

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA EDILE-ARCHITETTURA**

*Dipartimento di Architettura e Pianificazione Territoriale*

**TESI DI LAUREA**

in

Organizzazione del Cantiere

**ANALISI E CONFRONTO DI STRUMENTI INFORMATICI PER  
LA PROGRAMMAZIONE OPERATIVA DEI LAVORI : IL CASO  
DEL "PEOPLE MOVER" DI BOLOGNA**

CANDIDATA

Maria Alessandra Petrera

RELATORE

Prof. Ing. Marco Alvise Bragadin

CORRELATORI

Dott. Ing. Rita Finzi

Dott. Arch. Andrea Vanzini

Prof. Ing. Andrea Simone

Anno Accademico 2010/11

Sessione II

# INDICE

## **1. LA PROGRAMMAZIONE**

- Strategia
- Organizzazione: WBS e OBS
- Progettazione: Preliminare, Definitiva, Esecutiva
- Tempi
- Costi

## **2. LE TECNICHE RETICOLARI DI PROGRAMMAZIONE: ottimizzazione della fase esecutiva della costruzione di un'opera**

- Ricerca operativa
- Teoria dei grafi
  - Programmazione reticolare: i reticoli come rappresentazione delle sequenze delle attività
- CPM: Critical Path Method con uno e con più calendari
- PDM: Precedence Diagramming Method semplice e generalizzato
- PERT: Program Evaluation and Review Technique
- CPM/I-J: Critical Path Method nella forma I-J
- BUFFER: pratica comune nella programmazione

## **3. LA PROGRAMMAZIONE OPERATIVA**

- Progetto del Cantiere
- Schemi della Produzione
- Programma dei lavori: Cronoprogramma di GANTT

## **4. IL “PEOPLE MOVER”: sistema automatico di collegamento aeroporto “G.Marconi” – “Stazione FS”**

- Descrizione generale dell'infrastruttura
- Programmazione
- Esecuzione

## **5. DEFINIZIONE DI TEMPI E PROCEDURE:**

**la WBS e gli schemi di produzione**

## **6. PROGRAMMAZIONE OPERATIVA DEL “PEOPLE MOVER” : i programmi lavori ASAP e ALAP**

## **7. I SOFTWARE: Microsoft Project 2007 e Primavera Project Planner P6**

- Il metodo Critical Chain di E.Goldratt
- Le conseguenze della programmazione operativa sul cantiere
- Esempi di Diagrammi Reticolari

## **8. ANALISI ECONOMICO-FINANZIARIE**

- PEF: Piano Economico-Finanziario
- Valutazione dei risultati ottenuti
- Relazioni elaborate dai programmi

## **9. VALUTAZIONI CRITICHE**

## **BIBLIOGRAFIA**

## **ALLEGATI**

## 1.LA PROGRAMMAZIONE

Con la parola progetto si intende il processo che porta al raggiungimento degli obiettivi. Non si deve quindi limitarne il significato alla sola fase progettuale, ma a tutto il processo che porta dall'ideazione alla realizzazione di un'opera architettonica. In questo senso il progetto può essere scomposto in quattro fasi principali, che sono però in continua evoluzione, perché il progetto si modifica per seguire di pari passo i cambiamenti sia interni, sia esterni: la rappresentazione più verosimile di un progetto è quindi un diagramma ciclico detto **ciclo di vita del progetto**.



1. **Obiettivi da raggiungere:** è su questi che verrà alla fine decretato il successo o l'insuccesso di un progetto: su questi obiettivi è decisa l'accettazione del progetto da parte del committente e il progetto verrà valutato positivamente, stabilendo quindi che tutte le persone che vi hanno lavorato lo hanno fatto in maniera efficace e produttiva, valutazione che si ripercuoterà a cascata dai livelli più alti dell'organizzazione fino ai singoli operai. Gli obiettivi danno informazioni chiare sui requisiti generali **con indicazioni di tempo, costo e standard di qualità**, in maniera che siano anche facilmente controllabili in tutte le fasi del progetto. La valutazione dei tempi necessari è fatta sulla base dell'esperienza, mentre la stima dei costi in questa fase si basa su indicazioni parametriche. Anche le **attività di suddivisione del progetto in sottounità facilmente controllabili (WBS) e di definizione delle risorse necessarie per la realizzazione**

competono alla fase di definizione del progetto, ma sono poi riviste e sviluppate in maniera dettagliata dopo che sia stata approfondita l'elaborazione progettuale nella successiva fase di programmazione.

**2. Programmazione delle attività del progetto:** la programmazione considera le possibili strategie per raggiungere gli obiettivi fissati. Il project manager deve programmare il flusso delle attività per la realizzazione del progetto. Deve quindi stabilire l'elenco dettagliato delle attività ed il relativo tempo di esecuzione, verificando le risorse necessarie per ogni attività. Anche la valutazione economica del progetto viene calcolata in modo analitico per ogni singola attività. Nei prossimi capitoli si affronteranno le tecniche di project management che si utilizzano per programmare i tempi e le attività, come il diagramma di Gantt o il Pert. Per la valutazione analitica dei costi si costruirà un computo metrico estimativo sulla base degli elaborati di progetto, che descriveranno anche completamente le caratteristiche del progetto da realizzare e le specifiche tecniche dei materiali e delle lavorazioni.

Si definisce l'organigramma, ovvero il diagramma delle responsabilità delle risorse impegnate nel progetto e le loro mansioni: chi deve fare cosa.

Sono valutati tutti quei rischi che possono avere un impatto negativo sul progetto, cercando di darne un'approssimativa valenza economica.

La programmazione è un'attività che inizia dopo la fase di definizione, ma non finisce mai per tutta la vita del progetto; programmare assume il significato di prevedere, quindi implica la previsione di tutte le attività e gli eventi che si intendono attuare e raggiungere e ha come obiettivo l'ottimizzazione dei quattro fattori **“qualità prestazionale – tempi – costi – risorse”**: **ottimizzare in funzione del fattore tempo l'intervento costruttivo.**

Scopo specifico della programmazione del cantiere è l'individuazione delle durate delle singole attività lavorative e la definizione delle date di esecuzione (inizio e fine delle attività), nel rispetto dei vincoli di tipo tecnologico, contrattuale, normativo e logico – cronologico. La determinazione dei tempi di esecuzione di processo è strettamente legata all'impiego delle risorse dedicate, al loro costo, ai procedimenti eseguiti e di conseguenza alla qualità prestazionale degli elementi realizzati. Perciò determinare i tempi del processo comporta l'analisi e lo studio dei costi delle risorse, delle loro disponibilità, del loro impiego e delle tecniche adottate e comporta la ricerca di una soluzione adeguata ai requisiti prestazionali e procedurali posti a base dell'intervento: comporta cioè la previsione di un modello gestionale da attuare in fase esecutiva.

Il livello di definizione e le finalità della programmazione sono differenziate in relazione alla capacità decisionale di chi la attua. Quindi si possono distinguere una programmazione svolta a **livello strategico**, per la definizione dell'intervento nell'ambito della strategia generale di impresa nell'ambiente competitivo del mercato, a **livello tattico** per l'individuazione e la ricerca della sequenza dei cicli fabbricativi, coordinati nell'ambiente multi-progetto di impresa, a **livello operativo** per la gestione delle attività e delle risorse di cantiere. Per questo si definisce la programmazione del cantiere **programmazione operativa**.

**3. Esecuzione:** consiste nel mettere in pratica quanto si è programmato, motivando le risorse umane al raggiungimento dell'obiettivo e controllando il lavoro svolto. Si deve monitorare la velocità di avanzamento del progetto sia sulla base della percentuale di lavoro fatto, sia sulla base della produzione fatturata al committente e dei relativi sostenuti. E' in questa fase che si comincia l'effettiva costruzione del progetto e si ha il maggiore esborso economico.

**4. Verifica e controllo del cambiamento:** è di fondamentale importanza tenere sotto controllo l'andamento del progetto non solo alla fine dell'opera, valutando il risultato complessivo, ma durante tutti i momenti della realizzazione secondo i criteri di verifica concordati con il committente. In questo modo è possibile applicare dei correttivi alla programmazione iniziale permettendo, ove possibile, di recuperare gli imprevisti, senza pregiudicare il risultato finale. Quindi se nella fase di controllo si ha una difformità rispetto al programma, si deve tornare alla fase di definizione degli obiettivi e di programmazione. Se possibile si mantengono invariati gli obiettivi fissati, facendo però delle modifiche alla fase di programmazione, che si vanno ad attuare alla fase esecutiva.

Il momento che segna chiaramente il passaggio dalla fase di programmazione alla fase di esecuzione è l'appalto dei lavori all'impresa esecutrice.

## **Strategia**

La pianificazione strategica è il processo in cui si definiscono le strategie per raggiungere gli obiettivi del progetto e si redigono i piani operativi attraverso i quali il disegno strategico risulta effettivamente realizzabile.

Come un condottiero prima di andare in battaglia, il project manager deve pensare al piano d'azione, alle risorse a disposizione, alle varie

fasi di suddivisione del piano per poter gestire e controllare ogni situazione della battaglia.

Con la pianificazione operativa si pianificano nel dettaglio le attività e si individuano le persone cui affidare i compiti, determinando i tempi di esecuzione. In generale la pianificazione porta ad attivare i seguenti punti:

- creazione del gruppo di lavoro ed assegnazione dei compiti;
- individuare i termini e le condizioni contrattuali;
- stabilire le strategie aziendali per il progetto;
- stabilire le diverse fasi del progetto ed i responsabili di ciascuna fase;
- scomporre il progetto in attività elementari;
- scomporre il progetto in sub-unità o fasi;
- determinare gli standard di performance per ogni sub-unità;
- determinare la sequenza appropriata per completare le sub-unità;
- determinare i costi di ogni sub-unità;
- progettare l'organizzazione del personale;
- definire le procedure;
- analizzare le circostanze impreviste negative.

Definiamo la differenza tra piano e programma:

**piano:** sequenza logica di eventi, basata essenzialmente su legami di tipo funzionale;

**programma:** sequenza logica di eventi basata su un calendario di dettaglio per la distribuzione cronologica delle attività (scadenziario temporale, tabelle di marcia) e delle risorse.

### **Organizzazione: WBS e OBS**

Il pacchetto di dati (*work package*) che costituiscono il sub-progetto elementare è dato dall'intersezione delle informazioni derivanti dalle seguenti tipologie di disaggregazione:

- WBS;
- OBS.

#### **WBS: Work Breakdown Structures**

Il **frazionamento di un progetto** è una tecnica logicamente impiegata in qualsiasi campo si voglia cercare di semplificare un problema complesso. E' interessante riprendere le regole proposte da Cartesio nel suo "Discorso sul metodo", per verificare come sono attuali ed applicabili al moderno project management:

1. l'**evidenza:** *non accogliere mai nulla per vero, che non conoscessi evidentemente essere tale;*

2. l'**analisi**: *dividere ciascuna delle difficoltà che esaminassi, in tante parti quanto fosse possibile e quante fosse richiesto per meglio risolvere le difficoltà stesse;*

3. la **sintesi**: *condurre con ordine i miei pensieri, cominciando dagli oggetti più semplici e più facili da conoscersi, per salire, a poco a poco e come per gradi, fino alla conoscenza dei più complessi;*

4. l'**enumerazione completa**: *di fare delle enumerazioni così complete e delle rassegne così generali, da essere sicuro di non omettere nulla.*

Per progetti di grandi dimensioni, che coinvolgono un notevole numero di persone all'interno e all'esterno della squadra di lavoro, si è verificata la necessità di adottare un'unica suddivisione del progetto in parti più facilmente gestibili e controllabili, in maniera coordinata ma separata. Tale suddivisione deve essere univoca e conosciuta da tutti i partecipanti al progetto. Lo scopo di questa suddivisione è quello di ottenere una struttura comune e condivisa del lavoro da svolgere, che consenta di attivare un riferimento preciso alle parti di opera per le comunicazioni, le responsabilità, il monitoraggio del lavoro eseguito, la gestione del lavoro, la gestione dei costi e la gestione dei tempi.

Tale suddivisione viene chiamata **W.B.S. - Work Breakdown Structures** o struttura di scomposizione del lavoro. Si tratta di una disaggregazione strutturata del progetto, per livelli successivi, secondo un grado di approfondimento legato a sistemi gestionali (es. finalizzato alla costruzione, alla progettazione, agli acquisti). La particolarità della WBS è l'utilizzo della **struttura gerarchica** che permette di rappresentare il quadro completo del progetto partendo dallo scopo più generale, per arrivare al particolare della singola attività elementare, per livelli successivi, mantenendo i legami strutturali con i livelli precedenti. Graficamente è rappresentata da una struttura ad albero rovesciato. Il tronco rappresenta lo scopo del progetto. Le foglie rappresentano le attività suddivise per livelli in cui il progetto è scomposto. I rami indicano i sistemi di connessione delle foglie e costituiscono il legame logico tra un livello ed il successivo.



Un'**attività** (*task*) è un lavoro coerente, che ha luogo in un determinato periodo di tempo e che si conclude con la creazione di un prodotto (*deliverable*), che è l'output dell'attività.

Per scegliere le attività da inserire nella programmazione e quindi della suddivisione in WBS, in primo luogo devono essere parti di progetto significative, di rilievo nella gestione e tali da influenzare il risultato finale del progetto stesso. Devono essere riconoscibili in modo da stabilirne l'inizio, la fine e lo stato di avanzamento. Per ogni livello della scomposizione il criterio dell'omogeneità garantisce un buon equilibrio della strutturazione del progetto:

- omogeneità per livello di aggregazione delle lavorazioni;
- omogeneità per impiego di tempi e costi;
- omogeneità per tipo di risorse, macchinari ed attrezzature utilizzate.

E' possibile quindi trattare il progetto come l'insieme di numerosi sottoprogetti, gestibili in maniera separata ma coordinata e strutturata. Si riescono così a valutare gli obiettivi parziali delle singole parti di opera, durante tutta la realizzazione e non solo al termine dell'opera, nella valutazione degli obiettivi finali dell'intero progetto. Gli eventuali scostamenti rispetto alle previsioni sono verificabili tempestivamente al termine di ogni attività della WBS e non solo alla fine del progetto quando ogni azione correttiva sarebbe inutile e tardiva.

Deve quindi essere definito il **livello di dettaglio** della scomposizione più utile al fine del progetto. La scomposizione segue principi logici coerenti con il tipo di progetto e con lo scopo di utilizzo della suddivisione. Il **parametro guida della scomposizione** può essere:

- per parti (finalizzato alla costruzione);
- per fasi funzionali (finalizzato alla progettazione);
- merceologico (finalizzato agli acquisti).

### **Come si fa una WBS?**

Esistono due modi di analizzare il progetto per determinare l'elenco delle attività. Dall'alto verso il basso (*top-down*), si procede dal generale al particolare, stabilendo le fasi del progetto, che rappresentano i blocchi di lavoro che raggruppano le lavorazioni del livello successivo. La prima linea di suddivisione

può riferirsi alle fasi del ciclo di vita del progetto, ma non è l'unico modo di suddividerlo. Si analizzano i flussi di lavoro di ogni fase e si stabiliscono le singole attività. Dal basso verso l'alto (*bottom-up*), si analizza dal particolare al generale, partendo dall'elenco delle attività, raggruppandole per tipologie omogenee. E' bene ripercorrere il progetto mentalmente in entrambe le direzioni per verificare l'adeguatezza della scomposizione.

Le attività della fase di esecuzione del progetto sono in genere raggruppate in quattro livelli:

1. *voci d'opera*, capitoli riepilogativi di parte di opera gestibili come tempi e costi dal punto di vista strategico;
2. *lavorazioni*, sono gli elementi esecutivi del progetto, ubicati nei rispettivi luoghi di produzione del cantiere;
3. *attività*, operazioni elementari dal punto di vista produttivo (es. carpenteria, armatura, getto);
4. *operazione*, definisce i singoli atti della costruzione in un secondo livello di dettaglio rispetto alle attività (es. approvvigionamento materiale, smistamento ai piani, ecc.).

E' necessario partire dallo studio della planimetria del progetto da realizzare e delle diverse tipologie di intervento previsto (es. nuova costruzione o ristrutturazione) e pensare ad una **disarticolazione spaziale** dell'intervento che rifletta la logica dell'opera. Poi si ipotizza il **parametro guida** per la successiva scomposizione.

Un riferimento importante in questo senso è la norma **UNI 8290 Sistema tecnologico – Classificazione e terminologia**, nata per l'edilizia residenziale, ma utile per favorire una comune terminologia e classificazione degli elementi di scomposizione di un'opera architettonica:

- per la scomposizione del sistema tecnologico;
- per classi prestazionali;
- fornisce la classificazione e l'articolazione delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici;
- elementi tecnici crescenti.

Per elemento tecnico si intende “*un prodotto edilizio più o meno complesso, capace di svolgere del sistema tecnologico di appartenenza funzioni semplici o complesse, ma comunque sempre ravvisabili*”.

La scomposizione è strutturata in tre livelli:

- a. classi di unità tecnologiche;
- b. unità tecnologiche;
- c. classi di elementi tecnici.

Consente di ottenere un elenco di articoli tecnici condiviso, l'uso di una terminologia convenzionale con validità a livello nazionale. Le voci sono selezionate secondo criteri di omogeneità, mentre la logica della divisione è stabilita per classi prestazionali. In particolare vengono definite le seguenti **classi di unità tecnologica**:

1. **movimenti di terra;**
2. **approntamento di cantiere;**
3. **struttura portante;**
4. **chiusura;**
5. **partizione interna;**
6. **partizione esterna;**
7. **impianto di fornitura servizi;**
8. **impianto di sicurezza;**
9. **attrezzatura domestica;**
10. **attrezzature esterne.**

Tornando alla suddivisione di progetto in WBS, la scelta successiva è fino a che punto si vuole spingere il livello di dettaglio della scomposizione. Questa dovrà essere sufficientemente dettagliata per chiarire tutte le attività da tenere monitorate, ma non eccessivamente per non appesantire la lettura delle informazioni più importanti.

### **Perché si fa una WBS?**

Gli obiettivi d'impiego della WBS riguardano:

- la descrizione globale e dettagliata del prodotto progettuale;
- la presentazione del processo di lavoro con interrelazioni tra i diversi *work packages*;
- l'alimentazione del processo di pianificazione/programmazione;
- l'individuazione delle risorse specifiche da allocare nel tempo e delle criticità;
- la strutturazione del processo di controllo.

### **OBS: Organization Breakdown Structure**

Dal punto di vista organizzativo si raggiunge lo scopo fondamentale di assegnare ogni elemento finale (*work package*) ad un unico responsabile, project manager del sub-progetto elementare. Al sub-progetto viene assegnata una struttura organizzativa che è descritta in un documento apposito:

**OBS - Organization Breakdown Structure – Articolazione organizzativa**, individuazione delle responsabilità per ogni

pacchetto di lavoro della WBS, definizione delle risorse assegnate, dei ruoli e responsabilità di ciascuno. Chiarisce *chi* deve fare *che cosa*, alle singole persone devono essere assegnati dei compiti specifici. Tutti devono essere messi a conoscenza del piano organizzativo, dei compiti che ogni risorsa deve eseguire e a chi questa dovrà fare riferimento.

## **Progettazione**

Con la progettazione prende forma l'idea che ha dato luogo alla nascita del progetto di realizzazione di un'opera architettonica, attraverso l'elaborazione e la rappresentazione grafica, permettendone infine la comunicazione e la condivisione. Gli obiettivi del progetto nella fase di definizione sono l'input per la progettazione, che deve assicurare:

- la qualità dell'opera e la rispondenza alle esigenze del committente;
- la conformità alle norme ambientali ed urbanistiche;
- il soddisfacimento dei requisiti essenziali, definiti dalle normative nazionali e comunitarie.

Esistono tre livelli di approfondimento della progettazione (preliminare, definitiva, esecutiva) che traducono il sistema di bisogni e requisiti del committente.

### **Progetto Preliminare**

“Il progetto preliminare **definisce le caratteristiche qualitative e funzionali dei lavori, il quadro delle esigenze da soddisfare e delle specifiche prestazioni** da fornire e consiste in una relazione illustrativa delle ragioni della scelta della soluzione prospettata in base alla valutazione delle eventuali soluzioni possibili, anche con riferimento ai profili ambientali, della sua fattibilità amministrativa e tecnica, accertata attraverso le indagini di prima approssimazione, dei costi, da determinare in relazione ai benefici previsti, nonché in schemi grafici per l'individuazione delle caratteristiche speciali, tipologiche, funzionali e tecnologiche dei lavori da realizzare.”(L.109/94 e s.m.i)

### **Progetto Definitivo**

“Il progetto definitivo individua compiutamente i lavori da realizzare, nel rispetto delle esigenze, dei criteri, dei vincoli, degli indirizzi e delle indicazioni stabiliti nel progetto preliminare e **contiene tutti gli elementi necessari ai fini del**

**rilascio delle prescritte autorizzazioni ed approvazioni.** Esso consiste in una relazione descrittiva dei criteri utilizzati per le scelte progettuali, nonché delle caratteristiche dei materiali prescelti e dell'inserimento delle opere sul territorio; nello studio di impatto ambientale ove previsto; in disegni generali nelle opportune scale descrittive delle principali caratteristiche delle opere, delle superfici e dei volumi da realizzare, compresi quelli per l'individuazione del tipo di fondazione; negli studi ed indagini preliminari occorrenti con riguardo alla natura ed alle caratteristiche dell'opera; nei calcoli preliminari delle strutture e degli impianti; in un disciplinare descrittivo degli elementi prestazionali, tecnici ed economici previsti in progetto nonché in un computo metrico estimativo. Gli studi e le indagini occorrenti, quali quelli di tipo geognostico, idrologico, sismico, agronomico, biologico, chimico, i rilievi e i sondaggi, sono condotti fino ad un livello tale da consentire i calcoli preliminari delle strutture e degli impianti e lo sviluppo del computo metrico estimativo.”(L.109/94 e s.m.i)

#### Progetto Esecutivo

“Il progetto esecutivo, redatto in conformità al progetto definitivo, **determina in ogni dettaglio i lavori da realizzare ed il relativo costo previsto** e deve essere sviluppato ad un livello di definizione tale da consentire che ogni elemento sia identificabile in forma, tipologia, qualità, dimensione e prezzo. In particolare il progetto è costituito dall'insieme delle relazioni, dei calcoli esecutivi delle strutture e degli impianti e degli elaborati grafici nelle scale adeguate, compresi gli eventuali particolari costruttivi, dal capitolato speciale d'appalto, prestazionale o descrittivo, dal computo metrico estimativo e dall'elenco dei prezzi unitari. Esso è redatto sulla base degli studi e delle indagini compiuti nelle fasi precedenti e degli eventuali ulteriori studi ed indagini, di dettaglio o di verifica delle ipotesi progettuali, che risultino necessari e sulla base dei rilievi planoaltimetrici, di misurazioni e picchettazioni, di rilievi della rete dei servizi del sottosuolo. Il progetto esecutivo deve essere altresì corredati da apposito piano di manutenzione.

In relazione alle caratteristiche e all'importanza dell'opera stabilisce criteri, contenuti e **momenti di verifica tecnica dei vari livelli di progettazione.**”(L.109/94 e s.m.i)

Il progetto esecutivo contiene tutti gli elaborati necessari per indire una gara di appalto per l'assegnazione dei lavori e per

realizzare l'opera senza alcuna ulteriore integrazione progettuale da parte del progettista.

## **Tempi**

La programmazione dei tempi è il nodo centrale dell'attività del project management. Consente in primo luogo **la riflessione da parte di tutti gli attori** coinvolti sul risultato finale e sulle interdipendenze tra le attività durante la fase esecutiva, permette di **gestire l'impiego delle risorse**, rende possibile **dare obiettivi limitati alle singole attività** maggiormente comprensibili da parte dei lavoratori, che terranno più soddisfazione nel raggiungimento di numerosi obiettivi intermedi, piuttosto che un unico obiettivo finale, permette di **sfruttare appieno lo strumento della delega**, individuando per ogni attività l'output atteso e la scadenza temporale in maniera chiara. Esso è un mezzo di comunicazione delle principali caratteristiche del progetto, sintetizzate nel programma, per cui il committente, i fornitori, i membri del team, ecc. hanno una base di riferimento comune nelle discussioni e delle motivazioni che fissano alcune scadenze in un certo modo. Da ultimo, ma non meno importante, **il programma dei tempi è il riferimento rispetto al quale si verifica l'avanzamento di tutte le attività del progetto**, che consente, nel caso di eventuali ritardi o difformità rispetto al programma atteso, di intervenire prima che la situazione diventi critica.

In un'opera architettonica, la programmazione dei tempi dell'esecuzione è anche elemento strategico per garantire la necessaria sicurezza durante tutte le attività di costruzione dell'opera, nell'interesse sia del committente sia dell'esecutore chiamati entrambi in causa dalla norma sulla sicurezza sul lavoro d.lgs. n. 494/1996. Per il committente nell'art.3 si ha: *“Al fine di permettere la pianificazione dell'esecuzione in condizione di sicurezza dei lavori o delle fasi di lavori che si debbano svolgere simultaneamente o successivamente tra loro, il committente o il responsabile dei lavori prevede nel progetto la durata di tali lavori o fasi di lavori”*, per le imprese si fa riferimento all'art. 8: *“I datori di lavoro delle imprese esecutrici...curano, ciascuno per la parte di competenza, l'adeguamento, in funzione dell'evoluzione del cantiere, della durata effettiva da attribuire ai vari tipi di lavoro o fasi di lavoro”*.

La programmazione dei tempi avviene per livelli di approssimazione successivi, seguendo di pari passo i tre stadi della progettazione (preliminare, definitiva, esecutiva). Viene eseguita dal progettista o dal coordinatore della sicurezza in fase

di progettazione. Si avrà dunque un *programma lavori generale*, di tipo strategico, utilizzato dalla committenza per individuare i passaggi principali del progetto architettonico sia in termini di avanzamento della produzione, sia in termini di programmazione dell'impegno economico-finanziario. La redazione di questo documento è affidata alla struttura di project management del committente, sulla base dei programmi dei progettisti. Il *programma lavori esecutivo*, redatto dal coordinatore della sicurezza in fase di progettazione ed allegato al progetto esecutivo è parte integrante dei documenti di appalto e di contratto con l'impresa esecutrice. Consente al committente la verifica della fattibilità dell'intervento nei tempi previsti e garantisce la verifica di tutte le possibili situazioni di rischio durante l'esecuzione dei lavori, permette l'attività di pianificazione e di prevenzione infortuni richiesta dalla normativa (d.lgs. n.494/1996).

Dopo l'aggiudicazione dell'appalto si passa alla programmazione operativa, sviluppata dall'impresa esecutrice con il proprio direttore di cantiere, per tenere conto dei mezzi operativi e l'organizzazione di cantiere specifica, utilizzati durante i lavori di costruzione. Questo documento, detto anche *programma lavori di costruzione*, viene controllato dal direttore dei lavori e dal coordinatore della sicurezza in fase esecutiva.

### **Che cos'è la programmazione dei tempi?**

E' una tecnica che permette di determinare le tappe intermedie e gli obiettivi finali del progetto architettonico, specificandone le modalità e le prescrizioni tecniche, tenendo conto in particolare dei seguenti aspetti:

- definire le attività;
- stabilire le relazioni tra le attività;
- assegnare le risorse a ciascuna attività;
- stimare la durata di ogni attività;
- indicare le date di inizio e fine attività;
- valutare la durata totale del progetto;
- stabilire dei punti di controllo intermedi (*milestones*) del progetto.

Nella valutazione dei tempi è importante lo studio di eventuali eventi negativi quali rischi ed imprevisti e la proposta di possibili soluzioni alternative nel caso si verificano tali eventi.

La **definizione delle attività** deve essere coerente con la suddivisione in WBS. Le **relazioni tra le attività** sono definite

con i legami di dipendenza di tipo logico-operativo stabiliti dalle regole di buona esecuzione dello specifico processo produttivo. Si attribuisce ad ogni attività il proprio *predecessore*, lavorazione che rappresenta un vincolo per l'esecuzione dell'attività successiva. I vincoli di precedenza possono essere riassunti in tre tipologie:

- **tecnico-esecutivo**, ad esempio non si possono eseguire i muri se prima non sono state realizzate le fondazioni;
- **organizzativo**, dipendono dall'impiego delle risorse a disposizione del progetto, che non posso lavorare su due attività;
- **amministrativo**, legati alle forniture esterne, ai contratti, al termine per eventuali concessioni, ecc.

Le relazioni tra le attività sono definite anche sulla base dei vincoli temporali, quali:

*finish to start* (fine-inizio), un'attività può cominciare solo quando ne è terminata un'altra, è il vincolo che rappresenta la dipendenza sequenziale più comune;

*start to start* (inizio-inizio), un'attività può cominciare solo dopo che ne è iniziata un'altra;

*finish to finish* (fine-fine), un'attività può terminare solo quando ne è finita un'altra;

*start to finish* (inizio-fine), il legame meno utilizzato prevede che un'attività non possa finire se non ne è cominciata un'altra.

E' necessario controllare i legami tra le attività, ma anche se una dovesse mancare del tutto. La verifica si può fare ripercorrendo il flusso delle attività in senso contrario a quello che le ha generate, in modo da assicurarsi che ogni lavorazione abbia l'input necessario dalla lavorazione precedente. Un'attività mancante potrebbe creare seri problemi ad un piano se questo non avesse all'interno i margini temporali per inserirla successivamente. Per di più i membri del team di progetto in quel caso verrebbero destinati ad altre attività.

Le **risorse da assegnare a ciascuna attività** sono state definite nel piano organizzativo (OBS) messo a punto in concomitanza con la definizione delle WBS.

La **durata di un'attività** è il tempo necessario per il suo completamento, che corrisponde alla generazione del relativo output, e viene stimata in funzione delle risorse per questa disponibili. Non solo, dipende inoltre dall'efficienza dei lavoratori e dalle condizioni di lavoro esterne alla squadra nelle quali viene realizzata l'attività. Dal punto di vista della costruzione si devono valutare la produzione della manodopera e delle attrezzature e la quantità di queste impiegate nella



lavorazione. Esistono diversi metodi di valutazione delle durate delle attività anche in funzione delle informazioni che si hanno al momento della stima:

- *metodo analitico*, attraverso l'analisi delle lavorazioni necessarie per la definizione di una voce di lavoro si stima l'impiego di manodopera per unità di misura della lavorazione;
- *metodo della produzione giornaliera*, fornisce la produzione media giornaliera di una squadra operativa standard in tabelle pubblicate in letteratura;
- *metodo dell'incidenza percentuale di manodopera*, indica la percentuale di manodopera da applicare alle voci di computo metrico, da cui si desume il costo totale della manodopera. Ipotizzando una squadra di lavoro standard è possibile risalire alla durata della lavorazione;
- *metodo dell'intervista*, richiede direttamente agli operatori una stima della durata dell'attività che andranno a svolgere. La stessa domanda viene rivolta a più persone e si individua il valore più probabile;
- *misura oggettiva di lavori simili*, questo metodo è applicabile esclusivamente in fase esecutiva dall'impresa stessa che ha a disposizione un panorama storico di durate di lavori simili già realizzate in passato.

**I punti di controllo del progetto** o *milestones* (pietre miliari) sono momenti significativi per la vita del progetto e indicano i controlli da eseguire sul progetto in generale al termine di attività particolarmente rilevanti. Nel caso del progetto di costruzione di un'opera architettonica si possono ipotizzare come punti di controllo i seguenti:

- definizione degli obiettivi del progetto
- incarico di progettazione (preliminare, definitiva, esecutiva)
- approvazione della progettazione da parte del committente
- autorizzazioni edilizie
- pubblicazione del bando della gara d'appalto
- aggiudicazione dell'appalto
- inizio lavori
- stato avanzamento lavori
- controlli al termine degli impianti o di altre lavorazioni particolari
- consegna lavori

I punti di controllo sono eventi di durata nulla, non sono delle attività. *Un evento è un accadimento che segna l'inizio o il completamento di uno o più compiti o attività.* Quindi deve essere individuato con una data precisa di calendario. Un efficace sistema di punti di controllo fornisce obiettivi utili al progetto a breve e medio termine, mantenendo la tensione della squadra di lavoro sulle mete del progetto, dando anche le dovute giustificazioni del loro superamento.

### **L'impiego delle risorse**

Un'importante verifica della programmazione dei tempi in corso di elaborazione è l'analisi del **diagramma di impiego delle risorse**. Per ogni risorsa occupata nel progetto si esaminano tutte le attività che questa deve svolgere dal punto di vista dell'impiego del tempo lavorativo disponibile. Se in una stessa giornata alla risorsa sono assegnate due diverse attività, ciò viene evidenziato in un istogramma in cui si visualizza che tale risorsa ha superato il 100% di impiego. E' evidente che tale situazione è un errore nella programmazione che deve essere rivista in modo da dilazionare nel tempo le due attività, poiché una stessa persona non può essere assegnata su due lavorazioni nello stesso momento.

Ciò si può verificare in particolare quando, per recuperare eventuali ritardi accumulati in precedenza, si cerca di contrarre il programma dei tempi mettendo il più possibile lavorazioni in parallelo. Il pericolo allora è di avere un programma non realizzabile, non aderente alla realtà. Un altro inconveniente molto importante è che, più persone lavorano contemporaneamente in uno stesso spazio fisico, più aumentano le probabilità di errori umani e di possibili incidenti. In tal caso deve essere posto un accento sulle problematiche relative alla sicurezza, sulle verifiche dei rischi e sulle procedure da adottare per lavorare con prudenza, in conformità alle normative vigenti, coinvolgendo il responsabile della sicurezza.

L'analisi dell'istogramma delle risorse si esegue per ogni squadra specializzata coinvolta nel progetto. Nella fase di esecuzione dei lavori si avranno allora squadre di muratori, piastrellisti, imbianchini, ecc. le cui lavorazioni devono essere verificate in funzione dell'andamento generale dei lavori della programmazione. E' bene sviluppare diversi programmi lavori alternativi in modo da cercare l'ottimizzazione della sequenza di lavorazioni.

L'ottimizzazione dell'impiego delle risorse si valuta considerando eventuali disomogeneità o sprechi con lo scopo di livellare l'utilizzo delle risorse per tutta la durata dei lavori e di concentrare i picchi di lavoro in momenti limitati nel tempo possibilmente per lavorazioni che permettono anche l'uso di manodopera esterna (attraverso subappalti), tutto ciò nel rispetto della data finale del progetto concordata nel contratto.

Si può procedere in diversi modi, facendo sempre molta attenzione a verificare poi che il programma così rappresentato sia effettivamente realizzabile e non un puro esercizio teorico:

- cambiando i vincoli tra due attività, quando ad esempio non sono strettamente consequenziali si possono eseguire in parallelo se ubicate in luoghi di lavoro non interferenti e realizzate da squadre di lavoratori diverse;

- concentrando l'attenzione sulle attività critiche è possibile allora ridurre il tempo totale di esecuzione. Si deve valutare la possibilità di aggiungere risorse sulle attività critiche eventualmente spostandole da altre attività non critiche, purchè svolte da squadre aventi la stessa specializzazione.

Il processo di ottimizzazione è un percorso iterativo che procede per aggiustamenti successivi, facilmente realizzabile mediante i software che permettono di ricalcolare immediatamente il programma dei tempi in seguito all'inserimento di piccole variazioni.

### **Scelta del programma dei tempi**

Quando si è ottimizzato il programma dei tempi (*programma esecutivo* nel caso di valutazione del project manager del committente o *programma costruttivo* nel caso di valutazione del project manager dell'impresa esecutrice) **si stabilisce che tale programma è il riferimento concordato per lo svolgimento del progetto:** si fissano la data finale del progetto e le date di eventuali milestones intermedie. Dal punto di vista tecnico il software consente di memorizzare tale programma, in modo che qualunque modifica successiva venga confrontata con quella prestabilita. Si deve allora fissare o congelare la *biseline*, cioè si definisce tale programma come la linea di riferimento di base di tutto il progetto. Durante l'esecuzione delle diverse attività si dovrà monitorare l'avanzamento dei lavori rispetto alla biseline:

- il programma viene memorizzato (congelato) nella configurazione concordata dal project manager prima dell'inizio dei lavori;

- si utilizza come riferimento per il confronto preventivo-consuntivo;
- permette di evidenziare gli eventuali scostamenti tra quanto programmato e la produzione effettivamente eseguita.

## **Costi**

E' importante improntare un sistema di controllo dei costi per conoscere esattamente i costi di produzione, riducendo le incertezze sulla valutazione economica del progetto, per la riduzione dei margini di guadagno causata dalla forte concorrenza nel settore, che ha posto l'attenzione sul monitoraggio dettagliato dei costi, per la riduzione dei guadagni causata dall'aumento dei costi della manodopera, per avere gli strumenti per la pianificazione ed il controllo di gestione del progetto. E' fondamentale per ogni project manager che debba verificare i costi di produzione del proprio progetto, soprattutto nel caso in cui questo venga realizzato all'interno dell'azienda.

### **Strumenti contabili utilizzati dalle società**

La **contabilità generale** raccoglie l'insieme dei dati economici dell'azienda in un sistema di scritture contabili che definisce il reddito d'esercizio ed il capitale d'esercizio. Il risultato finale tiene conto anche delle rimanenze finali, che nelle imprese edili hanno una certa rilevanza, con riferimento a lavori pluriennali eseguiti in proprio dall'azienda o su commessa, oppure a materiali in giacenza.

La **contabilità industriale** suddivide i costi aziendali in appositi centri di costo allo scopo di determinare i costi della singola commessa (progetto). Consente la verifica periodica dell'andamento economico della singola commessa, permettendo quindi di valutare i costi sostenuti per il progetto in relazione agli obiettivi prefissati in fase di programmazione e di effettuare il controllo degli scostamenti. La fonte dei dati della contabilità industriale è la stessa della contabilità generale (fatture di acquisto, bolle di consegna, ecc.), poi tali informazioni vengono suddivise in modo da attribuire al progetto la competenza. In sostanza la totalità dei dati economici dell'azienda viene selezionato e suddiviso in conti in modo che sia rintracciabile l'insieme dei costi del singolo progetto.

La **contabilità dei costi** stabilisce secondo quali criteri si va a formare la voce di costo:

- sistema a costi pieni (*full costing*), definisce che tutti i costi contribuiscono alla formazione del costo complessivo del progetto (anche i costi amministrativi concorrono a formare il costo di produzione);
- sistema a costi variabili (*direct costing*), considera solo i costi variabili, cioè che variano all'aumentare della produzione;
- sistema a costi variabili e costi fissi (*direct costing integrato*), valuta i costi fissi attribuibili direttamente al cantiere, separandoli dai costi fissi comuni per tutta l'azienda, e li somma ai costi variabili.

Nel sistema contabile che comprende i costi variabili ed i costi fissi specifici nel controllo dei costi del progetto, si determinano queste distinzioni:

- **costi variabili**: materiali, manodopera, noli, forniture;
- **costi fissi specifici di cantiere**: costi fissi legati direttamente al progetto quali il project manager, i materiali vari di consumo, l'energia elettrica e l'acqua, i ponteggi, l'impianto ed espianto cantiere, i trasporti interni, le pulizie, le assicurazioni, ecc. Non si deve dimenticare però che i costi fissi non dipendono dalla produzione, ma aumentano con l'aumentare della durata dei lavori. L'incidenza di questi costi è massima quando per qualche motivo il cantiere smette di produrre, ovvero si ferma.

I **costi standard** sono voci di costo determinati sulla base dell'esperienza in lavorazioni già eseguite in precedenza e rappresentano l'ipotesi di costo di ogni attività, nel caso in cui questa si svolga in situazioni analoghe, ovvero in condizioni standard. Essi rappresentano il livello di efficienza raggiungibile nella gestione del progetto.

Nella fase di programmazione, la valutazione dei costi segue il dettaglio dei diversi livelli della programmazione. Partendo dal progetto preliminare in cui i costi sono stimati in maniera **parametrica**, fino al progetto esecutivo in cui vengono dettagliate analiticamente tutte le singole parti del progetto e valutate economicamente, con una stima **analitica** dei costi. Per effettuare una valutazione analitica dei costi nel campo dell'architettura, lo strumento fondamentale è il **computo metrico estimativo**. Tale elaborato è costituito da due componenti principali:

- il computo metrico, in cui vengono stimate le quantità di tutte le lavorazioni rappresentate negli elaborati grafici;

– analisi dei prezzi di ogni singola voce, da moltiplicare per le quantità calcolata nel computo metrico.

La somma dei prezzi totali di ogni articolo computato dà la stima dei costi totali dell'opera (costi per il committente).

Una volta noti i dati fondamentali del progetto trasformati da informazioni su elaborati grafici in un elenco di attività elementari, quantità e relativi costi nel computo metrico estimativo, il project manager ha la possibilità di programmare insieme con la direzione il **budget di commessa o di progetto**, dovrà considerare anche le informazioni strategiche aziendali sugli utili che il progetto porterà e le spese generali dell'azienda riferibili al progetto. Si definiscono nel budget gli obiettivi economici del progetto in funzione dell'organizzazione tecnica e della strategia aziendale.

### **Computo metrico**

Il computo metrico è la traduzione quantitativa del progetto: partendo dai disegni progettuali si individuano le diverse attività elementari da realizzare e se ne misurano le quantità, attribuendo ad ognuna la specifica unità di misura.

### **Come si fa?**

- Si determina la quantità di tutte le opere con riferimento alla scomposizione in WBS e nello stesso ordine in cui verranno eseguite nella costruzione.
- Si suddividono le attività nelle varie categorie (scavi, fondazioni, opere in c.a., murature, coperture, ecc.).
- La quantità di ogni articolo deve essere arrotondata in eccesso.
- Si deve chiarire il metodo di misurazione adottato per ogni lavorazione, con riferimento al Capitolato di appalto o alle norme di uso comune riportate nelle pubblicazioni delle locali Camere di Commercio oppure per gli enti pubblici alle direttive di riferimento.
- Si sceglie l'unità di misura coerente con il metodo di misurazione adottato.
- Si riporta il codice di riferimento per ogni singola voce: dell'attività da quantificare con relazione alla WBS.
- Oltre agli elaborati grafici bisogna considerare anche tutti i documenti che completano il progetto descrivendone i requisiti in termini qualitativi ed esecutivi, quali le Specifiche tecniche, le

Relazioni tecniche, il Capitolato speciale d'appalto ed i vari Capitolati tecnici, il Piano di sicurezza e coordinamento, ecc.

La **descrizione della voce da computare** deve essere estremamente dettagliata, per chiarire inequivocabilmente le attività comprese in questa dicitura e quelle escluse che faranno capo ad un'altra voce di computo. Ciò è di fondamentale importanza poiché la somma di tutte le voci di computo metrico descrive esattamente tutte le attività, i materiali, i mezzi d'opera impiegati nella costruzione del progetto. Se per errore dovesse mancare qualche attività, ritenendo che fosse già compresa in una voce di computo poco chiara, sicuramente all'atto della realizzazione di quella attività nasceranno problemi in cantiere che potrebbero inficiare la buona riuscita del progetto.

### **Analisi dei prezzi**

L'analisi dei prezzi è la descrizione dettagliata dell'attività da realizzare specificando tutte le operazioni elementari comprese nel prezzo ed eventualmente esplicitando ciò che è escluso cui va associata la valutazione economica per unità di misura.

Elaborare l'analisi dei prezzi per tutti gli articoli di lavoro è di difficile realizzazione pratica, perché il rilevamento dei dati soprattutto per l'impiego della manodopera è molto difficoltoso. Non solo poiché variabile da persona a persona o meglio da squadra a squadra, ma anche per la grande varietà dei materiali adottati, per la differenza di strutture in relazione alla unicità delle opere architettoniche oltre che per le condizioni del luogo di lavoro (centro storico o aperta campagna, ristrutturazione o nuova costruzione). Non bisogna trascurare le oscillazioni dei prezzi di mercato e la distanza del cantiere dai luoghi di approvvigionamento, poiché il costo di trasporto incide notevolmente.

Tutto questo per evidenziare il fatto che la stima pur cercando di arrivare alla determinazione del valore dell'opera da costruire, è molto difficile che lo raggiunga effettivamente. Non è quindi errato, trattandosi comunque di una stima, effettuare la valutazione con un leggero margine di eccesso.

L'analisi dei prezzi dei vari articoli di lavoro elencati nel computo metrico, con riferimento alla WBS, è formata dalla composizione delle seguenti voci:

– **mano d'opera**: descrizione della mano d'opera impiegata per l'esecuzione della lavorazione e valutazione del tempo impiegato da ogni lavoratore per il prezzo orario emesso dall'Associazione

degli Industriali della Provincia dove deve avere luogo la costruzione, suddiviso secondo la mansione:

- o capo squadra o capo cantiere (operaio di quarto livello con mansioni direttive),
- o muratore specializzato (operaio di terzo o quarto livello),
- o muratore qualificato (operaio di secondo livello),
- o manovale (operaio di primo livello),

per ogni lavorazione è necessaria una squadra di operai specifica, che comprende oltre agli operai un caposquadra che definisce i lavori da eseguire ed un manovale per le mansioni di fatica. E' comunque molto difficile avere una valutazione esatta del tempo impiegato per una lavorazione, perché come si può immaginare, questo in funzione dell'esperienza, dell'organizzazione del lavoro delle persone e delle difficoltà esecutive dell'opera;

– **materiali:** si considerano i materiali utilizzati per realizzare la lavorazione da stimare per unità di misura (es. per  $1\text{m}^3$  di muratura, per  $1\text{m}^2$  di pavimento). Questa valutazione deriva da una misurazione oggettiva. I prezzi di mercato dei materiali impiegati sono pubblicati nei vari bollettini ufficiali, considerando le eventuali correzioni per le quantità di materiali da ordinare (un ordine di grandi dimensioni può essere acquistato ad un prezzo inferiore di una piccola fornitura, perché è possibile ordinare direttamente dal produttore evitando l'aggravio di spese dovuto ai rivenditori ed ai trasporti intermedi) e per la data in cui avrà luogo la fornitura (per considerare le eventuali oscillazioni dei prezzi fino ad allora). Riepilogando i prezzi ufficiali posso risultare eccessivi per forti quantitativi oppure scarsi per modeste quantità. Un'altra fonte di riferimento dei prezzi sono anche i listini dei rivenditori dei materiali edili;

– **semilavorati:** sono lavorazioni molto usate in cantiere ovvero materiali prelaborati da altre aziende, come malte e calcestruzzi, per le quali si ritiene utile realizzare un'analisi prezzi separata cui fare riferimento per le altre lavorazioni;

– **lavori ed opere compiute:** forniture di opere compiute necessarie alla realizzazione della voce, stimate a parte in un'analisi specifica;

– **trasporti:** il costo dei trasporti è emesso dai bollettini ufficiali delle Associazioni degli Industriali di ogni Provincia;

– **noli:** è il noleggio delle varie attrezzature o macchinari impiegati nell'esecuzione della lavorazione. Il riferimento è ancora il bollettino dell' Associazioni degli Industriali di ogni Provincia.



La descrizione della voce chiarisce nel dettaglio tutte le lavorazioni comprese in questa analisi, delle quali si calcola il prezzo. Sarà la stessa riportata nel capitolato speciale d'appalto e dovrà corrispondere esattamente alla relativa voce del computo metrico in cui se ne è misurata la quantità, secondo la medesima unità di misura. Le unità di misura di riferimento sono quelle previste dal Dpr n. 802 del 1982.

Per la quantificazione dell'analisi del **prezzo** deve essere calcolato prima il **costo** interno all'impresa, poi aggiungendo le spese generali e l'utile si determina il prezzo della lavorazione da utilizzare nei preventivi economici. Il costo interno all'impresa è composto dalle valutazioni dell'impiego di manodopera, materiali, noli e forniture di opere compiute. Le spese generali sono i costi di sede, ad esempio l'affitto degli uffici, gli stipendi del personale di sede, ecc., ovvero i costi fissi non imputabili direttamente al progetto, più i costi fissi specifici (imputabili direttamente).

$$\text{PREZZO} = \text{COSTO} + \text{SPESE GENERALI} + \text{UTILE}$$

Il valore delle **spese generali** relative al progetto è variabile da azienda ad azienda e dipende dalla strutturazione della società per i **costi fissi di sede**: se l'immobile della sede è in affitto o di proprietà, quanti dipendenti lavorano in sede, quali sono i mezzi, le attrezzature di sede utilizzati, le spese varie di gestione, ecc. Dipende inoltre dal tipo di progetto per quanto riguarda i **costi fissi specifici**, quali:

- interessi sui capitali anticipati dalla società per il progetto;
- costi di assicurazione, contratti, ecc.;
- costi per l'impianto di cantiere (recinzioni e steccati temporanei, strade ed opere provvisoriale, punti luce ed energia elettrica di cantiere, allaccio temporaneo all'acquedotto e fognature temporanee di cantiere);
- costi per il montaggio ed il successivo smontaggio delle baracche di cantiere;
- costi di ammortamento e manutenzione delle macchine;
- consumi di attrezzi minuti;
- costi per la direzione di cantiere, l'assistenza, la sorveglianza e la sicurezza;
- costi per il collaudo dell'opera;
- costi di amministrazione del cantiere;
- costi per la manutenzione delle opere fino al collaudo finale;

- costi di guardiana notturna;
- eventuali spese tecniche di elaborazione elaborati grafici per il cantiere.

Tutti questi costi vengono in genere valutati con una percentuale sul costo dell'opera, indicata approssimativamente entro un range del 10-15%. Trattandosi di costi fissi in realtà la percentuale oscilla entro limiti molto più ampi in funzione dell'entità dell'opera da realizzare. Per un lavoro di piccole dimensioni tali spese in rapporto all'importo totale dei lavori saranno molto superiori (a partire dal 25%), mentre per un'opera di qualche milione di euro tale rapporto potrebbe scendere sotto al 10%.

E' bene allora calcolare a parte i costi fissi specifici facendo un'analisi dettagliata delle singole voci con riferimento al particolare progetti ed aggiungerli al costo finale dell'intera opera. Ad essi si sommeranno i costi fissi di sede, imputabili solo in percentuale, e gli utili d'impresa.

La corretta determinazione delle spese generali ha una grande influenza sulla determinazione finale dei costi dell'opera, poiché trattandosi di opere i cui importi sono in genere dell'ordine dei milioni di euro, un errore di un punto percentuale può portare a differenze importanti sulla valutazione complessiva, andando così ad inficiare tutto il lavoro precedente di analisi di ogni singola voce lavorativa costituente il progetto.

Per **utile** si intende il beneficio spettante all'appaltatore per l'organizzazione del cantiere, per la collaborazione all'esecuzione materiale dell'opera, per l'alea dell'appalto, ecc., e per la remunerazione del capitale investito, secondo quanto già indicato nella legge del 1985 sui lavori pubblici, che fissa tale importo uguale al 10% sul valore totale dell'opera. L'importo totale dell'opera cui si riferisce l'utile è quello calcolato sommando le spese generali ai costi.

$$\text{PREZZO} = (\text{COSTO} + \% \text{ SPESE GENERALI}) + \% \text{ UTILE}$$

Anche in questo caso è fonte di errore calcolare l'utile con una percentuale fissa, poiché per lavori di importo limitato i macchinari da destinare a quel cantiere (8gru, betoniere, mezzi di trasporto, macchinari per carpenteria, per lavorazione del ferro, ecc.) non vengono impiegati per la loro intera potenzialità, per cui si ha una forte diminuzione degli utili rispetto ad un cantiere in cui possono lavorare a tempo pieno. La stessa cosa vale per tutte le risorse impiegate in quel lavoro e non un altro e per

l'organizzazione di cantiere. Anche per l'utile è bene ricordare che per lavori di piccola dimensione l'importo percentuale potrebbe risultare più elevato e per quelli grandi la percentuale dovrebbe essere ridotta. Si consiglia quindi di calcolare sempre il valore assoluto dell'utile e poi riverificare la percentuale risultante, dividendolo per costi sommati alle spese generali.

### **Che cos'è il ricarico?**

Il ricarico o mark-up è la differenza tra prezzi e costi, determinata in percentuale sui costi stessi. In altro modo si può dire che è quella percentuale di cui si aumenta il costo per ottenere il prezzo. Si utilizza in fase di offerta, ovvero quando si prepara il preventivo per il committente.

$$\text{RICARICO} = \frac{\text{PREZZO} - \text{COSTO}}{\text{COSTO}}$$

$$\text{PREZZO} = \text{COSTO} \times (1 + \text{RICARICO})$$

Uno dei compiti principali del project manager è quello sotto controllo i costi. Deve però conoscere in maniera approfondita anche i profitti che l'azienda prevede di fare attraverso il progetto da lui diretto. La comprensione dei processi gestionali a livello aziendale porta alla stima della differenza tra il prezzo di vendita, quotato nel preventivo fornito al cliente o committente, ed i costi del progetto. Bisogna definire chiaramente le due quantità e sapere passare dai costi ai prezzi anche per quotare eventuali variazioni di prezzo necessarie per seguire le richieste di variazioni al progetto da parte del committente.

### **Elenco prezzi unitari**

Elenca tutti gli articoli di lavoro, con il relativo prezzo unitario, che compongono l'opera progettata e che sono stati quantificati nel computo metrico. Questo elaborato varia per ogni progetto e riepiloga l'insieme di tutte le analisi dei prezzi che valutano ciascuna attività costituente l'opera.

La stima economica della voce di prezzo unitario viene ricavata dal costo di costruzione con riferimento ai listini prezzi di uso comune di riferimento o a preventivi richiesti appositamente.

L'individuazione degli articoli di lavoro più significativi viene tradizionalmente suddivisa in base alla *logica di appalto o merceologica*, ovvero per lavorazioni sulla base di forniture omogenee, come i principali capitoli dei Prezzari di uso comune. E' ancora poco utilizzata in questi documenti la scomposizione secondo la norma UNI 8290 per *classi prestazionali*. Gli articoli

considerati sono comunque gli stessi utilizzati nel computo metrico.

Il documento, allegato al contratto, contiene dunque la codifica di riferimento, la descrizione dettagliata e il prezzo.

### **Computo metrico estimativo**

Il computo metrico estimativo è il documento che insieme agli elaborati grafici ed ai Capitolati tecnici accompagna e delinea il contratto. E' lo strumento che consente di valutare economicamente il progetto, cioè è la traduzione economica del progetto. Il progettista ne è responsabile per eventuali carenze ed omissioni.

Senza questo elaborato la programmazione è come una battaglia senza armi ed il progetto sarà destinato a cadere rovinosamente.

Contiene la descrizione delle attività, la loro quantità, il relativo prezzo unitario, il prodotto quantità per prezzi unitari, cioè la stima economica di ogni parte di opera in cui si è suddiviso il progetto ed infine il totale.

### **Budget**

Il budget si utilizza per definire il programma di un progetto sotto l'aspetto economico in funzione dell'organizzazione tecnica e della strategia aziendale. Il direttore generale organizza una riunione specifica con il project manager e con le principali figure tecniche appartenenti al progetto, poiché la definizione del budget deve essere condivisa dal responsabile della commessa che ne risponde in prima persona. In questa riunione vengono analizzati gli aspetti:

- organizzativi;
- tecnici;
- costi di materie prime/manodopera/attrezzature;
- costi di forniture;
- tempistiche;
- alla luce dei dati economici fondamentali del progetto, quali il contratto acquisito, il computo metrico estimativo, le spese generali e l'utile.

*“Un budget è un programma di azione che è espresso in termini quantitativi, usualmente monetari, e che copre un predefinito arco temporale, solitamente un anno” R.N.Anthony – G.Welsh (1974)*

Esistono due principali tipologie di budget:

- *il budget di periodo*, per programmi annuali, semestrali, ecc.
- *il budget di iniziativa*, che indica un programma volto ad ottenere un determinato risultato (es. progetto o commessa). Il **progetto** è l'intero processo che porta alla realizzazione di un'opera architettonica, dall'ideazione alla costruzione (macroprogetto), la visione globale del progetto è a cura del committente e del suo project manager. Si dice **commessa** un lavoro acquisito per conto di un cliente (es. commessa di progettazione esecutiva conseguente all'affidamento dell'incarico al progettista da parte del committente o commessa di costruzione in seguito all'appalto dei lavori). La commessa è un progetto parziale rispetto al macroprogetto di realizzazione dell'opera architettonica ed avrà un relativo project manager sia per la società di progettazione, sia per l'impresa di costruzioni, sia per tutti gli eventuali sottoprogetti che concorrono al risultato finale.

I budget assumono particolare importanza per la realizzazione di grandi progetti di durata pluriennale.

### **Che cos'è il budget di progetto?**

Anche il **budget** segue i tre livelli di approfondimento della programmazione **del progetto** legati ai tre step progettuali – *preliminare, definitivo, esecutivo* – richiesti dalla normativa per gli appalti pubblici e ripresi in generale anche per i più importanti progetti privati. Avremo dunque tre tipi di budget di progetto ad essi relativi.

**Per le commesse**, porzioni del progetto complessivo di esecuzione dell'opera architettonica, invece il momento principale è quello del contratto, o acquisizione dell'ordine. Esistono diversi tipi di budget a seconda del momento in cui sono formulati rispetto all'evento del contratto:

- *budget preliminare o obiettivo*, valutato all'inizio della commessa, in base a stime di tipo parametrico, per decidere se tale lavoro sia di interesse dell'azienda e rientri all'interno del range di costi e tempi ritenuti accettabili per l'azienda stessa;
- *budget preventivo*, determinato in maniera analitica sulla base di tutti i documenti a disposizione in sede di offerta economica, *prima della firma del contratto*, permette una stima preventiva dei margini di contribuzione;
- *budget esecutivo o di gestione*, definito in maniera analitica sulla base degli elaborati allegati al contratto, coinvolgendo tutte le funzioni aziendali ognuna per la propria specifica competenza. Concordato infine tra la direzione ed il project manager *prima*

*dell'inizio dei lavori*, costituisce il programma economico di quella commessa anche ai fini della previsione della contabilità. si utilizza *durante l'esecuzione dei lavori* per verificare l'analisi degli scostamenti.

Il budget è lo strumento principe per la programmazione e controllo della gestione, attraverso **l'analisi degli scostamenti**.

Si realizza un confronto tra i valori di budget e i valori consuntivi e infine si determinano gli scostamenti totali. Scomposizione di questi ultimi in scostamenti elementari relativi alle attività oggetto di controllo.

Questo strumento permette l'individuazione delle cause e relative responsabilità degli scostamenti elementari e la definizione dei provvedimenti in caso di disfunzioni gestionali. Esistono diverse finalità gestionali e operative delle analisi degli scostamenti.

Nel caso di budget di commessa per una impresa di costruzioni, operativamente il project manager seguirà una procedura simile a quella descritta qui di seguito. In primo luogo leggerà attentamente i documenti di contratto, poi analizzerà il *budget commerciale o preventivo* confrontandolo con il progetto esecutivo allegato al contratto, successivamente verificherà l'attendibilità dei programmi e dell'organizzazione per la costruzione ipotizzati per redigere l'offerta preventivo. Non trascurerà inoltre la verifica economica e temporale delle principali forniture per la costruzione dell'opera presso i fornitori stessi. Coinvolgerà le varie funzioni aziendali che collaboreranno all'esecuzione del progetto (ingegneria, acquisti, magazzino, manutenzione, amministrazione), e apporterà le necessarie correzioni al budget preventivo per arrivare a concordare con la direzione il *budget esecutivo*, utilizzato per programmare il risultato economico della costruzione dell'opera.

Il budget esecutivo si basa dunque principalmente sull'analisi dei documenti di tipo tecnico per quanto riguarda la relazione tecnica del progetto, il programma lavori, le previsioni sull'impiego del personale dell'azienda, e sull'analisi dei documenti di tipo economico-finanziari per il computo metrico estimativo, per la stima delle spese generali ed utile aziendale, per la previsione dei flussi monetari (cash-flow) e per la previsione dei costi finanziari.

### **I vantaggi dell'elaborazione del budget**

- Stimolare ad analizzare il passato, come fonte di idee per il futuro;
- costringere a riflettere sul futuro;

- esplicitare strategie ed obiettivi;
- focalizzare l'attenzione sulla dimensione economica-finanziaria della gestione, spesso lontana dalla cultura tecnica.

### **Il margine di contribuzione**

Il *margine di contribuzione lordo* è la differenza tra il ricavo di contratto ed i costi variabili del progetto. Il *margine di contribuzione netto* detrae dall'importo di contratto oltre ai costi variabili anche i costi fissi specifici, imputabili direttamente al progetto. Si dice margine di contribuzione perché indica quanto contribuisce un dato progetto a coprire i costi fissi di sede o di struttura, oltre a generare eventuali utili. Si può immaginare che i costi fissi di struttura siano come un recipiente ed il margine di contribuzione di ogni progetto aziendale sia un certo quantitativo d'acqua. Solo quando la quantità di liquido versato nel recipiente mediante il contributo di ogni progetto arriva al bordo del contenitore (cioè ha coperto interamente i costi di sede) e comincia a tracimare, può cominciare a formarsi l'utile dell'azienda, pari al quantitativo d'acqua tracimato.

Il margine di contribuzione si indica anche in percentuale, in rapporto all'importo totale del contratto. E' la percentuale di ricavo o di prezzo di vendita che contribuisce a coprire i costi fissi ed a creare l'utile:

$$\text{MARGINE DI CONTRIBUZIONE} = \frac{\text{RICA VO} - \text{COSTO}}{\text{RICA VO}}$$

Si applica al ricavo in diminuzione, per ottenere il costo e si utilizza soprattutto per valutare il risultato finale di un progetto, sia a preventivo sia a consuntivo.

Si utilizza inoltre per **passare dalle voci di prezzo** delle singole attività alle **voci di costo**, utili anche per la redazione dei budget. Bisogna fare molta attenzione a non confondere il ricarico con il margine di contribuzione. Sono entrambi indicatori della differenza tra i prezzi e i costi, ma devono essere utilizzati in maniera appropriata alla specifica base di riferimento: per il ricarico la differenza prezzi-costi è rapportata ad i costi, per il margine tale differenza è rapportata ai prezzi.

Esiste una situazione limite rappresentativa della differenza tra i due indicatori: quella in cui il margine del 50% corrisponde ad un ricarico del 100%.

## **2.LE TECNICHE RETICOLARI DI PROGRAMMAZIONE**

La programmazione reticolare è nata alla fine degli anni '50 con la presentazione delle tecniche PERT e CPM che sorsero come naturale evoluzione dei diagrammi di Gantt allo scopo di fornire un valido strumento per la programmazione ed il controllo di attività complesse nel campo della ricerca, dello sviluppo e della produzione. Le tecniche reticolari si imposero rapidamente nei campi più diversi per la loro semplicità, la loro efficacia ed anche per la disponibilità di programmi applicativi che ne facilitarono l'impiego.

Parallelamente alla loro diffusione si assistette ad una notevole ricchezza di nuovi sviluppi che si basarono sui risultati mutuati dalla teoria dei grafi, dal calcolo delle probabilità, dalle tecniche euristiche e di simulazione.



Dall'insieme degli studi e delle esperienze fatti in questo campo emerge evidente la constatazione che il successo nell'impiego delle tecniche reticolari di programmazione è condizionato da tre elementi fondamentali.

a. La conoscenza approfondita delle tecniche che permetta all'utente di valutare in prima persona i vantaggi ed i limiti presentati da ciascuna tecnica.

b. La disponibilità di mezzi di elaborazione e soprattutto di programmi che risolvano i problemi connessi alla memorizzazione ed elaborazione dei dati.

c. L'adozione di un appropriato approccio organizzativo senza il quale la tecnica non si innesta nell'organismo aziendale ma viene colpita da un'azione di rigetto.

Ponendo l'attenzione sugli aspetti algoritmici è importante osservare che gli sviluppi avuti dalle tecniche reticolari di programmazione si sono rivolti in tre direzioni. La prima di queste si riferisce alla messa a punto di tecniche in grado di tener conto non solo della natura probabilistica relativa alle durate delle singole operazioni ma anche della natura probabilistica relativa alle sequenze di operazioni da eseguire. La seconda direzione di sviluppo è rivolta alla definizione di procedure in grado di programmare e controllare non soltanto lo stato di avanzamento fisico dei lavori ma anche i costi connessi a tale avanzamento. La terza direzione, infine, si riferisce alla messa a punto di tecniche capaci di programmare e controllare l'impiego delle risorse (ovviamente limitate) necessarie alla realizzazione di uno o più progetti contemporanei.

## **Ricerca Operativa**

### **Le origini**

La Ricerca Operativa nasce durante la seconda Guerra Mondiale ("Operations Research", ovvero "Research on Military Operation"). In occasione della Battaglia di Inghilterra il problema degli inglesi era quello di prevenire gli attacchi dei bombardieri tedeschi. Gli inglesi erano dotati di radar, ma in numero molto basso e dotati di un certo raggio d'azione, oltre alle pattuglie aeree di ricognizione. Occorreva definire la localizzazione dei radar per massimizzare le probabilità di intercettazione e coordinare le operazioni per facilitare l'identificazione delle possibili incursioni e per attivare la difesa aerea.

Furono creati gruppi di lavoro misti, con specialisti di varie competenze (matematici, fisici, ingegneri, militari, ecc.) che cercavano di coordinare le operazioni di contrasto alle incursioni

aeree tramite la messa a punto di metodi quantitativi di analisi e metodologie di soluzione con algoritmi matematici. Il risultato fu positivo, con la definizione di strumenti che migliorarono notevolmente l'efficacia del sistema integrato di avvistamento radar/pattuglie e contrasto delle incursioni, come la storia ha dimostrato. Gli strumenti messi a punto ebbero in seguito numerosi applicazioni in altri settori, in particolare nei trasporti, nella logistica industriale, nel campo della gestione dei progetti con l'introduzione delle tecniche di programmazione reticolare.

L'evoluzione della disciplina è coincisa con una successiva fase di sviluppo e diffusione nei settori industriali, nel settore universitario ed in quello della pubblica amministrazione. Dal 1940 al 1960 si concretizzò un grosso sforzo scientifico per sviluppare modelli che avessero delle applicazioni pratiche, in particolare nell'industria. Particolare impulso ebbero la programmazione lineare, la teoria dei grafi e dei reticoli per attività elementari, la simulazione numerica. Dal 1960 al 1970 la diffusione degli elaborati elettronici diede ancora un notevole impulso alla ricerca operativa che, tra l'altro, portò alla nascita della teoria della complessità.

Gli strumenti della ricerca operativa sono strumenti di tipo matematico e quindi:

- necessitano dell'analisi e dell'elaborazione dei dati;
- sono strumenti complicati che richiedono una formazione specifica;
- non sono strumenti esclusivamente grafici, per cui è difficile per un non esperto interpretare gli elaborati stessi o i dati di output: portano cioè a risultati che spesso vanno interpretati o gestiti, come primo approccio, da specialisti, ed è quindi importante la redazione di schemi grafici esplicativi per la comunicazione dei risultati;
- l'elaborazione elettronica è indispensabile: il grosso sviluppo del metodo del cammino critico (CPM) e dei suoi derivati per la programmazione dei lavori nell'industria delle costruzioni è sostanzialmente dovuto alla capillare diffusione commerciale dei Personal Computer.

### **Ricerca Operativa e Programmazione dei Lavori**

L'idea fondamentale che sta alla base delle tecniche reticolari era già presente allo stato potenziale in una tecnica di pianificazione proposta da Henry L. Gantt, all'inizio del 1900, in concomitanza con i primi esperimenti fatti da Frederick W. Taylor, per

realizzare la tempificazione ed il controllo del processo produttivo. L'idea che sta alla base dei diagrammi di Gantt è molto semplice.

Verticalmente sono indicati i tipi di destinazione (progetti, ordini, ecc.) che possono avere le risorse, mentre sull'asse orizzontale è rappresentato il tempo disponibile per ciascun lavoro. E' interessante notare che Gantt sviluppò il suo metodo nell'ambito delle operazioni militari della Prima Guerra Mondiale, quando egli lavorava per l'Ufficio Ordinanze dell'Esercito americano. Nel corso del suo lavoro egli si convinse che era necessario mettere a posto un metodo grafico per rappresentare i piani futuri di approvvigionamento e lo stato presente della disponibilità di munizioni. Operando in questa direzione egli osservò che il **tempo** era il denominatore comune mediante il quale potevano essere confrontati i piani di approvvigionamento e le effettive realizzazioni.

L'impiego di tale strumento, che presupponeva una stima accurata dei tempi di realizzazione, creò l'esigenza della definizione di quei tempi standard che dovevano giocare successivamente un ruolo fondamentale nel controllo dei processi produttivi.

Da quanto precede risulta che i diagrammi di Gantt, se da un lato presentano il vantaggio di fornire una comoda rappresentazione grafica del programma di lavoro previsto e dello stato attuale di avanzamento, dall'altro non tengono conto di due elementi fondamentali. Il primo è rappresentato dagli eventuali vincoli di successione esistenti fra le operazioni, il secondo è rappresentato dalla disponibilità, generalmente limitata, di risorse che condiziona i tempi di realizzazione delle singole operazioni.

Nondimeno i diagrammi di Gantt hanno rappresentato dalla fine della Prima Guerra Mondiale fino all'avvento delle prime tecniche reticolari il principale strumento di pianificazione non soltanto per la programmazione della produzione, ma anche per qualsiasi tipo di attività industriale.

Tale metodo continua ad essere usato anche oggi nella programmazione dei lavori per due scopi principali. Il primo consiste nella valutazione di massima delle date relative ai traguardi intermedi fondamentali; la coerenza di tali date ed il loro grado di realizzabilità vengono poi verificati mediante l'impiego delle tecniche reticolari. Il secondo uso odierno dei diagrammi di Gantt consiste nella rappresentazione grafica dei risultati ottenuti mediante l'impiego di tali tecniche.

Riguardo al problema specifico della pianificazione e organizzazione della produzione si può citare un passaggio

intermedio tra lo strumento Gantt e i modelli reticolari: l'*harmonygraph* di Adamiecky. L'*harmonygraph* è uno strumento grafico, molto simile al Gantt che in più individua i vincoli logici tra le attività. La forma grafica è simile a quella del cronoprogramma a barre, ma il diagramma risulta specchiato attorno alla diagonale, vale a dire che è rappresentato da un piano cartesiano ortogonale in cui sono indicati i tempi in ordinata (crescenti verso il basso) e le attività in ascissa (che mano a mano che si sviluppano procedono dall'alto verso il basso). In corrispondenza delle attività sono indicati i predecessori e i successori logici. (Fig.2.1)

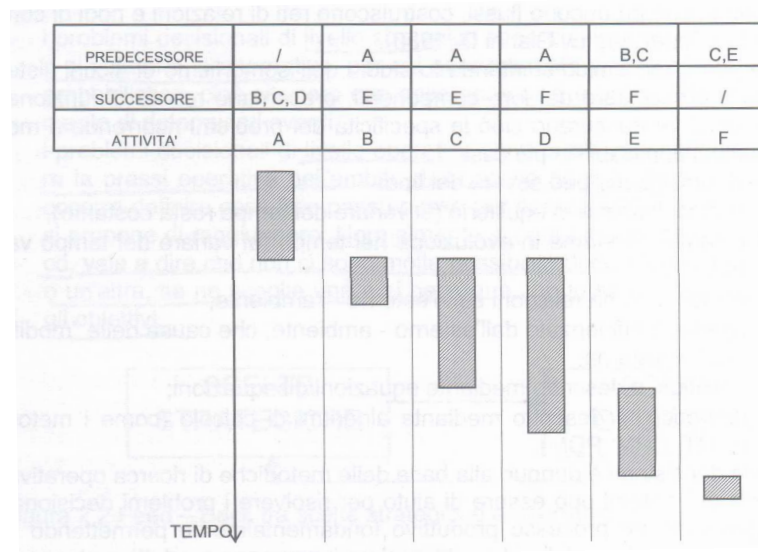


Fig. 2.1

La descrizione dei principali vincoli di conseguenza logica – cronologica tra le attività lavorative dell'*Harmonygraph* dà già un notevole contributo alla soluzione di molti problemi di pianificazione della produzione, ma ancora manca un metodo matematico di programmazione delle attività, per cui le criticità già citate tipiche dei metodi grafici e la sua scarsa diffusione nel mondo accademico ad esso contemporaneo ne hanno impedito una qualsiasi diffusione applicativa.

Le carenze concettuali e le difficoltà di impiego dell'*Harmonygraph* e dei metodi grafici come il cronoprogramma di Gantt vengono risolte con l'introduzione dei metodi reticolari per la programmazione della produzione, ovvero con l'impiego di strumenti propri della ricerca operativa resi più operabili grazie alla capacità di calcolo degli elaborati elettronici.

La Ricerca Operativa è una scienza che studia l'applicazione di metodi scientifici a problemi decisionali che si presentano in strutture organizzate e complesse. I metodi sono matematici, gli

strumenti sono informatici. E' anche detta scienza della gestione (Management Science) oppure scienza delle decisioni (Decision Science).

La Ricerca Operativa si applica a sistemi organizzati che sono insiemi di elementi legati da forme di interazione (es. cantiere: elementi = macchine per la produzione di semilavorati; interazioni = flussi di materiali / prodotti) per risolvere problemi decisionali.

E' considerato fondatore della moderna "Teoria dei sistemi" Ludwing von Bertanllaffy (2004) che nel 1936 definisce i concetti base della teoria, le cui prime applicazioni si avranno non prima del dopoguerra. Bertanllaffy, biologo e studioso della vita delle cellule si era accorto che tutti i fenomeni sono scomponibili in vari elementi che hanno interazioni tra di loro che causano determinati effetti. La fondamentale intuizione di Bertanllaffy è che le relazioni sono almeno importanti quanto gli elementi, o, in certi casi, sono le relazioni che qualificano gli elementi stessi.

Sistema è quindi un insieme di parti o elementi tra loro correlati, capaci di costruire un tutto, che abbia un significato in un certo contesto. Il sistema si presenta come una struttura più o meno rigidamente connessa di processi, guidati da precise regole di "funzionamento", dove vengono ad operare forze direzionate, che producono flussi, costruiscono reti di relazioni e nodi di convergenze (Capezzuto D. Gianni, 1988).

Per approccio sistematico si intende lo studio dell'isomorfismo di alcuni sistemi, che a prescindere dai loro componenti, presentano regole di funzionamento simili. Si trascurano cioè le specificità dei problemi ricorrendo a modellizzazioni applicabili in più casi.

In sintesi, un sistema può essere del tipo:

- statico, sistema in equilibrio (al variare del tempo resta costante);
- dinamico, sistema in evoluzione nel tempo (al variare del tempo varia);
- chiuso, non ha relazioni con l'esterno – l'ambiente;
- aperto, è influenzato dall'esterno – ambiente, che causa delle "modifiche" al sistema;
- analitico, è descritto mediante equazioni/disequazioni;
- numerico, è descritto mediante algoritmi di calcolo (come i metodi PERT, CPM, PDM).

La teoria dei sistemi è dunque alla base delle metodiche teorie di ricerca operativa. La teoria dei sistemi può essere di aiuto per risolvere i problemi decisionali che riguardano un processo produttivo, fondamentalmente permettendo la realizzazione di un

modello che approssima il processo produttivo stesso in funzione degli aspetti da ottimizzare. Tramite la costruzione del modello ed il suo continuo aggiornamento si fornisce un sistema di supporto delle decisioni per la gestione.

Un problema decisionale è la scelta tra diverse alternative, della configurazione relativa ad un insieme di decisione che consente di ottenere dal sistema le prestazioni desiderate.

Gli aspetti di gestione della produzione che più frequentemente vengono affrontati con l'approccio sistemico sono le decisioni riguardanti:

- scelta del layout di un impianto industriale;
- scelta delle macchine in funzione della produttività richiesta;
- ottimizzazione della sequenza delle lavorazioni industriali;
- programmazione dei lavori costruzione;

in relazione alla determinazione di specifiche prestazioni che possono essere:

- la produttività (massima/minima);
- i costi (massimi/minimi);
- le interazioni del sistema produttivo con la normativa o gli assetti del mercato.

La Ricerca Operativa aiuta con degli strumenti matematici a risolvere dei problemi decisionali, ed è un supporto al decisore per le scelte sull'assetto del sistema produttivo.

I problemi decisionali possono essere classificati in strategici e operativi:

- i problemi decisionali di livello strategico sono quelli in cui si definiscono e si valutano le alternative, per cui generalmente si opera in un regime probabilistico, cioè si opera con delle possibilità e probabilità di accadimento di determinati eventi;
- i problemi decisionali di livello operativo sono quelli in cui si deve definire la prassi operativa nell'ambito delle scelte strategiche assunte, cioè occorre definire cosa fare passo passo per perseguire gli obiettivi che ci si propone di raggiungere. Normalmente si opera in regime deterministico, vale a dire che non ci sono molte possibilità di percorrere una strada o un'altra, se ne sceglie una e si persegue con lo scopo di raggiungere gli obiettivi.

La Ricerca Operativa ha come scopo principale quello di realizzare dei modelli matematici per fornire alla Direzione un supporto per le decisioni in merito all'organizzazione delle attività del processo e all'allocazione delle risorse produttive. Da ciò discende la necessità di evidenziare le attività che rivestono

carattere di criticità per il raggiungimento degli obiettivi posti a base del processo. Uno dei fondamentali compiti della Produzione Edilizia, inteso come insieme strutturato di metodi, strumenti, nozioni e informazioni per lo studio e la gestione ottimale della tecnologia edilizia e della costruzione, sia di comporre ed adattare i vari strumenti teorici della Ricerca Operativa allo scopo di conformarli al settore delle costruzioni, con le sue peculiarità tecnologiche ed organizzative.

Per “processo” si intende un insieme di fasi, attività o di operazioni elementari diverse che seguono un ordine determinato, che un sistema esegue per realizzare una certa funzione in maniera spontanea o impostata dall'esterno.

Per capire e studiare il processo costruttivo può essere utilizzata la teoria dei sistemi allo scopo di realizzare dei modelli matematici. Infatti la teoria dei sistemi consente di creare dei modelli e usare dei modelli vuol dire simulare la realtà con strumenti matematici per aumentarne la conoscenza. Un modello è una rappresentazione semplificata di un sistema reale, progettata per rispondere, mediante analisi sperimentali, a domande specifiche (risposta agli ingressi/decisioni).

Un modello è quindi un sistema organizzato che ha degli ingressi (input), decisioni o controlli, cioè variabili che cerchiamo di controllare e corrispondenti uscite, cioè prestazioni (output) che cerchiamo di prevedere.

Un modello è una rappresentazione semplificata di realtà complesse o di conoscenze, che comunque ha lo scopo di evidenziare alcuni aspetti significativi della realtà stessa rispetto al contesto in cui opera. Nel modello nessuno degli elementi fondamentali della struttura è assente e tutti i rapporti funzionali interni ed essenziali sono evidenziati.

Le proprietà di un modello sono la capacità di astrazione (ogni modello ha un suo livello di astrazione) e di sintesi: il modello coglie della situazione reale solo le caratteristiche più rilevanti con l'obiettivo di semplificare il problema per giungere alla determinazione dei risultati richiesti.

Un modello migliora il grado di comprensione della realtà. Questo perché individua:

- le componenti importanti;
- le fondamentali relazioni di causa ed effetto.

Quindi è evidente che, anche nel caso specifico della modellazione del cantiere, il modello non risolve i problemi, ma specifiche la scelta delle decisioni da assumere.

In relazione alla finalità i modelli possono essere classificati in:

- **descrittivi**: riproducono con semplificazioni la realtà, senza presupporre l'uso che del modello verrà fatto;
- **predittivi**: danno di una certa realtà gli elementi necessari per prevederne l'evoluzione, lasciando spazio ad eventuali scelte;
- **prescrittivi**: impongono un comportamento particolare in previsione dell'obiettivo da raggiungere.

Rispetto alla loro natura i modelli possono essere classificati in:

- **analogici o fisici**: utilizzano la similitudine o l'analogia, danno una rappresentazione fedele della realtà, ad esempio con una riproduzione in scala;
- **simbolici o matematici**: insieme di relazioni logico/matematiche che descrivono il comportamento del sistema;
- **di simulazione computerizzata**.

I modelli simbolici sono modelli matematici che si prefiggono lo scopo di rappresentare la realtà tramite la definizione di algoritmi matematici che consentano di trovare la soluzione "ottima" (o almeno sub-ottima) al problema da risolvere soddisfacendo contemporaneamente determinati vincoli di base.

Un esempio comune può essere il problema di minimizzare i costi di produzione di un cantiere rispettando i vincoli contrattuali di tempo e di qualità procedurale.

Il modello simbolico<sup>1</sup> (Mendogni, 2000) è definito come:

$$z = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

con

- $x_i$  = incognite del problema
- $z$  = funzione obiettivo

La funzione obiettivo è soggetta a vincoli del tipo:

- 1)  $g_j(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \leq V_j$  con  $j = 1, 2, 3, \dots, m$
- 2)  $x_i \in X_i$  dove  $X_i$  è l'insieme delle variabili  $x_i$  (continue, discrete, binarie)
- 3)  $x_i = \text{costante nel tempo}$   
oppure
- 4)  $x_i = p(t)$  con  $t = \text{tempo trascorso}$ .

Normalmente si usa per la funzione obiettivo una funzione di tipo lineare come la seguente:

$$z = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n = \sum_{j=1}^n a_jx_j$$

con  $a_j = \text{costante}$

Il valore di  $z$  rappresenta le prestazioni del sistema, e quindi è la variabile dipendente, mentre  $x_i$  sono le variabili decisionali, indipendenti. Sia  $z$  che i valori  $x_i$  devono appartenere ad una regione ammissibile, definita dai vincoli.



Se il modello è prescrittivo la forma della funzione

$$z = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

è nota, i valori delle variabili  $x_i$  sono noti e controllabili dal decisore. Solitamente sono modelli utilizzati a livello operativo, per determinare i valori di  $x_i$  che massimizzano o minimizzano  $z$ .

Se il modello è descrittivo/predittivo la forma della funzione:

$$z = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

è nota, però non si conoscono i valori delle variabili  $x_i$  e/o non sono

controllabili dal decisore. Normalmente sono modelli utilizzati a livello strategico per la determinazione o la stima dei valori di alcune  $x_i$  in funzione di altre  $x_i$ .

<sup>1</sup>Mendogni definisce le seguenti fasi di lavoro per la realizzazione del modello:

1. acquisizione dati di base;
2. problem solving (definizione dei requisiti del modello);
3. definizione del modello;
4. soluzione del modello;
5. analisi dei risultati dal modello e azioni correttive.

Il problema dei modelli di tipo simbolico-matematico è costituito dalla difficoltà di rappresentare la realtà, con buona approssimazione, senza ricorrere a funzioni matematiche molto complesse. Questo porta spesso a realizzare modelli utilizzando ipotesi semplificative che conducono difficilmente a risultati attendibili.

Esempio classico nell'industria delle costruzioni si incontra quando, na volta ottimizzato il processo in base ai tempi mediante un reticolo CPM o PDM si vuole procedere alla allocazione delle risorse effettivamente a disposizione. A questo punto il modello matematico si complica per cui spesso l'allocazione delle risorse si effettua con un metodo ottimo-euristico.

I modelli di simulazione superano questi problemi mediante l'uso del computer. Infatti si riproduce la realtà realizzando al computer una rappresentazione "virtuale" del sistema che si vuole studiare. Non si sviluppa un modello matematico vero e proprio, ma si induce il calcolatore a simulare il sistema produttivo reale, o, meglio, il suo comportamento sotto determinate condizioni. Il modello di simulazione è una realtà virtuale che riproduce il più fedelmente possibile quanto avviene nella realtà del processo, cioè in cantiere.

Il computer stimola il sistema virtuale con ingressi che rappresentano quelli reali (ad esempio l'inizio dello svolgimento di un'attività da parte di una squadra di cantiere). Il sistema

simulato fornisce delle uscite che corrispondono (o, meglio dovrebbero corrispondere) alle risposte effettivamente fornite dal sistema reale, per esempio alle quantità prodotte nel nostro cantiere dopo un determinato tempo. Se le uscite non sono soddisfacenti si modifica il modello sino a quando il livello di approssimazione è accettabile.

Chiaramente il modello di simulazione è un modello creato ad hoc di complessa realizzazione.

Dal punto di vista della complessità di realizzazione abbiamo che il modello più semplice è un modello simbolico di tipo lineare, mentre il modello più complesso è un modello di simulazione.

I modelli oggetto della presente trattazione sono i modelli simbolici realizzati tramite reticoli per attività elementari (come il CPM e il PDM) che per la loro relativa semplicità si sono diffusi notevolmente, soprattutto nel mondo industriale manifatturiero e, nel settore delle costruzioni, nei paesi anglofoni più sviluppati o, in Italia, per le commesse più rilevanti a livello nazionale o internazionale. Dal punto di vista strettamente teorico-matematico i reticoli per attività elementari possono essere ricondotti a problemi di programmazione matematica lineare. La programmazione dei lavori di costruzione, o di un qualsiasi progetto, tramite i modelli simbolici realizzati con reticoli di attività elementari è detta "Programmazione reticolare".

Sino ad ora le tecniche di programmazione reticolare hanno avuto lo scopo di perseguire quattro obiettivi fondamentali:

1. definire metodi e strumenti che permettano di programmare lo sviluppo temporale dei lavori e controllarne gli stati di avanzamento in corso di esecuzione, ottimizzando i vincoli relativi a tempo e produzione svolta;
2. definire metodi e strumenti che permettano di programmare lo sviluppo dei costi dei lavori e controllarne l'incremento in corso di esecuzione, ottimizzando i vincoli relativi a costi e produzione svolta;
3. definire delle tecniche che tengano conto dell'incertezza sia nella determinazione della durata delle singole attività che nella sequenza delle attività stesse, ovvero nella stima della durata e della sequenza più probabile;
4. definire metodi e strumenti in grado di programmare, ottimizzare e controllare l'uso delle risorse necessarie all'esecuzione delle attività, sia in condizioni di tempo limitato che di risorse limitate.

I primi due obiettivi sono raggiunti in maniera abbastanza agevole con tecniche relativamente semplici, generalmente indicate con il metodo CPM o PDM. Per quanto riguarda il terzo obiettivo, la “programmazione dell’incertezza”, esso si sviluppa per quanto riguarda la durata delle attività con il metodo PERT, e per l’incertezza nella logica del processo con il metodo GERT.

Gli algoritmi applicabili alle tecniche reticolari per il carico e livellamento delle risorse sono oggetto di continui sviluppi e fondamentalmente si fondano su metodi ottimo-euristici, che perseguono il quarto obiettivo.

La tecnica CPM (Critical Path Method) si basa sul presupposto che l’utente disponga di una esperienza sufficientemente lunga nella realizzazione delle operazioni considerate. Per tale ragione il CPM prevede che venga associata a ciascuna attività una durata deterministica.

Al contrario, la tecnica PERT (Program Evaluation and Review Technique) è rivolta al controllo di quei progetti che per il loro carattere di novità presentano una notevole incertezze nella valutazione dell’ammontare di risorse e di tempo necessari per completare le singole operazioni. In conseguenza di ciò il PERT si basa su una valutazione probabilistica della durata associata a ciascuna attività.

Le tecniche reticolari possono essere classificate secondo *tre* criteri.

Il *primo* criterio fa riferimento alla *natura* del fenomeno considerato: questa può essere deterministica o probabilistica.

Quando è deterministica l’analisi e la programmazione possono essere realizzate mediante le tecniche CPM ed MPM. Quando la natura del fenomeno considerato è probabilistica, può esserlo nella durata delle operazioni, nel cammino percorso o in entrambi. La tecnica PERT copre solo il primo caso, mentre la tecnica GERT copre anche gli altri due casi.

Il *secondo* criterio si basa sulla *logica* con la quale è costruito il grafo. In questo senso si può supporre che un nodo sia realizzato quando in ingresso sono realizzati tutti gli archi che convergono su quel nodo (logica AND) oppure quando è realizzato uno qualsiasi di tali archi (logica OR).

L’uscita da un nodo realizzato può anch’essa essere di due tipi:

- AND quando la realizzazione del nodo comporta l’attivazione di tutti gli archi in uscita,
- OR quando comporta l’attivazione di un unico arco in uscita, in accordo con le probabilità assegnate.

Le tecniche CPM, MPM E PERT permettono di trattare la logica AND/AND, la tecnica GERT permette invece di trattare anche le altre tre logiche indicate.

Il *terzo* criterio si riferisce a diversi *livelli di impiego*. Sotto questo punto di vista le tecniche reticolari possono essere classificate nel seguente modo:

– *Tecniche per la pianificazione delle scadenze*: tali tecniche forniscono informazioni sui tempi di realizzazione delle varie operazioni, avendo come dati di ingresso la durata associata alle operazioni ed i vincoli di successione. Esse non tengono perciò conto né dei costi di realizzazione, né dei vincoli fisici connessi alla disponibilità delle risorse. A queste limitazioni si può ovviamente sopperire in modo manuale. L'approccio manuale anche se molto istruttivo non può però rappresentare, per evidenti ragioni, la soluzione definitiva. Questa soluzione deve essere invece ricercata nell'integrazione di questo livello d'impiego con i successivi.

– *Tecniche per la pianificazione dei costi*: tali tecniche permettono il confronto incrociato fra: budget, costi previsti e costi effettivi in funzione dello stato di avanzamento dei lavori. Esse permettono inoltre di effettuare una estrapolazione dei costi effettivi sulla base di quelli realizzati fino a quel momento. In tal modo viene a costituirsi un supporto sistematico per integrare il controllo sullo stato di avanzamento fisico con il controllo sulla situazione economica.

– *Tecniche per la ottimizzazione dei costi di realizzazione*: queste tecniche si propongono di individuare il piano di lavoro che minimizza i costi di realizzazione. Gli algoritmi proposti per raggiungere questo scopo possono essere avere natura rigorosa (programmazione lineare) od euristica. La loro maggiore limitazione risiede nel fatto che non tengono conto dei vincoli connessi alla limitazione nella disponibilità delle risorse che vengono invece considerati dalle tecniche del livello successivo.

– *Tecniche per l'ottimizzazione delle risorse*: rappresentano il livello più evoluto della programmazione reticolare e possono essere distinte in due categorie.

Le tecniche della prima categoria mirano a minimizzare il tempo di realizzazione considerando come vincolo rigido (anche se non necessariamente costante nel tempo) la quantità di risorsa disponibile. Gli algoritmi impiegati possono essere rigorosi (programmazione lineare a numeri interi) od euristici.

Le tecniche della seconda categoria mirano invece a livellare (nel senso più intuitivo della parola) i carichi delle diverse risorse,

considerando come vincolo rigido la data di fine del progetto opportunamente determinata. Gli algoritmi impiegati nell'ambito di questa seconda categoria di tecniche hanno tipicamente natura euristica.

## **La Teoria dei Grafi**

Nonostante le prime realizzazioni derivino da applicazioni pratiche di programmazione lineare, le tecniche di programmazione reticolare si fanno derivare, dal punto di vista matematico, dalla Teoria dei Grafi.

In molti casi viene naturale impiegare un certo numero di punti uniti da linee o da frecce per rappresentare una situazione che si prende in esame. I punti possono indicare persona, luoghi, atomi, etc. Le linee (orientate o no) possono rappresentare vincoli di parentela, strade, legami chimici e così via. Questi diagrammi assumono i nomi più disparati a seconda del campo nel quale vengono utilizzati: si parla di sociogrammi, organigrammi, alberi genealogici, reti di comunicazione e via di seguito.

D. Koenig fu la prima persona a suggerire di chiamare tutti questi diagrammi con il nome generico *grafi*.

Gli studiosi successivi svilupparono in modo astratto e formale tutto insieme di conoscenze che assunse l'aspetto di una vera e propria teoria, ma la nascita della *Teoria dei Grafi* si attribuisce ad Eulero (matematico tedesco 1707-1783), che per primo ricercò nei grafi il metodo per la soluzione di problemi reali. Il caso era quello del problema dei "Sette Ponti di Königsberg", ovvero la determinazione di un particolare percorso chiuso per le vie e i ponti di questa piccola cittadina prussiana situata sul fiume Pregel (ora Kaliningrad, i ponti furono distrutti durante la seconda guerra mondiale e solo cinque furono ricostruiti), che in quel punto si divide in due rami, formando due isole (Fig.2.2)

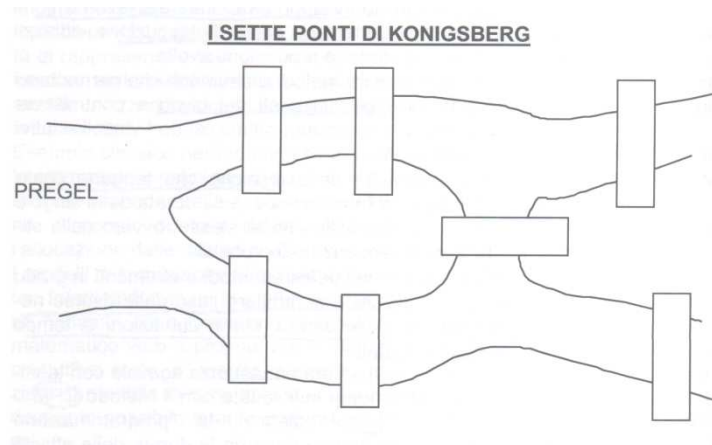


Fig. 2.2

Il problema dei sette ponti di Königsberg può essere enunciato nella seguente forma: “è possibile effettuare un attraversamento di ciascun ponte una sola volta e ritornare sulla sponda di partenza?”. Eulero definì matematicamente il problema e lo risolse, fondando la Teoria dei Grafi. Il primo passo fu l’astrazione del modello sintetizzando il problema con un grafo, ovvero un diagramma costituito da nodi e archi di collegamento.

La teoria dei grafi utilizza, come ogni altra teoria matematica, una propria terminologia che consente una notevole economia di pensiero e una più facile manipolazione dei concetti.

Il problema si riformula: “C’è un percorso chiuso che attraversa tutti gli archi del Grafo una ed una sola volta?”. E’ facile dimostrare, anche per tentativi che il problema non ha soluzione. La generalizzazione del problema (dal particolare al generale) tramite i grafi portò Eulero alla definizione di una regola generale:

“il circuito chiuso esiste se per ogni nodo esiste un numero pari di lati incidenti ”.

Nel caso specifico dei sette ponti di Königsberg il grafo rappresentativo ha dei nodi *a*, *b*, *c* e *d*:

- a) 3 lati incidenti;
- b) 3 lati incidenti;
- c) 3 lati incidenti;
- d) 5 lati incidenti.

Per il problema di Königsberg non c’è soluzione, ovvero non esiste un circuito chiuso, detto anche circuito euleriano. (Fig.2.3)

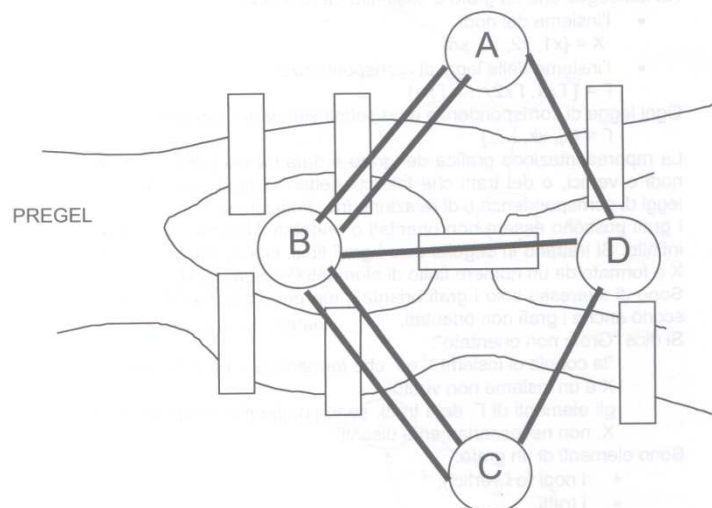


Fig. 2.3

Da allora, con l'evoluzione degli studi di ricerca operativa, i grafi sono utilizzati:

- nel campo militare (per es. definizione della gerarchia);
- in campo industriale (per es. organigramma aziendale o layout funzionale degli impianti produttivi, la WBS);
- in campo trasportistico;
- per la programmazione delle attività di un progetto e quindi dei lavori di costruzione;
- per molteplici applicazioni.

Come definizione matematica di grafo si può dare la seguente: "un *grafo*  $G(X,U)$  consiste di un insieme  $X$  di elementi e di un insieme  $U$  costituito da coppie  $(x,y)$  di tali elementi (non necessariamente distinti).

In questo senso del tutto generale, un grafo può rappresentare, per esempio, le relazioni di parentela fra un gruppo di persone, le regole degli scacchi, le connessioni fra le parti di un'apparecchiatura elettrica. Un grafo  $G(X,U)$  si dice *orientato* quando le coppie di vertici  $(x,y)$  appartenenti all'insieme  $U$  devono considerarsi ordinate. Gli elementi dell'insieme  $X$  possono essere rappresentati geometricamente da punti nel piano, prendendo così il nome di *vertici* o *nodi* del grafo (ai nostri fini ci limiteremo a considerare i grafi aventi un numero finito di vertici). Inoltre se due punti  $x$  ed  $y$  sono tali che  $(x,y) \in U$ , i corrispondenti punti del piano sono collegati da una linea continua ed *orientata verso*  $y$ , chiamata *arco* del grafo.

Illustriamo queste definizioni con un esempio.

Si consideri il grafo  $G(X,U)$  definito dai due seguenti insiemi:

$$\begin{aligned} X &= \{a, b, c, d, e\} \\ U &= \{(a, b), (a, c), (a, d), (b, a), (b, b), (b, c), (c, b), (c, d), (d, c), (d, c), (d, d), (d, e)\} \end{aligned}$$

In accordo con quanto detto prima, la rappresentazione grafica assume la seguente forma (Fig.2.4)

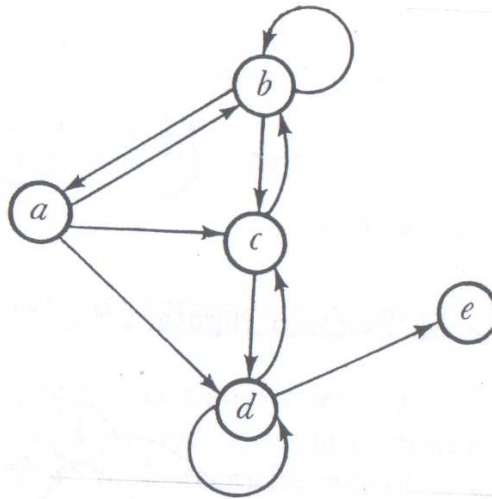


Fig. 2.4

Un *sottografo* di un grafo  $G(X,U)$  è definito come un grafo della forma  $G(S,V)$ , dove:

$$S \subset U$$

$$V = \{(x,y) \mid x,y \in S\}$$

essendo

$$(x,y) = u.$$

Un *grafo parziale* del grafo  $G(X,U)$  è un grafo della forma  $G(X,H)$  dove

$$H \subset U.$$

Si chiama *cammino* (o *percorso* o *itinerario*) una sequenza di archi  $(u_1, u_2, \dots)$  di un grafo  $G(X,U)$  tale che il vertice terminale di ciascun arco coincida con il vertice iniziale dell'arco successivo. Un cammino è *semplice* se nessun arco è percorso più di una volta, si dice invece *composto* nel caso contrario.

La *lunghezza* di un cammino è data dal numero degli archi in sequenza. Un *circuito* è un cammino nel quale il vertice iniziale coincide con il vertice finale. Infine il *cappio* è un circuito di lunghezza 1.

Affinchè la struttura sia gerarchizzata il grafo non deve contenere circuiti. I concetti di arco, cammino, circuito ci permettono di individuare diversi tipi di grafi.

Un grafo è *simmetrico* se due vertici adiacenti  $x$  e  $y$  sono sempre connessi da due archi orientati in senso opposto. Quindi un grafo è simmetrico se:

$$(x,y) \in U \Rightarrow (y,x) \in U$$



Un grafo è *antisimmetrico* se ciascuna coppia di nodi adiacenti è connessa in una sola direzione. Quindi un grafo è antisimmetrico se:

$$(x,y) \in U \Rightarrow (y,x) \notin U$$

Un grafo è *completo* se ciascuna coppia di nodi è connessa in almeno una delle due possibili direzioni. Vale per un grafo completo la seguente relazione:

$$(x,y) \in U \Rightarrow (y,x) \in U$$

Un grafo è *fortemente connesso* se esiste un cammino che unisce ogni coppia arbitraria di nodi.

Un grafo è *valutato* se sono depositate sull'insieme dei suoi nodi e/o archi alcune informazioni quantitative dette *valutazioni*.

Un *reticolo* è un grafo finito, orientato, valutato, senza vertici isolati, con o senza circuiti. Come si vedrà i reticoli CPM (Critical Path Method) e PERT (Program Evaluation Review Technique) sono dei grafi senza circuiti, mentre i reticoli MPM (Metra Potential Method) e GERT (Graphic Evaluation Review Technique) possono avere circuiti.

Anche se nell'ambito delle tecniche reticolari tutti i grafi sono orientati, per completezza si è ritenuto opportuno inserire le definizioni di grafo non orientato o parzialmente orientato.

Rifacciamoci alla definizione di grafo data inizialmente per osservare che le coppie di vertici  $(x,y)$  appartenenti all'insieme  $U$  sono state finora considerate come *ordinate*. Ciò è stato messo in evidenza, nella rappresentazione grafica, dalla linea orientata che unisce i due vertici  $x$  e  $y$  (arco). Nulla impedisce di pensare ad un grafo nel quale tutti o parte dei collegamenti tra i vertici non siano orientati (spigoli). Lo *spigolo* può dunque essere definito come il possibile supporto (sostegno) di un arco e corrisponde ad una coppia non ordinata di vertici. Ne deriva che la presenza di un arco presuppone quella di uno spigolo mentre non è vero il viceversa.

Si chiama *catena* una sequenza di spigoli  $(\underline{u}_1, \underline{u}_2, \dots)$  tali che ciascuno spigolo abbia in comune un vertice col precedente e uno con il successivo. Una catena è *semplice* se nessuno spigolo è percorso per più di una volta, è *composta* nel caso contrario.

Un *ciclo* è una catena che inizia e termina nello stesso vertice.

Un grafo è *connesso* se ciascuna coppia di nodi distinti è unita da almeno una catena.

Un grafo fortemente connesso è quindi sempre connesso, non sempre vale il contrario.

Un grafo è un *albero* se è formato da almeno due nodi, è connesso e non possiede cicli.

Osserviamo che anche i grafi non orientati possono essere valutati nei nodi e/o spigoli.

Possiamo ora definire in modo più rigoroso un *reticolo* dicendo che esso è un grafo finito, orientato, connesso con o senza circuiti, valutato.

I reticoli sono utilizzati come naturale supporto a ogni processo decisionale convenientemente modellabile. In relazione al livello decisionale in essere si possono classificare due categorie di reticoli:

1) reticoli deterministici (detti in letteratura DAN = Deterministic Activity Network), utilizzati a livello operativo. I reticoli DAN non ammettono circuiti.

2) reticoli probabilistici (PAN = Probabilistic Activity Network), utilizzati a livello strategico. I reticoli PAN ammettono circuiti.

In relazione alla strutturazione i reticoli si possono suddividere in:

1. reticoli AOA (Activity on Arc) sono reticoli in cui le attività elementari sono rappresentate dagli archi del grafo e i nodi rappresentano gli eventi rappresentativi degli stati di inizio e fine delle attività stesse. Con questa strutturazione si possono rappresentare reticoli sia DAN che PAN. E' importante rimarcare come in un reticolo DAN gli archi oltre che rappresentare le attività rappresentino anche la sequenza logica;

2. reticoli AON (Activity on Node) sono reticoli in cui le attività elementari sono rappresentate dai nodi del grafo, mentre gli archi rappresentano le relazioni di precedenza tra le attività, ovvero la sola sequenza logica. con questa strutturazione si rappresentano solo reticoli DAN.

Quindi mentre la rappresentazione di tipo AOA consente di rappresentare sia reticoli DAN che PAN, la rappresentazione di tipo AON può raffigurare solo reticoli DAN. Per questo a livello decisionale operativo è possibile scegliere la rappresentazione più consona alla tecnica e agli strumenti utilizzati, in relazione alle capacità del pianificatore.

**Programmazione Reticolare: i reticoli come rappresentazione delle sequenze delle attività**

Il reticolo (o *network*, o diagramma di precedenza) del progetto è una rappresentazione grafica che illustra la sequenza temporale di tutte le attività che devono essere svolte affinché il progetto venga completato. Per applicare gli algoritmi che consentono di definire la durata del progetto e la schedulazione delle singole attività elementari (o *task*) occorre procedere alla costruzione del reticolo. A tal proposito è opportuno ricordare che le attività inserite nei pacchetti di lavoro della WBS finora non sono state caratterizzate dalla sequenza temporale: tramite la sola WBS non si è di fatto in grado di studiare come si collocano le attività nel tempo, e quali relazioni di precedenza sussistono fra loro.

E' dunque ovvio che la WBS costituisce il legame logico per l'applicazione delle tecniche reticolari, la lista completa delle attività de progetto che può essere ricavata direttamente dai pacchetti di lavoro. Ogni pacchetto può quindi essere impiegato per fornire l'elenco delle attività del progetto che saranno dotate di descrizione e di relativo codice WBS.

Obiettivo di una tecnica reticolare è in primo luogo quello di definire il piano delle attività nel rispetto delle scadenze fissate, usando le risorse disponibili e, successivamente, quello di seguire e controllare l'avanzamento del progetto.

L'uso di queste tecniche comporta la parzializzazione delle opere da svolgere nelle singole attività elementari fra loro logicamente interconnesse e permette di conoscere analiticamente la durata complessiva delle opere, i tempi delle fasi costruttive e gli effetti di una qualsiasi modifica a quanto programmato, oltre a dati su costi e uso di risorse.

Le singole fasi nelle quali viene scomposto il progetto sono caratterizzate da eventi e attività elementari. Gli eventi, ai quali in generale viene assegnata una data, sono istanti di tempo in cui si dà inizio e/o termina una attività, mentre l'attività, rappresentando un lavoro, un'operazione, un compito che deve essere completato perché il progetto raggiunga il suo obiettivo, viene caratterizzata da una durata, eventualmente da un costo e un consumo di risorse. In un reticolo, o diagramma di precedenza, ciascuna attività è dotata di un codice identificativo e di una descrizione che ne indica il contenuto. Come in ogni modello, la descrizione deve essere al contempo informativa e priva di ambiguità interpretative. Quando si impiegano pacchetti software per costruire il reticolo occorre ricordare che le definizioni non devono essere particolarmente lunghe, perché si corre il rischio che vengano troncate in fase di reporting. Per supplire a tale carenza è opportuno impiegare definizioni brevi e utilizzare

eventualmente le finestre di commento per esplicitare in modo più dettagliato il contenuto dell'attività e/o i possibili riferimenti documentali.

Una volta scomposto il processo costruttivo si procede alla pianificazione del progetto. Nella fase di pianificazione si provvede ad elencare tutte le azioni elementari prevedibili e a dare loro una correlazione logico-cronologica, vale a dire i legami che rappresentano le dipendenze sequenziali che sussistono fra le diverse attività. Quindi si determinano le attività la cui ultimazione deve necessariamente precedere l'inizio di ciascuna azione esaminata (predecessori), quelle che non potranno iniziare se tale azione non è stata ultimata (successori), e infine quelle attività che si potranno eseguire contemporaneamente. La durata di tempo da assegnare a ciascuna attività può essere stabilita con metodo deterministico o probabilistico.

Note le durate delle singole attività e le loro correlazioni logico-cronologiche si potrà procedere alla determinazione delle loro date di inizio e di fine, ovvero passare alla fase di programmazione.

Un ulteriore input di rilevante importanza alla definizione del reticolo è l'identificazione in fase di pianificazione di momenti chiave del progetto, in corrispondenza dei quali si verificano eventi particolari. Tali eventi, definiti *milestone*, rappresentano attività prive di durata o di durata breve, che, generalmente, vengono graficamente rappresentate con simbologie differenti dalle altre attività del progetto.

Gli strumenti per la programmazione fondamentale sono distinti in relazione al livello decisionale in cui si opera. In generale si distinguono:

- metodologie deterministiche (DET) con algoritmi deterministici per il livello operativo, come il CPM e PDM (Precedence Diagramming Method);
- metodologie stocastiche (STOC) con algoritmi stocastici per il livello strategico come GAN (Generalized Activity Network) e GERT e GERTS (GERT per simulazione);
- metodologia PERT che presenta un reticolo di tipo deterministico (e quindi utilizzabile a livello operativo per la pianificazione), ma supportato da un algoritmo di tipo stocastico, per la fase di analisi temporale.

Per la programmazione reticolare dei lavori sono, quindi, necessarie due fasi di lavoro per il programmatore. Una prima fase di pianificazione, in cui vengono individuate la logica del reticolo per attività elementari e le milestones e una successiva

fase di schedulazione basata sull'algoritmo di calcolo fornito dal metodo di programmazione.

In generale le relazioni logico-cronologiche definiscono tra due o più attività una relazione di successione, di contemporaneità parziale o di contemporaneità totale. La logica del reticolo, "*network logic*", è l'insieme delle relazioni logico-cronologiche tra le attività che consentono di costruire il reticolo. La logica del reticolo è rappresentata dalla struttura formata dai legami tra le attività nel reticolo in modo differente a seconda del tipo di reticolo (Activity On Arc o Activity On Node) e del metodo di programmazione. Nel caso di un reticolo di tipo AON data una logica si individua univocamente un solo reticolo, mentre nel caso di un reticolo del tipo AOA, data una logica è possibile individuare più reticoli differenti, in quanto la rappresentazione non è univoca.

Nel momento in cui si realizza la logica del reticolo si effettuano le scelte realizzative della costruzione. Il processo costruttivo si sviluppa secondo delle regole di carattere generale e dei vincoli più specifici che possono derivare dalla tecnologia impiegata, dalla normativa, dalle politiche realizzative o dalle tradizioni costruttive, dalle risorse disponibili o da qualsiasi altro elemento condizionante.

La regola fondamentale è quella che nella letteratura anglosassone è detta Regola delle 3 "S":

- Sicurezza;
- Spazio;
- Struttura

che individua i requisiti fondamentali del processo costruttivo (Callahan, Quackenbush, Rowings, 1992).

La sicurezza delle condizioni psicofisiche di lavoro nel cantiere è un requisito fondamentale del processo costruttivo. E' noto che la successione delle attività costituisce un elemento fondamentale per garantire la sicurezza delle fasi di lavoro.

La disponibilità dello Spazio necessario per svolgere le attività costruttive è condizione necessaria per lo svolgimento delle operazioni correlate.

La costruzione della Struttura portante dell'opera da realizzare è sempre la prima fase da svolgere nel cantiere ed è quella condizionante per tutte le rimanenti. Normalmente la catena di attività che rappresenta la costruzione della struttura portante costituisce un elemento fondamentale per la definizione della logica del reticolo.

Per quanto riguarda i vincoli alla definizione del processo costruttivo può essere di aiuto una rapida classificazione. I vincoli di dipendenza logico-cronologica tra le attività infatti possono rappresentare diverse tipologie causali che possono essere:

- a) di tipo naturale;
- b) di risorsa;
- c) di progetto.

Per cui le relazioni tra le attività possono essere classificate in relazione a queste categorie:

a. i vincoli naturali sono vincoli di tipo fisico, tecnologico e dipendono dalle tecniche impiegate: sono quelle attività che obbligatoriamente si devono fare per poterne poi fare altre in seguito, in relazione alla tecnologia scelta (es. prima di eseguire il getto di calcestruzzo, saranno stati realizzati i casseri e posato l'acciaio) oppure tempi necessari allo svolgimento di determinati processi difficilmente condizionabili (ad es. lo sviluppo di reazioni chimiche quali la presa del calcestruzzo o l'asciugatura delle vernici);

b. i vincoli di risorsa sono vincoli dovuti al continuo utilizzo delle stesse risorse per eseguire più attività in sequenza. Se si costruisce il reticolo in funzione della disponibilità delle risorse si costruisce sicuramente un modello aderente alla realtà, però relativo ad un preciso contesto produttivo temporale. Ma costruendo il reticolo in funzione del vincolo risorse, non si può sfruttare al massimo i benefici delle tecniche reticolari. E' infatti sempre consigliato, in prima stesura, disegnare il reticolo con l'ipotesi di risorse illimitate, il che equivale a supporre che quando ci sarà necessità di un determinata risorsa in cantiere essa sarà disponibile. L'ottimizzazione dell'uso delle risorse è normalmente oggetto di studio in un secondo momento, e si può ottenere:

- o strutturando la logica del reticolo di dettaglio, ovvero determinando una priorità tra le attività che utilizzano le stesse risorse;
- o con altri metodi, quali ad esempio gli algoritmi per la schedulazione delle risorse.

Inoltre, l'introduzione di vincoli alle risorse rappresenta sempre un'arma a doppia taglio perché in realtà vincola la programmazione e non le risorse.

I vincoli di risorsa possono essere:

- di manodopera, relativi alla disponibilità degli operatori;
- di attrezzatura, riguardano la disponibilità delle attrezzature;

- di impianto, riguardano la produttività degli impianti del cantiere;

c.i vincoli di progetto sono vincoli dovuti ad elementi condizionati di altro tipo, ad esempio particolari scelte costruttive, contesto ambientale, fabbricativo, normativo o contrattuale, ecc. Possono essere suddivisi in vincoli di:

- affollamento: derivano dallo spazio a disposizione nel cantiere. Ogni attività ha bisogno di un suo spazio per l'esecuzione, che se viene violato può causare interferenze alla produzione o addirittura nuovi pericoli;

- sequenza: possono essere dati dal pianificatore in funzione di scelte aziendali o soggettive;

- accesso: sono vincoli di accesso a determinate aree di lavoro;

- contrattuali: sono vincoli imposti dal committente, cioè che derivano da impegni contrattuali;

- tipo ambientale/meteorologico, in relazione a determinate tecnologie utilizzate: sono vincoli relativi alla prevedibile situazione climatica, non certo relativi ad eventi eccezionali o difficilmente prevedibili;

- di sicurezza, in relazione alle misure di prevenzione contro i rischi per la sicurezza e l'igiene dei lavoratori. Sono anche dette misure di coordinamento per la sicurezza del cantiere in quanto vincolano la sequenza delle attività ad un certo modello previsto dal Piano di Sicurezza e Coordinamento dell'opera.

Il tipo e il numero di vincoli individuano le relazioni tra le attività che definiscono la struttura del reticolo, che a sua volta stabilisce le sequenze tra le fasi costruttive specifiche in funzione dell'opera da realizzare, del contesto fisico e normativo, dell'organizzazione di impresa e delle scelte realizzative. Per definire correttamente la struttura del reticolo a volte sarà necessario introdurre delle attività fittizie, ossia un'attività che non dà luogo a consumo di risorse e di tempo ma stabilisce solo un ordine di precedenza tra gli eventi, ovvero implica una dipendenza logica tra le attività. Se è questo è assolutamente necessario nei reticoli di tipo Activity On Arc come il metodo CPM/I-J, si vedrà che l'introduzione delle attività fittizie è più discrezionale nei reticoli di tipo Activity On Node come il metodo PDM. Resta il fatto che l'introduzione di attività fittizie complica il reticolo, specialmente dal punto di vista della comprensione oltre che da quello dei calcoli.

E' molto importante che il reticolo sia chiaro e comprensibile, in quanto i modelli reticolari sono anche mezzi di trasmissione delle informazioni, e che non si perda di vista l'obiettivo finale.

Da quanto fin qui esposto è comprensibile come la stesura del reticolo di programmazione, quindi la definizione della sua logica, possa essere svolta in tre tempi:

I. stesura del reticolo con l'ipotesi di risorse illimitate e i soli vincoli naturali;

II. stesura del reticolo con i vincoli di processo;

III. stesura del reticolo con i vincoli di risorsa.

La fase di definizione della logica del reticolo è la più importante tra le fasi, in quanto costringe i decisori a scelte analitiche, basate su dati oggettivi e quantificabili, che rendono necessaria un'approfondita fase di analisi per la "quantificazione" delle attività necessarie e per la definizione delle fondamentali relazioni di causa ed effetto tra di esse.

E' quindi basilare avere a disposizione un progetto definito in tutte le sue parti, senza indeterminazioni, e conoscere i procedimenti costruttivi corrispondenti alle tecniche individuate. Inoltre la struttura del reticolo dipenderà dai fattori inerenti l'individuazione delle responsabilità, la definizione delle risorse e la qualità dell'esecuzione.

La tecnica reticolare costituisce lo strumento per raggiungere una forma mentale che consente di analizzare scientificamente le attività costruttive scomponendole in attività connesse con relazioni di causa ed effetto ed essendo, però, solo uno strumento se pur efficiente, l'output dipende dai dati di input utilizzati per la programmazione.

L'efficienza del modello realizzato con il reticolo dipenderà dall'aderenza alla realtà delle ipotesi assunte per la sua realizzazione.

La fase successiva di schedulazione dei tempi è dipendente dagli algoritmi utilizzati per risolvere il modello reticolare. Una volta definito l'algoritmo questa fase è risolta con semplici calcolazioni che normalmente sono eseguite dall'elaboratore elettronico.

## **CPM: Critical Path Method**

### **Introduzione**

Il metodo del percorso critico è una tecnica reticolare basata su un algoritmo di calcolo deterministico, che supporta la programmazione dei tempi delle attività del progetti. L'algoritmo di calcolo utilizza le durate deterministiche precedentemente



assegnate alle singole attività e le compone nel rispetto dei vincoli di successione esistenti tra le attività stesse. Nel descrivere l'algoritmo di calcolo del CPM si assume una disponibilità illimitata di risorse. Applicando il CPM sulla sequenza delle attività si ricavano le seguenti informazioni:

- date minime di inizio e di fine per ciascuna attività;
- date massime di inizio e di fine per ciascuna attività;
- data di fine di progetto;
- percorsi critici che rappresentano le sequenze di attività per le quali non è ammesso alcuno scorrimento;
- scorrimenti ammissibili delle attività che giacciono sugli altri percorsi.

### **Cenni storici**

Il lavoro fondamentale del CPM fu effettuato nel 1957 da Morgan R. Walker della Du Pont e da James E. Kelley delle Remington Rand. I due autori si occupavano a quel tempo del problema di migliorare le tecniche di programmazione per i lavori di costruzione e riparazione relativi agli impianti della Du Pont.

Dalla constatazione che tutte le operazioni di tali progetti dovevano essere eseguite rispettando dei vincoli di successione ben definiti, essi trassero la conclusione che la rappresentazione più naturale di un progetto era costituita da un grafo orientato. Si narra che l'impiego del CPM in occasione dei lavori di riparazione della fabbrica dei prodotti chimici Du Pont situata a Louisville (Kentucky) abbia ridotto del 37% la durata dei lavori.

Il grafo proposto da questi autori ed il metodo per individuare il cammino (successione di archi tali da collegare il nodo iniziale con il nodo finale del reticolo) avente la durata più lunga (o *cammino critico*) sono identici a quelli proposti per la tecnica PERT. La differenza fondamentale fra le due tecniche consiste nell'impiego da parte di Kelley e Walker di una stima unica per la durata di ciascuna operazione, senza porsi il problema dell'eventuale incertezza connessa alla sua realizzazione. Un'altra importante differenza risiede nel fatto che, nell'ambito degli studi fatti da Kelley sulla tecnica del CPM, egli mise a punto un metodo per accorciare la durata del progetto sopportando il minimo costo.

Entrambi gli strumenti, CPM e PERT, sono stati divulgati alla comunità scientifica nel 1959; nei successivi quaranta anni di applicazioni in campo industriale hanno subito una serie di

evoluzioni, così che le differenze di impostazione sono a poco a poco scomparse, facendo nascere il cosiddetto metodo I-J.

Il metodo CPM nasce orientato al controllo delle attività, ovvero presenta nella programmazione solo i tempi di inizio e fine delle attività, mentre il metodo PERT nasce orientato al controllo degli eventi, ovvero presenta nella programmazione solo i tempi degli eventi. Quindi il metodo I-J aggiunge al CPM classico la possibilità di definire i tempi di evento, tipica del PERT.

Il metodo I-J mantiene, comunque, l'impostazione deterministica ed operativa del CPM originario, comprensiva della chiara definizione degli scorrimenti ammissibili per le attività.

## **Pianificazione delle scadenze**

### **Regole per la costruzione del reticolo**

#### Rappresentazione delle operazioni mediante archi

Il CPM, nella sua versione originale, si avvale di una rappresentazione grafica (spesso chiamata *americana* proprio per la sua origine) del tipo descritto in Fig.\*\*. In tale grafo i nodi rappresentano degli *eventi*, cioè “degli istanti nel tempo perfettamente definiti, che coincidono con l'inizio e/o la fine di una specifica operazione del progetto”. Ogni evento viene definito mediante un codice.

Ognuno degli archi rappresenta una *operazione*, cioè “l'attività necessaria per raggiungere l'evento-nodo verso il quale l'arco converge”. Per tale ragione le operazioni vengono spesso chiamate semplicemente *attività*. In questo tipo di rappresentazione, gli eventi-nodi vengono individuati mediante un codice alfanumerico, mentre le operazioni vengono individuate i codici dell'evento iniziale e finale oppure mediante un codice alfanumerico associato al relativo arco.

Ad ogni arco è associato un numero in parentesi tonda, che rappresenta la durata prevista della relativa esecuzione.

In questo tipo di rappresentazione gli archi svolgono la duplice funzione di rappresentare sia le operazioni che devono essere eseguite, sia i vincoli di successione esistenti fra gli eventi.

Ne deriva che, quando un evento è definito come fine di due o più operazioni che divergono da un unico evento, è necessario introdurre delle attività “dummy”, che hanno il significato di *attesa che siano completate altre operazioni*. che hanno durata nulla e che sono rappresentate da archi tratteggiati.

Le regole topologiche fondamentali che stanno alla base della costruzione di un reticolo CPM sono sostanzialmente le seguenti:

1. un'operazione non può avere, per definizione, che un solo evento iniziale ed un solo evento finale; mentre un evento può avere più operazioni precedenti e più operazioni seguenti;
2. un evento può dirsi realizzato solo quando sono completate tutte le operazioni che conducono ad esso;
3. la realizzazione di un evento determina l'inizio di tutte le operazioni che iniziano con quell'evento. (In altri termini cioè il CPM è una tecnica che si basa sulla logica AND/AND);
4. un reticolo CPM non può contenere circuiti che costituirebbe un non-senso logico. Capita abbastanza sovente nella pratica di trovarsi di fronte a reticoli CPM nei quali sono stati introdotti per errore dei circuiti. ciò avviene soprattutto quando si tratta di reticoli complessi e realizzati da parte di più individui appartenenti a diverse organizzazioni. Per tale ragione alcuni dei programmi di calcolo CPM contengono delle "routines" che segnalano la presenza dei circuiti. Alcuni di questi programmi sono anche in grado di individuare gli archi appartenenti al circuito.

#### Rappresentazione delle operazioni mediante nodi

In questo tipo di rappresentazione (detta talvolta "europea" per la sua origine) le operazioni vengono indicate con dei nodi, mentre i vincoli di successione sono indicati con archi che collegano opportunamente tali nodi.

Perciò, mentre nella rappresentazione delle attività mediante archi due attività  $a$  e  $b$ , di cui la prima precede la seconda, vengono rappresentate come in Fig.\*, nella rappresentazione mediante nodi, il reticolo assume la configurazione di Fig.\*\*.

I due tipi di rappresentazione sono perfettamente equivalenti nel senso che un qualsiasi progetto rappresentabile in un modo lo è anche nell'altro. E' facile però constatare che la rappresentazione delle attività mediante archi presenta in generale una maggiore complessità; in quanto spesso vengono introdotte delle "dummy", attività piuttosto innaturali, in quanto esse non sono rilevabili durante la prima fase di analisi (consistente nella suddivisione del progetto in operazioni elementari) ma vengono introdotte solo all'atto della stesura del reticolo.

La maggior semplicità di impiego della rappresentazione mediante nodi è, secondo alcuni, ulteriormente convalidata dal fatto che per questa via è possibile evitare l'effettiva costruzione del reticolo, con evidenti vantaggi soprattutto quando il numero di operazioni considerate è dell'ordine delle centinaia o addirittura delle migliaia.

## La pianificazione delle scadenze

### *Procedimento di calcolo nella rappresentazione delle operazioni mediante archi*

Questo tipo di rappresentazione prevede per ogni evento-nodo tre tipi di calcoli fondamentali: il calcolo delle date minime, il calcolo delle date massime e quello dei ritardi ammissibili.

#### CALCOLO DELLE DATE MINIME

Tale calcolo permette di rispondere alla seguente domanda: qual è la data più recente alla quale può realizzarsi un certo evento nell'ipotesi che tutti gli eventi che lo precedono si siano realizzati alla loro data minima?

Facendo riferimento alla figura 3.10 è facile osservare che l'evento iniziale 1 (che non deve essere preceduto da altri eventi) può realizzarsi al momento stesso in cui si dà il via al progetto e cioè, per convenzione, al tempo zero. La data minima di tutti gli eventi iniziali sarà perciò nulla\*:

$$Dm(g) = 0$$

Per tutti gli altri eventi la data minima viene calcolata mediante la relazione:

$$Dm(g) = \max \{Dm(f) + d(fg)\}$$

in quanto l'evento  $g$  non può realizzarsi finché non sono finite tutte le operazioni che convergono su di esso. (Il simbolo  $d(fg)$  rappresenta la durata dell'operazione che ha come evento iniziale  $f$  e come evento finale  $g$ ).

Ne deriva che la  $Dm$  di un evento può essere calcolata solo dopo che sono state calcolate le  $Dm$  degli eventi immediatamente precedenti.

A partire dagli eventi iniziali è così possibile calcolare la  $Dm$  di tutti gli altri eventi.

La data minima di fine del progetto sarà la massima fra le  $Dm$  relative agli eventi finali.

#### CALCOLO DELLE DATE MASSIME

Tale calcolo ha lo scopo di rispondere alla seguente domanda: qual è la data più remota alla quale può realizzarsi un certo evento senza ritardare la data di completamento del progetto?

Per gli eventi finali (che non sono, cioè, seguiti da nessun altro evento) la data massima coincide con la data minima di fine del progetto.

In generale per gli eventi finali si avrà perciò

$$DM(g) = \max Dm(f)$$

dove l'indice  $f$  è esteso a tutti gli eventi finali.

Per tutti gli altri eventi la data massima viene calcolata mediante la relazione

$$DM(g) = \min_h \{DM(h) - d(g, h)\}$$

nella quale l'indice  $h$  è esteso a tutti gli eventi che seguono immediatamente l'evento  $g$ .

Ne deriva che la  $DM$  di un evento può essere calcolata solo dopo che sono note le  $DM$  degli eventi immediatamente successivi: partendo dagli eventi finali (o dall'evento finale) e procedendo a ritroso è così possibile calcolare la  $DM$  di tutti gli altri eventi.

#### DEFINIZIONE DI CAMMINO CRITICO

Esistono degli eventi per i quali si ha

$$DM(g) = Dm(g)$$

Questi eventi si dicono *eventi critici*, in quanto un ritardo anche di una sola unità di tempo della loro realizzazione implica necessariamente un ritardo nel completamento del progetto. Il cammino che passa per tali eventi è detto *cammino critico* ed è facile verificare che esso è il cammino che ha la durata più lunga fra tutti quelli che uniscono un evento iniziale con un evento finale del reticolo.

#### CALCOLO DEI RITARDI AMMISSIBILI

Per tutti gli eventi non critici vale la relazione

$$DM(g) > Dm(g)$$

che implica la possibilità, per tali eventi, di subire un ritardo nella loro realizzazione, senza per questo determinare *necessariamente* un ritardo nella data di completamento del progetto.

#### *Ritardo totale*

Si chiama ritardo totale di un evento l'intervallo massimo di tempo di cui può essere ritardata la sua realizzazione (a partire dalla sua data minima) senza determinare un ritardo nel completamento dell'intero progetto,

Il ritardo totale del generico evento può perciò essere calcolato mediante la relazione:

$$Rt(g) = DM(g) - Dm(g)$$

#### *Ritardo libero*

Si chiama ritardo libero di un evento l'intervallo massimo di tempo di cui può essere rimandata la sua realizzazione (a partire dalla sua data minima) senza per questo impedire che tutti gli

eventi immediatamente successivi si realizzino alla loro data minima.

Il calcolo del ritardo libero per un generico evento può essere effettuato mediante la relazione:

$$Rl(g) = \min_h \{Dm(h) - d(gh)\} - Dm(g)$$

### *Ritardo indipendente*

Si chiama ritardo indipendente di un evento l'intervallo massimo di tempo di cui può essere ritardata la sua realizzazione nel caso si verifichi la situazione più sfavorevole e cioè:

- gli eventi che lo precedono immediatamente hanno luogo alla loro data massima
- gli eventi che lo seguono immediatamente si realizzano alla loro data minima.

Questo tipo di ritardo può essere calcolato mediante la relazione

$$Ri(g) = \max \{0, \min_h [Dm(h)] - d(gh) - \max_f [DM(f) + d(fg)]\}$$

### Procedimento di calcolo nella rappresentazione delle operazioni mediante nodi

Anche questo tipo di rappresentazione prevede l'esecuzione di tre calcoli fondamentali: quello delle date minime di fine (o di inizio), quello delle date massime di fine (o di inizio) e quello dei ritardi ammissibili.

### CALCOLO DELLE DATE MINIME DI FINE (O DI INIZIO)

Tale calcolo permette di rispondere alla seguente domanda: qual è la data più recente alla quale potrà terminare (o iniziare) ogni operazione nell'ipotesi che tutte quelle che la precedono inizino il prima possibile?

Le due operazioni iniziali  $a$  e  $b$  (che non devono cioè essere precedute da altre operazioni) possono iniziare al momento stesso in cui sarà dato il via al progetto, cioè al tempo zero. Ne deriva che la loro data minima di fine  $Dmf$  (scritta in parentesi quadra) è uguale alla loro durata  $d$  (scritta in parentesi rotonda). Per le loro operazioni iniziali si avrà dunque

$$Dmf(j) = d(j)$$

Per tutte le altre operazioni la data minima di fine viene calcolata mediante la seguente relazione:

$$Dmf(j) = \max_i Dmf(i) + d(j)$$

in quanto l'operazione  $j$  non può iniziare finché non sono finite tutte le operazioni  $i$  che la precedono immediatamente. Ne deriva

che la data  $Dmf$  di una operazione può essere calcolata solo dopo che sono state calcolate le  $Dmf$  delle operazioni immediatamente precedenti. Procedendo nel modo descritto, cioè calcolando le  $Dmf$  per quelle operazioni per le quali è man mano possibile, si determinerà la  $Dmf$  di tutte le operazioni e quindi anche di quelle finali.

La data minima di fine del progetto sarà la massima fra le  $Dmf$  delle operazioni finali.

Procedendo in modo analogo sarà facile constatare che le date minime di inizio sono pari a:

$$Dmf(j) = 0$$

per le operazioni iniziali ed a:

$$\begin{aligned} Dmi(j) &= \max_i \{Dmi(i) + d(j)\} = \\ &= \max_i Dmf(i) \end{aligned}$$

per tutte le altre. Vale infatti la relazione

$$Dmi(j) = Dmf(i) - d(j)$$

#### CALCOLO DELLE DATE MASSIME DI FINE (O DI INIZIO)

Tale calcolo ha lo scopo di rispondere alla domanda: qual è la data più remota alla quale una certa operazione può essere completata senza ritardare la data di completamento del progetto? Per le operazioni finali la data massima di fine  $DMf$  coincide con la data minima di fine progetto. Per le operazioni finali si avrà perciò:

$$DMf(j) = \max_i Dmf(i)$$

dove l'indice  $i$  è esteso a tutte le operazioni finali.

Per tutte le altre operazioni si avrà:

$$\begin{aligned} DMf(j) &= \min_k \{Dmf(k) - d(k)\} = \\ &= \min_k Dmi(k) \end{aligned}$$

in quanto l'operazione  $j$  può finire al più tardi nell'istante nel quale deve necessariamente iniziare la più recente fra le operazioni  $k$  che seguono immediatamente  $j$ .

Da ciò deriva che la  $DMf$  delle operazioni di un progetto deve essere calcolata procedendo a ritroso dalle operazioni finali verso le operazioni finali.

Procedendo in modo analogo a quanto si è fatto per le date massime di fine sarà facile constatare che, per le operazioni finali, le date massime di inizio  $DMi$  sono pari a

$$DMi(j) = \max_i Dmf(i) - d(j)$$

(dove l'indice  $I$  è esteso a tutte le operazioni costituenti il progetto).

Per tutte le altre operazioni si avrà invece:

$$DMi(j) = \min_k Dmi(k) - d(j)$$

(dove l'indice  $k$  è esteso a tutte le operazioni che seguono immediatamente l'operazione  $j$ ).

Vale naturalmente la relazione:

$$DMi(j) = DMf(j) - d(j).$$

#### DEFINIZIONE DI CAMMINO CRITICO

Si può notare che esistono delle operazioni per le quali si ha

$$Dmf = DMf.$$

Le operazioni che soddisfano a questa condizione si dicono *operazioni critiche*, in quanto un ritardo anche di una sola unità di tempo nella loro esecuzione implica necessariamente un ritardo nel completamento del progetto.

Il cammino  $a, d, f, i$  che comprende tali operazioni è detto: *cammino critico*.

#### CALCOLO DEI RITARDI AMMISSIBILI

Per tutte le operazioni non critiche vale la relazione:

$$DMf(j) > Dmf(j)$$

che implica la possibilità, per tali operazioni, di subire un ritardo nella loro esecuzione, senza per questo determinare necessariamente un ritardo nella data di completamento del progetto.

Data la notevole importanza operativa dei ritardi ammissibili, considereremo ora i principali tipi di ritardo aggiungendo qualche considerazione di carattere operativo.

#### *Ritardo totale*

Si chiama ritardo totale di un'operazione l'intervallo massimo di tempo di cui può essere rimandata la fine dell'operazione (a partire dalla data minima di fine) senza determinare un ritardo di completamento dell'intero progetto. Il calcolo di questo tipo di ritardo, per una generica operazione, viene effettuato mediante la seguente relazione:

$$Rt(j) = DMf(j) - Dmf(j)$$

Da un punto di vista organizzativo, si può osservare che il responsabile dell'esecuzione di una certa attività può disporre di tutto il ritardo totale, soltanto se si verificano le due seguenti condizioni:



- le operazioni che condizionano l’inizio dell’operazione in questione sono completate entro la loro data minima di fine;
- le operazioni che sono condizionate dalla fine dell’operazione in questione vengono eseguite a partire dalla loro data massima di inizio.

Poiché è raro che queste condizioni siano entrambe verificate, si può concludere che l’impiego razionale del ritardo totale pone dei delicati problemi.

### *Ritardo libero*

Si chiama ritardo libero di un’operazione l’intervallo massimo di tempo di cui può essere rimandata la fine dell’operazione stessa (a partire dalla sua data minima di fine), senza per questo impedire che tutte le operazioni immediatamente successive vengano eseguite a partire dalla loro data minima di inizio.

Il calcolo del ritardo libero per una generica operazione viene effettuato mediante la seguente espressione:

$$Rl(j) = \min_k Dmi(k) - Dmf(j)$$

Dalla definizione precedente discendono immediatamente i limiti di impiego del ritardo libero nelle applicazioni concrete delle tecniche reticolari. Alcuni autori considerano, oltre al ritardo libero “a sinistra” appena definito, anche il ritardo libero “a destra” definito nel seguente modo

$$Rld(j) = DMi(j) - \max_i DMf(i)$$

in alcuni casi il ritardo libero viene definito come il valore più piccolo fra i due precedentemente definiti. Si farà riferimento al solo ritardo libero “a sinistra” indicato con:  $Rl(j)$ .

### *Ritardo concatenato*

Si chiama ritardo concatenato di un’operazione quella quota di ritardo totale che viene sottratta all’operazione in questione, qualora le operazioni successive siano eseguite a partire dalla data minima di inizio. Questo tipo di ritardo può essere calcolato mediante la relazione:

$$Rc(j) = DMf(j) - \min_k Dmi(k)$$

Da quanto precede risulta che vale la relazione:

$$Rt(j) = Rl(j) + Rc(j)$$

Dal punto di vista organizzativo, il calcolo del ritardo concatenato non porta ovviamente nessuna informazione nuova.

### *Ritardo indipendente*

Si chiama ritardo indipendente di un'operazione l'intervallo massimo di tempo di cui può essere ritardato l'inizio (o la fine) dell'operazione stessa nel caso si verifichi la situazione più sfavorevole, e cioè:

- le operazioni precedenti vengono completate alla loro data massima di fine;
- le operazioni successive vengono iniziate alla loro data minima di inizio.

Questo ritardo può essere calcolato mediante la relazione:

$$Ri(j) = \max \{0, \min_k Dmi(k) - \max_i DMf(i) - d(j)\}.$$

Da un punto di vista organizzativo la conoscenza dei ritardi indipendenti presenta indubbiamente un notevole interesse in quanto dà ai responsabili di ogni operazione una misura della rigidità dei legami tra l'operazione in questione e tutte quelle ad essa direttamente collegate.

### Considerazioni comparative sulle due forme di pianificazione delle scadenze

Non è facile esprimere un giudizio nettamente preferenziale nei confronti di una di queste due forme di rappresentazione.

Al fine di dare un quadro il più possibile completo dei relativi vantaggi e svantaggi, vengono presi in considerazione tre punti di vista.

#### **Punto di vista formale**

Da questo angolo visuale sembrerebbe preferibile tener conto della dimensione temporale propria delle attività rappresentandole per mezzo di elementi, come gli archi, dotati di una dimensione spaziale. Analogamente sembrerebbe naturale rappresentare gli eventi che hanno una dimensione temporale nulla con elementi, come i nodi, privi di una dimensione spaziale.

Ne deriverebbe l'opportunità di rappresentare le operazioni mediante archi aventi lunghezza proporzionale alla durata dell'operazione stessa. Sfortunatamente non esiste a priori nessuna ragione per pretendere che la durata delle operazioni rispetti la disuguaglianza triangolare (per la quale, come è noto, la lunghezza relativa ad un lato di un triangolo è minore della somma delle lunghezze relative agli altri due).

Per rispettare la proporzionalità di cui sopra è perciò necessario ricorrere ad opportuni accorgimenti grafici che presentano

peraltro l'inconveniente di appesantire notevolmente il lavoro di costruzione del reticolo, soprattutto in presenza di un grande numero di attività.

### **Punto di vista organizzativo**

Se si considera il problema da questo punto di vista è facile constatare come, nella realtà, una persona sia normalmente responsabile di una o più operazioni e non di uno o più eventi. Sembrerebbe perciò naturale fornire i risultati dei calcoli facendo riferimento alle operazioni e non agli eventi.

I risultati ottenuti dalla tecnica di rappresentazione delle attività mediante archi si riferiscono invece agli eventi.

Ma anche in questo caso l'argomentazione non è determinante.

Il passaggio dai risultati relativi agli eventi, ai risultati relativi alle attività (e viceversa) non presenta, infatti, nessuna particolare difficoltà, come è facile constatare immediatamente.

Si inizia con il considerare il calcolo delle date minime di fine (o di inizio).

Dalle definizioni fornite in precedenza deriva immediatamente:

$$f \longrightarrow g$$

$$Dmi(f-g) = Dm(f) \text{ e quindi } Dmf(f-g) = Dmi(f-g) + d(f-g)$$

Per quanto attiene al calcolo delle date massime di fine (o di inizio), dalle definizioni date discende direttamente:

$$DMf(f-g) = DM(g) \text{ e quindi } Dmi(f-g) = DMf(f-g) - d(f-g)$$

Relativamente al calcolo dei ritardi ammissibili, non è necessario aggiungere altro poiché questi sono definiti in termini di date minime e massime di inizio e fine.

Le considerazioni organizzative di cui sopra, insieme alla facilità con la quale si può passare dai risultati riferiti agli eventi a quelli riferiti alle attività, hanno fatto sì che tutta la letteratura più recente ed i programmi generalizzati per gli elaborati elettronici facciano riferimento ai risultati relativi alle operazioni, anche quando la rappresentazione impiegata è quella per archi.

### **Punto di vista operativo**

Come si è accennato, una delle argomentazioni fornite dagli estimatori della rappresentazione delle attività mediante nodi si basa sull'affermazione che seguendo questa via è possibile evitare l'effettiva costruzione del reticolo con evidenti risparmi di tempo, soprattutto in presenza di reticoli complessi.

L'argomentazione sembrerebbe inattaccabile. In realtà chi ha avuto modo di seguire un gran numero di applicazioni in questo campo ha potuto constatare quanto difficilmente l'utente di queste tecniche sia disposto a rinunciare, appunto, alla costruzione del reticolo. Questa riluttanza viene giustificata da un certo numero di ragioni:

a. In fase di preparazione dei dati iniziali si richiedono un certo numero di rimaneggiamenti per tener conto dei vincoli temporali, economici e di risorsa che gravano sul progetto. E' indubbio che il reticolo costituisce in questa fase una valida base di discussione fra i vari gruppi interessati. In tal modo ciascuna componente operativa raggiunge una maggiore consapevolezza del ruolo che le è stato affidato con evidenti effetti positivi sul piano della motivazione personale e di gruppo.

b. Il reticolo ha una sua evidenza grafica che è molto importante anche ai fini di valorizzare l'attività di programmazione. La sua costruzione permette infatti di mettere in evidenza le interdipendenze esistenti fra gli insiemi di attività affidati ai diversi enti, fornendo così un efficace quadro di sintesi, in genere molto gradito agli organi direttivi.

c. Il reticolo è immediatamente accessibile per piccoli aggiornamenti, per apportare correzioni e per verificare le conseguenze di una certa decisione. L'impiego dell'elaboratore richiede sempre un minimo di tecnicismo (perforazione di schede, attesa che la macchina sia disponibile, ecc.) la soluzione al problema consiste nell'impiego di sistemi interattivi uomo-macchina. Ma è fin troppo evidente che non tutti gli utenti possono permettersi la disponibilità di strumenti tanto raffinati.

d. Man mano che i lavori procedono ed il numero di operazioni ancora da realizzare si riduce, diventa sempre più facile controllare manualmente l'avanzamento dei lavori. Tale controllo manuale richiede ovviamente l'impiego di un reticolo.

In sostanza sembra di poter concludere che la pretesa necessità di disporre di un supporto grafico sia valida soprattutto per i principianti, cioè per quelle aziende che hanno iniziato da poco l'uso delle tecniche reticolari.

### **Aspetto algoritmico**

La rappresentazione delle attività mediante nodi lascia agli archi il solo compito di rappresentare i vincoli di successione temporale.

In tal modo è possibile attribuire agli archi un valore opportunamente definito, fornendo le basi per una generalizzazione della tecnica.

*Risultati forniti dal CPM pianificazione scadenze: validità e limiti*

In fase di programmazione iniziale dei lavori (*programmazione di massima*), questa tecnica fornisce in sostanza tre risultati.

Il primo di questi consiste in un'analisi approfondita della struttura del progetto, attraverso l'individuazione di un certo numero di macro-operazioni e dei vincoli di successione esistenti fra di esse.

Tale analisi si materializza nella costruzione di un reticolo, secondo una delle due tecniche precedentemente illustrate.

Un altro risultato consiste nella possibilità fornita da questa tecnica di tener conto dei vincoli temporali imposti sulla data di fine del progetto ed, eventualmente, sulle tappe intermedie di realizzazione.

Questo risultato si realizza attraverso il calcolo delle date minime di fine di ciascuna operazione secondo la procedura già descritta.

Infine, l'impiego di questa tecnica permette l'individuazione delle operazioni critiche ed, in generale, la valutazione dei vari tipi di ritardo con le conseguenti considerazioni di carattere operativo di cui si è già parlato.

In fase di realizzazione dei lavori (*programmazione esecutiva*) questa tecnica fornisce sostanzialmente i seguenti contributi. Innanzitutto costituisce il supporto per un'esplosione delle macro-operazioni e dei relativi vincoli di successione fatta allo scopo di raggiungere il necessario grado di dettaglio. Questo processo si realizza mediante la costruzione di un reticolo derivato da quello relativo alla programmazione di massima.

In secondo luogo permette di valutare lo stato di avanzamento fisico dei lavori. ciò può realizzarsi derivando un nuovo reticolo da quello precedente, mediante l'eliminazione delle operazioni già eseguite e l'eventuale revisione dei dati relativi alle operazioni in corso e a quelle ancora da iniziare. Il calcolo CPM pianificazione scadenze eseguito su questo nuovo reticolo permette di determinare la nuova data prevista di fine dei lavori.

In terzo luogo la tecnica considerata fornisce una nuova valutazione dei vari tipi di ritardo che possono essere utilizzati ai fini della più efficace razionalizzazione nei confronti dei futuri lavori.

Passando ora a considerare la validità ed i limiti della tecnica in questione si può affermare che essa costituisce uno strumento importante di pianificazione per i vantaggi diretti ed indiretti che comporta e per il fatto di costituire praticamente un passo obbligato per arrivare all'impiego di tecniche più sofisticate.

Per quanto riguarda il contributo fornito da questa tecnica dal punto di vista organizzativo si verifica una maggiore consapevolezza di ogni componente operativa del ruolo che le è stato affidato ed una evidenziazione di un preciso quadro di sintesi per gli organi direttivi.

Non va infine dimenticato che questa tecnica fornisce un valido strumento di previsione in quanto permette di valutare con sufficiente approssimazione le date previste di fine dei vari progetti in funzione dell'effettivo avanzamento dei lavori e degli altri elementi emersi durante la realizzazione del progetto. In tal modo la Direzione ha la possibilità di intervenire tempestivamente in vista del raggiungimento degli obiettivi aziendali.

Al fine di non mitizzare l'impiego del CPM pianificazione scadenze, è necessario metterne in evidenza anche i limiti di applicazione.

Innanzitutto occorre osservare che l'impiego di questa tecnica richiede la realizzazione di un circuito informativo che permetta di aggiornare con sufficiente tempestività i dati sullo stato di avanzamento dei lavori. Soltanto la rielaborazione periodica di questi dati permette infatti di seguire con la necessaria continuità l'andamento dei lavori.

Un esame approfondito di questo argomento va al di là dei limiti del presente lavoro che è orientato alle tecniche e non agli aspetti organizzativi. Perciò si può osservare la creazione del circuito informativo che non è un'impresa di poco conto. Essa comporta infatti la creazione di un organo (uno staff direzionale) con le competenze ed i poteri necessari per gestire il circuito informativo ed il sistema di pianificazione da esso alimentato.

In qualche senso l'impiego efficace di queste tecniche richiede l'acquisizione di una certa mentalità aziendale cui come gestire i progetti.

E' facile immaginare come ciò sia possibile solo quando è la stessa alta direzione a farsene promotrice. In caso contrario lo scetticismo si trasmetterà fatalmente ai livelli inferiori determinando il fallimento dell'innovazione organizzativa.

Questa tecnica inoltre non tiene conto in modo esplicito né dei problemi di pianificazione e ottimizzazione dei costi, né di quelli connessi all'impiego efficace di risorse necessariamente limitate. In una fase iniziale i problemi relativi ai costi ed alle risorse possono essere trattati manualmente ma è fuori di dubbio che è necessario procedere verso l'impiego di tecniche più impegnative ma che tengono nel debito conto questi elementi che sono essenziali per una corretta programmazione dei lavori.

### **Ottimizzazione delle risorse con vincoli di disponibilità**

Nell'analisi fatta fino ad ora non si è tenuto conto *in modo esplicito* dei problemi connessi all'impiego delle risorse.

Si è detto "in modo esplicito" perché in realtà durante la stesura del reticolo il buon programmatore tiene conto non solo dei vincoli di successione aventi natura logica, ma anche di quelli derivanti dall'impiego delle risorse. D'altra parte è facile immaginare che il programmatore, per quanto esperto, si troverà a mal partito di fronte a problemi che riguardano un grande numero di operazioni e numero risorse: la situazione tenderà a divenire insostenibile in presenza di più progetti contemporanei. In questo senso si pone perciò il problema di fornire uno strumento che lo aiuti a svolgere meglio l'attività di programmazione dei lavori.

Per quanto riguarda il caso in cui la disponibilità delle risorse costituisce un dato del problema, il contributo fornito dalle tecniche reticolari si articola in tre livelli.

A *livello manuale*, mediante il cosiddetto *caricamento delle risorse*, che consiste sostanzialmente nell'impiegare i risultati forniti dalla pianificazione delle scadenze, per determinare i diagrammi di carico relativi alle varie risorse impiegate.

A *livello euristico*, mediante la ricerca di un piano di lavoro che sfrutti in modo efficace le risorse con l'obiettivo di finire i lavori al più presto possibile.

A *livello analitico*, mediante l'impiego di opportuni algoritmi di ottimizzazione che forniscono la soluzione ottima, cioè quella che corrisponde al piano ottimo di impiego delle risorse, ai fini della minimizzazione del tempo impiegato per completare i lavori previsti.

### **Caricamento delle risorse**

Supponiamo che un programmatore abbia pianificato l'esecuzione di un progetto applicando il CPM-pianificazione scadenze. Supponiamo ancora che lo stesso programmatore, basandosi sulla

sua esperienza, abbia cercato di strutturare il reticolo in modo da tener conto non solo dei vincoli di successione aventi natura tecnica, ma anche dei vincoli connessi alla limitata disponibilità di risorse.

E' abbastanza naturale che egli, giunto a questo punto, sia interessato a verificare se gli sforzi manuali, da lui fatti per impiegare le risorse disponibili nel miglior modo, abbiano sortito il loro effetto.

Il caricamento delle risorse ha appunto lo scopo di soddisfare questo desiderio.

Dopo aver effettuato il caricamento delle risorse, si potrebbe verificare un sovraccarico per una risorsa; sulla base delle informazioni fornite dal caricamento delle risorse il programmatore può prendere una o più delle seguenti decisioni:

1. spostare manualmente le date delle operazioni che cadono nei periodi di punta allo scopo di ridurre e possibilmente eliminare i sovraccarichi;
2. verificare se il contesto aziendale permette di reperire risorse straordinarie per i periodi di punta, oppure se è possibile affidare all'esterno dell'azienda la realizzazione di alcune attività;
3. ritardare l'esecuzione di uno o più progetti o addirittura rinunciare alla costruzione di una o più opere.

In ogni caso, dopo aver modificato i dati del problema, il programmatore potrà ricorrere nuovamente al caricamento delle risorse per controllare i risultati ottenuti.

Questo modo semi-manuale di procedere presenta da un lato il vantaggio di essere molto elastico (nel senso che lascia al programmatore ampio margine di azione), dall'altro lo svantaggio di dar luogo ad un notevole dispendio di tempo.

In prima approssimazione si può concludere dicendo che il caricamento delle risorse costituisce un valido strumento, soprattutto quando le dimensioni dei lavori da programmare (numero di progetti, numero di attività per progetto, numero di risorse) sono contenute entro limiti modesti.

### **Ricerca euristica della soluzione migliore**

Un passo successivo rispetto al caricamento delle risorse è rappresentato dai metodi euristici di allocazione, cioè da quei metodi che forniscono delle "buone" soluzioni attraverso procedimenti di calcolo accettabili dal punto di vista dei tempi di esecuzione. Le tecniche impiegate in questo contesto possono procedere in parallelo o in serie.



Le prime allocano per ogni intervallo di tempo più attività contemporaneamente sulle varie risorse.

Le tecniche seriali procedono invece allocando un'attività alla volta per la sua intera durata.

Le tecniche di questo secondo tipo sono quelle che hanno avuto maggior successo per la loro semplicità e per i risultati forniti, che si sono dimostrati decisamente buoni in rapporto, ovviamente, al tempo di calcolo necessario.

Nel seguito ci si concentrerà esclusivamente sulle tecniche seriali. Data la loro natura risulta immediatamente chiaro che il nocciolo del problema risiede nell'ordine con il quale le operazioni vengono caricate sulle rispettive risorse.

Si considerano tre algoritmi ordinati in ordine crescente di complessità e quindi il tempo di calcolo necessario.

### Definizione dei simboli

$Dmi(j)$  = data minima di inizio dell'attività  $j$

$DMi(j)$  = data massima di inizio dell'attività  $j$

$Dmf(j)$  = data minima di fine dell'attività  $j$

$DMf(j)$  = data massima di fine dell'attività  $j$

$d(j)$  = durata dell'attività  $j$

$Dpi(j)$  = data pianificata di inizio dell'attività  $j$ , tenuto conto della

disponibilità di risorsa per quell'attività

$Dpf(j)$  = data pianificata di fine per l'attività  $j$ ; tenuto conto che le

operazioni non si possono spezzare, si avrà:

$$Dpf(j) = Dpi(j) + d(j)$$

$Dai(j)$  = data aggiornata di inizio dell'attività  $j$ , tenuto conto della

disponibilità di risorsa per le operazioni precedenti.

$$Dai(j) = \max_{i \in P(j)} Dpf(i)$$

$Rr(j)$  = ritardo residuo dell'attività  $j$  dopo che essa è stata allocata.

Per cui si avrà:

$$Rr(j) = DMf(j) - Dpf(j)$$

### Algoritmi N.1

L'algoritmo procede secondo i seguenti cinque passi:

1. le operazioni relative ai progetti vengono ordinate secondo le seguenti chiavi:

-  $DMf(j)$  crescente

- $Dmi(j)$  crescente
- $d(j)$  decrescente

In altri termini, si considerano prima le operazioni che hanno  $DMf$  più piccola e poi via via tutte le altre. Se due o più operazioni hanno la stessa  $DMf$  si preferisce quella che ha la  $Dmi$  più piccola.

Se si incontrano due o più operazioni che hanno la stessa  $DMf$  e la stessa  $Dmi$  si preferisce quella che ha durata più lunga.

Se infine esistono due o più operazioni che presentano gli stessi gli stessi valori per le tre grandezze considerate, si carica in un ordine qualsiasi, per esempio in ordine crescente del codice di riconoscimento relativo alle varie attività.

2. Per tutte le operazioni si pone provvisoriamente la data pianificata di inizio ( $Dpi$ ) uguale alla data aggiornata di inizio ( $Dai$ ), uguale alla data minimo di inizio ( $Dmi$ ).

3. Si considera la prima operazione (secondo l'ordine prima stabilito) che non è stata ancora caricata e si verifica se le risorse disponibili permettono la sua realizzazione a partire dalla  $Dai$ . Se ciò è possibile, l'operazione viene caricata a partire da questa data e si avrà che la data pianificata di inizio ( $Dpi$ ) coincide con la  $Dai$ .

4. In caso contrario si ricerca, a partire dalla data immediatamente successiva alla  $Dai$ , qual è la data minima a partire dalla quale è possibile realizzare l'operazione in questione.

5. Si aggiorna la  $Dai$  per ciascuna delle operazioni immediatamente successive all'operazione  $j$  (che è stata appena caricata) applicando la relazione

$$Dai(k) = \max_i \{Dai(k); Dpi(j) + d(j)\}$$

Si rientra poi a punto 3.

Il procedimento si conclude quando sono state allocate tutte le operazioni.

Questo algoritmo fornisce risultati che appaiono piuttosto buoni.

### Algoritmi N.2

L'algoritmo procede secondo i seguenti quattro passi:

1. Le operazioni relative ai progetti vengono ordinate per

$$DMf(j) \text{ crescente}$$

2. Per tutte le operazioni si pone provvisoriamente

$$Dpi(j) = Dai(j) = Dmi(j)$$

3. Si determina l'insieme  $I$  di tutte le operazioni ancora da allocare che hanno la stessa  $Dmf$  minima.

Per ognuna di queste operazioni si determina la  $Dpi$  procedendo per tentativi a partire dalla  $Dai$  e successivamente si ordinano le operazioni appartenenti ad  $I$  secondo le seguenti chiavi

$$Dpi(j) \text{ crescente} \\ d(j) \text{ decrescente}$$

Si procede poi a caricare effettivamente alla sua  $Dpi$  l'operazione che viene per prima nell'ordinamento appena effettuato.

4. Si determina la  $Dai$  per ciascuna delle operazioni immediatamente successive all'operazione  $j$  (che è stata appena caricata), applicando la relazione

$$Dai(k) = \max_j \{Dai(k); Dpi(j) + d(j)\}$$

Si rientra poi al punto 3.

Il procedimento si conclude quando sono state allocate tutte le operazioni.

Questo algoritmo può richiedere diversi tentativi di allocazione per ogni attività e quindi comporta una mole di calcoli superiore rispetto a quello precedente.

Da esperienze effettuate, è risultato infatti che il tempo di calcolo richiesto è da tre a sei volte maggiore del tempo richiesto dal primo algoritmo ma fornisce normalmente risultati un po' migliori. In sintesi si può dire che questo secondo metodo è da preferire al primo.

### Algoritmi N.3

L'algoritmo si realizza attraverso i seguenti quattro passi:

a) Per tutte le operazioni si pone provvisoriamente

$$Dpi(j) = Dai(j) = Dmi(j)$$

b) Si determina l'insieme  $I$  di tutte le operazioni che sono immediatamente caricabili. (Inizialmente questo insieme è costituito dalle sole attività iniziali, successivamente ne entreranno a far parte tutte quelle operazioni le cui precedenti siano già state caricate).

Per ciascuna di queste operazioni si determina la  $Dpi$  e si calcola quindi il relativo ritardo residuo

$$Rr(j) = Dmi(j) - Dpi(j)$$

c) Si ordinano le operazioni appartenenti ad  $I$  secondo le seguenti chiavi:

$$Rr(j) \text{ decrescente} \\ d(j) \text{ crescente}$$

e si carica poi definitivamente alla sua  $Dpi$  l'operazione che viene per prima nell'ordinamento appena effettuato.

d) Si determina la  $Dai$  per ciascuna delle operazioni immediatamente successive all'operazione  $j$  (che è stata appena caricata) applicando la relazione

$$Dai(k) = \max\{Dai(k); Dpi(j) + d(j)\}$$

Si rientra poi al punto 3.

Il procedimento si conclude, ovviamente, quando sono state caricate tutte le operazioni.

Anche questo algoritmo richiede diversi tentativi di allocazione per ogni attività e comporta una mole di calcoli superiore non solo al primo metodo ma anche al secondo.

Dalle esperienze effettuate, questo metodo richiede infatti dalle sei alle dodici volte il tempo di calcolo necessario al primo algoritmo.

A questo maggior onere *non* corrisponde normalmente un miglioramento nella qualità dei risultati forniti.

Sembra perciò di poter concludere che questo terzo metodo sia da scartare.

### **Il problema delle priorità fra i progetti**

Gli algoritmi descritti finora si basano sull'ipotesi che i progetti considerati abbiano tutti la stessa priorità e per tale ragione prendono in esame contemporaneamente tutte le operazioni appartenenti ai diversi progetti.

Il modo più naturale per tenere conto di un diverso grado di priorità consiste nell'applicare serialmente gli algoritmi precedente trattando i progetti uno dopo l'altro, ovviamente in ordine decrescente di priorità.

Da un punto di vista generale, l'introduzione delle priorità ritarda complessivamente le date pianificate di fine. Le conseguenze nei confronti di ogni singolo progetto, dipendono dalla distribuzione nel tempo delle risorse ancora disponibili e delle richieste dal progetto stesso.

### **Ricerca analitica della soluzione ottimale**

La ricerca del piano di esecuzione di un progetto che minimizza il suo tempo di realizzazione (tenendo ovviamente conto della limitata disponibilità di risorse) può essere affrontata con la tecnica della programmazione lineare a numeri interi.

IPOTESI

La formulazione del problema si basa sulle seguenti ipotesi:

Hp1 Sono già note precedentemente le date minime e massime di inizio e di fine relative a ciascuna operazione.

Hp2 I vincoli di risorsa sono rigidi, nel senso che non è prevista la possibilità di ricorrere al lavoro straordinario.

Hp3 L'esecuzione di un'attività non può essere interrotta e ripresa successivamente.

Hp4 La quantità di risorsa richiesta per l'esecuzione di una operazione è costante per tutta la durata dell'operazione stessa.

Hp5 Le operazioni programmate appartengono ad un solo reticolo

CPM.

### Definizione dei simboli

$d(j)$  = durata dell'attività  $j$

$N$  = numero delle attività del progetto

$P$  = insieme delle attività del progetto

$S(j)$  = insieme delle attività che seguono immediatamente l'attività  $j$

$s(j)$  = numero delle attività appartenenti all'insieme  $S(j)$

$P(j)$  = insieme delle attività che precedono immediatamente l'attività  $j$

$Dmi(j)$  = data minima di inizio dell'attività  $j$

$DMi(j)$  = data massima di inizio dell'attività  $j$

$Dmf(j)$  = data minima di fine dell'attività  $j$

$DMf(j)$  = data massima di fine dell'attività  $j$

$Rt(j)$  = ritardo dell'attività  $j$

$T$  = numero degli intervalli di tempo in cui si suddivide la durata totale del progetto fornita dal calcolo CPM

$W$  = numero degli intervalli di tempo in cui si suddivide la presumibile durata totale del progetto in presenza di risorse limitate

$R$  = numero delle risorse utilizzate

$r$  = generica risorsa considerata

$A(r,t)$  = quantità di risorsa  $r$  inizialmente disponibile nel  $t$ -esimo intervallo di tempo

$l(r,t)$  = quantità di risorsa  $r$  richiesta per ogni unità di tempo dall'attività  $j$

$Dpi(j)$  = data pianificata di inizio dell'attività  $j$ , tenuto conto della

disponibilità di risorsa per quell'attività

$Dpf(j)$  = data pianificata di fine per l'attività  $j$ ; tenuto conto che le

operazioni non si possono spezzare, si avrà:

$$D_{pf}(j) = D_{pi}(j) + d(j)$$

$Rr(j)$  = ritardo residuo dell'attività  $j$  dopo che essa è stata allocata,

per cui si avrà:

$$Rr(j) = DMf(j) - D_{pf}(j)$$

$Dai(j)$  = data aggiornata di inizio dell'attività  $j$ , tenuto conto della

disponibilità di risorsa per le operazioni precedenti.

$$Dai(j) = \max_{i \in P(j)} D_{pf}(i)$$

$D(j)$  = insieme delle possibili date di inizio per l'operazione  $j$ .

Come si vedrà fra poco, vale la relazione:

$$D(j) = W - [T - Dmi(j)] - Dmi(j)$$

$t$  = generico intervallo unitario di tempo (per comodità nel seguito si indicherà con  $t$  anche l'istante d'inizio del relativo intervallo)

$$X(j, t) = \begin{cases} 1 & \text{se l'attività } j \text{ è programmata per iniziare} \\ & \text{all'istante } t \\ 0 & \text{per ogni altro valore di } t \end{cases}$$

### Funzione criterio

Il problema considerato consiste nella ricerca del piano di lavoro che minimizza il tempo di realizzazione del progetto.

La funzione criterio è perciò la seguente

$$\sum_{t \in D(k)} t \cdot X(k, t)$$

dove  $k$  indica l'attività finale cioè quella per la quale si ha

$$s(k) = 0$$

Per determinare il numero di incognite di questo problema si osserva che la generica attività ( $j$ ) non può iniziare prima della  $Dmi(j)$  e mai dopo un istante  $t$  tale che l'intervallo di tempo ( $W - t$ ) sia esattamente sufficientemente alla pianificazione dell'attività  $j$  e di tutte le attività a valle di  $j$ .

Tale intervallo è chiaramente uguale a

$[T - Dmi(j)]$  e quindi  $t = W - [T - Dmi(j)]$  per cui

$$D(j) = W - [T - Dmi(j)] - Dmi(j)$$

Pertanto il numero complessivo di incognite  $X(j, t)$  risulta pari a:

$$\sum_{j=1}^N D(j) = N(W - T) + \sum_{j=1}^N Rt(j)$$

### Vincoli di precedenza

I legami di successione rappresentanti nel reticolo sono traducibili in un insieme di disequazioni che tengono conto del fatto che ogni operazione  $j$  non può iniziare prima che siano completate tutte quelle che la precedono immediatamente

$$Dpi(j) \geq Dpi(i) + d(j) \quad i \in P(j)$$

Il numero complessivo di vincoli di questo tipo sarà perciò pari a:

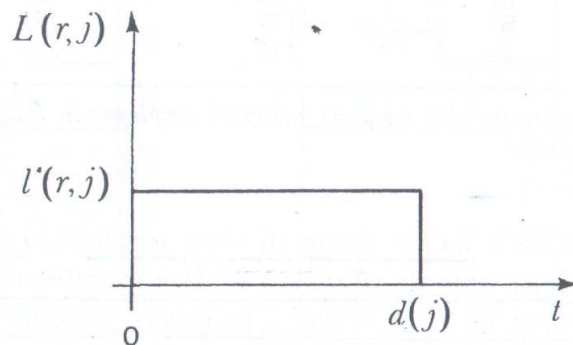
$$\sum_{j=1}^N p(j)$$

Se si esprimono le precedenti disequazioni in termini delle incognite  $X(j, t)$  si avrà

$$\sum_{t \in D(j)} t \cdot X(j, t) \geq \sum_{t \in D(i)} t \cdot X(i, t) + d(i) \quad i \in P(j)$$

### Vincoli di risorsa

L'impegno di risorsa  $r$  da parte dell'attività  $j$  può essere rappresentato da una funzione  $L(r, j)(t)$  che ha il seguente andamento



In simboli

$$L(r, j)(t) = \begin{cases} l'(r, j) & \text{per } 0 \leq t < d(j) \\ 0 & \text{per } t \geq d(j) \end{cases}$$

Il vincolo per il quale ogni risorsa  $r$ , in ogni intervallo  $t_1$  non può essere caricata oltre la sua capacità  $A(r, t_1)$  assume la forma:

$$\sum_{j=1}^N \sum_{t \in D(j)} L(r, j)(t_1 - t) \cdot X(j, t) \leq A(r, t_1) \quad (t_1 = 1, 2, \dots, W)$$

E' facile constatare che esistono  $W$  disuguaglianze di questo tipo per ciascuna risorsa e quindi, complessivamente  $W \cdot R$  vincoli.

Il problema di programmazione lineare intera sopra definito può risultare non risolubile, tipicamente quando l'arco di tempo  $W$  non è sufficiente a completare il progetto, tenuto conto dei vincoli di risorsa. Quando questo succede non resta che ripetere il calcolo, adottando un valore maggiore per  $W$ .

Da un punto di vista pratico, la limitazione maggiore presentata da questo approccio è determinata dalla notevole mole di calcoli che deve essere eseguita. Da quanto precede, infatti, che anche per il trattamento di reti aventi dimensioni piuttosto modeste il numero delle incognite e dei vincoli raggiunge dimensioni ragguardevoli.

### Considerazioni conclusive

L'ottimizzazione delle risorse rappresenta indubbiamente la punta più avanzata degli sviluppi presentati delle tecniche reticolari di programmazione. Ad essa si può giungere direttamente dalla pianificazione delle scadenze o passando attraverso l'ottimizzazione dei costi.

E' il caso però di ricordare che nulla impedisce di eseguire l'ottimizzazione delle risorse e poi di passare alla pianificazione dei costi, anzi questo modo di procedere sembra che concluda efficacemente il circuito logico che ci si è ripromessi di sviluppare in questa nota.

In tal modo, infatti, dopo aver pianificato i lavori tenendo conto della effettiva disponibilità di risorse, è possibile verificare non soltanto l'avanzamento fisico degli stessi, ma anche le conseguenze in termini economici che da essi derivano.

## **Ottimizzazione delle risorse con vincoli di disponibilità**

In questo capitolo si affronta il problema del dimensionamento delle risorse in funzione dei lavori da eseguire.

Viene approfondito il discorso sull'impiego dei ritardi per una valida programmazione dei lavori; viene, inoltre descritta la tecnica SUPERT che, attraverso la ripartizione dei ritardi totali di cammino, mira a rendere il più possibile indipendenti le decisioni relative alla localizzazione temporale delle singole operazioni.

In una seconda parte è descritta la tecnica PERTCOM che permette il livellamento dei carichi di risorsa, mediante una procedura che si basa sull'impiego opportunamente pilotato ed integrato della tecnica SUPERT.

### L'impiego dei ritardi nella programmazione delle operazioni



I diversi tipi di ritardo (totale, libero, concatenato, indipendente) sono forniti da una elaborazione CPM. Essi assumono notevole importanza per fissare le date effettive di inizio delle singole operazioni. Si può osservare che esistono due modi estremi di procedere. Il primo consiste nel programmare tutte le operazioni a partire dalla loro data minima di inizio. Normalmente si afferma che questo procedimento deve essere preferito quando i lavori non prevedono dei notevoli investimenti di capitale (che altrimenti resterebbero inutilizzati per molto tempo) e quando si vuole limitare al massimo la probabilità di completare i lavori in ritardo (l'esecuzione delle operazioni non critiche "all'ultimo momento" tende infatti a fare aumentare tale probabilità). Il secondo modo di procedere consiste nel programmare tutte le operazioni a partire dalla loro data massima di inizio. Questo procedimento viene ritenuto più adatto quando sono previsti dei notevoli investimenti di capitale ed inoltre si è disposti a correre un certo rischio di completare i lavori dopo la data di fine prevista.

L'applicazione di questi due criteri estremi incontra notevoli difficoltà a causa della limitata disponibilità di risorse. In altri termini l'esecuzione delle operazioni potrà essere effettivamente iniziata alla data più recente o alla data più remota possibile, solo se a quelle date le risorse necessarie per la loro esecuzione si riveleranno effettivamente disponibili. In generale perciò le singole operazioni vengono eseguite a partire da una data compresa fra quella minima e quella massima di inizio.

Questa semplice considerazione permette di porre in evidenza come i risultati forniti dal CPM diano luogo a delle serie difficoltà, quando si voglia procedere alla effettiva localizzazione temporale delle singole operazioni. Infatti, il ritardo totale di un'operazione è patrimonio comune di tutte le operazioni che hanno lo stesso ritardo totale e che appartengono allo stesso cammino e quindi il suo impiego può essere effettuato solo mediante ripartizione fra tali operazioni.

In realtà, la questione è ancora più complicata: quanto detto è infatti valido solo per i cammini che si "appoggiano" sul cammino critico. Per gli altri, il ritardo totale effettivamente disponibile dipende anche dalle decisioni prese intorno alla localizzazione temporale delle operazioni appartenenti ai cammini, ai quali si "appoggia" il cammino in questione.

Anche la conoscenza del ritardo libero non porta un decisivo contributo alla risoluzione del problema considerato. E ciò per due ragioni: in primo luogo perché soltanto alcune operazioni hanno un ritardo libero, in secondo luogo perché il suo impiego

effettivo presuppone l'esecuzione delle operazioni "adiacenti" a partire dalla loro data minima di inizio (o dalla loro data massima di inizio), mentre ciò spesso non è possibile o non è conveniente. L'unico tipo di ritardo che per le sue caratteristiche si presta a fornire una solida base per fissare la data di inizio delle operazioni è il ritardo indipendente. Sfortunatamente, le operazioni che hanno un ritardo indipendente sono in numero decisamente piccolo rispetto al totale delle operazioni.

### La tecnica SUPERT

Tale tecnica permette di superare gli inconvenienti esaminati, mediante l'applicazione di un algoritmo che opera sui ritardi totali, ripartendoli fra le operazioni appartenenti allo stesso cammino in modo da associare a ciascuna di queste un ritardo indipendente. A tal fine si prendono in esame i cammini esistenti nel reticolo CPM a partire da quello avente ritardo minimo non nullo. Tale cammino viene reso critico ripartendo il ritardo fra le varie operazioni in proporzione diretta alle loro durate o secondo un altro indice associato alla durata prevista di ciascuna operazione. Dopo tale ripartizione, si provvede ad eseguire un calcolo CPM, che permette di tener conto degli effetti determinati dai cambiamenti (fittizi) di durata relativi alle operazioni del cammino reso critico.

Il processo continua rendendo critico il cammino che in base agli ultimi calcoli CPM ha ritardo minimo non nullo. Dopo un certo numero di cicli, tutti i cammini sono resi critici e quindi tutti i ritardi totali sono stati completamente ripartiti.

Operando in questo modo, la ripartizione dei ritardi totali relativi ai cammini che si "appoggiano" sul cammino critico, determina dei cambiamenti nel ritardo totale dei cammini che si "appoggiano" su di essi.

In tal modo la tecnica SUPERT presenta un indubbio interesse da un punto di vista organizzativo, in quanto riduce grandemente le interazioni fra i diversi centri decisionali per ciò che riguarda la localizzazione temporale delle singole operazioni.

Dal punto di vista del calcolo la tecnica SUPERT si è rivelata piuttosto pesante. Per superare tale inconveniente è stato escogitato un algoritmo che permette di "spezzare" il grafo originale in un certo numero di nuclei separati.

L'applicazione su tali nuclei dello stesso algoritmo dà luogo ad un procedimento di "disintegrazione" del grafo che accelera notevolmente la ripartizione dei ritardi totali.

### La tecnica PERTCOM. I dati in ingresso

Questa tecnica consente la ricerca euristica del piano di realizzazione che ottimizza l'impiego delle risorse nel rispetto dei vincoli di tempo imposti.

Tale ottimizzazione mira in sostanza ad individuare la dimensione più opportuna delle risorse attraverso il livellamento dei relativi carichi.

I dati in ingresso si riferiscono essenzialmente ai vincoli a cui è soggetta l'esecuzione dei singoli progetti e possono essere così classificati.

#### *Dati che definiscono le modalità di esecuzione delle operazioni di ogni progetto*

Tali dati sono rappresentabili mediante un reticolo in cui i valori fra parentesi associati a ciascun nodo rappresentano rispettivamente la durata dell'operazione (in parentesi rotonda) e la risorsa con il relativo carico (in parentesi graffa).

#### *Dati che stabiliscono i vincoli temporali di esecuzione di ciascun progetto e costi di penale*

L'esecuzione di ciascun progetto è soggetta a dei vincoli temporali che si prestano ad una efficace rappresentazione grafica.

E' possibile in generale distinguere due casi:

a. si vuole livellare le risorse a partire dalla data più recente possibile. In accordo a tale esigenza il PERTCPM nella sua versione "al più presto" prevede che vengano fissate:

– la data effettiva di inizio dei lavori (*dei*), definita come l'istante di tempo nel quale si può dare il via ai lavori di quel progetto;

– la data pianificata di fine (*Dpf*), definita come l'istante di tempo al quale, in base al calcolo CPM-pianificazione scadenze, è prevista la fine dei lavori nell'ipotesi che essi inizino alla *Dei*;

– la data richiesta di fine (*Drf*), definita come l'istante di tempo al quale il committente chiede che i lavori del progetto siano ultimati;

– la data massima di fine (*DMf*), definita come l'istante ultimo di tempo al quale il committente è ancora disposto ad accettare la consegna del progetto.

Definiamo inoltre:

– il ritardo esterno (*Re*) di un progetto, come la differenza ( $Drf - Dpf$ ) fra la data richiesta di fine e la data pianificata di fine;

– il ritardo penalizzato ( $Rp$ ) di un progetto, come la differenza ( $DMf - Drf$ ) fra la data massima di fine e la data richiesta di fine (tale ritardo viene chiamato *esterno* perché non dipende dalla struttura interna del reticolo);

b. si vuole livellare le risorse eseguendo i lavori al più tardi possibile, ma tenendo conto della data richiesta di fine. Per soddisfare questa esigenza, il PERTCOM, nella sua versione “al più tardi”, prevede che vengano fissate:

– la data richiesta di fine ( $Drf$ );

– la data minima di inizio ( $Dmi$ ) del progetto, definita come l’istante di tempo prima del quale non si possono iniziare i lavori;

– la data pianificata di inizio ( $Dpi$ ), definita come l’istante di tempo al quale, in base al calcolo CPM-pianificazione scadenze, è previsto l’inizio dei lavori nell’ipotesi che essi si completino alla  $Drf$ ;

– la data massima di fine ( $DMf$ ).

Definiamo inoltre:

– il ritardo esterno ( $Re$ ) del progetto che, in questo caso, è pari alla differenza ( $Dpi - Dmi$ ) fra la data pianificata di inizio e la data minima di inizio;

– il ritardo penalizzato ( $Rp$ ).

*Dati che definiscono i vincoli fisici di disponibilità delle risorse ed i relativi costi*

E’ possibile considerare la disponibilità di risorse variabili nel tempo.

Definiamo i seguenti simboli:

$Cdi$  = Costo direttamente imputabile ad una certa operazione.

$Cor$  = Costo ordinario, corrispondente all’impiego della disponibilità ordinaria di una risorsa.

$Cst$  = Costo straordinario; corrispondente all’impiego della disponibilità straordinaria di una risorsa.

$Cso$  = Costo di sottocarico, corrispondente al mancato impiego di una risorsa disponibile.

$Cip$  = Costo di ipercarico, corrispondente ad una richiesta superiore alla massima disponibilità di una risorsa.

$Cin$  = Costo indiretto, cioè non direttamente imputabile ad una certa operazione, ma che si suppone essere una funzione lineare del tempo.

$Cpe$  = Costo di penale, derivante da un ritardo nella data di consegna di una commessa dopo  $Drf$ .

### Logica impiegata dal PERTCOM

L'analisi di un progetto col metodo PERTCOM può essere vantaggiosamente impiegata, seguendo due criteri di pianificazione sostanzialmente diversi: in entrambi i casi si tende a rendere minimo il costo totale di realizzazione

$$C = C_{di} + C_{in} + C_{pe}$$

dove

$$C_{di} = C_{or} + C_{st} + C_{so} + C_{ip}$$

a. caricamento "al più presto".

La scelta di questo criterio comporta l'applicazione di una procedura che può essere così sommariamente descritta:

- esecuzione di un calcolo CPM preliminare a partire dalla *Dei* di ciascun progetto;
- caricamento delle operazioni sulle rispettive risorse a partire dalla data minima di inizio;
- ripartizione (mediante l'impiego della tecnica SUPERT applicata a ciascun progetto) dei ritardi totali *interni* fra le operazioni appartenenti ai vari cammini in modo da favorire le operazioni critiche dal punto di vista delle risorse disponibili;
- caricamento delle operazioni sulle rispettive risorse, scegliendo fra tutte le date possibili di inizio quella che minimizza un *indice di posizionamento* definito in seguito;
- ripartizione (mediante l'impiego della tecnica SUPERT) di quote via via crescenti di ritardo esterno e di ritardo penalizzato;
- caricamento delle operazioni sulle rispettive risorse secondo il criterio precedentemente esposto;
- scelta del piano di produzione che presenta il minimo costo globale di realizzazione;

b. caricamento "al più tardi".

La scelta di questo secondo criterio comporta l'applicazione di una procedura analoga alla precedente e che prevede le seguenti elaborazioni fondamentali

- esecuzione di un calcolo CPM preliminare procedendo a ritroso, a partire dalla *Drf* del progetto;
- caricamento a ritroso delle operazioni sulle rispettive risorse a partire dalla data massima di fine di ciascuna operazione;
- ripartizione (mediante l'impiego della tecnica SUPERT) dei ritardi interni di cammino fra le operazioni che lo costituiscono, in modo da favorire le operazioni critiche dal punto di vista delle risorse disponibili,

- caricamento delle operazioni sulle rispettive risorse scegliendo, fra tutte le date di fine possibili, quella che minimizza *un indice di posizionamento* definito in seguito;
- ripartizione (mediante l'impiego della tecnica SUPERT) di quote via via crescenti di ritardo esterno e di ritardo penalizzato;
- caricamento delle operazioni sulle rispettive risorse secondo il criterio precedentemente esposto;
- scelta del piano di produzione che presenta il minimo costo globale di realizzazione.

### Risultati forniti dal PERTCOM

Si riferiscono al caricamento che presenta il minimo costo totale e sono rappresentati da tre prospetti principali:

- prospetto SITUAZIONE RISORSA.

Ha lo scopo di fornire una visione generale dello stato di caricamento di ciascuna risorsa ed è rappresentabile da un grafico.

- prospetto PIANO DI IMPIEGO RISORSA.

Definisce il piano di impiego di ciascuna risorsa. Per ogni operazione che, per la sua esecuzione, richiede l'impiego della risorsa in questione vengono forniti:

- la data pianificata di inizio
- il codice e la descrizione dell'operazione
- la durata
- il carico
- la data minimo di inizio
- la data massima di fine

- prospetto PIANO DI ESECUZIONE PROGETTO.

Rappresenta il piano di esecuzione completo e dettagliato relativo a ciascun progetto. Per ogni operazione del progetto vengono indicati:

- la data massima di fine
- il codice e la descrizione dell'operazione
- la risorsa impiegata
- la durata di esecuzione
- il carico
- la data minima di inizio
- la data pianificata di inizio.

Per ogni progetto sono inoltre indicate la data effettiva di inizio, la data di richiesta di fine, la data massima di fine e la data pianificata di fine. Poiché quest'ultima data coincide con la data

richiesta di fine, i costi di penale relativi ai due progetti sono nulli.

### Il problema della priorità fra i progetti

La logica del PERTCOM descritta finora si basa sull'ipotesi che tutti i progetti abbiano la stessa priorità. Si vedrà ora come tale logica possa essere facilmente modificata in modo da tener conto anche di questo aspetto del problema.

Si suppone di dover programmare alcuni progetti contemporanei, ad ognuno dei quali sia associato un codice (numerico) di priorità. Si supponga, inoltre, che tale codice sia tanto più piccolo quanto maggiore è la priorità.

Il modo più naturale per modificare la logica descritta in precedenza consiste nel cambiare la procedura con la quale si fanno i caricamenti delle operazioni sulle risorse.

Finora ogni caricamento era preceduto da un ordinamento delle operazioni (appartenenti a tutti i progetti) secondo il seguente codice:

- ritardo ripartito (crescente)
- durata (decrescente)

Per risolvere il problema proposto è sufficiente che si modifichi il codice di ordinamento nel seguente modo:

- codice di priorità del progetto (crescente)
- ritardo ripartito (crescente)
- durata (decrescente).

In pratica ciò corrisponde a caricare i progetti in ordine di priorità decrescente, con l'ovvio risultato di favorire i progetti maggiormente prioritari.

In tal modo, infatti, le richieste di risorsa, relative alle attività appartenenti ai vari progetti, daranno luogo a diagrammi di carico delle risorse *strafilati*: "in basso" i progetti a più alta priorità, "in alto" i progetti a priorità inferiore.

Tale stratificazione è utile da un punto operativo in quanto:

1. Permette di verificare (in caso di penuria delle risorse) quali sono i progetti realizzabili e quali non lo sono.
2. Rende agevole (sempre in caso di penuria di risorse) la valutazione dell'effetto determinato sui diagrammi di carico delle risorse, dalla "cancellazione" di uno o più progetti.
3. Fornisce gli elementi per calcolare *costo differenziale* di ciascun progetto porgendo così un dato essenziale per le valutazioni di convenienza economica.

Dall'esame dei dati si possono trarre le seguenti considerazioni:

- a) L'introduzione della priorità fra i progetti determina un aumento nei costi totali relativi a tutti i caricamenti. (La cosa non è sorprendente: l'introduzione della priorità rappresenta un ulteriore vincolo imposto all'algoritmo di livellamento e quindi non può che peggiorarne le prestazioni).
- b) Il caricamento che ha dato i risultati migliori in termini di costo totale resta quello basato sulla ripartizione dei ritardi esterni.
- c) La ripartizione dei ritardi interni in funzione dell'indice definito in precedenza non ha portato un miglioramento nel costo totale così come era avvenuto nel caso di assenza di priorità.
- d) Se si considerano i costi differenziali dei diversi progetti nell'ambito dello stesso caricamento, si nota che essi tendono a crescere con il diminuire delle priorità. Questa tendenza si realizza in tutti i caricamenti ma i costi differenziali dei diversi progetti tendono a livellarsi man mano che si procede nei caricamenti successivi. (Chiaramente man mano che la data di fine pianificata di un progetto viene spostata "verso destra", l'aumentata disponibilità di risorse tende a ridurre l'importanza, in termini di costo, del grado di priorità).

#### Considerazioni conclusive

L'ottimizzazione delle risorse rappresenta indubbiamente la punta più avanzata degli sviluppi presentati dalle tecniche reticolari di programmazione.

Tale ottimizzazione può assumere due forme a seconda che si consideri rigida la disponibilità di risorsa o il tempo disponibile. In sostanza nel primo caso si suppone che la disponibilità di risorse sia un dato del problema mentre nel secondo si suppone che sia un'incognita.

In realtà il processo di pianificazione ha spesso natura interattiva, specialmente in fase di acquisizione dei lavori. In tale occasione infatti, l'impresa costruttrice può utilmente impiegare queste due tecniche per simulare l'esecuzione dei lavori con la possibilità di verificare la coerenza fra i vincoli di tempo (eventualmente imposti dal committente) e i vincoli di risorsa (connessi alla effettiva disponibilità presente e futura).

All'ottimizzazione delle risorse si può giungere direttamente dalla pianificazione delle scadenze o passando attraverso l'ottimizzazione dei costi.

E' il caso inoltre di ricordare che nulla impedisce di eseguire l'ottimizzazione delle risorse e poi di passare alla pianificazione dei costi. Questo modo di procedere, anzi, ci sembra che concluda



efficacemente il circuito logico che ci si è ripromessi di sviluppare in questo lavoro.

In tal modo infatti, dopo aver pianificato i lavori tenendo conto della effettiva possibilità di risorse, è possibile verificare non soltanto l'avanzamento fisico degli stessi, ma anche le conseguenze in termini economici che da essi derivano.

## **PDM: Precedence Diagramming Method semplice e generalizzato**

### **Introduzione**

Il Precedence Diagramming Method (PDM) è forse il modello reticolare più utilizzato nelle applicazioni della programmazione reticolare. E' certamente il metodo più potente per gestire e programmare il cantiere.

### **Cenni storici**

La prima definizione del PDM è del Prof. Fondhal che, nel 1961 in occasione di un'applicazione pratica su una commessa della U.S. Navy (lavori per le banchine del porto di San Diego, USA), adattò il metodo CPM sviluppandone la rappresentazione duale con l'attività rappresentata dai nodi del reticolo invece che dalle frecce. Lo sviluppo di questo strumento detto "Circle and Connetting Line" e successivamente "Activity On Node", "Node diagramming" diventerà poi il PDM.

L'innovazione alla base del PDM è che la rappresentazione dell'attività mediante nodi, Activity On Node, (AON), è molto più intuitiva e semplice della tradizionale Activity On Arc (AOA), perché distingue le funzioni degli elementi del reticolo: mentre nelle AOA la freccia assolve contemporaneamente due funzioni, ovvero rappresenta l'attività e le relazioni tra le attività, nella rappresentazione mediante nodi le attività sono rappresentate dai nodi e le frecce rappresentano le relazioni tra le attività. Il risultato è che data una logica del processo, identificata dalla lista delle attività e dei rispettivi predecessori o successori, la rappresentazione con il reticolo AON è univoca.

L'idea di Fondhal nasce con l'obiettivo di applicare lo strumento reticolare all'industria delle costruzioni, con un approccio "*non computer*", facile da gestire "a mano".

Il nome PDM appare per la prima volta nel 1964 in un manuale IBM di istruzioni all'uso degli elaborati elettronici IBM-1440, il cui principale autore era Craig. In questo manuale appare anche per la prima volta il PDM nella forma generalizzata.

Grazie alla semplicità di costruzione del reticolo e alla diffusione dei Personal Computer il PDM è oggi il metodo di programmazione reticolare più diffuso per le applicazioni, soprattutto per le costruzioni. Analogo al PDM, e precedente come definizione è però il Metra Potential Method (MPM), sviluppato in Franca nel 1959 da Klein. La tecnica MPM può essere considerata una generalizzazione della tecnica CPM. Le due tecniche hanno in comune la rappresentazione delle operazioni mediante nodi e quella dei vincoli mediante archi, per questo leggermente meno immediato del PDM. Il MPM si diffuse negli anni 60-70 in Europa e soprattutto nelle aree meno influenzate dalla cultura anglosassone. Di questo resta traccia nel linguaggio dei programmatori, che hanno definito per anni la rappresentazione con le attività sulla freccia “americana”, e la rappresentazione con l’attività sul nodo “europea”.

### **Il Precedence Diagramming Method semplice**

Il modello PDM è fondamentalmente la rappresentazione del modello CPM con un reticolo AON. Nel PDM i nodi rappresentano le attività mentre gli archi rappresentano le relazioni di dipendenza logica-cronologica.

Il PDM semplice tra il suo nome dal tipo di legame che lega le attività nel reticolo. Infatti la dipendenza logica tra le attività in questo modello è resa tramite il solo legame “Fine-Inizio” (Finish To Start, FTS), detto appunto legame semplice.

Se due attività A e B sono collegate da un legame di fine-inizio  $FTS_{AB}$ , abbiamo che:

- la prima attività ad essere realizzata nella successione logico-cronologica dei lavori è detta Predecessore, ed è la A;
- la seconda attività ad essere realizzata nella successione logico-cronologica dei lavori è detta Successione, ed è la B;
- il legame  $FTS_{AB}$  significa che la fine del predecessore A consente l’inizio del successore B.

I vantaggi che presenta la rappresentazione mediante nodi rispetto alla rappresentazione mediante archi sono molteplici.

Innanzitutto non è più necessario utilizzare delle attività fittizie nel reticolo per rappresentare correttamente la logica del processo rappresentato, perché si differenzia l’attività (nodi) dal legame di relazione (archi), cosa invece che coesisteva nella rappresentazione mediante archi. Questo nell’applicazione pratica rende di gran lunga più facile ed intuitivo il disegno della logica del reticolo e si traduce in una maggiore chiarezza e nel risparmio di tempo nell’applicazione del metodo. Per disegnare la logica di

un reticolo è necessario avere un elenco attività, con indicati i predecessori immediati e tradurre i dati di ipotesi.

Inoltre, il fatto che le attività siano rappresentate da un nodo significa che sono individuate nel reticolo da un unico codice alfanumerico invece che due. Infine è più semplice trasferire in forma tabellare il reticolo PDM, ed il relativo calcolo dei tempi, in un foglio elettronico.

Lo svantaggio fondamentale della rappresentazione AON risiede nel fatto che l'identificazione delle attività prescinde dai legami: mentre nel CPM individuando per ogni attività "i" due eventi di inizio e di fine "i-j" si individua l'attività stessa e le sue correlazioni logiche con predecessori e successori, nel PDM la sola identificazione dell'attività i-esima non dà alcuna informazione riguardo ai suoi predecessori e successori che quindi per essere conosciuti devono essere espressamente esplicitati.

Il modello PDM semplice è un digrafo finito e aciclico in cui le frecce orientate (dette a volte archi), sono definite come legami tra le attività, e i nodi sono definiti come attività.

Associata ad ogni attività vi è una variabile non negativa, deterministica, che è detta durata dell'attività.

Ogni legame è compreso tra due attività e determina un verso di percorrenza del reticolo e rappresenta una relazione logico-cronologica di fine-inizio tra predecessore e successore.

Esistono due attività speciali, che sono l'attività iniziale e l'attività finale del reticolo. Nessun legame termina nell'attività iniziale, che dunque non ha attività precedenti (predecessori), e nessun legame si diparte dall'attività finale, che non ha attività successive (successori). Ogni legame è contenuto in un percorso orientato che conduce dall'attività iniziale all'attività terminale.

La struttura del reticolo definisce una sequenza di attività che è detta logica del reticolo.

Si definisce una realizzazione del reticolo il reticolo stesso con un determinato insieme di valori delle durate per le attività.

Per ogni realizzazione del reticolo si definisce *cammino critico* il percorso più "lungo", di maggiore durata, che conduce dall'attività iniziale a quella finale, la durata del processo è definita come la "lunghezza" in termini di durata di tale percorso critico.

La durata del processo corrisponde ad un valore deterministico calcolato con un algoritmo matematico.

## **Nozioni fondamentali per la realizzazione del reticolo PDM SEMPLICE per la programmazione**

Le regole fondamentali per la rappresentazione del modello PDM semplice sono quattro (Harris, 1978).

### Attività indipendenti

Quando due attività sono indipendenti esse appaiono nel reticolo con dei nodi separati, senza alcun legame di relazione.

### Attività dipendenti con legame Fine – Inizio FTS

Quando due attività A “predecessore” e B “successore”, sono legate da un legame Fine – Inizio – FTS, l’inizio del successore B è possibile solo una volta che è terminato il predecessore A.

Dal punto di vista dell’applicazione pratica nel cantiere a volte si può accettare che il predecessore sia completato al 90 – 95%, per poter incominciare il successore. Questa minima sovrapposizione tra le attività normalmente non inficia il modello ed è concorde con la normale prassi costruttiva.

### Attività di convergenza

Quando un’attività è dotata di due o più predecessori, si dice che è un’attività di convergenza, in quanto realizza un nodo di unione.

Si supponga di avere due predecessori, A e B, per l’attività C, successore di A e B. L’attività C è di convergenza. I due legami Fine – Inizio tra le attività,  $FTS_{AC}$  e  $FTS_{BC}$ , indicano che perché l’attività C possa iniziare devono essere completati entrambi i predecessori A e B.

### Attività di divergenza

Quando un’attività è dotata di due o più successori si dice che è un’attività di divergenza, in quanto realizza un nodo di separazione.

Si supponga di avere un predecessore, A, e due successori, B e C. L’attività A è un’attività di divergenza. I due legami Fine – Inizio tra le attività  $FTS_{AB}$  e  $FTS_{AC}$ , indicano che perché le attività B e C possano iniziare deve essere completato il predecessore A.

## **Aspetti operativi della definizione del reticolo PDM SEMPLICE**

Anche se le regole precedentemente enunciate definiscono interamente dal punto di vista matematico il reticolo, per l’applicazione pratica è necessario aggiungere altre nozioni, regole di buona pratica che consentano la stesura del modello

reticolare del processo costruttivo e ne facilitano la lettura. Queste regole “pratiche” sono relative a legami ridondanti, attività iniziali e finali del reticolo, rappresentazione per livelli e identificazione delle attività.

### Legami ridondanti

I legami ridondanti sono relazioni logiche sovrabbondanti, che non aggiungono significato “logico” al reticolo, ma possono rappresentare nella realtà situazioni particolari.

Si supponga di avere tre attività, A, B e C, legate da tre legami logici di fine inizio,  $FTS_{AB}$ ,  $FTS_{AC}$ ,  $FTS_{BC}$ .

In questo caso A è predecessore di B e C, e anche B è predecessore di C. Perché C possa iniziare devono essere terminati A e B, mentre perché B possa iniziare deve essere terminato A. Chiaramente il legame  $FTS_{AC}$ , non aggiunge nulla dal punto di vista della mera successione logico-cronologica delle attività a quanto è stato definito dal  $FTS_{AB}$  e  $FTS_{BC}$ . Il legame  $FTS_{AC}$  è sovrabbondante e pertanto può essere eliminato, poiché in realtà la logica individuata dal reticolo corrisponde alla catena A – B – C.

I legami ridondanti complicano inutilmente il reticolo e aumentano il numero di operazione da svolgere per l’analisi dei tempi.

A volte però può essere utile lasciare dei legami sovrabbondanti nel reticolo, ove rappresentino dei vincoli ulteriori rispetto al semplice legame logico – cronologico. Si pensi ad esempio al caso in cui per eseguire l’attività C sia necessaria una specifica risorsa, per esempio, un’attrezzatura particolare, o la medesima squadra operativa che deve essere utilizzata prima in A e successivamente rilasciata all’attività C, senza interferire con l’esecuzione di B. In questo caso il legame  $FTS_{AC}$  ha un significato ben preciso, e deve essere indicato, perché rappresenta un’indicazione importante del pianificatore riguardo al flusso delle risorse che in fase di esecuzione o di aggiornamento del reticolo può esprimere una precisa successione tra le due attività A e C.

E’ facile riconoscere nel reticolo i legami ridondanti per il loro schema triangolare. La loro rimozione è in generale consigliata, ma è a discrezione del programmatore.

### Struttura del reticolo: attività iniziali e attività finali nel reticolo

I reticoli PDM devono avere un'unica attività iniziale (nodo source, sorgente), senza predecessori, ed un'unica attività finale (nodo sink, pozzo), senza successori. Questo permette all'algoritmo di eseguire correttamente i calcoli dei tempi. E' quindi necessario trovare sempre un'unica attività iniziale ed un'unica attività finale. Se il reticolo presenta più attività iniziali e più attività finali si dice che ha gli estremi aperti.

In caso di reticolo con estremi aperti è sempre possibile trovare per ognuna delle attività "iniziali" un predecessore, o per ognuna delle attività "finali" un successore. Se ci si trova di fronte ad incertezze, dovute alla necessità di iniziare o di finire i lavori con più attività contemporanee, allora può essere necessario inserire delle attività del tipo "firma contratto" oppure "mobilitazione impresa", o "ultimazione dei lavori" con lo scopo di aprire e chiudere il reticolo con un unico nodo. Al limite si possono sempre inserire attività fittizie, con durata nulla, che rappresentino l'inizio e la fine della costruzione rappresentata.

### I livelli del reticolo

Un reticolo è un insieme di nodi ed archi. Ordinare per livelli il reticolo significa disegnare i nodi nella loro posizione "valida" ovvero, partendo da sinistra disegnare i nodi successori sempre alla destra dei nodi predecessori, seguendo la direzione della progressione temporale, e mantenere su di una stessa colonna i successori che hanno lo stesso numero di predecessori.

Quindi:

- attribuire un livello ad un'attività significa indicare il suo numero di predecessori, a partire dall'attività iniziale;
- ordinare per livelli il reticolo significa disegnare le attività che appartengono ad uno stesso livello nella stessa colonna.

La logica del reticolo resta invariata, in quanto non cambiano né l'insieme delle attività né l'insieme delle relazioni tra le attività.

I livelli così definiti sono detti livelli al più presto del reticolo e possono essere definiti per le attività anche livelli al più tardi. Il livello al più presto di un'attività del reticolo rappresenta la sua posizione al più presto, mentre il livello al più tardi rappresenta la sua posizione al più tardi.

Per reticoli complessi, ordinare per livelli aiuta a visualizzare il processo con maggiore chiarezza.

Per ordinare per livelli il reticolo è sufficiente inserire in ogni attività il suo livello, contando il numero di predecessori a partire dall'attività iniziale. All'attività iniziale è in genere attribuito il livello zero (poiché non ha predecessori). In caso in cui si

abbiamo più percorsi differenti che conducono all'attività considerata, e quindi un numero differente di predecessori da percorso a percorso, occorre sempre considerare il percorso più lungo, ovvero quello con un numero maggiore di attività.

A questo punto basta ridisegnare il reticolo incolonnando le attività che appartengono ad uno stesso livello, partendo da sinistra verso destra.

Il reticolo ordinato è più leggibile e rappresenta in maniera ordinata e chiara il processo produttivo. E' immediato individuare le attività che presumibilmente si svolgeranno in sovrapposizione parziale o contemporaneamente. Si ricordi che per ordinare il reticolo per livelli non si deve considerare la durata, ma solo la posizione "logica" dell'attività nel reticolo.

Se si pensa che l'incremento dei livelli delle attività significa progredire nel reticolo secondo un ipotetico asse dei tempi orizzontale, orientato da sinistra a destra, allora è facile intuire che ordinare il reticolo per livelli sia equivalente a localizzare nel diagramma le attività nella loro posizione al più presto.

Se il reticolo è molto semplice si possono omettere le frecce, disegnando solo archi non orientati, in quanto il verso del tempo in un reticolo ordinato per livelli è già stato individuato.

### L'identificazione delle attività

L'identificazione delle attività appartenenti al reticolo è realizzata attraverso l'attribuzione di un codice alfanumerico identificativo ad ogni nodo.

L'identificazione delle attività è importante soprattutto per le applicazioni "a mano", in quanto è un'operazione semi-automatica se si opera con un software su personal computer.

Sono stati individuati due requisiti fondamentali da soddisfare nell'attribuzione dell'identificativo di ogni nodo.

Il primo requisito è quello di unicità. Ad ogni nodo deve corrispondere un unico codice identificativo. Questo in quanto i nodi del reticolo rappresentano attività perfettamente identificate nel processo per modalità di esecuzione, obiettivi e contesto. Possono essere anche attività fittizie, di durata nulla, ma ugualmente sono perfettamente identificate in quanto hanno lo scopo di individuare momenti particolari del processo, veri e propri eventi, che corrispondono al raggiungimento di obiettivi specifici.

Il secondo requisito è quello della progressione per numeri ordinali concorde con il tempo di esecuzione. E' infatti prassi che il codice identificativo, se contiene una parte numerica, segua la

progressione dei tempi con numeri via via crescenti. Per questo motivo si usa numerare i nodi del reticolo solo dopo che è stato ordinato per livelli. La numerazione è di solito una serie aritmetica secondo multipli di cinque, dieci, cento ecc. Questo permette di inserire nuovi nodi, e quindi nuove attività in futuro, senza modificare gli altri identificativi e rispettando il requisito di progressione numerica.

Tuttavia, mentre il requisito di unicità è irrinunciabile, la moderna pratica della programmazione con il personal computer può prescindere dal requisito di progressione numerica, permettendo eccezioni nella numerazione ordinale senza conseguenze.

Può essere utile inserire nel codice identificativo del nodo un riferimento alla WBS di progetto o all'articolo di capitolato o di elenco prezzi. In questo caso è sempre bene che queste ulteriori codificazioni siano solo una parte del codice identificativo. Infatti inserire solo il codice WBS significa non rispettare il requisito di progressione numerica, mentre inserire solo l'articolo di elenco prezzi significa non rispettare il requisito di unicità. Conviene quindi strutturare il codice con una parte numerica indipendente da altre codificazioni del progetto, riferita solo al reticolo e quindi alla programmazione.

Questo permette di rispettare i due requisiti sopracitati, con la possibilità di fornire utili informazioni con i riferimenti alla WBS o alla contabilizzazione delle attività.

In proposito è spesso invalsa nei programmatori la prassi di identificare i nodi del reticolo con un codice alfanumerico che, in analogia con la WBS di progetto ma con una struttura differente, permette l'identificazione dalla categoria di lavoro o della fase di esecuzione, o di altre informazioni ancora, in modo da avere una struttura del lavoro alternativa alla WBS, ma analoga, con cui gestire le informazioni date dal programma reticolare.

## **La logica del reticolo come rappresentazione della realtà costruttiva**

### *La sovrapposizione delle attività*

Il metodo PDM semplice è basato come il CPM sul solo legame logico di tipo fine – inizio (FTS) per indicare una relazione tra due o più attività. Questo porta necessariamente all'uso di alcuni di alcuni stratagemmi per rappresentare invece una situazione che si presenta spesso nella pratica cantieristica, ovvero quella della



sovrapposizione temporale di due attività la cui esecuzione è correlata.

Si esamini il caso in cui si debba rappresentare l'esecuzione di due attività T e C, parzialmente sovrapposte. Queste attività cantieristiche siano l'esecuzione di tracce nelle murature a cui segue la posa delle canalizzazioni per gli impianti tecnologici. Si ha:

T = realizzazione di tracce

C = posa di canalizzazioni

Se la relazione tra le due attività è semplicemente di tipo fine – inizio, si può rappresentare il processo come una catena di due attività in cui T è predecessore di C.

Si rappresenta così nel reticolo che il termine di T consente al successore C di iniziare. Se invece si vuole rappresentare una situazione di parziale contemporaneità, occorre suddividere le attività in più parti e legarle con vincoli di dipendenza di tipo fine – inizio. Quindi occorre dividere l'attività T in due attività T1 e T2, e l'attività C in C1 e in C2. Si noti che per evitare interruzioni nell'esecuzione del successore C, occorre che la durata di T2 sia uguale alla durata di C1.

La suddivisione di T in T1 e T2 e di C in C1 e C2, con T2 e C1 completamente (o parzialmente, in caso di durata differente) contemporanee si traduce nel reticolo PDM semplice.

Si consideri ora il caso delle tre attività:

C = posa dei casseri per c.a.

A = posa di armature per c.a.

G = getto di calcestruzzo

Realizzando le attività in sequenza logica si può disegnare la catena con C predecessore di A e G successore di A.

Si pensi ancora una volta che queste tre attività siano realizzate in tre differenti aree di cantiere, ad esempio tre diversi fabbricati. Per una migliore organizzazione del lavoro delle squadre è logico sovrapporre le tre attività in modo da consentire un accorciamento del tempo totale di esecuzione.

Come già detto l'unico modo per rappresentare questa situazione, con il solo legame logico di tipo "fine-inizio" tra le attività, è quello di suddividere le tre attività. Se si fa corrispondere la suddivisione ad attività eseguite nelle tre aree di cantiere differenti si avranno tre catene di attività ognuna relativa ad un'area specifica, ovvero ad un fabbricato, che tiene conto dei vincoli tecnologici tra le attività. Per il fabbricato 1 si avrà la catena di attività C1, A1, G1, per il fabbricato 2 la catena C2, A2, G2, per il fabbricato 3 le attività C3, A3, G3.

Considerando che ogni attività sia realizzata da una risorsa operativa ad essa dedicata, si ha che le attività C1, C2, C3 sono realizzate dalla squadra dei carpentieri, le attività A1, A2, A3 sono realizzate dalla squadra dei ferraioli, le attività G1, G2, G3 realizzate dalla squadra dei cementisti. Quindi, se si programma di utilizzare un'unica squadra per ogni specializzazione per tutti e tre i fabbricati, occorre inserire dei legami che rappresentino la successione tra le attività in funzione dello spostamento delle risorse da un'attività all'altra (lo spostamento di ogni squadra da un fabbricato all'altro). Il flusso delle risorse desiderato è rappresentato dai legami che legano le tre catene che andranno poi a formare il reticolo.

L'obiettivo di modellizzare tre attività la cui esecuzione temporale è parzialmente contemporanea in cantiere è stato raggiunto abbastanza agevolmente. Tuttavia si noti che anche in questo caso la sovrapposizione delle attività ha moltiplicato il numero delle attività del reticolo: da tre si è passati a nove. Il modello cercato però è stato realizzato molto agevolmente, con chiarezza e facilità di rappresentazione.

Si sottolinea che i legami relativi alle catene di ogni singolo fabbricato (ad esempio,  $FTS_{C1-A1}$  e  $FTS_{A1-G1}$ ) sono legami che rappresentano la successione "tecnologica" delle attività, quindi vincoli di tipo naturale, mentre i legami che collegano le catene sono vincoli di risorsa (ad esempio,  $FTS_{C1-C2}$ ,  $FTS_{A1-A2}$  e  $FTS_{G1-G2}$ ). Ai fini del modello reticolare PDM si tratta sempre però di legami che rappresentano una relazione logico-cronologica di successione del tipo di Fine – Inizio, ovvero rappresentano una semplice successione temporale, non implicando, ai fini del funzionamento del modello reticolare temporale, non implicando, ai fini del funzionamento del modello reticolare, un flusso di risorse ma un flusso di tempo. Questo può essere un elemento critico a livello teorico ma non certamente a livello operativo, di effettiva gestione delle risorse in cantiere perché in realtà si vincola il programma lavori ma non l'impiego delle risorse. Inoltre occorre evidenziare che questi legami di risorsa garantiscono sì il flusso delle risorse da un'attività all'altra, ma non il requisito del continuo utilizzo delle stesse. Ovvero, in funzione dell'analisi temporale il reticolo potrà generare degli intervalli di tempo tra la fine del predecessore, per esempio A1, e l'inizio del successore, per esempio A2. Questo lasso di tempo è detto *ritardo semplice* o *ritardo di legame*.

Si osservi infine che l'aver distinto le attività dalle relazioni nel modello AON rende estremamente più semplice la stesura della

logica del reticolo. La semplicità si traduce in una maggiore chiarezza e, fondamentale, in un notevole risparmio di tempo per la realizzazione di questa fase di lavoro.

### **Analisi dei tempi nel metodo PDM semplice**

L'analisi dei tempi del metodo PDM semplice non è altro che l'analisi temporale del CPM trasposta nella rappresentazione con le attività sui nodi del reticolo (AON). La differenza sostanziale è che vengono a mancare gli eventi del reticolo e quindi i tempi di evento. L'analisi dei tempi individua quattro tempi per l'esecuzione di ogni attività  $i$ -esima, due tempi minimi e due tempi massimi.

I tempi minimi, ovvero al più presto (ASAP):

- il tempo minimo di inizio E<sub>Si</sub> (Early Start) dell'attività  $i$ -esima; è l'istante più vicino al tempo S, inizio del processo costruttivo, in cui l'attività può iniziare;
- il tempo minimo di fine E<sub>Fi</sub> (Early Finish) dell'attività  $i$ -esima; è l'istante più vicino al tempo S, inizio del processo costruttivo, in cui l'attività può terminare.

I tempi massimi, ovvero al più tardi (ALAP):

- il tempo massimo di inizio L<sub>Si</sub> (Late Start) dell'attività  $i$ -esima; è l'istante più vicino al tempo T, fine del processo costruttivo, in cui l'attività può iniziare, senza ritardare a sua volta T;
- il tempo massimo di fine L<sub>Fi</sub> (Late Finish) dell'attività  $i$ -esima; è l'istante più vicino al tempo T, fine del processo costruttivo, in cui l'attività può terminare, senza ritardare a sua volta T.

E' la schedulazione con i tempi minimi, al più presto, la più significativa per la determinazione del programma dei lavori. La conoscenza dei tempi massimi però costituisce una risorsa importante per la gestione dei lavori sul campo, in quanto consente di procedere all'ottimizzazione delle risorse produttive o economiche ed alla gestione degli imprevisti grazie al margine di flessibilità di cui sono dotate le attività subcritiche. Fondamentalmente questo margine di flessibilità è rappresentato dal tempo totale a disposizione di un'attività per il suo svolgimento, margine che consente di rispettare i termini previsti per l'ultimazione dei lavori utilizzando gli scorrimenti delle attività.

*Il tempo totale a disposizione*

Il tempo totale a disposizione di un'attività i-esima (TTDi) è il lasso di tempo che intercorre tra il tempo minimo di inizio e il tempo massimo di fine:

$$TTDi = LFi - ESi$$

Se l'attività i-esima si svolge all'interno di questo intervallo di tempo, a prescindere dall'effettiva durata e dagli effettivi tempi di inizio e fine attività, non si avranno ritardi al tempo T di ultimazione del processo.

Si noti come i due estremi dell'intervallo del tempo a disposizione, il tempo minimo di inizio (ESi) ed il tempo massimo di fine (Lfi) siano gli elementi fondamentali per la schedulazione dell'attività e tra di essi non sussista alcuna relazione. Questo deriva dal fatto che sono generati da due calcolazioni distinte,

### Analisi in Avanti

L'analisi in avanti è un algoritmo che fornisce i tempi minimi delle attività, ovvero la schedulazione al più presto, detta brevemente "ASAP" (*As Soon As Possible*).

Questo algoritmo parte dalla prima attività e percorre il reticolo nel senso della progressione temporale (il verso delle frecce) sino all'attività finale, calcolando tutti i tempi minimi, il che equivale a trovare il percorso più lungo dal punto di vista temporale, tra tutti i percorsi possibili che congiungono il nodo iniziale con quello finale del reticolo.

L'analisi in avanti è formata da tre passi:

1)  $ES_{j_0} = S$

Il tempo minimo di inizio dell'attività iniziale  $J_0$  è uguale ad un valore imposto qualsiasi "S".

2)  $EF_j = ES_j + D_j$

Il tempo minimo di fine dell'attività J è uguale alla somma del tempo minimo di  $ES_j$  e della sua durata  $D_j$ .

3)  $ES_j = \max(EF_i) \forall i$

Il tempo minimo di inizio  $ES_j$  dei successori J delle attività i-esime

sarà uguale al massimo dei tempi di fine dei predecessori  $EF_i$ . Questo discende dal legame di fine - inizio ( $FTS_{ij}$ ) tra le attività che impone che nessuna attività possa cominciare se non sono prima terminati tutti i suoi predecessori.

### Analisi all'Indietro

L'analisi all'indietro è un algoritmo che fornisce i tempi massimi delle attività, ovvero la schedulazione al più tardi, detta brevemente "ALAP" (*As Late As Possible*).

Questo algoritmo parte dall'attività finale e percorre il reticolo nel senso opposto a quello della progressione temporale (il verso opposto a quello delle frecce) sino all'attività iniziale, calcolando tutti i tempi massimi.

L'analisi all'indietro è formata da tre passi:

1)  $LF_{j_n} = T$

Il tempo massimo di fine  $LF_{j_n}$  dell'attività finale  $J_n$  è imposto dal programmatore uguale ad un valore  $T$ , che corrisponde al tempo massimo fissato per l'esecuzione del processo produttivo.

2)  $LS_j = LF_j - D_j$

Il tempo massimo di inizio  $LS_j$  dell'attività  $J$  è uguale alla sottrazione della durata dell'attività  $D_j$  dal tempo massimo di fine  $LF_j$ .

3)  $LF_i = \min (LS_j) \forall j$

Il tempo massimo di fine  $LF_i$  del predecessore  $I$  delle attività  $j$ -esime è uguale al minimo dei tempi di fine dei successori  $LS_j$ . Questo discende dal legame fine - inizio tra le attività (FTS<sub>ij</sub>) che impone che l'inizio dei successori sia possibile solo una volta terminato il predecessore.

#### Convenzione di scorrimento zero

Se si impone che il valore  $T$ , che rappresenta il tempo massimo di fine  $LF_{j_n}$  dell'attività finale, sia uguale al tempo minimo di fine  $EF_{j_n}$  della medesima attività, cioè:

$$T = LF_{j_n} = EF_{j_n}$$

Allora il minimo valore di scorrimento nel reticolo è uguale a zero.

Altrimenti  $T$  può essere, per esempio, corrispondente alla durata contrattuale per eseguire i lavori.

#### Il ritardo di vincolo (FTS= $n$ )

Il reticolo PDM semplice è dal punto di vista matematico un digrafo. Ovvero un reticolo per attività elementari in cui i nodi rappresentano le attività (AON). In generale gli archi di un grafo possono sempre essere dotati di una valutazione. Quindi i legami fine - inizio (FTS) tra le attività possono essere dotati essi stessi

di una “durata”, che rappresenti l’intervallo di tempo che deve intercorrere tra la fine del predecessore e l’inizio del successore. L’esplicitazione del legame logico che intercorre tra le attività costruttive permette di attribuire ad esso una valutazione che rappresenta un ritardo o un anticipo, se di segno negativo, tra la fine del predecessore e l’inizio del successore. Questo ritardo è detto di “vincolo” ed è semplicemente una quantità di tempo imposta dal programmatore tra la fine del predecessore I e l’inizio del successore J.

In termini matematici si indica:

$$FTS_{ij} = n$$

dove n indica il numero di unità di tempo che devono passare dalla fine del predecessore I per consentire l’inizio del successore J e rappresenta la valutazione temporale della relazione fine – inizio  $FTS_{ij}$  tra le attività I e J.

La valutazione del legame indicata con  $FTS_{ij} = n$  si indica anche con la sigla LT dall’inglese “*Lead Time*”, tempo di risposta:

$$FTS_{ij} = n = LT$$

Il ritardo di vincolo è una quantità di tempo fissa, non modificabile, che normalmente si interpreta con una “addizione” al tempo di fine del predecessore.

Per esempio si consideri l’attività di verniciatura: prima di effettuare successive operazioni è necessario attendere il tempo di asciugatura della verniciatura in quanto è un processo chimico che ne è conseguente e inevitabile. Dal punto di vista del modello reticolare il tempo di asciugatura può quindi essere trattato in tre modi:

1. si aumenta la durata dell’attività di verniciatura, il che non è generalmente corretto. in quanto ad una durata di un’attività sono normalmente associate delle risorse;
2. si inserisce un’attività di asciugatura, come successore della verniciatura, senza uso di risorse, ma con durata definita;
3. si inserisce il ritardo di legame sul legame di fine – inizio che ritarda l’inizio del successore del tempo necessario all’asciugatura.

In linea generale i programmatori preferiscono la seconda soluzione, ovvero inserire una nuova attività, per motivi di chiarezza di rappresentazione.

Si consideri, ancora, l’esempio di un getto di calcestruzzo per realizzare il solaio al primo piano, rappresentato dall’attività A, e la posa dell’acciaio dei pilastri del secondo ordine, rappresentato

dall'attività B. Prima di svolgere l'attività B occorre che sia trascorso almeno un giorno in modo che il getto sia calpestabile. Pertanto il legame fine – inizio avrà una valutazione di un giorno:

$$FTS_{AB} = LT = 1$$

### Il ritardo di legame con $FTS=0$

Il ritardo di legame è un'entità temporale che nasce nel reticolo con le attività sui nodi, e non ha “precedenti” nel CPM con le attività sulla freccia.

Fissato un reticolo PDM semplice, con un determinato insieme di attività caratterizzate dalle durate assegnate, e con un determinato insieme di legami tra le attività di tipo fine – inizio con valutazione nulla ( $FTS=0$ ), il ritardo di legame (o ritardo semplice) è l'intervallo temporale che si determina, a causa della calcolazione dei tempi, tra il tempo minimo di fine del predecessore ed il tempo minimo di inizio del successore, per i tempi minimi, e tra il tempo massimo di fine del predecessore ed il tempo massimo di inizio del successore, per i tempi massimi.

Quindi, siano date due attività I e J, vincolate da un legame  $FTS_{IJ}=0$  per cui I sia il predecessore e J il successore, allora si ha:

–  $R_{IJ}$ , Ritardo di legame per i tempi minimi:

$$R_{IJ} = ES_J - EF_I$$

–  $R_{JI}$ , Ritardo di legame per i tempi massimi:

$$R_{JI} = LS_J - LF_I$$

$$R_{IJ} = ES_J - EF_I = r$$

$$R_{JI} = LS_J - LF_I = s$$

Si tratta, in buona sostanza, di una sorta di scorrimento del legame che, per essere distinto dagli scorrimenti, o tempi flottanti, calcolabili sulle attività, è stato denominato con il termine ritardo, come d'altronde è definito in letteratura “lag”. Si noti che il ritardo di legame è concettualmente differente dal ritardo di vincolo, che è un valore imposto dal programmatore.

Il ritardo di legame si definisce nel reticolo dei legami “speciali” che hanno ritardo semplice nullo, ovvero:

$$R_{IJ} = 0$$

Questi legami sono detti “condizionamenti” o “limitanti”, in quanto sono quelli che definiscono il tempo di inizio al più presto del successore. Gli altri legami dello stesso successore con altri predecessori sono detti “non condizionanti” o “non limitanti”.

In pratica il legame condizionante corrisponde a quello con il predecessore che ha la fine al più presto più ritardata.

Si analizza ora il caso di tre attività A, B e C, rispettivamente legate con due legami  $FTS_{AB}=0$  e  $FTS_{CB}=0$ . Dei due predecessori A e C dell’attività B, il C è il ritardato nel completamento, poiché  $EF_C > EF_A$  e quindi determina il legame condizionante per l’inizio del successore B. Infatti sarà:

$$R_{AB} = r > 0$$

e

$$R_{CB} = 0$$

L’insieme dei legami con ritardo di legame nullo definisce nel reticolo PDM con solo legami di tipo fine – inizio una struttura ad albero, detta “albero del ritardo del legame nullo”. L’albero del ritardo del legame nullo è l’insieme dei legami limitanti presenti nel reticolo.

In generale in un reticolo PDM con solo legami  $FTS_{IJ}=0$  avremo:

- ogni legame del reticolo è dotato di ritardo di legame;
- con  $R_{IJ}=0$  nessun predecessore può terminare dopo l’inizio del successore;
- il ritardo di legame è una proprietà del legame tra le attività;
- poiché il tempo minimo di inizio  $ES_J$  di un’attività J è dato dal massimo dei tempi minimi di fine  $ES_I$  dei suoi predecessori I, ci sarà sempre tra tutti i legami entranti in un’attività un legame con ritardo di legame nullo ( $R_{IJ}=0$ ), ovvero condizionante.

### Il ritardo di legame con $FTS > 0$

Il ritardo di legame e il ritardo di vincolo sono due entità concettualmente differenti, non coincidono e non sono sommabili in quanto il primo deriva dall’algoritmo di calcolo e il secondo è un dato imposto dal programmatore. Quindi un legame  $FTS_{IJ}$  tra due attività I e J può allo stesso tempo essere dotato di un ritardo di vincolo maggiore di zero:

$$FTS_{IJ} = n > 0$$

ed avere un ritardo di legame pari a:



$$R_{IJ} = R > 0$$

oppure nullo:

$$R_{IJ} = 0$$

in maniera del tutto indipendente, a seconda della struttura del reticolo e dei tempi di durata delle attività.

Si consideri ancora l'esempio di un getto di calcestruzzo per realizzare il solaio al primo piano, rappresentato dall'attività A, e la posa delle armature dei pilastri del secondo ordine, rappresentato dall'attività B. Si supponga che, prima di svolgere l'attività B occorra che siano trascorsi  $n$  giorni. pertanto il legame fine – inizio avrà una valutazione:

$$FTS_{AB} = n$$

Tuttavia prima di svolgere l'attività B occorre che siano state approvvigionate in cantiere le nuove gabbie di armatura, cioè l'attività C. Il legame tra le due attività è  $FTS_{CB} = 0$ .

Si possono presentare due casi. Il primo caso è quello in cui in base al calcolo temporale risulta che la fine dell'attività C è più ritardata dalla fine dell'attività A, cioè:

$$EF_C > EF_A + FTS_{AB}$$

Pertanto il legame condizionante per l'attività B è quello  $FTS_{CB}$ , il che genera un ritardo semplice sul legame  $FTS_{AB}$ :

$$R_{AB} = r$$

Infatti il ritardo di vincolo non è altro che il ritardo della fine dell'attività A, per cui occorre detrarre il suo valore nel calcolo del ritardo semplice.

Quindi è:

$$R_{AB} = ES_B - EF_A - FTS_{AB} = r > 0$$

e

$$R_{CB} = 0$$

Il legame limitante è  $FTS_{CB}$ .

Il secondo caso è quello in cui la fine dell'attività A con il ritardo di vincolo è più tardata della fine dell'attività C, cioè

$$EF_A + FTS_{AB} > EF_C$$

con

$$FTS_{AB} = n$$

e

$$FTS_{CB} = 0$$

pertanto il legame condizionante per l'attività B è quello  $FTS_{AB}$ , il che genera un ritardo semplice sul legame  $FTS_{CB}$ :

$$R_{CB} = ES_B - EF_C = r > 0$$

e

$$R_{AB} = 0$$

Il legame limitante è  $FTS_{AB}$ .

Quindi, nel caso generale in cui uno stesso legame  $FTS_{ij}$  sia presente il ritardo di legame e il ritardo di vincolo si ha:

$$R_{ij} = ES_j - EFi - FTS_{ij} = ES_j - Efi - n = r$$

Dove:

$$FTS_{ij} = n$$

Il ritardo di vincolo viene spesso utilizzato per processi produttivi o tempi di attesa di qualsiasi tipo (tempi necessari per la presa del calcestruzzo, per autorizzazioni amministrative, ecc.). Il suo utilizzo per modellare il processo costruttivo è comodo e semplice, ma può creare problemi di lettura del reticolo. Infatti se la valutazione del legame non è esplicitata nei grafici o nei tabulati di schedulazioni, la programmazione può risultare meno chiara e immediata. Per questo spesso è consigliabile inserire un'attività apposita, in luogo del ritardo di vincolo, nonostante ciò si aumenta il numero di attività e quindi la complessità del reticolo.

### **Teoria dei margini di attività e attività critiche per i tempi**

Come già visto per il CPM, lo studio dei tempi marginali delle attività, detti tempi flottanti o scorrimenti, è fondamentale dal punto di vista della gestione dell'esecuzione delle attività e per la creazione del programma target.

I tempi flottanti non solo distinguono le attività critiche per i tempi da quelle subcritiche, ma permettono di gestire gli imprevisti al meglio, quali ritardi dati da mancata produzione o da maggiori tempi di lavorazione, di concentrare l'attenzione del management sulle attività più importanti, di ottimizzare l'impiego delle risorse produttive ed economiche.

Nel PDM semplice si definiscono i seguenti scorrimenti:

- scorrimento totale  $TF_j$ ;
- scorrimento libero  $FF_j$ ;
- scorrimento interferente  $INTF_j$ ;
- scorrimento indipendente  $INDF_j$ ;
- scorrimento condizionale  $CONF_j$  o di sicurezza  $SAF_j$ ;
- scorrimento programmato  $PF_j$ .

Dal punto di vista dell'applicazione pratica si osserva che lo scorrimento più usato è lo scorrimento totale, che fornisce una quantificazione complessiva del margine di libertà ammissibile per lo svolgimento dell'attività, seguito dallo scorrimento libero che è considerato importante per la direzione soprattutto per la sua applicazione nella ottimizzazione della schedulazione delle risorse.

### Scorrimento totale TFj e attività critiche

Lo scorrimento totale di un'attività J, indicato con TFj (Total Float), è definito come la massima quantità di tempo di cui si può ritardare lo svolgimento dell'attività senza causare un ritardo alla data di completamento del processo produttivo e quindi senza aumentarne la durata complessiva prevista dal programma reticolare.

Lo scorrimento totale è uguale alla differenza tra i tempi minimi e massimi di inizio o di fine di un'attività. Per i tempi di fine:

$$TFj = LFj - EFj$$

Dalle precedenti si ha anche

$$TFj = LFj - (ESj + Dj) = LFj - Esj - Dj$$

e, sostituendo il valore LFj si ha:

$$TFj = LFj - ESj$$

Introducendo il Tempo Totale a Disposizione:

$$TTDj = LFj - Esj$$

si ha

$$TFj = TTDj - Dj$$

Le attività con valore minimo di TFj nel reticolo si dicono attività critiche per i tempi J(cr):

$$TFj (cr) = \min(TFj) \forall j$$

Se si è utilizzata la convenzione di scorrimento zero le attività critiche hanno:

$$TFj (cr) = \min(TFj) \forall j$$

Lo scorrimento totale è una quantità di tempo "condivisa" tra le attività che appartengono ad uno stesso percorso.

Infatti l'utilizzo di tutto o solo una parte dello scorrimento totale per ritardare un'attività può causare un ritardo nei tempi effettivi di inizio, rispetto ai tempi minimi, di uno o più successori appartenenti allo stesso percorso. L'uso dello scorrimento totale in un'attività di un percorso normalmente ridurrà lo scorrimento di tutte le altre attività che lo condividono.

Pertanto si dice che lo scorrimento totale è un attributo di un percorso, e le singole attività non lo possiedono, ma lo condividono. Il completo utilizzo dello scorrimento totale TFj per ritardare un'attività J è sottoposto a due condizioni:

- i predecessori della J con il tempo di completamento più ritardato non hanno subito ritardi e sono stati completati al più presto, nel tempo minimo di fine;

- i successori della J più anticipati devono essere iniziati nel tempo massimo di inizio e non devono subire ritardi, in quanto diventano attività critiche.

### Attività ipercritiche

Per il suo significato lo scorrimento totale ha normalmente valore positivo o nullo. Se nel reticolo si ottiene per un'attività  $TF_j < 0$  l'attività si dice ipercritica. Significa in questo caso che occorre ridurre la durata per permetterne l'esecuzione, o, se ciò non è possibile, occorre modificare le date imposte come vincoli esterni al reticolo stesso.

Se un'attività ipercritica viene realizzata nella durata prevista si ritarda il completamento del progetto della quantità di tempo indicata dallo scorrimento totale negativo.

Le cause di uno scorrimento totale negativo possono essere fondamentalmente le seguenti:

- per l'ultima attività  $J_n$  si è imposto  $LF_{J_n} < EF_{J_n}$ , per cui  $TF_{J_n} < 0$  per tutte le attività critiche;
- è stato imposto un vincolo temporale, ovvero una data imposta  $X$  per il completamento di un'attività  $j$  tale che  $EF_j > X$ . Nel caso in cui un programma reticolare presenti delle attività ipercritiche è necessario verificare tutto il programma per eliminare lo scorrimento negativo, rimuovendo i vincoli e/o modificando la durata delle attività ipercritiche.

### Cammino critico

Le attività critiche formano un percorso lungo il reticolo che congiunge l'attività iniziale con l'attività finale. La somma delle durate delle attività critiche su un cammino critico fornisce la durata complessiva del processo. Si dice dunque che il cammino critico è il percorso più lungo tra tutti i percorsi possibili nel reticolo.

Si osservi come dalla definizione dell'albero di ritardo di legame nullo, insieme dei legami limitanti, combinata con la definizione di cammino critico deriva che il cammino critico è il percorso (o i percorsi) dell'albero di ritardo di legame nullo che congiunge l'attività iniziale con l'attività finale del reticolo.

### Lo scorrimento libero $FF_j$

Lo scorrimento libero, indicato con  $FF_j$  (Free Float), misura la massima quantità tempo di cui un'attività può essere ritardata senza causare un ritardo dei tempi minimi di inizio dei successori

e senza tardare l'ultimazione del programma lavori. Utilizzare solo lo scorrimento libero di un'attività consente di ritardarne il completamento permettendo alle attività successive di iniziare al più presto.

Lo scorrimento libero dell'attività  $j$  si calcola sottraendo al proprio tempo minimo di fine  $EF_j$  il minimo tra i tempi minimi di inizio  $ES_k$  dei successori  $K$ -esimi:

$$FF_j = \min(ES_k) - EF_j \quad \forall K$$

Dalla sua definizione è evidente che lo scorrimento libero è un porzione dello scorrimento totale.

Poiché, data una schedulazione, il valore di tempo minimo di fine  $EF_j$  è una costante, allora possiamo includere questo valore nella minimizzazione della precedente equazione:

$$FF_j = \min(ES_k - EF_j) \quad \forall K$$

Dalla definizione di ritardo di legame  $R_{jk}$ :

$$R_{jk} = ES_k - EF_j$$

Pertanto sostituendo si ha:

$$FF_j = \min(R_{jk}) \quad \forall K$$

Dunque lo scorrimento libero è uguale al minor valore di ritardo semplice nei legami con i successori  $k$ -esimi dell'attività  $j$ . Deriva che se uno di questi legami è limitante per un successore e presenta:

$$R_{jk} = 0$$

allora l'attività  $J$  non è dotata di scorrimento libero.

Per la sua definizione si ha che, se i predecessori di  $j$  non hanno ritardi, lo scorrimento libero è patrimonio della singola attività, e al contrario dello scorrimento totale non è condiviso in quanto il suo consumo non tarda l'inizio al più presto dei successori.

Lo scorrimento libero per l'attività  $j$  è presente solo quando i suoi successori sono dotati di altri predecessori con legami limitanti.

### Lo scorrimento interferente $INTF_j$

Lo scorrimento interferente di un'attività  $j$  misura la parte di scorrimento che non è più permessa se l'attività successiva  $k$  inizia nel suo tempo minimo di inizio (al più presto). Lo scorrimento interferente non è quindi, in effetti, un ritardo ammissibile, ovvero uno scorrimento nel senso delle definizioni date sino ad ora, ma la misura della sovrapposizione del ritardo ammissibile del predecessore con l'inizio più anticipato del successore.

Dalla definizione:

$$INTF_j = LF_j - \min(ES_k) \quad \forall K$$

Dalla definizione di scorrimento totale dell'attività  $J$ :

$$TF_j = LF_j - EF_j$$

Si ha, sostituendo  $LF_j$ :

$$INTF_j = TF_j + EF_j - \min(ES_k) \quad \forall K$$

Poiché, data una schedulazione, il valore  $EF_j$  si può considerare costante, allora si può includere tale valore nella minimizzazione:

$$INTF_j = TF_j - \min(ES_k - EF_j) = TF_j - \min(R_{jk}) \quad \forall K$$

E, ricordando la definizione di scorrimento libero, si ha:

$$INTF_j = TF_j - FF_j$$

Da cui:

$$TF_j = INTF_j + FF_j$$

Lo scorrimento totale è una somma di più contributi, il contributo dato dallo scorrimento libero e quello dell'intervallo di tempo che interferisce con il successore, appunto detto scorrimento interferente.

### Lo scorrimento indipendente $INDF_j$

Lo scorrimento indipendente corrisponde alla situazione più svantaggiosa per l'attività  $j$ , cioè misura il ritardo ammissibile se il più ritardato dei predecessori  $i$  è terminato al più tardi, nel tempo massimo di fine  $LF_i$ , e il più anticipato dei suoi successori  $k$  deve iniziare al più presto, ovvero nel tempo minimo di inizio  $ES_k$ , senza tardare l'ultimazione lavori. Ovvero:

$$INDF_j = \min(ES_k) - D_j - \max(LF_i) \quad \forall k; \forall i$$

Poiché il calcolo dello scorrimento indipendente è funzione dei valori dei tempi minimi dell'attività susseguente  $k$ -esima più anticipata, dei tempi massimi dell'attività precedente  $i$ -esima più ritardata e del valore della durata dell'attività stessa, è possibile che per delle attività  $j$  l'intervallo di tempo tra la fine al più tardi dell'attività precedente e l'inizio al più presto dell'attività succedente sia minore della durata  $D_j$  dell'attività stessa. In questo caso non è possibile svolgere l'attività  $j$  nelle suddette condizioni, e il valore dello scorrimento indipendente  $INDF_j$  dal calcolo è negativo. E' evidente che un valore negativo non ha significato e ai fini del controllo si deve considerare uguale a zero. Lo scorrimento indipendenti, come è facile dimostrare, è un'aliquota dello scorrimento libero.

Perciò se è:

$$FF_j = 0$$

allora

$$INDF_j = 0$$

Si noti infine che tra tutti gli scorrimenti possibili quello indipendente non risente dell'effettivo svolgimento delle altre

attività del reticolo precedenti e susseguenti, per cui, se esiste, è patrimonio della singola attività senza limitazioni.

Lo scorrimento condizionale CONFj o di sicurezza SAFj

Lo scorrimento condizionale (Conditional float) di un'attività j misura il ritardo ammissibile se il più ritardato dei predecessori i è terminato al più tardi, nel tempo massimo di fine LFi, e il più anticipato dei successori k può anch'esso iniziare al più tardi, ovvero nel tempo massimo di inizio LSk, senza tardare il completamento del programma lavori. E' detto scorrimento condizionale in quanto la sua disponibilità è condizionata dalla possibilità del successore di iniziare al più tardi. Analiticamente:

$$CONFj = \min(LSk) - Dj - \max(LFi) \quad \forall k; \forall i$$

Poiché è:

$$LFj = \min(LSk) \quad \forall k$$

Si ha:

$$CONFj = LFj - Dj - \max(LFi) \quad \forall i$$

Anche in questo caso valori negativi non hanno significato. Lo scorrimento di sicurezza (Safety float) non è altro che lo scorrimento condizionale considerato in posizione antecedente l'attività j (quest'ultima in posizione ALAP), il che consente di non inserire il valore della durata Dj nella definizione. Infatti lo scorrimento di sicurezza rappresenta la quantità di tempo di cui può essere dilatata la durata di un'attività j quando il più ritardato dei predecessori i-esimi termina nel tempo massimo di fine, senza tardare il completamento del programma lavori. Si ha:

$$SAFj = LSj - \max(LFi) \quad \forall i$$

In questo caso lo scorrimento è detto scorrimento di sicurezza, per l'appunto, in quanto rappresenta l'ultima possibilità di non tardare l'ultimazione dei lavori.

Lo scorrimento programmato PFj e le date imposte

Si è visto come l'algoritmo PDM fornisca due schedulazioni per le attività, quella al più presto (ASAP) e quella al più tardi (ALAP). Questo permette alle attività di essere allocate temporalmente in molteplici (e dal punto di vista matematico infinite, ma discrete nell'applicazione pratica) posizioni tra queste due situazioni limite, valutandone le conseguenze in termini di scorrimenti, ovvero ritardi. Anche in questo caso la determinazione del tempo totale a disposizione consente di quantificare esattamente la finestra temporale concessa all'attività.

Nel PDM lo scorrimento programmato è la distribuzione, in tutto o in parte, dello scorrimento totale di un cammino subcritico sulle sue attività componenti in relazione a criteri specifici imposti dal programmatore. Lo scorrimento programmato dell'attività  $j$  si indica con  $PF_j$ .

Si tratta, in buona sostanza, di vincolare l'esecuzione di un'attività in un determinato periodo all'interno del suo tempo totale a disposizione. Per fare questo la pratica dei programmatori ha individuato otto tipi di "restrizioni", dette anche "*constraint*", da assegnare all'attività:

1. Must Start On = l'attività deve iniziare esattamente nella data imposta;
2. Must Start On or Later = l'attività deve iniziare nella data imposta o più tardi (detto anche "Target Start");
3. Must Start On or Earlier = l'attività deve iniziare nella data imposta;
4. Must Finish On = l'attività deve finire esattamente nella data imposta;
5. Must Finish On or Later = l'attività deve finire nella data imposta o più tardi;
6. Must Finish On or Earlier = l'attività deve finire nella data imposta o prima (detto anche "Target Completion");
7. Must Start Between = l'attività deve iniziare all'interno di un determinato periodo;
8. Must Finish Between = l'attività deve terminare all'interno di un determinato periodo.

L'imposizione di queste "restrizioni" consiste sostanzialmente nell'assegnare date specifiche per l'inizio o la fine delle attività e, per questo si definiscono normalmente anche come "date imposte". Si osservi che, in realtà, anche le schedulazioni al più presto (ASAP) e al più tardi (ALAP) sono in qualche modo da considerare come delle "restrizioni" per le attività.

### **Il Precedence Diagramming Method generalizzato**

Il Precedence Diagramming Method (PDM) è attualmente il metodo più utilizzato per la programmazione dei lavori proprio nella sua forma generalizzata, facilmente realizzabile tramite i numerosi applicativi informatici disponibili sul mercato.

La necessità di rappresentare tutti i possibili legami che si possono instaurare tra due attività correlate in senso logico – cronologico, ha portato alla codifica del Precedence Diagramming Method nella sua forma più completa e complessa, definita appunto PDM generalizzato in quanto utilizza legami logici



generalizzati, per distinguerla dalla sua forma “semplice”. Questa differenza di denominazione si rende necessaria per individuare una metodologia che, in effetti, porta alla costruzione di modelli reticolari molto differenti e con caratteristiche e peculiarità proprie.

### **I quattro legami logici**

Si considerino due attività A e B, e tra queste due attività A sia il predecessore logico e B il successore. Il PDM semplice utilizza come unico legame logico tra predecessore A e successore B il legame di fine-inizio (FTS: Finish to Start), per cui la fine del predecessore A consente l’inizio del successore B. Se il legame è valutato con un numero di giorni  $n$ , allora la fine del predecessore A consente l’inizio del successore B dopo  $n$  giorni:

$$FTS_{AB} = n.$$

La semplicità e la chiarezza del PDM è proprio riposta nell’espressività di questa rappresentazione. Tuttavia, nel caso in cui si dovessero rappresentare delle attività sovrapposte temporalmente, completamente o parzialmente, occorre suddividere le attività in più parti per rappresentare correttamente la modalità esecutiva contemporanea.

Il PDM generalizzato supplisce a questo limite del PDM semplice tramite l’introduzione di nuovi legami tra le attività, detti appunto legami generalizzati.

Il legame inizio-inizio (STS: Start to Start), vincola tra loro l’inizio delle due attività: l’inizio del predecessore A consente l’inizio del successore B dopo la quantità di tempo espressa dalla valutazione del legame, generalmente indicata con  $n$ . Si indica:

$$STS_{AB} = n.$$

Il legame fine-fine (FTF: Finish to Finish), vincola tra loro la fine delle due attività. la fine del predecessore A consente la fine del successore B dopo la quantità di tempo espressa dalla valutazione del legame  $n$ . Si indica:

$$FTF_{AB} = N.$$

Il legame inizio-fine (STF: Start to Finish), vincola tra loro l’inizio e la fine delle due attività: l’inizio del predecessore A consente la fine del successore B dopo la quantità di tempo espressa dalla valutazione del legame  $n$ . Si indica:

$$STF_{AB} = n.$$

Quindi, si individuano in un’attività due momenti di controllo, l’inizio e la fine, che possono essere collegati tra successore e predecessore in ognuno dei quattro modi possibili.

### Rappresentazione grafica e interpretazione dei legami generalizzati

Grazie all'introduzione dei quattro legami logici generalizzati è possibile rappresentare con il modello reticolare attività che si svolgono in parziale o totale contemporaneità, oppure a cascata, con grande facilità.

Ma queste nuove potenzialità del metodo reticolare suggeriscono alcune osservazioni.

La prima osservazione è relativa alla rappresentazione grafica del modello reticolare. I nodi del reticolo, le attività, è bene che evidenzino con chiarezza l'inizio e la fine, che sono gli stati di controllo, in quanto da esse si dipartono gli archi che rappresentano i vari tipi di legame tra le attività. Per questo si è instaurata la convenzione di rappresentare le attività nel reticolo come rettangoli (detti "box"), in cui si contraddistingue un bordo di inizio (lato verticale a sinistra), che rappresenta l'inizio dell'attività, ed un bordo di fine (lato verticale a destra), che rappresenta la fine dell'attività.

La seconda osservazione è relativa al modello reticolare stesso. Infatti la sovrapposizione delle attività si effettua valutando i legami con dei valori che rappresentano degli intervalli di tempo o dei ritardi di vincolo.

In realtà il programmatore, quando pensa a ritardare l'inizio del successore B rispetto, per esempio, all'inizio del predecessore A, si riferisce in realtà alla quantità di lavoro che deve essere svolta dal predecessore A per permettere a B di cominciare a lavorare. Pertanto, se per esempio A e B sono vincolate da un legame di tipo:

$$STS_{AB} = na$$

in giorni, normalmente si intende che dopo  $na$  giorni di lavoro dell'attività A è possibile incominciare l'attività B. Questo implica che se l'attività A inizia ma si interrompe dopo  $m < na$  giorni, in realtà l'attività B non potrà iniziare, effettivamente, dopo  $na$  giorni perché non è stata svolta una quantità di lavoro sufficiente. Questo, chiaramente, non è un problema dal punto di vista della gestione del cantiere sul campo, ma può generare confusione e fraintendimenti nell'interpretazione della programmazione dei lavori in fase di redazione di uno stato di avanzamento o di uno stato "as built".

Allo stesso modo, per un legame del tipo:

$$FTF_{AB} = nb$$

sempre in giorni, normalmente si intende che dopo la fine del predecessore A occorre svolgere  $nb$  giorni dell'attività B per poter completare l'attività stessa.

Di più complessa interpretazione è il legame di tipo inizio-fine. Per chiarirne il significato si ricorre ad un'ulteriore precisazione. Infatti se sul reticolo si individua:

$$STF_{AB} = n$$

In giorni, normalmente si specifica:

$$n = na + nb$$

il che significa che dopo  $na$  giorni di lavoro dell'attività predecessore A, occorrono  $nb$  giorni di lavoro del predecessore B perché esso sia portato a termine. Il legame inizio-fine è sostanzialmente un legame composto in cui il momento in cui è stato prodotto lavoro sufficiente a "passare" da un'attività all'altra non coincide con nessuno degli stati di inizio e fine del predecessore e del successore.

Volendo unificare la definizione di legame generalizzato nel PDM si può dare la seguente: se  $s$  considerano due attività, A e B, con A predecessore e B successore, i cui stati di controllo X di A e Y di B siano vincolati tra loro, allora si definisce legame logico XTY:

$$XTY_{AB} = n$$

Dove:

X = stato di controllo, inizio o fine, del predecessore A;

Y = stato di controllo, inizio o fine, del successore B;

$n$  = valutazione del legame tra A e B.

Il legame generalizzato  $XTY_{AB}$  indica che la realizzazione dello stato X (inizio o fine) di A permette la realizzazione dello stato Y (inizio o fine) di B dopo  $n$  unità di tempo.

Come si può intuire, dal punto di vista strettamente logico è corretto vincolare le due attività sovrapposte A e b con due legami, uno di tipo inizio-inizio:

$$STS_{AB} = n$$

ed uno di tipo fine-fine:

$$FTF_{AB} = m.$$

Questo significa che l'inizio del predecessore A consente, dopo  $n$  unità di tempo, l'inizio del successore B, e la fine del predecessore A consente, dopo  $m$  unità di tempo, la fine del successore B. Quindi, per incominciare a svolgere il lavoro del

successore B devono essere svolti  $n$  giorni del predecessore A, e una volta che questo sia terminato occorre svolgere altri  $m$  giorni di lavoro del successore B, per portare a termine quest'ultimo.

Si noti che i due vincoli devono essere "equiversi", ovvero ci deve essere un unico predecessore, A, nella coppia di attività. Se questo non accadesse si avrebbe un loop logico, il che non è permesso nei modelli reticolari deterministici come il PDM.

Il legame composto tra il predecessore A e il successore B con.

$$STS_{AB} = n$$

e

$$FTF_{AB} = m$$

si può indicare:

$$ZZ_{AB} = n, m$$

### Vantaggi, svantaggi e definizione del PDM nella forma Generalizzata

La possibilità di costruire un modello reticolare con quattro tipi di legame tra le attività ha fundamentalmente tre punti di forza:

1. il realismo del modello reticolare, che permette di rappresentare con precisione i rapporti di sequenza logica e cronologica tra le attività;
2. la diminuzione del numero di attività complessive del modello;
3. la rappresentazione fedele delle attività svolte in condizione di parziale o totale contemporaneità.

Oltre a questi indubbi vantaggi del modello PDM generalizzato si devono però evidenziare alcuni svantaggi:

1. la complessità del reticolo che aumenta: nonostante la diminuzione del numero delle attività la molteplicità dei legami può indurre interpretazioni poco chiare o inesatte;
2. la complessità del calcolo che aumenta e la presenza di diverse "versioni" dell'algoritmo più laboriosi, e, di più, nella pratica vengono utilizzati algoritmi differenti per l'analisi temporale che a parità di reticolo (logica, attività e durate) possono portare a soluzioni temporali diverse;
3. perde di significato il cammino critico, in quanto la complessità dei legami rende il percorso critico "articolato" e spesso di scarsa utilità dal punto di vista dell'applicazione pratica;
4. problemi nell'interpretazione dei vincoli tra le attività: infatti i quattro legami logici tra le attività rappresentano, e sono, situazioni di successione temporale tra le attività e non le

corrispondenti quantità di lavoro da svolgere; nel PDM semplice invece la fine delle attività comporta, oltre all'esaurimento delle durata relativa ed effettiva, il termine del lavoro che deve essere svolto con le operazioni dell'attività stessa.

In modo sintetico, il modello PDM generalizzato è un digrafo finito e aciclico di frecce orientate, dette a volte archi, che sono definite come relazioni logiche tra le attività, e di nodi che sono definiti come attività.

Associata ad ogni attività è una variabile non negativa, deterministica, che è detta durata dell'attività, considerata costante, continua e non ulteriormente suddivisibile (ovvero lo svolgimento dell'attività è considerato non interrompibile senza un intervento del programmatore).

Ogni legame è compreso tra due attività e determina un verso di percorrenza del reticolo e rappresenta una relazione logica – cronologica tra predecessore e successore.

I legami logici possibili tra le attività sono di quattro tipi: fine-inizio, inizio-inizio, fine-fine, inizio-fine.

Esistono due attività speciali, che sono l'attività iniziale e l'attività finale del reticolo. Nessun legame termina nell'attività iniziale, che dunque non ha attività precedenti (predecessori), e nessun legame si diparte dall'attività finale, che non ha attività successive (successori). Ogni legame è contenuto in un percorso orientato che conduce dall'attività iniziale all'attività terminale. I successori dell'attività iniziale non possono iniziare prima dell'attività iniziale come i predecessori dell'attività finale non possono terminare dopo l'attività finale.

La struttura del reticolo definisce una sequenza di attività che è detta logica del reticolo.

Si definisce una realizzazione del reticolo il reticolo stesso con un determinato insieme di valori delle durate per le attività.

Per ogni realizzazione del reticolo si definisce cammino critico il percorso più “lungo”, di maggiore durata, che conduce dall'attività iniziale a quella finale, e la durata del processo è definita come la “lunghezza” in termini di durata di tale percorso critico.

La durata del processo corrisponde al valore deterministico calcolato con un algoritmo matematico.

### **Precedence Diagramming Generalizzato: logica del reticolo**

La logica è l'ordine di esecuzione delle attività. Si è già visto che la logica del modello è rappresentata dalla struttura stessa del

reticolo, ovvero dalla successione logico – cronologica delle attività data dai legami tra le stesse.

La definizione dei nuovi tipi di legame permette di esprimere nel modello una logica più complessa ma più aderente alla realtà. Infatti il PDM nella forma generalizzata permette di esprimere con facilità le relazioni di parziale o totale contemporaneità tra le attività lavorative che spesso si sviluppano in cantiere. Mentre per costruire un modello CPM o PDM Semplice il programmatore si domanda quali attività devono essere terminate prima dell'attività da esaminare, nel caso di un modello PDM Generalizzato si deve domandare quali porzioni di attività devono precedere logicamente l'attività in questione.

Si consideri infatti l'esempio, in cui si sovrappongono tre attività di realizzazione di cassature, posa delle armature per il cemento armato e getto del conglomerato cementizio:

C = Posa dei casseri per c.a.

A = Posa di armature per c.a.

G = Getto di calcestruzzo.

E' facile disegnare la sovrapposizione delle attività nel modello reticolare costruito con il metodo PDM Generalizzato, inserendo semplicemente due legami di tipo inizio-inizio tra le attività C ed A:

$$STS_{CA} = n$$

dove  $n$  rappresenta il numero di giorni che servono alla squadra dei carpentieri per realizzare lavoro a sufficienza per permettere ai ferraioli di iniziare a posare il ferro;

e tra le attività A e G:

$$STS_{AG} = m$$

dove  $m$  rappresenta il numero di giorni che servono ai ferraioli per completare le armature in una porzione di cantiere in modo che sia possibile iniziare il getto del calcestruzzo.

La facilità di modellazione e la chiarezza di rappresentazione sono evidenti.

E' chiaro come la rappresentazione delle attività con elementi rettangolari evidenzia il bordo di inizio e il bordo di fine delle attività e pertanto permette di differenziare anche graficamente i diversi tipi di legame.

Si tenga conto però che se l'attività C non termina, e quindi tutti i casseri non sono stati posati, non sarà possibile terminare

neanche il suo successore A, ovvero la posa delle armature. Per questo è necessario inserire il legame:

$$FTF_{CA} = p$$

con  $p$  i giorni di lavoro necessari a terminare la posa delle armature, una volta completati i casseri.

Lo stesso dicasi del rapporto tra le attività A e g: se non è terminata la posa delle armature non si potrà terminare il getto del calcestruzzo, per cui è necessario inserire tra A e G il legame logico:

$$FTF_{AG} = q$$

che indica i  $q$  giorni di lavoro necessari a terminare il getto una volta terminata la posa dell'armatura.

In realtà non pochi sono i problemi che possono emergere.

Il primo aspetto critico è la rappresentazione di attività completamente sovrapposte. Questo è il caso in cui due attività di durata uguale o differente, si svolgono nello stesso lasso di tempo. Nel caso di durata differente l'attività di durata minore si svolge interamente nel lasso di tempo occupato dall'esecuzione dell'attività di durata maggiore.

Un secondo aspetto critico, comune a tutti i reticoli di tipo DETERMINISTICO, è la possibile presenza di circuiti logici detti "loop". Un loop logico è un percorso all'interno del reticolo che, partendo da un'attività (nodo) qualsiasi permette di tornare ad essa seguendo il percorso naturale dei legami indicato dalle frecce. Il modello PDM Generalizzato, che può contenere con facilità molti legami tra le attività (un semplice reticolo può contenere centinaia di attività e di legami), può facilmente indurre in errore anche un programmatore esperto e includere un loop logico. In genere i software attualmente in commercio sono in grado di identificare automaticamente i loop logici. Buona norma è comunque sempre quella di inserire nel reticolo sempre solo i legami fondamentali tra le attività, ovvero solo quelli che si ritengono realmente incidenti sullo svolgimento delle operazioni.

Un ultimo aspetto critico del modello reticolare PDM Generalizzato può essere rappresentato dalla presenza di più estremi aperti alle estremità del reticolo, ovvero di più attività iniziali, senza predecessori, e/o di più attività finali, senza successori.

E' intuitivo infatti come la presenza di estremi aperti possa indurre facilmente in errori di valutazione. Un reticolo con gli estremi aperti contiene più percorsi differenti che partendo da più punti di inizio del reticolo terminano in punti di fine diversi. Questo rappresenta un elemento di indeterminazione nel moment in cui si applica l'algoritmo di calcolo dei tempi: che valori si attribuiranno per il tempo minimo di inizio degli estremi iniziali? e quali valori per il tempo massimo di fine degli estremi finali?

E' facile capire come molti estremi aperti nel reticolo impediscano la corretta calcolazione dei tempi e dei percorsi critici, e inducano nei successivi aggiornamenti del modello, effetti difficilmente valutabili, soprattutto sui tempi di esecuzione delle stesse attività degli estremi aperti. Una prima soluzione consiste nel considerare sempre critiche le attività che costituiscono gli estremi aperti, che devono essere pensate come attività di completamento di uno specifico percorso critico. Quindi il tempo massimo di fine dell'estremo aperto deve essere uguale al tempo minimo di fine dell'attività stessa. Tuttavia questa soluzione può rendere attività critiche per i tempi che, in effetti, potrebbero non esserlo. La soluzione che è considerata più corretta è quella di eliminare gli estremi aperti del reticolo mantenendo un'unica attività iniziale "source" e un'unica attività finale "sink", intervenendo sulla logica reticolare.

Infatti, nella modellazione del cantiere di costruzione si possono trovare molte attività che possono iniziare o finire senza avere, in apparenza, altri particolari vincoli di tipo logico o cronologico con altre attività precedenti o susseguenti, ma in realtà è facile capire che questi vincoli, in genere, esistono, siano essi dovuti all'utilizzo di risorse di vario tipo, come manodopera, mezzi, materiali, spazio o elementi di convenienza economica o operativa, o siano dovuti semplicemente a consuetudini costruttive. E' compito specifico del programmatore, in qualità di artefice del modello, individuare questi legami e inserirli nel reticolo. Al limite è sempre possibile collegare gli estremi aperti di inizio ad un'attività fittizia di inizio del reticolo e gli estremi di fine ad un'attività fittizia di fine, in modo da eliminare gli estremi aperti.

### *L'interpretazione dei legami logici e l'algoritmo di calcolo dei tempi nel PDM Generalizzato*

Si analizzano alcuni esempi chiave per evidenziare le peculiarità del modello reticolare e i possibili problemi che si possono



incontrare nell'uso del PDM Generalizzato. A tale scopo si utilizzeranno anche i diagrammi tempo/produzione.

I diagrammi "Tempo/Produzione", anche noti come "LOB: Line Of Balance" rappresentano graficamente un'attività "A" su di un piano cartesiano ortogonale orientato con i tempi di esecuzione in ascissa e la quantità di prodotto realizzata, o la percentuale di avanzamento, in ordinata. Nel diagramma tempo/produzione si evidenzia la produzione prevista o svolta a consuntivo. In genere si ipotizza una produzione lineare, ovvero rappresentata da una retta sul diagramma dotata di coefficiente angolare costante e positivo. Quindi quando si rappresenta un'attività generica "A" per cui:

1. le operazioni lavorative inizino al termine del giorno zero, ovvero:

$$S_A = 0$$

2. le operazioni proseguano con lo stesso tasso di produzione sino a terminare il giorno  $T_A$ :

$$T_A = S_A + D_A$$

con  $D_A$  che rappresenta la durata dell'attività;

è noto come questa sia un'approssimazione: le attività lavorative possono iniziare, anche in ritardo, poi procedere magari accelerate, interrompersi, riprendere eccetera.

La curva di apprendimento tiene conto del processo di apprendimento degli operatori nello svolgere l'attività lavorativa. Infatti di pari passo con lo svolgimento di una serie di operazioni la squadra operativa impara a svolgerle meglio, facendo quindi aumentare la quantità di prodotto per unità di tempo. Si definisce la produzione unitaria come la quantità di lavoro svolto in un giorno, espresso in quantità di prodotto per giornata realizzato dalla squadra operativa standard:

$$P = Q_t / D$$

Dove:

$P$  = Produzione unitaria

$Q_t$  = Quantità totale di prodotto realizzata dalla squadra standard per l'attività in esame;

$D$  = durata dell'attività per produrre  $Q_t$  in giorni lavorativi;

è chiaro che  $P$  è in realtà un valore medio. Se si determina la produzione unitaria svolta in ogni singolo giorno di lavoro si ha:

$$P_g = Q_g / 1$$

Se si verifica di giorno in giorno  $P_g$  normalmente si riscontra che  $P_g$  aumenta con l'aumentare del tempo, in base appunto alla curva di apprendimento.

Nello studio del programma lavori è fondamentale la definizione dei vincoli di esecuzione tra le attività precedenti e successive, la corretta stima della durata e la possibilità di eventuali modifiche in fase di programmazione.

Pertanto è possibile definire 3 ipotesi di lavoro per la programmazione delle attività con il Precedence Diagramming Method.

1. Attività continue, durata fissa, E' l'ipotesi di lavoro consigliata, soprattutto per mantenere la continuità dell'uso delle risorse nell'ambito della medesima attività, salvaguardando la produttività della squadra sia per il fenomeno della curva di apprendimento che per evitare che la dilatazione dei tempi diminuisca la produttività. Infatti è ben noto come lo svolgimento di un'attività da parte di una squadra operativa sia ottimizzata per certi valori di durata: attribuendo valori maggiori della durata le risorse tendono inevitabilmente ad utilizzare tutto il tempo a disposizione per svolgere il lavoro, diminuendo così la produttività.

2. Attività continue, durata variabile. Ovvero si può pensare che l'attività venga svolta con continuità, senza interruzioni, per qualsiasi valore di durata, grande o piccolo piacere. E' la cosiddetta ipotesi di attività infinitamente "elastica", a volte utilizzata ma poco plausibile nella realtà per i motivi che si possono intuire: infatti le risorse produttive sono elementi discreti, caratterizzati da quantità minime e massime di operatori o di macchine per la corretta esecuzione del lavoro, cui corrispondono tassi di produzione che variano in modo non lineare.

3. Attività discontinue, durata complessiva fissa o variabile. E' un'ipotesi di lavoro plausibile, infatti si può "spezzare" l'esecuzione delle attività in due o più parti. Mentre nel primo caso le porzioni di attività vengono accelerate, aumentando la produzione unitaria e mantenendo così fissa la durata complessiva al lordo delle pause tra le lavorazioni, nel secondo caso si mantiene costante la produzione unitaria dilatando così il completamento complessivo dell'attività. In entrambi i casi a questa ipotesi corrisponde un impiego discontinuo delle risorse nel cantiere. Anche se questo impiego discontinuo delle risorse è spesso utilizzato nella realtà del cantiere sia per motivi

tecnologici che di opportunità, è noto che questo non ottimizza né la produzione e né la logistica del cantiere.

E' chiaro che il programma reticolare, in particolare l'algoritmo per il calcolo dei tempi, si sviluppa in modo differente in funzione delle diverse ipotesi che si possono considerare per le attività.

### **L'analisi temporale nel Precedence Diagramming Method Generalizzato**

#### La programmazione delle attività al più presto e al più tardi

L'algoritmo "classico" per il calcolo dei tempi con il metodo Precedence Diagramming Generalizzato assume l'ipotesi di lavoro di attività continue con durata fissa. Non è altro che l'estensione dell'algoritmo CPM ad un reticolo con le attività sui nodi, tenendo conto delle varie possibilità di relazione logico - cronologica date dai legami possibili tra le attività. Si tratta quindi dell'algoritmo presentato da Crandall nel 1973. Anche in questo caso l'algoritmo è diviso in due parti, l'analisi in avanti che provvede alla programmazione con i tempi minimi di attività, ovvero fornisce la programmazione al più presto (ASAP: "As Soon As Possible") e l'analisi all'indietro che provvede alla programmazione con i tempi massimi di attività, ovvero la programmazione al più tardi (ALAP: "As Late As Possible").

#### L'analisi in avanti

L'analisi in avanti calcola i tempi minimi di inizio e di fine delle attività. Considerando l'attività J-esima occorre considerare tutti i legami logici entranti nell'attività dai vari predecessori I-esimi, sia nell'inizio come STS<sub>ij</sub> o FTS<sub>ij</sub> sia nella fine come FTF<sub>ij</sub> o STF<sub>ij</sub>. Per ogni legame si calcola il valore di ES<sub>j</sub>, tempo minimo di inizio, e il valore massimo trovato (il più ritardato) diviene il ES<sub>j</sub>. Poiché alcune attività J-esime possono avere solo legami con il tempo di fine, ovvero FTF<sub>ij</sub> o STF<sub>ij</sub>, per evitare di trovare valore di ES<sub>j</sub> negativi o inferiori al tempo minimo di inizio dell'attività iniziale, si introduce un valore aggiuntivo da confrontare nella massimizzazione, detto "tempo iniziale", che viene imposto uguale a zero o al tempo minimo di inizio della prima attività del reticolo e che in genere si indica con S.

Posto:

- Tempo iniziale = 0 oppure S (valore imposto al ES della prima attività)

si ha:

- per ogni attività J, a partire dalla prima attività (sorgente) del reticolo sino all'ultima attività (pozzo) del reticolo:

*Passo 1:* calcolo di ES<sub>j</sub> dell'attività J-esima con predecessore attività I-esima

$$ES_j = \max_{\text{per ogni } i} \begin{array}{|l} \text{Tempo iniziale} \\ E_{Fi} + FTS_{ij} \\ E_{Si} + STS_{ij} \\ E_{Fi} + FTF_{ij} - D_j \\ E_{Si} + STF_{ij} - D_j \end{array}$$

*Passo 2:* calcolo di EF<sub>j</sub> dell'attività J-esima

$$EF_j = ES_j + D_j$$

### L'analisi all'indietro

L'analisi all'indietro calcola i tempi massimi di inizio e di fine delle attività. Considerando l'attività I-esima occorre percorrere a ritroso il reticolo, nel verso opposto a quello della progressione temporale, e considera tutti i legami logici uscenti dall'attività verso i successori J-esimi, sia nell'inizio come STS<sub>ij</sub> o STF<sub>ij</sub> sia nella fine come FTS<sub>ij</sub> o FTF<sub>ij</sub>. Per ogni legame si calcola il valore L<sub>Fi</sub>. Poiché alcune attività i-esime possono avere solo legami con il tempo di inizio ovvero STF<sub>ij</sub> o STS<sub>ij</sub>, per evitare di trovare valori di L<sub>Fi</sub> maggiori della durata del programma (la durata del programma è convenzionalmente indicata dal massimo EF calcolato per ogni attività nell'analisi in avanti, ovvero dal tempo massimo di fine dell'ultima attività se maggiore) o eccedenti la durata complessiva prevista per il progetto, si introduce un valore aggiuntivo da confrontare nella minimizzazione, detto "tempo finale", che viene imposto uguale alla durata del programma computata o alla durata complessiva prevista, ovvero al massimo valore di E<sub>Fi</sub> presente nel reticolo, che in genere si indica con T.

Posto:

- Tempo finale = durata del reticolo oppure T (valore imposto al completamento del progetto)

si ha:

- per ogni attività I, a partire dall'ultima attività (pozzo) del reticolo sino alla prima attività (sorgente) del reticolo:

*Passo 1:* calcolo di L<sub>Fi</sub> dell'attività I-esima con successore attività J-esima

$$LS_i = \min_{\text{per ogni } i} \begin{array}{|l} \text{Tempo finale} \\ LS_i + FTS_{ij} \\ LF_i + FTF_{ij} \\ LS_i + STS_{ij} + D_j \\ LF_i + STF_{ij} + D_j \end{array}$$

*Passo 2:* calcolo di  $LS_i$  dell'attività I-esima

$$LS_i = LF_i - D_i$$

E' interessante osservare che imporre nella massimizzazione dell'analisi in avanti il confronto con il valore del "tempo iniziale" (uguale a zero o al tempo minimo di inizio della prima attività del reticolo cioè a S) significa pensare che esista un'attività fittizia iniziale che è legata a tutte le attività del reticolo con una relazione di tipo  $FTS = 0$ . Questo impedisce che un'attività J susseguente l'attività iniziale, e legata solo con un legame di tipo  $STF_{ij}$  o  $FTF_{ij}$  a causa della sua elevata durata possa iniziare precedentemente all'attività iniziale stessa, e quindi si impone che  $ES_j = ES_i = S$ .

Allo stesso modo imporre nella minimizzazione dell'analisi all'indietro il confronto con il valore "tempo finale" (uguale alla durata del programma computata o alla durata complessiva prevista, ovvero al massimo valore di EF presente nel reticolo cioè a T), significa pensare che esista un'attività fittizia finale, legata a tutte le attività del reticolo con una relazione  $FTS = 0$ . Questo rende un'attività I, predecessore dell'attività J tramite un legame di tipo  $STS_{ij}$  o  $STF_{ij}$  ma con  $EF > EF_j$  l'ultima attività del reticolo. In questo caso infatti l'attività J è programmata per terminare, al più presto, prima dell'attività I, suo predecessore. Allora l'attività I è in realtà la vera attività finale per cui deve essere  $LF_i = LF_j = T$ .

Queste due attività fittizie cui corrispondono i valori "tempi finale" e "tempo iniziale", non sono normalmente rappresentate nel reticolo e sono considerate implicitamente nei calcoli.

### Stato al più presto e Stato al più tardi, date di controllo

Per il PDM Generalizzato, Harris (1978) definisce gli stati al più presto e al più tardi delle attività e le relative date di controllo.

- Stato al più presto di inizio o di fine dell'attività J-esima: è la posizione temporale al più presto dell'attività J identificata o dal suo tempo minimo di inizio  $ES_j$  o dal suo tempo minimo di

fine EF<sub>j</sub>, sommati al ritardo di vincolo espresso dalle eventuali valutazioni dei legami che si dipartono dal bordo di inizio o di fine dell'attività J.

- Data di controllo al più ECD<sub>j</sub> (= Early Control Date) dell'attività J-esima è l'istante temporale che identifica lo stato al più presto dell'attività, in funzione del tipo di legame e della sua valutazione.
- Stato al più tardi dell'attività J-esima: è la posizione temporale al più tardi dell'attività J identificata o dal suo tempo massimo di fine LF<sub>j</sub> o dal suo tempo massimo di inizio LS<sub>j</sub>, sommati algebricamente al ritardo di vincolo espresso dalle eventuali valutazioni dei legami che entrano nel bordo di inizio o di fine dell'attività J.
- Data di controllo al più tardi LCD<sub>j</sub> (= Late Control Date) dell'attività J-esima è l'istante temporale che identifica lo stato al più tardi dell'attività, in funzione del tipo di legame e della sua valutazione.

#### Il ritardo del legame nel PDM Generalizzato

La definizione del ritardo di legame che si trova nel PDM Semplice si trasporta anche nella forma generalizzata.

Il ritardo Rij del legame XTY<sub>ij</sub> tra l'attività I, predecessore, e l'attività J, successore, rappresenta l'intervallo di tempo che esiste tra lo stato al più presto del predecessore X e lo stato al più presto del successore Y. Come noto, il ritardo del legame è una proprietà del singolo legame tra due attività generata dall'algoritmo di programmazione. Anche in questo caso, come nel PDM Semplice, si definisce il ritardo di legame solo per i tempi minimi perché più significativo per le applicazioni pratiche. La definizione del ritardo di legame per i tempi massimi può essere svolta in perfetta analogia con quanto già esposto. Poiché la definizione del ritardo di legame per il PDM Generalizzato può essere svolta più agevolmente utilizzando le definizioni di stato al più presto e date di controllo per le attività J-esime.

Sia per il predecessore che per il successore lo stato al più presto è identificato o dal tempo minimo di inizio o dal tempo minimo di fine dell'attività, come modificati dalla valutazione del legame. Infatti la valutazione dei legami del PDM Generalizzato può essere considerata come una modifica ai rispettivi tempi di inizio o fine delle attività, e pertanto le correzioni temporali che essi apportano sono elementi essenziali per definire lo stato temporale

dell'attività stessa. La data di controllo identifica invece lo stato dell'attività tenendo conto del ritardo di legame.

### Modalità per il calcolo del Ritardo di Legame $R_{ij}$

a) *Per il legame Fine-Inizio:*

$$FTS_{ij} = n$$

Lo stato al più presto di fine dell'attività I è identificato da  $E_{Fi}$  più la valutazione  $FTS_{ij}$  del legame, mentre lo stato al più presto di inizio dell'attività J è identificato da  $E_{Sj}$ . Quindi

$$R_{ij} = E_{Sj} - (E_{Fi} + FTS_{ij}) = E_{Sj} - E_{Fi} - n$$

Se con  $E_{CDi}$  si indica la data di controllo al più presto dell'attività I-esima:

$$E_{CDi} = E_{Fi} + FTS_{ij} = E_{Fi} + n$$

Allora:

$$R_{ij} = E_{Sj} - E_{CDi}$$

b) *Per il legame Inizio-Inizio:*

$$STS_{ij} = n_i$$

Lo stato al più presto di fine dell'attività I è identificato  $E_{Fi}$  più la valutazione del legame  $STS_{ij}$ , mentre lo stato al più di inizio dell'attività J è identificato da  $E_{Sj}$ . Quindi:

$$R_{ij} = E_{Sj} - (E_{Fi} + STS_{ij}) = E_{Sj} - E_{Fi} - n_i$$

Se:

$$E_{CDi} = E_{Si} + STS_{ij} = E_{Si} + n_i$$

Allora è ancora:

$$R_{ij} = E_{Sj} - E_{CDi}$$

c) *Per il legame Fine-Fine:*

$$FTF_{ij} = n_j$$

Lo stato al più presto di fine dell'attività I è identificato da  $E_{Fi}$ , mentre lo stato al più di inizio dell'attività J è identificato da  $E_{Fj}$  meno la valutazione del legame  $FTF_{ij}$ . Quindi:

$$R_{ij} = (E_{Fj} - FTF_{ij}) - E_{Fi} = E_{Fj} - n_j - E_{Fi}$$

Se con  $E_{CDj}$  si indica la data di controllo al più presto dell'attività J-esima:

$$E_{CDj} = E_{Fj} - FTF_{ij} = E_{Fj} - n_j$$

Allora:

$$R_{ij} = E_{CDj} - E_{Fi}$$

d) *Per il legame Inizio-Fine:*

$$STF_{ij} = n = n_i + n_j$$

Lo stato al più presto di fine dell'attività I è identificato da  $E_{Si}$  più l'aliquota della valutazione del legame  $STF_{ij}$  relativa al predecessore che è  $n_i$ , mentre lo stato al più presto dell'attività J è identificato da  $E_{Fj}$  meno l'aliquota di valutazione del legame  $STF_{ij}$  relativa al successore che è  $n_j$ . Quindi:

$$R_{ij} = (E_{Fj} - n_j) - (E_{Si} + n_i) = E_{Fj} - E_{Si} - (n_i + n_j) = E_{Fj} - E_{Si} - n$$

Se con  $E_{CDi}$  si indica la data di controllo al più dell'attività I-esima:

$$E_{CDi} = E_{Si} + n_i$$

Se con  $E_{CDj}$  si indica la data di controllo al più presto dell'attività J-esima:

$$E_{CDj} = E_{Fj} - n_j$$

Allora:



$$R_{ij} = ECD_j - ECD_i$$

La definizione del ritardo di legame nel reticolo consente le seguenti osservazioni.

a. Il ritardo di legame  $R_{ij}$  è calcolato sui tempi minimi, utilizzando gli stati al più presto delle attività. Poiché normalmente il programma al più tardi è meno utilizzato nelle applicazioni, sono stati definiti solo i ritardi di legame per i tempi minimi. Come detto il ritardo di legame  $R_{ij}$  calcolato con i tempi massimi si trova analogamente una volta eseguita l'analisi all'indietro.

b.  $R_{ij} \geq 0$  per definizione. Con le ipotesi di attività continue e con durata prefissata tutti i ritardi semplici del reticolo saranno positivi o maggiori di zero. Dal punto di vista strettamente applicativo non è possibile avere dei ritardi negativi. Infatti quando si hanno dei ritardi negativi o degli scorrimenti negativi significa che nel reticolo è presente una data imposta (*constraint*) che limita l'esecuzione di una o più attività e/o modificare il reticolo.

c. Per ogni attività J-esima del reticolo, ad esclusione della prima attività, esiste un legame limitante con  $R_{ij}$  uguale a zero. Questo legame definisce la posizione temporale dell'attività al più presto e si dice appunto limitante o condizionante. Gli altri eventuali legami entranti nell'attività J-esima e con  $R_{ij} > 0$  sono detti non limitanti o non condizionanti. L'insieme dei legami limitanti, con  $R_{ij} = 0$ , costituisce l'albero del ritardo nullo del reticolo. Il (o i) percorso formato dai rami dell'albero del ritardo nullo che collega la prima attività del reticolo con l'ultima, per sua definizione è il percorso più lungo del reticolo, che è detto percorso critico.

In conclusione si può evincere che nell'ambito di ogni legame tra due attività, la definizione della valutazione del legame non è altro che una correzione del tempo di inizio o di fine dell'attività allo scopo di individuare un tempo intermedio nello svolgimento dell'attività stessa, che sia significativo per la logica del processo produttivo. Allora si possono definire i tempi di controllo, o date di controllo, come gli istanti temporali che individuano lo stato al più presto o lo stato al tardo di un'attività, tenendo conto della specifica programmazione. Infatti i tempi di controllo dell'attività I-esima o J-esima del reticolo sono definiti in relazione al tipo di legame logico che lega le attività I e J ed al calcolo dei tempi del programma reticolare.

Si noti come la definizione dei tempi di controllo sia in realtà utile solo nel caso in cui essi differiscano dai consueti valori dei tempi di attività, ES, EF, LS e LF, ovvero nel caso di valutazione dei legami diversa da zero.

### Scorrimento totale TFi

Il metodo Precedence Diagramming Generalizzato è sostanzialmente un metodo del cammino critico che si sostanzia nella ricerca, attraverso il calcolo dei tempi delle attività, del percorso temporale più lungo del reticolo. Pertanto la definizione degli scorrimenti delle attività riprende le definizioni già viste in precedenza.

Lo scorrimento totale di un'attività I, indicato con TFi (Total Float), è definito come la massima quantità di tempo di cui si può ritardare lo svolgimento dell'attività senza causare un ritardo alla data di completamento del processo produttivo e quindi senza aumentarne la durata complessiva prevista.

Lo scorrimento totale è uguale alla differenza tra i tempi minimi e massimi di inizio o di fine di un'attività. Vale a dire:

$$TF_i = LF_i - EF_i$$

Oppure

$$TF_i = LS_i - ES_i$$

Dalle precedenti si ha anche:

$$TF_i = LF_i - (ES_i + D_i) = LF_i - ES_i - D_i$$

Può essere utile definire lo scorrimento totale in funzione delle date di controllo delle attività, nel caso di valutazione dei legami non nulla.

a) *Per il legame di tipo FTS<sub>ij</sub> = n:*

Poiché:

$$ECD_i = EF_i + n$$

$$LCD_i = LF_i + n$$

Sottraendo ed aggiungendo il valore costante n, si ha:

$$TF_i = LF_i - EF_i - n + n = (LF_i + n) - (EF_i + n) = LCD_i - ECD_i$$

b) *Per il legame di tipo STS<sub>ij</sub> = n<sub>i</sub>:*

Poiché:

$$ECD_i = E_{Si} + n_i$$

$$LCD_i = L_{Si} + n_i$$

Sottraendo ed aggiungendo il valore costante n<sub>i</sub>, si ha:

$$TF_i = L_{Si} - E_{Si} - n_i + n_i = (L_{Si} + n_i) - (E_{Si} + n_i) = LCD_i - ECD_i$$

c) *Per il legame di tipo FTF<sub>ij</sub> = n<sub>j</sub>:*

Poiché:

$$ECD_i = E_{Fi}$$

$$LCD_i = L_{Fi}$$

E' semplicemente:

$$TF_i = L_{Fi} - E_{Fi} = LCD_i - ECD_i$$

d) *Per il legame di tipo STF<sub>ij</sub> = n<sub>i</sub> + n<sub>j</sub>:*

Poiché:

$$ECD_i = E_{Si} + n_i$$

$$LCD_i = L_{Si} + n_i$$

Si ricade naturalmente nel caso già visto, sottraendo ed aggiungendo il valore costante n<sub>i</sub>, si ha:

$$TF_i = L_{Si} - E_{Si} - n_i + n_i = (L_{Si} + n_i) - (E_{Si} + n_i) = LCD_i - ECD_i$$

Pertanto si può dare, nel caso del Precedence Diagramming nella forma generalizzata, la seguente definizione di Scorrimento Totale TF<sub>i</sub> per l'attività I-esima:

“nel PDM Generalizzato lo scorrimento totale TF<sub>i</sub> dell'attività I-esima è l'intervallo di tempo in cui può avvenire il completamento della data di controllo dell'attività senza ritardare il completamento del progetto”.

Si noti come, in questo caso, non sia più necessario utilizzare i tempi di fine o inizio attività, ma semplicemente la data di

controllo che deve verificarsi nell'intervallo di tempo  $LCD_i - ECD_i$ .

E' quindi possibile scrivere la seguente formula, valida per l'attività I-esima e per ogni tipo di legame possibile:

$$TF_i = LCD_i - ECD_i$$

Anche in questo caso lo scorrimento totale è una quantità di tempo "condivisa" tra le attività che appartengono ad uno stesso percorso.

Si conferma ancora come lo scorrimento totale sia un attributo di un percorso, e le singole attività non lo possiedano, ma lo condividano. Infatti il completo utilizzo dello scorrimento totale  $TF_i$  per ritardare un'attività I-esima è sottoposto a due condizioni:

- i predecessori della I più ritardati non hanno subito ritardi e sono stati completati al più presto, nel tempo minimo di fine;
- i successori della I più anticipati devono essere iniziati nel tempo massimo di inizio e non devono subire ritardi, in quanto diventano attività critiche.

#### Attività critiche e cammino critico

Le attività con valore minimo di  $TF_i$  nel reticolo si dicono attività critiche  $I(cr)$ :

$$TF_i(cr) = \min (TF_i) \quad \forall i$$

Se si è utilizzata la convenzione di scorrimento zero le attività critiche hanno:

$$TF_i(cr) = \min (TF_i) \quad \forall i = 0$$

Per il suo significato  $TF_i$  ha normalmente valore positivo o nullo. Se nel reticolo si ottiene per un'attività  $TF_i < 0$  l'attività si dice *iper critica*. Significa in questo caso che occorre ridurre la durata per permetterne l'esecuzione, o, se ciò non è possibile, occorre modificare le date imposte come vincoli esterni al reticolo stesso. Come già accennato uno scorrimento negativo significa che il reticolo è stato condizionato da una data imposta, che impedisce il completamento nei tempi previsti per l'attività ipercritica. In termini teorici lo scorrimento negativo rappresenta la quantità di tempo di cui verrà ritardato il processo produttivo se non vengono intraprese azioni correttive.

Le attività critiche formano un percorso lungo il reticolo che congiunge l'attività iniziale con l'attività finale. La somma algebrica delle durate delle attività critiche appartenenti ad un cammino critico fornisce la durata complessiva del processo. Pertanto il cammino critico è il percorso più lungo tra tutti i percorsi possibili nel reticolo.

Tuttavia il percorso critico nel Precedence Diagramming Generalizzato non ha più quel significato chiaro e preciso nell'applicazione pratica tipico dei metodi del cammino critico. Infatti, che un'attività sia critica per i tempi, ovvero presenti un valore di scorrimento totale nullo (o minimo!), non comporta gli stessi effetti che questo aveva considerando il percorso critico nel PDM con il solo legame semplice di fine-inizio. Infatti una dilatazione di un'attività critica può comportare tre differenti effetti per la durata complessiva del processo produttivo programmato nel reticolo:

- un aumento complessivo della durata del programma lavori (che è l'unico caso che si presentava nel PDM Semplice);
- una diminuzione complessiva della durata del programma lavori;
- nessuna conseguenza della durata del programma lavori.

Questo comporta inevitabilmente una perdita di significato del cammino critico come era stato inizialmente definito nei metodi con il solo legame fine-inizio, e ciò, in realtà, non è altro che una conseguenza dei diversi legami logici possibili nel PDM Generalizzato. Tuttavia la definizione di attività critica resta attuale, in quanto, ad ogni buon conto, si tratta di un'attività per i tempi che, se modificata nella durata di esecuzione con una dilatazione (ritardo) o un'accelerazione (anticipo), comporterà delle conseguenze nella durata complessiva del processo. La valutazione delle conseguenze è ora più complessa, ma sostanzialmente intuitiva, in quanto sono le stesse modalità con cui il percorso critico interessa l'attività che definiranno le conseguenze sulla durata complessiva del programma lavori. Di aiuto può essere la classificazione delle attività critiche di Weist (1981), sotto la convenzione di scorrimento uguale a zero, che si riporta di seguito.

*Attività critica:* si definisce attività critica un'attività in cui la differenza tra il tempo massimo di fine ed il tempo minimo di inizio è uguale alla durata dell'attività stessa.

*Attività critica normale (normal critical activity):* si definisce attività critica normale un'attività critica che se la sua durata

aumenta o diminuisce modifica a sua volta la durata complessiva del programma lavori nello stesso modo, ovvero rispettivamente la aumenta o la diminuisce.

*Attività critica inversa (reverse critical activity):* si definisce un'attività critica inversa un'attività critica che se la sua durata aumenta o diminuisce modifica a sua volta la durata complessiva del programma lavori nel modo inverso, ovvero rispettivamente la diminuisce o l'aumenta.

*Attività bi-critica:* si definisce un'attività bi-critica un'attività critica che se la sua durata aumenta o diminuisce modifica a sua volta la durata complessiva del progetto sempre con un aumento della durata.

*Attività critica neutra, con inizio critico:* si definisce attività con inizio critico un'attività critica che se il suo inizio viene ritardato o anticipato si modifica a sua volta la durata complessiva del programma lavori nello stesso modo, ovvero rispettivamente la si aumenta o diminuisce. Per contro un aumento o una diminuzione della durata dell'attività stessa non produce nessun mutamento nella durata complessiva del programma lavori, per cui l'attività si dice anche critica neutra.

*Attività critica neutra, con fine critica:* si definisce attività con fine critica un'attività critica che se la sua fine viene ritardata o anticipata si modifica a sua volta la durata complessiva del programma lavori nello stesso modo, ovvero rispettivamente la si aumenta o diminuisce. Per contro un aumento o una diminuzione della durata complessiva del programma lavori, per cui l'attività si dice anche critica neutra.

#### Lo scorrimento libero FFi

Lo scorrimento libero misura la massima quantità di tempo di cui un'attività può essere ritardata senza causare un ritardo dei tempi minimi di inizio dei successivi e senza ritardare il completamento del programma lavori. Utilizzare solo lo scorrimento libero di un'attività i-esima consente di ritardarne il completamento pur permettendo alle attività successive di iniziare al più presto, se i predecessori non hanno ritardato a loro volta l'inizio al più presto dell'attività i-esima stessa. E' chiaro che per calcolare questo scorrimento nel PDM Generalizzato occorre esaminare tutti i legami a valle dell'attività i-esima con i successivi j-esimi, e

trovare quello che presenta il minimo valore di ritardo di legame, che coincide con lo scorrimento libero dell'attività. Infatti, dalla definizione si ha:

$$FF_i = \min_{ES_i} \left\{ \begin{array}{ll} ES_j - n - D_i & \text{Per ogni } FTS_{ij} = n \\ ES_j - n_i & \text{Per ogni } STS_{ij} = n_i - \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} EF_j - n_j - D_i & \text{Per ogni } FTF_{ij} = n_j \\ EF_j - (n_i + n_j) & \text{Per ogni } STF_{ij} = (n_i + n_j) \end{array} \right.$$

Poiché il termine  $ES_i$ , data una schedulazione si può ritenere costante, allora è possibile inserirlo nella minimizzazione e si ha:

$$FF_i = \min \left\{ \begin{array}{ll} ES_j - n - D_i - ES_i & \text{Per ogni } FTS_{ij} = n \\ ES_j - n_i - ES_i & \text{Per ogni } STS_{ij} = n_i \\ EF_j - n_j - D_i - ES_i & \text{Per ogni } FTF_{ij} = n_j \\ EF_j - (n_i + n_j) - ES_i & \text{Per ogni } STF_{ij} = (n_i + n_j) \end{array} \right.$$

Da cui

$$FF_i = \min_{n_j} \left\{ \begin{array}{ll} ES_j - n - EF_i & \text{Per ogni } FTS_{ij} = n \\ ES_j - n_i - ES_i & \text{Per ogni } STS_{ij} = n_i \\ EF_j - n_j - EF_i & \text{Per ogni } FTF_{ij} = \\ EF_j - (n_i + n_j) - ES_i & \text{Per ogni } STF_{ij} = \end{array} \right.$$

( $n_i + n_j$ )

Che corrisponde alla ricerca del minimo ritardo di legame  $R_{ij}$ , e quindi:

$$FF_i = \min R_{ij} \quad \forall J$$

Anche in questo caso è possibile dare una forma ancora più generale all'equazione per il calcolo dello scorrimento libero, utilizzando le date di controllo delle attività I e J già precedentemente definite ed esprimendo lo scorrimento libero in funzione di ogni singolo tipo di legame.

a) Per il legame di tipo  $FTS_{ij} = n$ :

Poiché:

$$\begin{aligned} ECD_i &= EFi + n \\ ECD_j &= ES_j \end{aligned}$$

si ha:

$$FF_i = \min ES_j - EFi - n = \min ECD_j - ECD_i$$

b) *Per il legame di tipo STS<sub>ij</sub> = n<sub>i</sub>:*

Poiché:

$$\begin{aligned} ECD_i &= ESi + n_i \\ ECD_j &= ES_j \end{aligned}$$

si ha:

$$FF_i = \min ES_j - ESi - n_i = \min ECD_j - ECD_i$$

c) *Per il legame di tipo FTF<sub>ij</sub> = n<sub>j</sub>:*

Poiché:

$$\begin{aligned} ECD_i &= EFi \\ ECD_j &= EF_j - n_j \end{aligned}$$

si ha:

$$FF_i = \min ES_j - ESi - n_i = \min ECD_j - ECD_i$$

Dove  $n_j$  è stato è stato incluso nella minimizzazione in quanto costante.

d) *Per il legame di tipo STF<sub>ij</sub> = n<sub>i</sub> + n<sub>j</sub>:*

Poiché:

$$\begin{aligned} ECD_i &= ESi + n_j \\ ECD_j &= EF_j - n_j \end{aligned}$$

si ha:

$$\begin{aligned} FF_i &= \min EF_j - ESi - (n_i + n_j) = \min (EF_j - n_j) - (ES_i + n_i) = \\ &= \min ECD_j - ECD_i \end{aligned}$$



Nel caso del Precedence Diagramming nella forma generalizzata si può dare pertanto la seguente definizione di Scorrimento Libero FFi per attività I-esima:

“nel PDM Generalizzato lo scorrimento libero FFi dell’attività I-esima è l’intervallo di tempo in cui può avvenire il completamento della data di controllo dell’attività senza ritardare la minima data di controllo dell’attività susseguente J e senza ritardare il completamento del progetto”.

Si nota come non è più necessario utilizzare i tempi di fine o inizio attività, ma semplicemente il tempo di controllo o, meglio, la data di controllo che può completarsi nell’intervallo  $\min ECD_j - ECD_i$ .

E’ quindi possibile scrivere la seguente formula, valida per l’attività i-esima e per ogni tipo di legame possibile:

$$FF_i = \min ECD_j - ECD_i$$

#### Lo scorrimento interferente INTFi

Lo scorrimento interferente di un’attività I misura la parte di scorrimento che non è più permessa se l’attività successiva J inizia nel tempo minimo di inizio (al più presto).

Per calcolare questo scorrimento nel PDM Generalizzato occorre esaminare tutti i legami a valle dell’attività I con i successivi J, e trovare quello che presenta il minimo valore. Infatti, dalla definizione si ha:

$$INT_i = \min \left\{ \begin{array}{ll} LFI + n - ES_j & \text{Per ogni } FTS_{ij} = n \\ LS_j + n_i - ES_j & \text{Per ogni } STS_{ij} = n_i \\ LF_j - (EF_j - n_j) & \text{Per ogni } FTF_{ij} = n_j \\ (LS_i + n_i) - (EF_j - n_j) & \text{Per ogni } STF_{ij} = (n_i + n_j) \end{array} \right.$$

Anche in questo caso si può dare una forma ancora più generale all’equazione per il calcolo dello scorrimento interferente, utilizzando le date di controllo delle attività I e J già precedentemente definite ed esprimendo lo scorrimento interferente in funzione di ogni singolo tipo di legame.

a) Per il legame di tipo  $FTS_{ij} = n$ :

Poiché:

$$LCD_i = LFi + n$$

$$ECD_j = ES_j$$

si ha:

$$\text{INTFi} = \text{LFi} + n - \min \text{ESj} = \text{LCDi} - \min \text{ECDj}$$

b) *Per il legame di tipo STSij = ni:*

Poiché:

$$\text{LCDi} = \text{LSi} + \text{ni}$$

$$\text{ECDj} = \text{ESj}$$

si ha:

$$\text{INTFi} = \text{LSi} + \text{ni} - \min \text{ESj} = \text{LCDi} - \min \text{ECDj}$$

c) *Per il legame di tipo FTFij = nj:*

Poiché:

$$\text{LCDi} = \text{LFi}$$

$$\text{ECDj} = \text{EFj} - \text{nj}$$

si ha:

$$\text{INTFi} = \min \text{LFi} - \min (\text{EFj} - \text{nj}) = \text{LCDi} - \min \text{ECDj}$$

Dove nj è stato è stato incluso nella minimizzazione in quanto costante.

d) *Per il legame di tipo STFij = ni + nj:*

Poiché:

$$\text{LCDi} = \text{LSi} + \text{nj}$$

$$\text{ECDj} = \text{EFj} - \text{nj}$$

si ha:

$$\text{INTFi} = (\text{LSi} + \text{ni}) - \min (\text{EFj} - \text{nj}) = \text{LCDi} - \min \text{ECDj}$$

Dove nj è stato è stato incluso nella minimizzazione in quanto costante.

Pertanto si può dare, nel caso del Precedence Diagramming nella forma generalizzata, la seguente definizione di Scorrimento Interferente INTFi per l'attività I-esima:

“nel PDM Generalizzato lo scorrimento interferente INTFi dell'attività I-esima è l'intervallo di tempo in cui non può

avvenire il completamento della data di controllo dell'attività senza ritardare la minima data di controllo dell'attività susseguente J.”

Si noti come non è più necessario utilizzare i tempi di fine o inizio attività, ma semplicemente il tempo di controllo o, meglio, la data di controllo il cui completamento non è più permesso nell'intervallo  $LCD_i - \min ECD_j$  se non si vuole ritardare la data di controllo al più presto del successore.

E' quindi possibile scrivere la seguente formula, valida per l'attività I-esima e per ogni tipo di legame possibile:

$$INTF_i = LCD_i - \min ECD_j$$

Infine, ricordando la definizione di  $TF_i$  dell'equazione:

$$TF_i = LCD_i - ECD_i$$

E sostituendo nella definizione di scorrimento totale il valore di  $LCD_i$ :

$$TF_i = INTF_i + \min ECD_j - ECD_i$$

E dalla definizione di  $FF_i$  dell'equazione:

$$FF_i = \min ECD_j - ECD_i$$

Si ha la consueta:

$$TF_i = INTF_i + FF_i$$

## **PERT: Program Evaluation and Review Technique**

### **Cenni storici**

La tecnica PERT fu sviluppata nel 1958 da un gruppo di studiosi (D.G. malcolm, J.H. Roseboom, C.E. Clark e W. Fazar), presso il Navy Special Projects Office, ai quali era stato dato l'incarico di mettere a punto un sistema per programmare e controllare la realizzazione del progetto FBM (Fleet Ballistic Missile), comunemente conosciuto con il nome di progetto "Polaris" ed avente per scopo la progettazione e la costruzione di sottomarini atomici armati di missili balistici.

Il programma, ritenuto di estrema importanza per la sicurezza degli Stati Uniti, doveva assolutamente essere completato entro

una data prestabilita e prevedeva la collaborazione di più di mille imprese.

In considerazione di tale complessità, il gruppo di ricerca decise di concentrare i propri sforzi sulla localizzazione temporale delle operazioni elementari costituenti il progetto. La caratteristica fondamentale della tecnica che ne derivò è rappresentata dalla possibilità che essa offre di tenere conto della incertezza nella durata delle operazioni. Tale incertezza venne valutata associando a ciascuna operazione tre diverse stime di durata (ottimistica, probabile, pessimistica). I risultati di questa prima fase delle ricerche furono resi pubblici nel settembre del 1959.

### Valutazione delle durate relative alle singole operazioni e all'intero progetto

La differenza fondamentale esistente tra il PERT ed il CPM risiede nella stima dei tempi di esecuzione delle singole operazioni. Tale differenza trae origine dal fatto che, mentre nelle attività produttive la durata di ciascuna operazione può essere prevista con una certa precisione, nei progetti di ricerca e sviluppo l'incertezza nella sua valutazione è normalmente notevole. Da un punto di vista generale, l'unica corretta interpretazione della durata da assegnare ad ogni operazione è quella di considerare la distribuzione di probabilità associata al suo tempo di esecuzione.

Se si indica con  $t$  la durata di una certa operazione, il responsabile dovrebbe quindi fornire la funzione  $y = f(t)$  tale che  $f(t)dt$  indichi la probabilità che la durata dell'operazione assuma un valore compreso tra  $t$  e  $(t + dt)$ .

Sfortunatamente, nella grande maggioranza dei casi i responsabili delle singole operazioni non sono assolutamente in grado di trasferire le loro considerazioni soggettive o le loro esperienze passate sulla durata in questione, in una rigorosa formulazione analitica.

Per ovviare a questa difficoltà si potrebbe richiedere al responsabile di ciascuna operazione di suddividere il campo di variabilità della durata in un certo numero finito e piuttosto piccolo di intervalli, associando a ciascuno di essi una probabilità di realizzazione.

Dovrebbe cioè essere fornita una tabella del seguente tipo:

*Intervalli Probabilità*

$t_1, t_2$	$p_1$
$t_2, t_3$	$p_2$
.....	.....
$t_{n-1}, t_n$	$p_{n-1}$

Se questi dati fossero disponibili, sarebbe possibile interpolarli con una funzione continua, oppure ricavare direttamente da essi i parametri fondamentali della distribuzione.

E' facile però constatare che anche una richiesta di questo tipo non rappresenta un mezzo pratico per raccogliere le informazioni disponibili sulla durata delle operazioni. E' preferibile perciò ripiegare su una procedura molto meno impegnativa e richiedere per ogni operazione soltanto la durata ottimistica, più probabile e pessimistica, così definita:

- la durata ottimistica  $a$  è l'intervallo minimo di tempo richiesto per completare una certa operazione, nelle condizioni più favorevoli;
- la durata più probabile  $M$  rappresenta l'intervallo di tempo che ci si aspetta di impiegare nelle condizioni più probabili;
- la durata pessimistica  $b$  è l'intervallo più lungo richiesto da un'operazione, nel caso si verificano le condizioni più sfavorevoli.

In questo modo si è semplificato il compito di coloro che devono fornire le informazioni sulla durata delle operazioni, ma si pongono dei gravi problemi sulla via per risalire, da queste scarse informazioni, alla distribuzione di probabilità associata.

Il modo più noto per superare tale difficoltà consiste nell'ammettere che la varianza della distribuzione possa essere stimata mediante l'espressione:

$$s^2(t_i) = \frac{(b_i - a_i)^2}{36}$$

e che la distribuzione Beta possa rappresentare in maniera soddisfacente la legge di probabilità relativa ad una durata qualsiasi.

Da queste due ipotesi discende che la media della distribuzione può essere stimata mediante l'espressione:

$$mt_{(i)} = \frac{a_i + 4M_i + b_i}{6}$$

Se si accetta per ora questa affermazione, si apre la possibilità di tenere conto dell'incertezza relativa alle durate. Il procedimento consiste nell'associare a ciascuna operazione una durata media ed una varianza calcolate mediante le due espressioni precedenti. Successivamente si procede in modo analogo a quello descritto per il CPM, calcolando per ciascuna operazione i valori attesi della data minima di fine (o inizio). Si diranno critiche le operazioni che presentano un ritardo atteso totale, uguale a zero. La durata attesa  $T$  di completamento dell'intero progetto viene stimata facendo la somma dei tempi medi di tutte le operazioni critiche e cioè:

$$m[T] = m[t(1)] + m[t(2)] + \dots + m[t(n)]$$

dove  $t(1), t(2), \dots, t(n)$ , sono le variabili casuali "durata" associate alle operazioni critiche, numerate per comodità da 1 a  $n$ .

Un teorema fondamentale di algebra delle variabili statistiche assicura infatti che se

$$x(1), x(2), \dots, x(n)$$

sono delle variabili casuali (stocasticamente dipendenti o indipendenti) aventi media

$$m[x(1)], m[x(2)], \dots, m[x(n)]$$

allora la variabile causale somma

$$X = x(1) + x(2) + x(3) + \dots + x(n)$$

ha media

$$m[X] = m[x(1)] + m[x(2)] + \dots + m[x(n)]$$

Applicando un teorema analogo per la varianza, *supposta la indipendenza stocastica fra le variabili sommate*, si ha:

$$s^2[T] = s^2[t(1)] + s^2[t(2)] + \dots + s^2[t(n)]$$

In molti è di notevole interesse conoscere qual è la probabilità che il progetto sia completato entro una certa data richiesta di fine ( $Drf$ ). Per rispondere a questa domanda è necessario conoscere qual è la distribuzione di probabilità relativa alla variabile casuale  $T$ , definita come somma dei tempi di esecuzione delle attività critiche

$$T = t(1) + t(2) + \dots + t(n)$$

Il teorema limite centrale assicura che se  $n$  è sufficientemente grande (in pratica se  $n \geq 15$ ), la variabile  $T$  è distribuita "normalmente" con media  $m[T]$  e varianza  $s^2[T]$ , definite precedentemente. E' allora facile, fissata la data di pianificazione di inizio ( $Dpi$ ), calcolare la probabilità

$$p = Pr \{T \leq Drf\}$$

che il progetto venga completato entro tale data.

Operando sui valori attesi delle durate in modo analogo a quello descritto per il CPM, sono stati calcolati i valori attesi delle date minime (di inizio e di fine) e delle date massime (di inizio e di fine).

### La scelta della distribuzione Beta e la stima della media e della varianza associate alla durata di ciascuna operazione

Il modello probabilistico del PERT è stato proposto in base all'ipotesi che la distribuzione di probabilità relativa ai tempi di realizzazione di ciascuna attività sia di tipo Beta. Sembra perciò naturale chiedersi prima di tutto se tale ipotesi sia accettabile o no. A tal fine si osserverà innanzitutto che la distribuzione prescelta deve presentare un certo numero di proprietà e cioè:

- deve essere unimodale, cioè presentare un solo massimo corrispondente alla durata più probabile  $M$ ;
- deve attribuire una bassa probabilità di realizzazione sia alla durata ottimistica  $a$  che alla durata pessimistica  $b$ ;
- deve intercettare l'asse delle ascisse in corrispondenza di due punti aventi ascissa positiva;
- deve poter assumere una forma asimmetrica in modo da ammettere un qualsiasi valore  $M$  compreso fra  $a$  e  $b$ ;
- deve possedere una notevole flessibilità in modo da poter rappresentare agevolmente una grande varietà di situazioni.

Poiché la distribuzione Beta gode di tutte queste proprietà si può concludere che non esiste a priori nessuna ragione per criticare la scelta che è stata fatta.

Si consideri ora il problema della stima relativa alla media e alla varianza della durata associata a ciascuna operazione.

La procedura PERT prevede che l'utente fornisca una valutazione dei due valori  $a$  e  $b$  e del valore modale  $M$ .

Il problema che si pone a questo punto è quello di individuare una procedura che permetta la stima del valore medio e della varianza relativa alla durata di ciascuna operazione. In riferimento alla varianza si ricorda che per le distribuzioni unimodali lo scarto quadratico medio può essere approssimativamente stimato pari ad un sesto del "range". E' sembrato perciò ragionevole stimare lo scarto quadratico medio del tempo di esecuzione relativo ad un'attività calcolando un sesto della differenza esistente fra la stima pessimistica e quella ottimistica.

Dall'ipotesi che

$$s^2 [T] = \frac{1}{36} (b - a)^2$$

(1)

e che la distribuzione sia di tipo Beta, si trae la conclusione che

$$m(t) = \frac{a + 4M + b}{6}$$

(2)

Il procedimento mediante il quale si è giunti a tale conclusione è il seguente.

Sia data la funzione di distribuzione Beta:

$$f(t) = \begin{cases} K(t - a)^\alpha (b - t)^\gamma & a < t < b \\ 0 & \text{altrove} \end{cases}$$

(3)

essendo  $\alpha, \gamma > -1$ .

Al fine di normalizzare tale distribuzione si introduce la variabile  $x$  così definita

$$x = \frac{t - a}{b - a}$$

La distribuzione di frequenza di  $x$  è

$$g(x) = H x^\alpha (1 - x)^\gamma$$

Poichè per definizione il valore modale della variabile causale  $t$  è pari ad  $M$ , se si indica con  $r$  il valore modale della variabile causale  $x$  si ha:

$$r = \frac{M - a}{b - a}$$

(4)

Com'è noto si ha:

$$r = \frac{\alpha}{\alpha + \gamma}$$

(5)

$$m(x) = \frac{\alpha + 1}{\alpha + \gamma + 2}$$

(6)

$$s^2(x) = \frac{(\alpha + 1)(\gamma + 1)}{(\alpha + \gamma + 2)^2(\alpha + \gamma + 3)}$$

(7)



Avendo imposto che

$$s^2 [T] = \frac{1}{36} (b - a)^2$$

ne viene che  $s^2(x) = \frac{1}{36}$ .

Sostituendo nella (7) a  $\gamma$  il valore ricavato dalla (5) e imponendo l'uguaglianza con  $1/36$  si ha:

$$\alpha^3 + (36 r^3 - 36 r^2 + 7 r) \alpha^2 - 20 r^2 \alpha - 24 r^3 = 0$$

La procedura proposta per calcolare  $m(x)$ , quando siano noti  $a$ ,  $b$  ed  $M$ , può essere così riassunta:

- Calcolare  $r = (M - a) / (b - a)$ .
- Ricavare  $\alpha$  dalla (8) dopo aver sostituito ad  $r$  il valore trovato.
- Ricavare  $\gamma$  dalla (5) dopo aver sostituito ad  $\alpha$  ed  $r$  i rispettivi valori.
- Calcolare  $m(x)$  impiegando la (6).
- Determinare  $m(t) = a + (b - a) m(x)$ .

Per evitare i calcoli precedenti che prevedono la risoluzione di un'equazione di terzo grado è stato proposto di impiegare la seguente relazione lineare

$$m(x) = \frac{4x+1}{6}$$

Come si vede la relazione suggerita approssima piuttosto bene la funzione  $m(x)$ .

Ciò, naturalmente nei casi in cui  $s^2(x) = \frac{1}{36}$ .

Applicando le relazioni esistenti fra  $m(x)$  ed  $m(t)$  e fra  $r$  ed  $M$  è facile ricavare

$$m(t) = \frac{\alpha + 4M + b}{6}$$

Dopo aver così descritto qual è la logica che sta alla base della scelta dei due stimatori considerati, ci si propone ora di accennare quali sono le condizioni alle quali devono sottostare i parametri della distribuzione Beta, affinché tali stimatori siano rigorosamente validi. A tal fine si consideri una variabile  $t$  distribuita secondo una Beta

$$f(t) = \begin{cases} K(t - a)\alpha(b - t)\gamma & a < t < b \\ 0 & \text{altrove} \end{cases}$$

(9)

essendo  $\alpha, \gamma > -1$ .

Com'è noto il valore medio  $m(t)$  e la varianza  $var(t)$  della variabile  $t$  sono facilmente ricavabili applicando le opportune trasformazioni ai corrispondenti valori della variabile  $x$ .

$$m(t) = a + (b-a) \frac{\alpha+1}{\alpha+\gamma+2} \quad (10)$$

$$s^2(t) = \frac{(b-a)^2 (\alpha+1)(\gamma+1)}{(\alpha+\gamma+3)(\alpha+\gamma+2)^2} \quad (11)$$

La moda  $M$  della variabile  $t$  si ottiene derivando la  $f(t)$  e risolvendo l'equazione  $f'(t) = 0$ . Procedendo in tal modo si ottiene:

$$M = \frac{\alpha\gamma+b\alpha}{\alpha+\gamma} \quad (12)$$

Operando opportunamente sulla (10) si può esprimere  $m(t)$  in termini di  $M$  come segue

$$m(t) = \frac{\alpha+b+(\alpha+\gamma)M}{\alpha+\gamma+2} \quad (13)$$

la risoluzione del sistema

$$\begin{cases} \frac{\alpha+b+(\alpha+\gamma)M}{\alpha+\gamma+2} = \frac{\alpha+4M+b}{6} & (14) \\ \frac{(b-a)^2 (\alpha+1)(\gamma+1)}{(\alpha+\gamma+3)(\alpha+\gamma+2)^2} = \frac{(b-a)^2}{36} & (15) \end{cases}$$

fornirà le condizioni alle quali devono soddisfare i parametri.

Si osservi innanzitutto che la (14) è soddisfatta solo se

$$\alpha + \gamma = 4$$

Se si ricava per esempio  $\alpha$  dalla (16) e la si sostituisce nella (15), si trova che i parametri  $\alpha$  e  $\gamma$  devono soddisfare ad una delle seguenti condizioni

$$\begin{aligned} \alpha &= 2 + \sqrt{2} & \gamma &= 2 - \sqrt{2} \\ \alpha &= 2 - \sqrt{2} & \gamma &= 2 + \sqrt{2} \end{aligned}$$

Un caso tutto particolare si ha quando la funzione Beta (9) è simmetrica. Com'è noto (e come è facile verificare operando sulla (9)), la simmetria si ha quando  $\alpha = \gamma$ . Ponendo  $\alpha = \gamma$  nella (15) e ricavando  $\alpha$  si ottiene  $\alpha = 3$  e quindi (trattandosi di distribuzione simmetrica) si ha immediatamente  $\gamma = 3$ .

Si ha dunque un'ulteriore condizione per i nostri parametri che in definitiva devono soddisfare ad una delle seguenti condizioni:

$$\begin{array}{ll} \alpha = 2 + \sqrt{2} & \gamma = 2 - \sqrt{2} \\ \alpha = 2 - \sqrt{2} & \gamma = 2 + \sqrt{2} \\ \alpha = 3 & \gamma = 3 \end{array} \quad \text{per il caso } M = m(t) = \frac{a+b}{2}$$

Da quanto precede risulta che le espressioni semplificate per la stima di  $m(t)$  e  $s^2(t)$  impiegate nel PERT forniscono i valori esatti di queste grandezze, solo per pochi valori dei parametri  $\alpha$  e  $\gamma$ .

Com'è stato osservato, tali valori restringono notevolmente la gamma di possibili configurazioni che la distribuzione Beta può prendere ed in particolare la vincolano ad un andamento poco asimmetrico e relativamente schiacciato; ciò implica che ad un intervallo di valori abbastanza ampio intorno alla moda  $M$  corrispondano ordinate di poco inferiori a quella corrispondente alla moda stessa.

Tale limitazione può portare ad errori anche notevoli nelle stime di  $m(t)$  e  $s^2(t)$ . Si consideri, infatti, una distribuzione Beta normalizzata e cioè con  $a = 0$  e  $b = 1$ . L'errore massimo assoluto nella stima della media è:

$$\left| \frac{1}{6} (4r + 1) - r(\alpha + 1) / (\alpha + 2r) \right|$$

mentre l'errore massimo assoluto nello scarto quadratico medio è:

$$\left| \frac{1}{6} - \sqrt{(r^2 (\alpha + 1)(\alpha - \alpha r + r) / (\alpha + 2r)^2 (\alpha + 3r))} \right|$$

Da queste relazioni si deduce che l'errore assoluto massimo può essere del 33% per la media e del 17% per lo scarto quadratico medio.

Ciò si verifica in corrispondenza dei valori estremi di  $\alpha$  e di  $r$ . Se invece si ammette che  $1 \leq \alpha \leq 6$  e che  $|1/2 - r| \leq 6$ , allora gli errori nella valutazione della media e dello scarto quadratico medio si riducono al 4% e al 7% rispettivamente.

### Problemi connessi alla ricerca del cammino critico

Come si è già osservato, il PERT nella determinazione del cammino critico tiene conto dei soli valori medi delle durate

associate singole operazioni, trascurando l'elemento stocastico, cioè la varianza.

Come è intuitivo e come si dimostrerà nel seguito, un modo di procedere così grossolano può portare a risultati fortemente criticabili per quanto riguarda appunto la determinazione del cammino critico.

In un modello deterministico come il CPM questo problema non si pone, in quanto, associando a ciascuna operazione una sola durata, il cammino critico o i cammini critici sono univocamente determinati.

In un modello stocastico come il PERT, invece, ciascun cammino ha una certa probabilità (generalmente diversa da zero) di essere il cammino avente la maggior durata.

Si precisa quanto detto, osservando che un reticolo PERT può assumere (per quanto riguarda le durate) un numero grandissimo (teoricamente infinito) di configurazioni.

Ognuna di tali configurazioni si può pensare essere generata associando a ciascuna operazione una durata estratta casualmente da un'urna avente composizione analoga alla distribuzione di probabilità relativa alla durata dell'operazione stessa.

Ciascuna di tali configurazioni rappresenta una delle possibili realizzazioni del fenomeno casuale rappresentato del reticolo PERT.

Ovviamente, ogni realizzazione individua il cammino o i cammini che, in quel caso particolare, hanno la massima durata.

Tutto ciò premesso si è ora in condizione di fare alcune precisazioni valide per un contesto di tipo PERT.

La probabilità che ha un cammino di avere la durata più lunga è data dal rapporto tra il numero di realizzazioni nelle quali quel cammino ha la durata più lunga ed il numero totale di realizzazioni possibili.

Analogamente la probabilità che ha un'operazione di trovarsi sul cammino avente la maggior durata è data dal rapporto tra il numero di realizzazioni nelle quali il cammino con la durata più lunga passa per quell'operazione ed il numero totale di realizzazioni possibili.

Come si è detto, però, il numero di tutte le possibili realizzazioni può essere infinito. In tal caso la valutazione delle probabilità di cui sopra può essere effettuata utilizzando le relative frequenze rilevate su di un numero sufficientemente grande di realizzazioni.

Da quanto fin qui esposto risulta che un reticolo PERT è composto di un gran numero di cammini, anche il cammino che la massima probabilità di avere la durata più lunga, può presentare

un valore basso di tale probabilità. Inoltre, un'operazione che ha la massima probabilità di far parte del cammino con maggiore durata, non è detto che faccia parte del cammino che ha la massima probabilità di avere la maggior durata.

In conclusione risulta che, in un modello stocastico come il PERT, sarebbe preferibile abbandonare il concetto di cammino critico ed impegnare il concetto di *indice di criticità associato a ciascuna operazione* definito ovviamente come probabilità di trovarsi sul cammino con maggior durata. Da un punto di vista organizzativo, ciò corrisponde a tenere sotto controllo non tanto le operazioni che presentano un ritardo totale atteso nullo, quanto quelle che hanno un elevato indice di criticità.

Per quanto riguarda la determinazione effettiva di tale indice, diciamo subito che essa presenta delle notevolissime difficoltà. Tali difficoltà sono di natura analitica se si considera la durata di ciascuna operazione come una variabile casuale discreta. Fortunatamente la natura nel problema è tale da presentarsi molto bene ad essere affrontata con il metodo Monte Carlo.

L'impiego del metodo Monte Carlo per lo studio dei reticoli PERT consiste essenzialmente nell'applicazione dell'algoritmo CPM ad una lunga serie di realizzazioni, ottenute assegnando a ciascuna operazione una durata estratta a caso dalla relativa distribuzione. I risultati ottenuti da ciascuna realizzazione vengono memorizzati e sottoposti ai metodi statistici classici per ottenere la stima delle distribuzioni o dei parametri che interessano. L'impiego del metodo Monte Carlo può porsi due obiettivi sostanzialmente diversi.

Il primo richiede l'esame di un numero relativamente piccolo di realizzazioni ed è impiegato per verificare se la vera durata del progetto può essere considerata pari al valore  $m[T]$  calcolato come precedentemente detto. In tal modo è possibile verificare se la seconda ipotesi può essere considerata valida ed in caso negativo valutare qual è l'effettiva durata attesa di realizzazione del progetto.

Il secondo obiettivo richiede l'esame di un numero relativamente grande di realizzazioni e permette la determinazione di un indice di criticità associato a ciascuna operazione e la corretta valutazione della distribuzione di probabilità relativa alla durata totale.

#### Validità e limiti d'impiego della tecnica PERT

Si ritiene opportuno dire subito che indubbiamente questa tecnica si è dimostrata un valido strumento per programmare i lavori

quando le operazioni presentano una notevole incertezza nelle durate.

Il suo pregio fondamentale consiste nella semplicità sia per quanto riguarda i dati d'ingresso e sia per quanto riguarda i risultati forniti.

In relazione al primo punto l'esperienza ha infatti dimostrato che non sarebbe realistico chiedere al responsabile di un'operazione informazioni sulla durata, più dettagliate di quelle richieste dal PERT (durata ottimistica, pessimistica e più probabile).

Relativamente ai risultati forniti (che riguardano com'è noto l'individuazione del cammino critico e la valutazione relativa alla media e varianza della durata del progetto) si può senz'altro affermare che essi rappresentano un importante contributo all'attività di programmazione.

L'esposizione precedente ha però messo in evidenza la necessità di maneggiare con cautela questo strumento solo apparentemente molto semplice. Ciò vale sia per la preparazione dei dati d'ingresso sia per la valutazione dei risultati.

Un'analisi approfondita come quella fatta ha messo infatti in evidenza le ipotesi restrittive che vengono implicitamente accettate al momento della precisazione dei dati in ingresso.

Come si ricorderà infatti, si tratta di accettare l'ipotesi che la distribuzione di probabilità sia di tipo Beta, ed inoltre che i due parametri  $\alpha$  e  $\gamma$  assumano delle ben precise configurazioni.

Concentrando ora l'attenzione sui risultati forniti dal PERT ricordiamo come sia necessaria nella loro valutazione una cautela anche maggiore. Richiamiamo a questo proposito la critica fatta perfino al concetto di cammino critico così come esso è definito dal PERT.

Allo stesso modo si è visto che anche la valutazione fornita dal PERT relativamente alla media e varianza della durata del progetto, può contenere errori piuttosto notevoli.

Ma al di là di queste precisazioni si ritiene opportuno attirare l'attenzione sull'impiego improprio di questa tecnica da parte di un certo numero di utenti.

E' infatti opinione diffusa che il solo fatto di trovarsi in presenza di una notevole incertezza nella durata delle operazioni sia condizione sufficiente per applicare il PERT.

Si può osservare che l'incertezza associata al tempo di realizzazione di un'operazione può essere considerata come la somma di almeno tre elementi.

a. Incertezza *sulla disponibilità delle risorse* necessarie al momento della realizzazione di quelle attività.

b. Incertezza *sulla quantità delle risorse* necessarie per realizzare una certa attività.

c. Incertezza connessa al *verificarsi di fatti imprevisti* (sciopero, calamità naturali, etc.).

Per quanto riguarda il primo di questi si osserva che l'impiego di tecniche rivolte ad un'efficace gestione delle risorse può ridurre notevolmente tale incertezza.

Tale riduzione può essere così importante da giustificare l'impiego di tecniche deterministiche per la gestione delle risorse anche in contesti considerati in precedenza come non adatti a questo approccio.

Un discorso completamente diverso deve essere fatto per il punto b). L'incertezza sulla quantità di risorse necessarie per realizzare una certa attività, infatti, è chiaramente determinata da ignoranza sul processo di realizzazione di quell'attività e come tale può essere soltanto misurata.

E' il caso però di osservare come neppure l'incertezza causata da ignoranza non vincibile sulla valutazione delle risorse necessarie, costituisca un ostacolo insormontabile per la pianificazione delle risorse.

Nell'impiego di queste, infatti, si realizza normalmente un *effetto di compensazione*.

Tale effetto si manifesta tipicamente quando l'eccesso di una risorsa, usata per un'operazione che ha richiesto un impiego inferiore al previsto, viene utilizzata per compensare la penuria di risorsa manifestatasi in un'altra operazione che ha richiesto invece un impiego maggiore del previsto.

Tale effetto di compensazione è particolarmente efficace quando una risorsa è rappresentata da elementi (uomini, macchine o materiali) sostituibili fra di loro e quando ciascun elemento è impiegato successivamente nella realizzazione di più operazioni.

Un altro elemento che favorisce tale effetto di compensazione è rappresentato dalla pianificazione di più progetti contemporanei e facenti uso di risorse comuni.

L'effetto di compensazione si affievolisce progressivamente allontanandosi da queste condizioni, ma resta comunque operante.

Consideriamo infine l'incertezza connessa al verificarsi di fatti imprevisti. E' ben vero che essa non può in alcun modo essere ridotta ma è vero anche che essa per la sua imprevedibilità non si presta ad essere padroneggiata neppure con una tecnica probabilistica come il PERT. La presenza di questo tipo di incertezza non rappresenta dunque un ostacolo all'impiego di tecniche deterministiche con eventuale gestione delle risorse.

### Gli altri livelli d'impiego

*Pianificazione dei costi.* – Essa si basa sull'integrazione del controllo sullo stato di avanzamento fisico con il controllo sulla situazione economica. Relativamente al controllo sulla situazione economica, si basa sul confronto incrociato tra le tre categorie contabili individuate a suo tempo e cioè budget, costi previsti e costi effettivi.

*Ottimizzazione dei costi.* – Queste tecniche si basano sulla ricerca euristica o rigorosa del piano di lavoro (cioè della durata di ciascuna attività) che minimizza il costo totale di realizzazione. Chiaramente questa impostazione si basa sull'ipotesi che sia possibile scegliere a "priori" la durata di realizzazione di ciascuna operazione.

Ciò sembra in contraddizione con l'incertezza delle durate che è alla base della tecnica PERT. Se si ammette, però, che in un ambiente PERT si possa individuare un'analogia relazione lineare fra la durata *media* di un'operazione ed il relativo costo, allora tutto quanto detto per il CPM è riferibile anche al PERT.

Resta ovviamente il fatto che i risultati ottenuti (e cioè le durate che sono state pianificate per ogni operazione) devono essere interpretati come valori medi e non come valori deterministici.

*Ottimizzazione delle risorse.* – Anche in questo caso si fa riferimento a quanto detto per il CPM per osservare quanto segue.

Tutte le tecniche considerate (euristiche e analitiche) si basano su una durata ed un carico di risorsa predeterminati per ogni operazione.

Ciò è chiaramente in contrasto con l'incertezza nelle durate che è tipica del PERT.

Anche in questo caso la scappatoia è fornita dall'impiego dei valori medi. Per giustificare tale affermazione si osserva che, in un ambiente PERT, la stima ottimistica, pessimistica e più probabile relativa alla durata di un'attività non può che derivare dalla quantità di risorse destinata a quell'operazione.

Se ciò è vero è possibile, anche in un contesto probabilistico, associare ad ogni operazione il carico di risorse che gli è stato assegnato ed una durata calcolata come media secondo la procedura PERT.

Accettate queste premesse si può concludere che le procedure proposte per il CPM sono trasferibili in ambiente PERT.



Ovviamente tutti i risultati devono essere interpretati come valori medi e non come valori deterministici.

Completiamo questo argomento mettendo in evidenza le difficoltà che si incontrano nell'associare a tali risultati medi un indice di dispersione, ad esempio la varianza.

Il campo perciò resta aperto ad approfondimenti.

## **CPM/I-J: Critical Path Method nella forma I-J**

### **Introduzione**

Il metodo CPM nasce orientato al controllo delle attività, ovvero presenta nella programmazione solo i tempi di inizio e fine delle attività, mentre il metodo PERT nasce orientato al controllo degli eventi, ovvero presenta nella programmazione solo i tempi degli eventi. Quindi il metodo I-J aggiunge al CPM classico la possibilità di definire i tempi di evento, tipica del PERT. Il metodo I-J mantiene l'impostazione deterministica ed operativa del CPM originario, comprensiva della chiara definizione degli scorrimenti ammissibili per le attività.

Di seguito si considererà il metodo CPM nella forma I-J, caratterizzato da un reticolo Activity On Arc (AOA) e da un algoritmo deterministico (DET).

Il metodo I-J comporta difficoltà oggettive nella sua applicazione perché richiede una conoscenza approfondita del metodo per il disegno del reticolo AOA. Questo è dovuto essenzialmente dal fatto che le frecce, oltre a rappresentare le attività, rappresentano anche la sequenza tra le attività stesse, il che rende necessario inserire nel reticolo attività fittizie allo scopo di rappresentare la dipendenza logica tra attività differenti. L'uso delle attività fittizie è discrezionale e dipende dalla capacità e dalle scelte del programmatore, per cui programmatori differenti possono rappresentare una stessa logica costruttiva in modi differenti. Questa mancanza di univocità nella rappresentazione reticolare rende difficile raggiungere uno dei fondamentali obiettivi della programmazione, la diffusione delle informazioni. D'altro canto la rappresentazione AOA consente, una volta nota la lista delle attività e i rispettivi codici I-J, di ricostruire esattamente la logica del reticolo senza ulteriori informazioni e, in questo caso, senza determinazioni. Da qui la diffusione nel passato del metodo I-J soprattutto per le opere pubbliche statunitensi, in un periodo in cui, prima dell'avvento della grafica computerizzata, la

diffusione e la modifica di elaborati grafici quali i reticoli costituiva un problema. Dal punto di vista scientifico resta in ogni modo importante definire e capire il metodo I-J per comprendere a fondo i metodi reticolari, soprattutto per quanto riguarda la teoria dei margini di attività.

## **Nozioni fondamentali per la realizzazione del reticolo CPM /I-J per la programmazione dei lavori**

### Attività ed eventi

Il metodo I-J è basato su un reticolo AOA, Activity On Arc, in quanto la sua rappresentazione grafica è costituita da un digrafo in cui gli archi orientati, le frecce, rappresentano le attività del progettano. Le frecce indicano anche la progressione delle operazioni in base al flusso del tempo. Soluzione di continuità tra il flusso dello svolgimento delle operazioni delle varie attività del processo costruttivo sono gli eventi, che si collocano, agli estremi delle attività e sono rappresentati da cerchi detti nodi.

L'evento alla sinistra dell'attività, posto nella coda della freccia, si chiama "evento di inizio" e si indica normalmente con la lettera "i" (o "I"), mentre quello all'estrema destra, nella punta della freccia "evento di fine" e si indica con la lettera "j" (o "J"). Segue che ogni attività del reticolo è univocamente individuata da una coppia di eventi, i e j, per cui il codice formato dai due numeri i e j identifica anche l'attività.

### Definizioni, ipotesi e regole per il metodo CPM/I-J

Per procedere all'applicazione pratica del metodo I-J alla programmazione dei lavori occorre definire meglio i concetti di attività ed evento.

- **Attività:** un'attività è un'operazione del processo costruttivo che richiede consumo di tempo e risorse produttive, tempo e risorse economiche o tempo solamente. Fa eccezione l'introduzione nel reticolo di attività fittizie, che non richiedono consumo né di tempo né di risorse ma rappresentano solo una dipendenza logica.
- **Evento:** l'evento rappresenta la situazione che si crea al termine di una o più attività. Un evento non richiede consumo di tempo o di risorse ma è caratterizzato solo da un istante, o una data, di accadimento.

Le ipotesi fondamentali per la realizzazione del modello CPM/I-J sono quattro.

1. Le frecce indicano il verso di percorrenza del reticolo, che è quello della progressione temporale delle attività.
2. Ogni freccia deve collegare due eventi distinti, detti I e J. Tutti gli eventi sono contemporaneamente eventi iniziali e finali di almeno due attività. L'eccezione a questa regola riguarda gli eventi finali e iniziali del reticolo. L'evento iniziale del processo non ha nessuna attività precedente, l'evento finale non ha nessuna attività susseguente.
3. Dato che il tempo non può tornare indietro non sono permessi anelli o circuiti nel reticolo, che consistono in una successione di frecce che tornano all'evento di partenza. Questi sono detti "loop" logici.
4. La lunghezza della freccia nel reticolo non è proporzionale alla durata dell'attività.

Le regole fondamentali per il disegno del reticolo sono tre.

1. La regola di dipendenza logica delle attività.

Poste due attività successive A e B, ovvero  $ij$  e  $jk$ , legate allo stesso evento  $j$ , l'attività susseguente  $jk$  non può iniziare se non termina l'attività precedente  $ij$ .

L'attività A è l'attività precedente alla realizzazione dell'attività B, e si dice predecessore (o antenato) di B, e B è l'attività successiva alla realizzazione di A, e si dice successore di A (o discendente).

E' chiaro come questa schematizzazione concettuale utile ai fini della definizione del modello matematico possa essere resa più flessibile in sede di applicazione pratica in cantiere. E' infatti comunemente accettato che se il predecessore  $ij$  è completato all'85-90% sia possibile iniziare le operazioni del successore  $jk$ , senza nulla togliere alla validità del modello.

Dalla regola di dipendenza logica conseguono le seguenti.

2. Regola di convergenza con logica di tipo "and".

Date tre attività A, B e C, ovvero  $ij$ ,  $yj$  e  $jk$  legate allo stesso nodo  $j$ , l'attività C non può iniziare se non sono terminate entrambe (*and*) le attività precedente A e B. L'evento  $j$  è detto *evento di unione*.

3. Regola di divergenza.

Date tre attività A, B e C, ovvero  $ij$ ,  $jm$  e  $jk$ , entrambe le attività susseguenti B e C non possono iniziare se non è terminata l'attività precedente A. L'evento  $j$  si dice *evento di separazione*.

Per l'applicazione pratica è necessario aggiungere altre nozioni, è necessario, per definire correttamente la logica del reticolo, l'introduzione delle *attività fittizie*.

Un'attività fittizia non dà luogo a consumo di risorse e di tempo ma stabilisce solo un ordine di precedenza tra gli eventi, ovvero implica una dipendenza logica tra attività. Per questo le attività fittizie sono dette anche *vincoli*. Se l'attività  $ij$  è fittizia, allora la sua durata  $D_{ij}$  è nulla:  $D_{ij} = 0$ .

Le attività fittizie si indicano con una freccia tratteggiata. L'attività fittizia quindi serve a vincolare la successione logica di due eventi del reticolo, inizialmente indipendenti.

La regola del nodo I indipendente è invece da applicare nel caso di due attività parzialmente o completamente contemporanee. Nel caso in cui occorra disegnare nel reticolo due attività parzialmente o completamente contemporanee, è sbagliato disegnare per entrambe gli stessi eventi iniziali e finali I e J, anche se da un punto di vista logico e della realtà del cantiere, sarebbe corretto. Per evitare problemi nell'analisi reticolare è necessario "sdoppiare" l'evento di inizio o di fine per poter identificare le attività diverse con i diversi simboli  $ij$ . A tal fine è utile inserire un'attività fittizia onde identificare le attività con codici differenti.

Questo significa che per rappresentare due attività sovrapposte occorre disegnarne tre nel reticolo. Per ovviare a questo inconveniente è qualche volta possibile aggregare le due attività contemporanee in un'unica attività data dalla somma delle due, con il vantaggio di non incrementare il numero di attività ma a scapito di una maggior analiticità del modello.

#### Definizione del modello CPM/I-J

Il modello I-J è un digrafo finito e aciclico in cui le frecce orientate (dette a volte archi), sono definite come *attività* e i nodi sono definiti come *eventi*. Associata ad ogni attività è una variabile non negativa, calcolata in modo deterministico, che è detta *durata* dell'attività.

Ogni attività è compresa tra due eventi e determina un verso di percorrenza. Esistono due eventi speciali: l'evento iniziale e l'evento finale. Ogni attività è contenuta in un percorso orientato che conduce dall'evento iniziale all'evento terminale.

La sequenza del reticolo definisce una sequenza di attività che è detta *logica del reticolo*.

Si definisce una *realizzazione del reticolo* il reticolo stesso con un determinato insieme di valori delle durate per le attività.

Per ogni realizzazione del reticolo si definisce *cammino critico* il percorso più "lungo", di maggiore durata, che conduce dall'evento

iniziale a quello finale, la durata del processo è definita come la “lunghezza” in termini di durata di tale percorso critico.

La durata del processo corrisponde ad un valore deterministico calcolato con un algoritmo matematico.

#### La sovrapposizione delle attività

Il metodo I-J non consente la sovrapposizione delle attività, in quanto l'unico legame logico possibile tra due attività è quello di fine-inizio. Pertanto l'unico modo per rappresentare la situazione data dalle attività sovrapposte è quella di “spezzare” le attività in più parti e legarle con vincoli di dipendenza dati da attività fittizie, indispensabili a rappresentare la logica del processo, ma spesso possono indurre in facili errori o fraintendimenti. Questa è la vera difficoltà del metodo CPM7I-J, insita nella stessa rappresentazione AOA che impone agli archi, cioè alle attività, di svolgere due funzioni allo stesso tempo: rappresentare le attività e la loro sequenza.

Riassumendo i tre passi per la corretta realizzazione della logica I-J sono:

1. definire le catene di attività e legarle tra loro con fittizie;
2. analizzare la logica rappresentata;
3. eliminare le attività fittizie fuorvianti o sovrabbondanti.

#### La struttura del reticolo CPM/I-J

I reticoli che rappresentano modelli del processo costruttivo devono essere strutturati in modo da avere un unico nodo di origine (detto “source” – sorgente) ed unico nodo di fine (detto “sink” – pozzo) per evitare fraintendimenti e difficoltà interpretative nel momento dell'effettivo calcolo dei tempi, la schedulazione.

### **La schedulazione delle attività e degli eventi**

Come già detto il metodo I-J è il risultato della fusione del metodo CPM con il metodo PERT. Infatti il metodo CPM nasce come metodo orientato alla programmazione e al controllo delle attività, mentre il metodo PERT focalizza l'attenzione sugli eventi. Questo significa che originariamente l'algoritmo per il calcolo dei tempi del CPM calcolava solo i tempi relativi all'esecuzione delle attività, mentre quello del metodo PERT calcolava solo i tempi alla realizzazione degli eventi. Si tratta quindi di due algoritmi di calcolo che in base alle stesse ipotesi elaborano dati complementari. L'algoritmo del metodo I-J integra questi due elementi e permette un'agevole programmazione e controllo di eventi ed attività contemporaneamente.

Consideriamo l'attività  $ij$ , la cui esecuzione è compresa tra i due eventi  $i$  e  $j$ .

Gli eventi  $i$  e  $j$  sono caratterizzati da un tempo di accadimento, ovvero da un istante nel tempo in cui  $i$  e  $j$  si realizzano, mentre l'attività  $ij$  è caratterizzata da un tempo di inizio ed un tempo di fine, associati da una durata  $D_{ij}$  di esecuzione dell'attività.

L'algoritmo alla base del metodo CPM/I-J calcolerà per ogni evento  $i$ -esimo e  $j$ -esimo due tempi di accadimento, detto tempo minimo e tempo massimo di evento, mentre per ogni attività  $ij$ -esima, caratterizzata da una durata prefissata e ritenuta costante, due tempi per l'inizio e due tempo per la fine attività, detti tempo minimo di inizio e tempo massimo di inizio, tempo minimo di fine e tempo massimo di fine.

Questi tempi definiscono le schedulazioni possibili per gli eventi e le attività.

Per l'evento  $i$ -esimo si ha:

- il tempo minimo dell'evento  $i$ -esimo, detto  $E_i$  (Early  $i$ ); è il tempo al più presto in cui si può realizzare l'evento  $i$ -esimo, ovvero è il tempo più vicino all'origine dei tempi, quindi più vicino all'inizio del processo produttivo, in cui si può realizzare il nostro evento  $i$ -esimo;

- il tempo massimo dell'evento  $i$ -esimo, detto  $L_i$  (Late  $i$ ); è il tempo al più tardi in cui si può realizzare l'evento  $i$ -esimo, ovvero è il tempo più ritardato possibile dall'origine del processo produttivo per realizzare l'evento  $i$ -esimo senza modificare la data finale di ultimazione del processo stesso.

Si consideri una qualsiasi attività  $ij$ . Per essa, fissata una durata di esecuzione costante, si definiscono quattro tempi.

Due tempi minimi, ovvero "al più presto":

- il tempo minimo di inizio di attività, detto  $ES_{ij}$  (Early Start  $ij$ ), il tempo al più presto, ovvero il più vicino all'origine dei tempi, in cui si può iniziare a svolgere l'attività  $ij$ ;

- il tempo minimo di fine di attività, detto  $EF_{ij}$  (Early Finish  $ij$ ), il tempo al più presto, ovvero il più vicino all'inizio del processo produttivo, in cui si può finire l'attività  $ij$ .

Due tempi massimi, ovvero "al più tardi":

- il tempo massimo di inizio di attività, detto  $LS_{ij}$  (Late Start  $ij$ ), il tempo più ritardato possibile dall'origine dei tempi per iniziare a svolgere l'attività  $ij$ , senza tardare la data finale di ultimazione lavori;

- il tempo massimo di fine di attività, detto  $LF_{ij}$  (Late Finish  $ij$ ), il tempo più ritardato possibile dall'origine dei tempi per

finire l'attività ij, senza tardare la data finale di ultimazione lavori.

Come accennato, l'algoritmo originario del PERT forniva solo i tempi di evento, mentre quello originario del CPM solo i tempi di attività. L'algoritmo I-J per fornire contemporaneamente sia i due tempi di evento che i quattro di attività stabilisce tra di essi delle relazioni ottenute dalle rispettive definizioni.

- A) Tempi minimi:  $E_i = ES_{ij}$   
 $EF_{ij} = ES_{ij} + D_{ij}$
- B) Tempi massimi:  $L_j = LF_{ij}$   
 $LS_{ij} = LF_{ij} - D_{ij}$

Si sottolinea come eventi ed attività siano entità concettualmente differenti che le sopracitate relazioni fanno coincidere, nei casi considerati, solo nei valori temporali.

Si noti inoltre come non esiste alcuna relazione tra i valori  $EF_{ij}$  e  $LS_{ij}$ , poiché gli algoritmi di calcolo trovano solo i valori  $ES_{ij}$  e  $LF_{ij}$ , oppure  $E_i$  o  $L_j$ , e non i valori calcolati aggiungendo o sottraendo la durata di questi ultimi.

#### L'analisi temporale con l'algoritmo I-J

L'algoritmo per calcolare i tempi è in realtà formato da due algoritmi differenti. Il primo algoritmo genera i tempi minimi e si chiama analisi in avanti. Il secondo genera i tempi massimi e si chiama analisi all'indietro.

#### *Analisi in avanti (ASAP: As Soon As Possible)*

Questo algoritmo parte dal primo evento e percorre il reticolo nel senso della progressione temporale (il verso delle frecce) sino all'evento finale, calcolando tutti i tempi minimi, il che equivale a trovare il percorso più lungo, dal punto di vista temporale, tra tutti i percorsi possibili che congiungono il nodo iniziale con quello finale del reticolo.

L'analisi in avanti è formata da quattro passi:

1)  $E_{i_0} = S$

Ovvero il tempo minimo del primo evento del reticolo (evento iniziale) è uguale ad un valore qualsiasi S, imposto dal programmatore;

2)  $ES_{ij} = E_i$

Tutte le attività ij che hanno l'evento i-esimo come evento iniziale, hanno come tempo minimo di inizio il tempo  $ES_{ij}$  uguale al tempo minimo dell'evento iniziale  $E_i$ ;

3)  $EF_{ij} = ES_{ij} + D_{ij}$

$$4) \quad E_j = \max(E_{Fij}) \quad \forall i$$

Il tempo minimo dell'evento finale j-esimo è uguale al massimo dei valori di tempo minimo di fine di tutte le attività ij che terminano nell'evento j-esimo. E' la regola di convergenza: le attività susseguenti non possono iniziare sino a quando non sono terminate tutte le attività precedenti.

*Analisi all'indietro: ALAP (As Late As Possible)*

Questo algoritmo parte dall'ultimo evento e percorre il reticolo nel senso opposto a quello della progressione temporale sino al primo evento, calcolando tutti i tempi massimi

L'analisi all'indietro è formata da quattro passi:

- 1)  $L_{j_n} = T$
- 2)  $LF_{ij} = L_j$
- 3)  $LS_{ij} = LF_{ij} - D_{ij}$
- 4)  $L_i = \min(LS_{ij}) \quad \forall j$

Il tempo massimo dell'evento i-esimo, di inizio di tutte le attività ij-esime, è uguale al minimo tra tutti i tempi massimi di inizio dell'attività ij. E' la regola di divergenza: poiché le attività susseguenti non possono iniziare sino a quando non sono terminate tutte le attività precedenti, per avere il massimo tempo in cui può terminare un'attività precedente si trova il minimo tempo massimo in cui può iniziare il più anticipato dei successori.

Convenzione di scorrimento zero

Se si impone che il valore T sia uguale al tempo minimo dell'ultimo evento  $E_{j_n}$ :

$$T = E_{j_n}$$

Allora, come si vedrà meglio in seguito, il minimo valore di scorrimento nel reticolo è uguale a zero. Altrimenti T può essere, per esempio, corrispondente alla durata contrattuale per eseguire i lavori.

Programma ASAP e ALAP, Tempo Totale a Disposizione

L'analisi in avanti fornisce i tempi minimi (ASAP) e l'analisi all'indietro fornisce i tempi massimi (ALAP).

Quindi, in generale, ogni attività dispone di due posizioni temporali generate dall'algoritmo che però non alterano la durata complessiva del programma lavori. A queste attività è dunque permesso un ritardo, o meglio, uno scorrimento nell'esecuzione



(oppure una dilatazione della durata) rispetto al programma con i tempi minimi.

L'esecuzione di un'attività  $ij$  può essere svolta in un lasso di tempo detto "Tempo Totale a Disposizione" (TTD), uguale a:

$$TTD_{ij} = L_j - E_i = LF_{ij} - Es_{ij}$$

L'ampiezza del tempo totale a disposizione è data dall'analisi temporale del reticolo ed è comprensiva della durata  $D_{ij}$  attribuita all'attività.

Da un rapido esame dei due programmi ASAP e ALAP si evince però che esistono nel reticolo delle attività "speciali" la cui schedulazione con i tempi minimi corrisponde con quella con i tempi massimi. Queste attività non hanno nessuna possibilità di scorrimento se non si vuole tardare la data di completamento del programma lavori. Queste attività sono dette *critiche* per i tempi. Le attività non critiche sono dette *subcritiche*.

Dunque dal punto di vista temporale ci sono delle attività più importanti di altre nel processo produttivo. Ci sono attività la cui esecuzione può essere effettuata in un periodo qualsiasi, compreso tra i tempi minimi e tempi massimi, ovvero all'interno del Tempo Totale a Disposizione, ed altre, più importanti dal punto di vista dei tempi, la cui dilazione da quanto programmato causa un pari ritardo nel completamento dell'intero svolgimento dei lavori.

Dal punto di vista della concreta fattibilità dei due programmi dei lavori ottenuti (ASAP e ALAP), si può osservare quanto segue.

Il programma al più presto tende a concentrare lo svolgimento delle attività verso l'origine dei tempi. Questo comporta un impegno notevole di risorse nelle prime fasi del processo produttivo, spesso con notevoli sovrapposizioni temporali. L'esecuzione di questo programma è però facilitata dalla possibilità di fare slittare alcune attività in caso di necessità.

Il programma al più tardi comporta normalmente una maggiore distribuzione delle attività nell'arco temporale dell'esecuzione dei lavori, con un minor livello di sovrapposizione tra le attività. In questo caso tutte le attività sono divenute critiche per i tempi, per cui un qualsiasi ritardo nello svolgimento di un'attività comporta un pari ritardo nell'ultimazione dei lavori. E' quindi quasi inevitabile la necessità di una proroga dei termini temporali per il completamento delle attività.

Quindi dal punto di vista dell'esecuzione si sceglierà un programma che preveda l'esecuzione delle attività subcritiche in una posizione "intermedia" rispetto all'intervallo tempi minimi – tempi massimi al fine di allocare meglio le risorse e ottimizzare

l'impegno produttivo ed economico durante l'esecuzione dei lavori. Questo programma "intermedio" che ottimizza le esigenze della produzione è definito programma "*target*" o "*baseline*", in quanto definisce l'obiettivo da perseguire e il riferimento per la misurazione degli scostamento in fase di esecuzione.

Con la definizione del programma target si individua un riferimento che consente di misurare la prestazione complessiva realizzata in relazione a due fattori fondamentali: la produzione svolta rispetto ai tempi, ovvero la produttività del cantiere, e i correlati fattori economici per la definizione dei costi e dei rimborsi afferenti al piano finanziario della commessa relativa al processo produttivo oggetto dei lavori.

### **Teoria dei margini di attività e le attività critiche**

E' importante per l'allocazione delle risorse e la gestione dell'esecuzione distinguere le attività critiche per i tempi da quelle subcritiche e studiare gli scorrimenti possibili per le attività. Il che significa saper valutare cosa comporta ritardare l'inizio o il completamento di un'attività del programma lavori. La teoria dei margini di attività studia gli scorrimenti. Gli scorrimenti sono i ritardi ammissibili per le attività che non inducono ritardi nell'ultimazione del processo produttivo. Nel metodo del cammino critico gli scorrimenti sono classificati in funzione delle conseguenze che il ritardo dell'attività in questione causa nelle attività a valle del processo, anche in presenza di ritardi nelle attività a monte. La definizione degli scorrimento nel metodo I-J è essenzialmente dovuta al CPM, mentre al PERT risale fundamentalmente la definizione dello scorrimento degli eventi.

Nel metodo CPM/I-J si definiscono i seguenti scorrimenti, uno per gli eventi e sei per le attività:

- scorrimento dell'evento  $i$ , indicato con  $F_i$ ;
- scorrimento totale dell'attività  $ij$ , indicato con  $TF_{ij}$ (Total Float  $ij$ );
- scorrimento libero dell'attività  $ij$ , indicato con  $FF_{ij}$ (Free Float  $ij$ );
- scorrimento interferente dell'attività  $ij$ , indicato con  $INTF_{ij}$ (Interfering Float  $ij$ );
- scorrimento indipendente dell'attività  $ij$ , indicato con  $INDF_{ij}$ (Independent Float  $ij$ );

- scorrimento condizionale o di sicurezza dell'attività ij, indicato con CONF ij o SAF ij (Conditional Float ij o Safety Float ij);
- scorrimento programmato dell'attività ij, indicato con PF ij.

Anche le attività fittizie, per quanto di durata nulla, possono essere dotate di scorrimento, in quanto sono calcolate dall'algoritmo come attività "normali".

Scorrimento dell'evento  $F_i$  – eventi critici

$$F_i = L_i - E_i$$

Gli eventi con valore minimo di  $F_i$  nel reticolo si dicono eventi critici:

$$F_i(\text{cr}) = \min(F_i) \quad \forall i$$

Se si è utilizzata la convenzione di scorrimento zero gli eventi critici hanno:

$$F_i(\text{cr}) = 0$$

Scorrimento totale  $TF_{ij}$  – attività critiche

E' la massima quantità di tempo di cui si può ritardare lo svolgimento dell'attività senza causare un ritardo alla data di completamento del processo produttivo del programma lavori reticolare e quindi senza aumentarne la durata complessiva prevista.

$$TF_{ij} = LF_{ij} - EF_{ij}$$

Oppure

$$TF_{ij} = LS_{ij} - ES_{ij}$$

da cui, dopo alcuni passaggi:

$$TF_{ij} = L_j - E_i - D_{ij}$$

Le attività con valore minimo di  $TF_{ij}$  nel reticolo si dicono attività critiche per i tempi  $ij(\text{cr})$ :

$$TF_{ij}(\text{cr}) = \min(TF_{ij}) \quad \forall ij$$

Se si è utilizzata la convenzione di scorrimento zero le attività critiche hanno:

$$TF_{ij}(cr) = 0$$

Lo scorrimento totale è una quantità di tempo “condivisa” tra le attività che appartengono ad uno stesso percorso. L’uso dello scorrimento totale in un’attività di un percorso normalmente ridurrà lo scorrimento di tutte le altre attività che lo condividono. Pertanto si dice che lo scorrimento totale è un attributo di un percorso e le singole attività lo condividono. Il completo utilizzo dello scorrimento totale  $TF_{ij}$  per ritardare un’attività  $ij$  è sottoposto a due condizioni:

- i predecessori della  $ij$  con il tempo di completamento più ritardato non hanno subito ritardi e sono stati completati al più presto, nel tempo minimo di fine;
- i successori della  $ij$  più anticipati devono essere iniziati nel tempo massimo di inizio e non devono subire ritardi, in quanto diventano attività critiche.

#### Attività ipercritiche

$$TF_{ij} < 0$$

Occorre ridurre la durata dell’attività per permetterne l’esecuzione o modificare alcune date imposte alla programmazione del reticolo.

#### Cammino critico

Le attività critiche formano un percorso lungo il reticolo che congiunge l’evento iniziale con l’evento finale. La somma delle durate delle attività critiche su un cammino critico fornisce la durata complessivo del processo.

Il cammino critico è il percorso più lungo tra tutti i percorsi possibili nel reticolo. Per la sua definizione, in un reticolo strutturato con un unico evento iniziale e un unico evento finale, il percorso critico congiunge l’evento iniziale con l’evento finale, che quindi saranno sempre critici.

E’ importante sottolineare che condizione sufficiente perché un’attività sia critica è che il suo scorrimento sia uguale al valore minimo possibile nell’ambito del reticolo, ovvero sia uguale allo scorrimento dell’ultimo evento. Dalla definizione di evento discende che condizione necessaria (ma non sufficiente) perché un’attività sia critica è che sia compresa tra due eventi critici.

#### Scorrimento libero $FF_{ij}$

Lo scorrimento libero misura la massima quantità di tempo di cui un'attività può essere ritardata senza causare un ritardo dei tempi minimi di inizio dei successori e senza tardare l'ultimazione dei programmi lavori.

$$FFij = \min(ES_{j,j+1}) - E_{ij}$$

Dalla definizione di  $E_j$ :

$$FFij = E_j - E_{ij}$$

Se i predecessori dell'attività  $ij$  non hanno subito ritardi, per sua definizione lo scorrimento libero  $FFij$  è patrimonio della singola attività  $ij$  e al contrario dello scorrimento totale non è condiviso, in quanto il suo consumo non causa ritardi ai successori. Si noti inoltre come lo scorrimento libero sia aliquota dello scorrimento totale.

Lo scorrimento libero è presente solo quando si è presenza di un evento di convergenza di più attività.

Lo scorrimento libero è un utile indicatore per i decisori, che necessitano di una visione globale del processo; è molto utile per realizzare il programma target, in quanto permette di tardare l'esecuzione di un'attività per consentire un uso ottimale delle risorse o una migliore gestione economica, senza influenzare i successori.

#### Lo scorrimento interferente INTFij

Lo scorrimento interferente misura la parte di scorrimento che non è più permessa se l'attività successiva più anticipata inizia nel tempo minimo di inizio (al più presto).

$$INTFij = LFij - \min(ES_{j,j+1})$$

Ovvero:

$$INTFij = L_j - E_j$$

Per le definizioni stesse di scorrimento totale, libero e interferente, vale la seguente relazione:

$$TFij = FFij + INTFij$$

#### Lo scorrimento indipendente INDFij

Lo scorrimento indipendente corrisponde alla situazione più svantaggiosa per un'attività  $ij$ , cioè misura il ritardo ammissibile se l'attività precedente più ritardata  $i-1,i$  è terminata al più tardi, nel tempo massimo di fine e l'attività susseguente più anticipata  $j,j+1$  deve iniziare al più presto, ovvero nel tempo minimo di inizio, senza tardare l'ultimazione del programma lavori.

$$\text{INDF}_{ij} = \min(\text{ES}_{j,j+1}) - \max(\text{LFI}_{-1,i}) - \text{D}_{ij}$$

$$\text{INDF}_{ij} = \text{E}_j - \text{L}_i - \text{D}_{ij}$$

Lo scorrimento indipendente non risente degli scorrimenti possibili dei predecessori e dei successori, ed è perciò patrimonio della singola attività senza limitazioni; è un'aliquota dello scorrimento libero e se lo scorrimento libero dell'attività  $ij$  è nullo, sarà nullo anche quello indipendente. Valori negativi non hanno significato.

Lo scorrimento condizionale CONF<sub>ij</sub> o di sicurezza SAF<sub>ij</sub>

Lo scorrimento condizionale misura il ritardo ammissibile se l'attività precedente più ritardata è terminata al più tardi, nel tempo massimo di fine e l'attività susseguente più anticipata può anch'essa iniziare al più tardi, ovvero nel tempo massimo di inizio, senza tardare l'ultimazione del programma lavori; il suo utilizzo è condizionale al ritardo dell'inizio al più preso dei successori.

$$\text{CONF}_{ij} = \min(\text{LS}_{j,j+1}) - \max(\text{LFI}_{-1,i}) - \text{D}_{ij}$$

Ovvero:

$$\text{CONF}_{ij} = \text{L}_j - \text{L}_i - \text{D}_{ij}$$

Valori negativi non hanno significato. Lo scorrimento di sicurezza non è altro che lo scorrimento condizionale in posizione antecedente l'attività  $ij$ , il che consente di non inserire il valore della durata  $\text{D}_{ij}$  nella definizione. Infatti lo scorrimento di sicurezza rappresenta la quantità di tempo di cui può essere dilatata la durata di un'attività  $ij$  quando il più ritardato dei predecessori termina nel tempo massimo di fine, senza tardare il completamento del programma lavori.

$$\text{SAF}_{ij} = \text{LS}_{ij} - \text{L}_i$$

Questo tipo di scorrimento rappresenta l'ultima possibilità di non tardare l'ultimazione dei lavori.

Lo scorrimento programmato PF<sub>ij</sub>

L'algoritmo CPM/I-J fornisce due schedulazioni per le attività, quella al più presto e quella al più tardi. Questo permette alle attività di essere allocate temporalmente in molteplici posizioni tra queste due situazioni limite, valutandone le conseguenze in

termini di scorrimenti, ovvero ritardi. Il tempo totale a disposizione ci consente di quantificare esattamente la finestra temporale concessa all'attività.

Attraverso la gestione dell'esecuzione dell'attività nel tempo totale a disposizione si può cercare di raggiungere l'uso ottimale delle risorse, dei flussi economici, o altre finalità produttive.

Lo scorrimento programmato è la distribuzione di una parte o di tutto lo scorrimento totale di un cammino subcritico sulle attività che lo compongono, in relazione a criteri specifici imposti dal programmatore.

Si tratta di vincolare lo svolgimento di un'attività in una determinata allocazione temporale posta all'interno del tempo totale a disposizione della stessa attività, imponendo delle date cosiddette "imposte".

## **Buffer: pratica comune nella programmazione**

### **Introduzione**

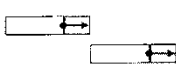
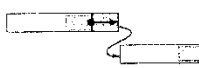
Il buffer è una pratica comune nella pianificazione del progetto. I responsabili di progetti o i programmatori di progetto hanno utilizzato una circostanza temporale volta a garantire il tempo di completamento di una attività o di un progetto. Questo uso tradizionale del buffer ("contingency buffer"), tuttavia, spesso non riesce a proteggere il rendimento della pianificazione del progetto, determinando una risorsa inutile di tempo inattivo. Ricerche sulla programmazione con il buffer per lo sviluppo del prodotto affrontano questo problema, concentrandosi sull'inadeguatezza del posizionamento e sul dimensionamento del buffer. Per esempio, Ballard e Howell (1995) hanno sostenuto che una programmazione con il buffer deve essere posta alla fine di progetti incerti, e la dimensione del buffer deve essere determinata sulla base del grado di incertezza. Goldratt (1997) ha introdotto vari tipi di buffer in base alle sue pratiche funzioni. Uno dei suoi suggerimenti è quello di mettere un "buffer di vincolo" davanti alle attività del percorso critico per ridurre al minimo i vincoli delle risorse e delle informazioni. Indicazioni in materia di decisioni strategiche sulla dimensione del buffer e sulla sua posizione sono anche proposte in letteratura. (Hopp e Spearman 1996; Ballard e Tommelein 1999; Koskela 1999; Ballard 2000; Yang e Photios 2001). Tuttavia, nonostante il loro contributo alla creazione di quadri concettuali di buffering, in pratica le strategie utili di buffering che possono essere applicate al processo di costruzione e che possono essere incorporate in strumenti di pianificazione e di controllo si trovano raramente.

Per risolvere questo problema, si presenta "il reliability buffer", una strategia di buffering basata sulla simulazione, che mira a generare un solido piano di costruzione che protegge contro le incertezze. A seguito delle discussioni sui motivi dell'inefficienza del buffer per assorbire imprevisti, i fondamenti per l'attendibilità del buffer sono qui introdotti. Poi, descriveremo brevemente Park e Peña-Mora (2003) il modello di progetto dinamico di Park e Peña-Mora (2003), che si concentra sui diversi impatti provocati dai cambiamenti della costruzione, che sono strettamente connesse al ruolo di affidabilità del buffer. Dopo aver discusso la struttura del modello, l'efficacia dell'attendibilità del buffer viene esaminata attraverso la simulazione del modello. Sulla base dei risultati della ricerca, possiamo concludere che buffer opportunamente aggregati, ridimensionati, spostati e ricaratterizzati possono contribuire a rendere più breve la durata del progetto senza aumentare i costi. Infine, un caso di studio di progetti di costruzione di ponti dimostra l'applicabilità del "reliability buffering" per reali progetti di costruzione.

### **Il Buffer per Assorbire Imprevisti ("Contingency Buffer")**

La prassi del settore per quanto riguarda i buffer per assorbire imprevisti varia a seconda del livello di programmazione utilizzato in un progetto di costruzione, come riassunto nella Tab.1.

Table 1. Traditional Buffering Practice

Level	Scheduled by	Buffering	
Lower	Subcontractors or Subdivisions	Adding some contingency to individual activities to guarantee the schedule performance of each individual activity	
Higher	General Contractors or Project Managers	Given precedence relationships, adding some contingency to the preceding activity to avoid subsequent schedule disruptions in the succeeding activity.	

Alla pianificazione di livello inferiore, gli imprevisti di tempo sono normalmente più probabili per la durata dell'attività, al fine di garantire le prestazioni della programmazione delle singole attività. Queste assegnazioni sono per lo più eseguite da subappaltatori o suddivisioni. Per esempio, i progettisti possono applicare una stima pessimista per la pianificazione della durata di progetto invece della sua durata media in modo che essi possano mantenere le loro promesse sui tempi di consegna nel caso in cui il lavoro di progettazione è in ritardo. Nel frattempo, quando una programmazione di livello superiore è fatta sulla base



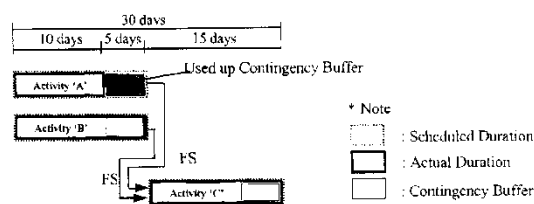
degli elenchi raccolti dal livello più basso, spesso, i fattori imprevisti sono di nuovo aggiunti all'attività precedente in modo da evitare interruzioni nelle attività successive. Per esempio, sapendo o non sapendo che i fattori imprevisti sono già stati inseriti in un'attività di scavo, un project manager può mettere più giorni imprevisti nei lavori di scavo in modo che i lavori di fondazione possano iniziare come previsto, anche se i lavori di scavo sono in ritardo di pochi giorni.

### **Mancanza di caratteristiche**

Sulla base della sequenza della programmazione, il buffer per assorbire imprevisti è normalmente concepito posizionato alla fine della durata dell'attività. Tuttavia, una volta aggiunto alla durata di un'attività, tale buffer tende ad essere utilizzato come parte di un'attività senza distinzioni chiaramente dalla durata originale, quindi, non più presentato come un imprevisto. Il tempo ha aggiunto alla durata originaria risulta solo nella pianificazione di sviluppo. Quando le persone si rendono conto che hanno più tempo di quanto ne sapevano per completare un compito, la produttività del loro lavoro di solito cala, spesso con l'incombenza di essere rinviata all'ultimo minuto ("la sindrome dell'ultimo minuto"). Come risultato, il buffer per assorbire imprevisti non è così utile per proteggere il rendimento della programmazione, creando spesso una durata elastica.

### **Perdita di un Punto di Fusione**

Inoltre, il buffer per assorbire imprevisti è spesso inefficiente nel punto fusione di una rete di pianificazione. Dal momento che un precedente legame può creare un ostacolo al punto di fusione, i progressi sono terminati, ma i ritardi si accumulano nei buffer della pratica tradizionale. Nella discussione per l'efficienza del buffer, i quattro legami sono esaminati qui di seguito. Cioè, Fine-Inizio (FS), Fine-Fine, Inizio-Fine e Inizio-Inizio (SS). Supponiamo che la durata delle attività A, B e C in Fig. 1 è di 15 giorni, che contiene 5 giorni per assorbire imprevisti.



**Fig. 1.** Contingency buffer at merging point

Inoltre, ogni attività A e B ha un legame FS con l'Attività C. Supponendo che l'Attività A è finita 5 giorni prima e le Attività B e C sono finite in tempo, la durata totale sarà 30 giorni. A causa dei legami di precedenza coinvolti nelle attività, l'Attività C non può iniziare fino a quando l'attività B è terminata, anche se l'Attività A è finita 5 giorni prima rispetto al tempo di programmazione. Come risultato, si ha che un anticipo programmato conseguito con l'attività A è terminato, non si aggiunge, quindi, alcun beneficio al progetto. Nel frattempo, supponendo che ci vogliono 20 giorni per terminare l'attività B, 5 giorni di ritardo dell'Attività B vengono trasferiti all'attività C, ritardando l'inizio dell'Attività C di 5 giorni. Questo esempio mostra come i ritardi si accumulano nella pratica tradizionale del buffer, mentre gli anticipi sono andati persi.

### **Dimensionamento Inefficiente**

Il metodo tradizionale per il dimensionamento di un buffer può contribuire a rendere il buffer per assorbire gli imprevisti inefficace. La dimensione di un "contingency buffer" è normalmente stabilito in base alla esperienza individuale e assegnata in modo uniforme (ad esempio, il 10% della durata dell'attività) invece di prendere in considerazione le caratteristiche di ogni singola attività. Inoltre, come discusso in precedenza, l'applicazione di tale buffer impropriamente dimensionato è spesso ripetuto da diverse funzioni nei progetti.

### **L'Affidabilità dei Buffer**

L'affidabilità del buffer presentata in questo articolo si propone di tutelare sistematicamente l'intera performance della pianificazione del progetto dalle interruzioni dei fallimenti nelle singole attività. Per fare ciò, l'affidabilità del buffer mette in comune, trasferisce, ridimensiona e ricaratterizza qualsiasi "contingency buffer" presente o introduce un nuovo buffer, se la presenza del "contingency buffer" non è esplicita. Inoltre, per tutta la durata della costruzione, la posizione e le dimensioni del buffer di affidabilità sono aggiornate dinamicamente per ospitare cambiamenti della pianificazione dal piano iniziale.

### **La Logistica del Buffer**

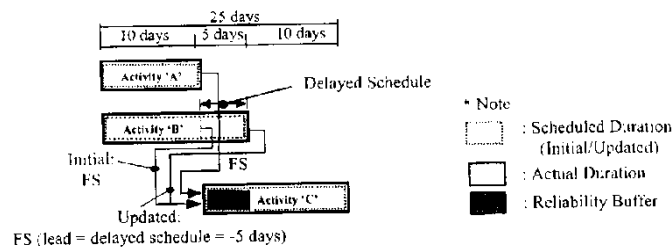
Nel buffer di affidabilità, il tempo in eccesso al di là del sapere la durata media è considerato come un "contingency buffer". Per esempio, ipotizzando che la durata media di un'attività è di 10

giorni, ma ne viene assegnata una di 15 giorni per garantire un completamento in tempo, la maggiorazione di 5 giorni è considerata un “contingency buffer”. Inoltre, ogni frazione di durata, per cui la gente potesse avere un atteggiamento permissivo, è anche visto come un “contingency buffer”, anche se nessun buffer di per assorbire gli imprevisti è stato volutamente assegnato. Come esempio di questo “contingency buffer” implicito, supponiamo che la produttività del lavoro medio di un'attività diventa la più alta con durata di 5 giorni, ma sono 7 i giorni attualmente assegnati all'attività. In questo caso, i 2 giorni eccedenti vengono considerati come un “contingency buffer”.

L'affidabilità del buffer inizia con l'eliminare i “contingency buffer” in modo da inserirli in seguito esplicitamente o implicitamente nelle singole attività. Eliminando i buffer per assorbire gli imprevisti derivanti dalle attività individuali si può ottenere il vantaggio delle attività da una appropriata pianificazione, superando la sindrome dell'ultimo minuto. Dopo aver eliminato i “contingency buffer”, il buffer di affidabilità è alimentato nella prima parte delle attività del successore e caratterizzato come un tempo per individuare i problemi creati nell'attività del predecessore e per aumentare le risorse per l'attività del successore. Ad esempio, un buffer di affidabilità in una attività di getto di calcestruzzo per una fondazione è progettato per assorbire qualsiasi imprevisto delle attività del predecessore così come un'attività di rinforzo in acciaio, nonché per pianificare l'uso delle risorse durante i getti di calcestruzzo, prendendo in considerazione le informazioni ottenute nel corso del rinforzo con l'acciaio rispettando le risorse o le caratteristiche di tutto il progetto. Mettendo un buffer all'inizio delle attività invece che alla fine, il buffer di affidabilità è in grado di affrontare la questione degli incarichi non ben definiti che possono richiedere tempo per la descrizione. In questo modo è possibile concentrarsi su attività che hanno alcuni problemi prima che attivare un effetto domino, come potrebbe accadere in un buffer tradizionale.

Nel frattempo, posizionando un buffer all'inizio della durata dell'attività, è anche possibile ridurre le perdite al punto di fusione di una rete di pianificazione. Continuando con l'esempio del buffer per assorbire gli imprevisti, 5 giorni di “contingency buffer” sono eliminati da tutte le attività (questo è basato sul presupposto iniziale che un “contingency buffer” di 5 giorni è applicato a tutte le attività). Poi, un buffer di affidabilità di 5 giorni (in realtà, le dimensioni del buffer variano a seconda delle

caratteristiche delle attività associate), ovvero considerato a fronte dell'Attività C, come illustrato in Fig.2. Come risultato, le Attività A e B hanno 10 giorni, e C ha 15 giorni (5 giorni per il buffer di affidabilità e 10 giorni per l'esecuzione). Supponendo che la durata effettiva delle Attività A e B siano le stesse del precedente esempio, l'Attività B è ora in ritardo di 5 giorni. Nonostante il ritardo nell'Attività B, l'Attività C può iniziare con il "reliability buffer".



**Fig. 2.** Reliability buffer at merging point

Nel frattempo, il legame di precedenza tra le attività B e C è stato modificato da un FS ad un FS con 5 giorni di vantaggio (anche se la dimensione aggiornata del buffer di affidabilità e il tempo di vantaggio non sono necessariamente 5 giorni nella nostra approccio, questo esempio viene utilizzato inizialmente per prevedere la dimensione del buffer per una spiegazione finale). Dettagli su questo buffer dinamico saranno discussi in seguito.

Durante il periodo del buffer, è possibile per i lavoratori dell'Attività C per trovare i problemi del predecessore o eventuali disallineamenti di carattere tecnico o funzionale prima che l'Attività C cominci controllando il lavoro che è stato fatto nelle Attività A e B fino a quel momento. Una volta che il problema è stato trovato, possono chiedere ai lavoratori dell'attività del predecessore di correggere il lavoro, che potrebbe d'altronde provocare imprevisti sull'avanzare dell'Attività C. Inoltre, il buffer di affidabilità può anche fornire un periodo di tempo da esaminare a fondo e per preparare l'Attività C, in modo da far crescere le risorse necessarie. Di conseguenza, l'Attività C può diventare più affidabile, il che aumenta le possibilità di terminare l'Attività C entro la durata ridotta (10 giorni effettivi di lavoro meno 5 giorni di buffer di affidabilità). A condizione che l'Attività C sia completata come previsto, la durata totale sarà di 25 giorni.

### Dimensione del Buffer

Come dimensionare un buffer è un altro tema cruciale nel buffering. La dimensione di un buffer deve essere abbastanza

prolungata per mantenere le attività del successore affidabili, ma un buffer con una dimensione impropria può creare un periodo di tempo improduttivo di inattività. Per fornire un modo sistematico nel dimensionamento del buffer, il buffer di affidabilità usa la struttura sovrapposta di Pena-Mora e di Li come determinanti della dimensione del buffer.

Le caratteristiche costruttive trattate nella loro struttura sono definite come segue:

1. Tipo di produzione: il modello di avanzamento dei lavori di un'attività. Nel caso di "ultima produzione", la produttività della costruzione è inizialmente alto, ma diminuisce man mano che la costruzione procede. Al contrario, la produttività della "produzione lenta" è inizialmente bassa, ma aumenta man mano che la costruzione procede.

2. Affidabilità: il grado di qualità del generico lavoro e la solidità contro le incertezze. Un'attività "affidabile" produce un minor numero di modifiche, mentre l'attività "inaffidabile" genera più modifiche.

3. Sensibilità: il grado di quanto un'attività è sensibile ai cambiamenti effettuati internamente o esternamente. Un'attività "sensibile" è più vulnerabile ai cambiamenti rispetto ad un'attività "insensibile".

Pena-More e Li sostengono che il grado di sovrapposizione di un'attività di costruzione dovrebbe essere deciso in modo tale che può essere assegnato tempo sufficiente per scoprire e risolvere i problemi nell'attività del predecessore. Più sovrapposizioni possono essere consentite, quando l'attività predecessore si evolve velocemente o quando l'attività successore evolve lentamente. In altre parole, un'attività lenta del predecessore o un'attività veloce successore richiedono buffer con più tempo per scoprire e risolvere problematiche del lavoro del predecessore. Inoltre, l'affidabilità dell'attività del predecessore governa anche il grado di sovrapposizione, in quanto la scarsa affidabilità delle attività del predecessore potrebbe comportare problemi per l'attività del successore. Di conseguenza, il lavoro del predecessore è meno affidabile, ha bisogno di maggior tempo nel buffer del successore. Infine, il grado di sovrapposizione dipende anche dalla sensibilità delle attività del successore al lavoro del predecessore. Normalmente, il lavoro più sensibile del successore richiede buffer con più tempo.

Questi fattori determinanti la dimensione del buffer forniscono linee guida fondamentali per l'affidabilità del buffer. Tuttavia, un efficace dimensionamento del buffer è anche strettamente legato a molte altre condizioni di costruzione, compreso il controllo della forza lavoro e le politiche di controllo. Inoltre, ogni determinante normalmente ha effetti diversi sul sistema di costruzione e i loro effetti variano a seconda delle legami precedenti. Per queste ragioni, il buffer di affidabilità adotta un approccio di simulazione nel dimensionamento di un buffer, che permette di fornire una adeguata dimensione del buffer in modo sistematico, date le caratteristiche di certe attività e le politiche di controllo del progetto.

### **Il Buffer Dinamico**

Al fine di controllare efficacemente i cambiamenti della pianificazione del progetto iniziale, i buffer inizialmente pianificati hanno bisogno di essere continuamente aggiornati durante la costruzione. Normalmente, un progetto di costruzione si sviluppa per tutta la durata del progetto, durante la quale le caratteristiche di un sistema costruttivo sono in continuo cambiamento. Come nell'esempio in Fig.2, se l'attività del predecessore ha un ritardo inferiore alla dimensione del buffer (ad esempio, 5 giorni), il buffer inizialmente previsto è in grado di assorbire il ritardo (ad esempio, fino a 5 giorni). Tuttavia, se l'attività del predecessore viene ulteriormente rimandata e, di conseguenza, il buffer applicato è esaurito, l'attività del predecessore ritardata ha effetto sulla performance dell'attività del successore come da programmazione.

Con un approccio statico al buffer, i ritardi nell'attività del predecessore sono passati direttamente sull'attività del successore semplicemente spingendo in avanti il buffer inizialmente programmato e l'attività del successore, come rappresentato in Fig.3(a). Al contrario, applicando il buffer dinamico, l'impatto delle interruzioni della programmazione del predecessore sull'attività del successore può essere minimizzato attraverso l'aggiornamento dinamico della posizione e della dimensione di un buffer sulla base delle informazioni ottenute dalla performance effettiva e della previsione delle prestazioni della costruzione rimanenti.

Nel caso in cui la durata effettiva dell'attività del predecessore è maggiore rispetto alla durata iniziale, questo approccio dinamico aiuta a minimizzare l'impatto delle interruzioni sulla programmazione del predecessore. Per esempio, in Fig.3 (a),

applicando un approccio dinamico del buffer, la durata iniziale dell'attività del predecessore  $D_i$  è aggiornata al momento " $t_c$ " con la durata prevista  $D_f$ , in base al quale la dimensione del buffer  $B_d$  è stabilita anche da poco.

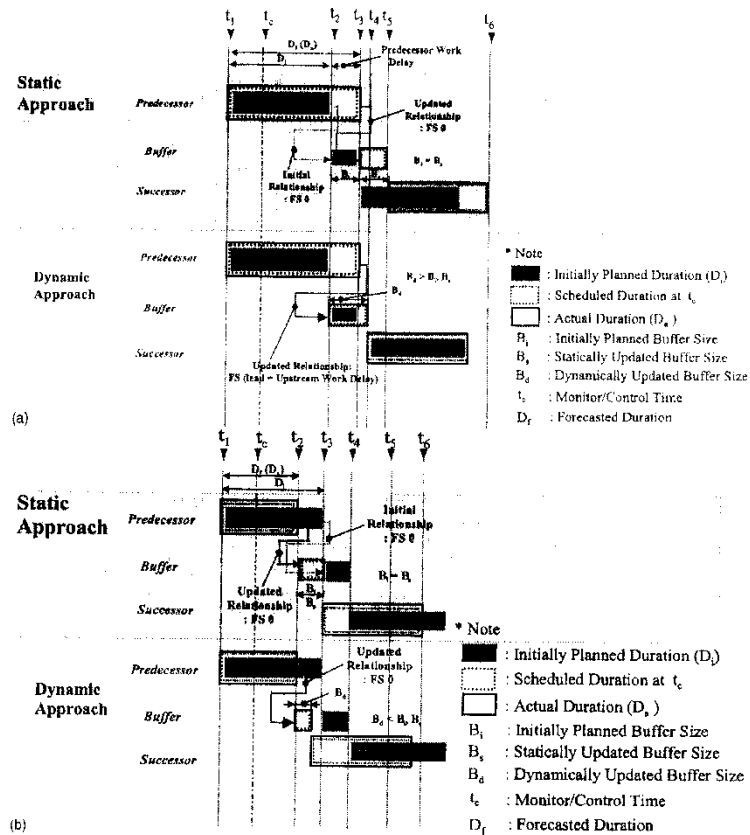


Fig. 3. Dynamic buffering (a) I and (b) II

La versione aggiornata della dimensione del buffer  $B_d$  è probabilmente più grande del buffer  $B_i$  inizialmente previsto, in quanto forse sono coinvolti più cambiamenti nell'attività del predecessore di quanto previsto nella pianificazione iniziale. Inoltre, il legame precedente associato è cambiato anche al fine di tutelare l'attività originaria del successore. Il tempo di completamento dell'attività del predecessore è cambiato a causa del ritardo, mentre l'orario di inizio del buffer aggiornato è lo stesso. Di conseguenza, il legame iniziale FS viene ad avere un vantaggio equivalente al ritardo nelle attività del predecessore ( $t_3 - t_2$ ). Supponendo che l'attività del predecessore è effettivamente finita a  $t_3$ , la risorsa tempo di inattività delle attività del successore nel buffer statico può essere salvata tanto quanto  $t_5 - t_4$ . Anche se ci possono esistere differenze tra la durata  $D_a$  effettiva e la durata prevista  $D_f$ , le lacune di solito sono limitate, come la costruzione procede verso il completamento e così l'informazione maggiore è ottenuta da monitoraggi successivi.

Nel frattempo, quando l'attività del predecessore è finita prima di quanto previsto dalla programmazione iniziale, l'approccio dinamico consente di utilizzare la pianificazione avanzata. Per esempio, supponiamo che le attività e il buffer di affidabilità in Fig.3 (b) siano riprogrammate con il tempo  $t_c$  come l'esempio in Fig.3 (a). Una volta che il buffer dinamico è applicato, è possibile salvare i tempi dell'attività del successore come  $B_s - B_d$ . I modelli di questo buffer dinamico variano in base al legame associato in precedenza, come riassunto nell'Appendice 1.

Riassumendo questa sezione, l'affidabilità del buffer mira a proteggere in modo aggressivo le prestazioni programmate del progetto. I passi del "reliability buffer" sono

- 1) eliminare i buffer per assorbire gli imprevisti derivanti da attività individuali e dalla loro messa in comune;
- 2) il ridimensionamento del "contingency buffer" o di introdurre un nuovo buffer in base ai risultati della simulazione, date le caratteristiche dell'attività di progetto e le politiche di controllo del progetto;
- 3) mettendo il buffer ridimensionato o di recente introduzione tra le attività, più precisamente all'inizio della durata dell'attività;
- 4) caratterizzandolo come un tempo per aumentare le risorse necessarie per l'attività del successore e del predecessore e per trovare un problematico lavoro che avrebbe interrotto l'attività del successore in corso;
- 5) utilizzando la programmazione delle contingenze rimaste nella riserva del buffer come un "percorso di riserva del buffer" per il progetto;
- 6) in modo dinamico l'aggiornamento della posizione e la dimensione del buffer durante la costruzione utilizzando le informazioni ottenute dal rendimento effettivo.

### **Il Progetto del Modello Dinamico**

Noi esaminiamo l'efficacia dell'affidabilità del buffer, mediante la simulazione del modello di progetto dinamico di Park e Pena-Mora. Per assistere le decisioni del direttore dei lavori, il modello è stato sviluppato integrando "reliability buffer" e concetti di programmazione di rete in modelli di sistemi dinamici. Dopo una breve introduzione dei sistemi dinamici, questa sezione discute la generica struttura del modello del processo, che costituisce lo scheletro del progetto del modello dinamico.



## Il Sistema Dinamico

Il sistema dinamico è stato sviluppato alla fine del 1950 per applicare la teoria di controllo per l'analisi dei sistemi industriali. Da allora, il sistema dinamico è stato utilizzato per analizzare sistemi industriali, economici, sociali e ambientali di ogni tipo. Una delle caratteristiche più potenti del sistema dinamico risiede nella sua capacità analitica, che può fornire la soluzione analitica per sistemi complessi e non lineari come la costruzione. I progetti di costruzione sono di per sé complessi e dinamici, visto che coinvolgono processi di informazioni multiple e relazioni non lineari. Per queste ragioni, un approccio di modellazione dinamica del sistema è adatto a trattare con la complessità dinamica nei progetti di costruzione, come è stato dimostrato da alcuni ricercatori. Come componente importante di modellazione, le scorte rappresentano quantitativi ammassati e quantità controllate di flussi che fluiscono e defluiscono nelle quantità di scorte. Per esempio, si assuma la struttura di stock e di flusso della Fig.4. Il *Tondino per cemento armato nell'Inventario* costituisce una scorta in cui il tondino viene accumulato così da poter essere espresso come *flusso di Consegna* e così che il tondino immagazzinato registrato come utilizzato attraverso il flusso dell'*Uso del Tondino per cemento armato*.

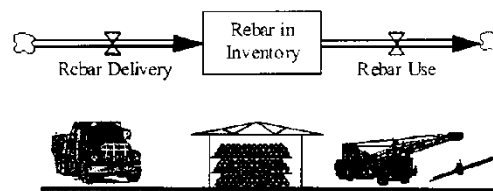


Fig. 4. Example of stock and flow structure

## Il Generico Processo di Struttura del Modello

La Fig.5 presenta il processo generico di un progetto di costruzione. Nella struttura del modello, il flusso di lavoro durante la costruzione è rappresentato come incarichi che affluiscono e attraverso cinque azioni principali: *Lavoro-da-Fare*, *Lavoro-in-Attesa-di-Risposta-da-RFI*, *Lavoro-in-attesa-per-il-cambiamento-di-PR*, *Lavoro-in-Attesa-per-la-Gestione-della-Qualità* e *Lavoro-Completato*.

Gli incarichi disponibili in un determinato momento vengono introdotti nell'azione *Lavoro-da-Fare*. Gli incarichi introdotti sono completati attraverso il ritmo di lavoro, a meno che le modifiche (stato di lavoro che si discosta dal piano iniziale di

costruzione o dalle direttive) sono presenti nel lavoro precedente. Quando si trovano i cambiamenti dell'attività del predecessore, gli ingegneri effettuano normalmente una "richiesta di informazioni" (RFI) al responsabile del progetto.

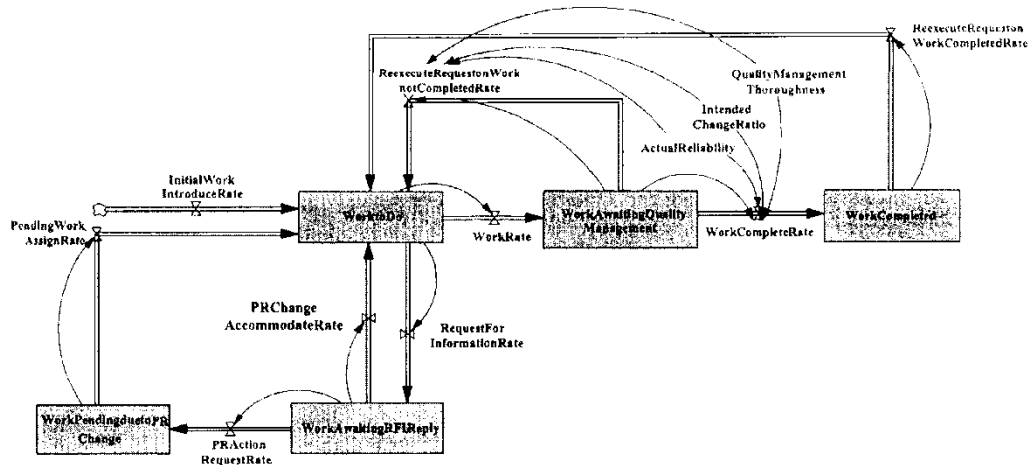


Fig. 5. Generic process model

Se mediante la risposta alla RFI, le modifiche risultano essere avvenute per errore e una decisione gestionale è stata presa per correggerle nel percorso di cambiamento della produzione, le attività del successore corrispondenti sono ritardate fino a quando le modifiche al predecessore sono ri-eseuite. Per esempio, supponiamo che prima di iniziare il lavoro "mattonelle del pavimento", si è constatato che il solaio è stato costruito con uno spessore maggiore rispetto alle specifiche di costruzione a causa di una inesatta colata di cemento. In questo caso, il project manager può richiedere personale per correggere lo spessore della lastra eliminando il calcestruzzo in eccesso. Nella struttura del modello, questo processo è rappresentato con i seguenti processi. Le attività del successore corrispondenti alle variazioni del predecessore sono spostate nel *Lavoro-in-Attesa-di-Risposta-da-RFI*, e poi nel *Lavoro-in-attesa-per-il-cambiamento-di-PR* dove si aspettano che le modifiche predecessore siano ri-eseuite. Quando i cambiamenti del predecessore sono ri-eseuiti, gli incarichi del successore sono rinviati nell'azione *Lavoro-da-Fare*. Tuttavia, l'iterazione di *Lavoro-in-Attesa-di-Risposta-da-RFI* - *Lavoro-in-attesa-per-il-cambiamento-di-PR* - *Lavoro-da-Fare* non ha luogo nei seguenti casi. Quando le variazioni del predecessore sono state trasferite al successore attraverso decisioni manageriali, esse si suppone siano state adattate cambiando le attività associate del successore. Continuando con l'esempio del lavoro delle piastrelle, è possibile trovare la costruzione in calcestruzzo imprecisa subito dopo il getto. Tuttavia, dopo aver

confrontato l'impatto economico di ciascuna opzione (variazione o rielaborazione), il project manager può decidere di modificare le specifiche mansioni dell'attività piastrellature del pavimento come, ad esempio, lo spessore di malta invece di ordinare il rifacimento della lastra. Inoltre, le modifiche indesiderate del predecessore possono anche essere adattate durante il lavoro del successore. Entrambi i casi sono rappresentati nella struttura del modello come attività collegate nel *Lavoro-in-Attesa-di-Risposta-da-RFI* essere restituite a *Lavoro-da-Fare* attraverso *Lavoro-in-attesa-per-il-cambiamento-di-PR*.

Nel frattempo, gli incarichi completati sono accumulati nello stock, il *Lavoro-in-Attesa-per-la-Gestione-della-Qualità* dove sono in attesa di essere monitorati o controllati. Le attività che soddisfano il livello di qualità di destinazione sono state approvate e si trasferiscono al *Lavoro-Completato*, mentre le modifiche vengono respinte e passate nello stock di *Lavoro-da-Fare* dove aspettano di essere ri-eseuite. Questa iterazione è disciplinata dall'*Affidabilità-Effettiva*, che è una funzione di affidabilità di un'attività, qualità dell'imprevisto del predecessore e la difficoltà della pianificazione. Un'attività di un lavoro inaffidabile genera più cambiamenti di un'attività di un lavoro affidabile. Inoltre, la bassa qualità del lavoro del predecessore e la difficoltà di una pianificazione durevole può anche abbassare l'attendibilità del lavoro del successore. Durante la gestione della qualità, è possibile distribuire le modifiche all'attività del successore non accorgendosi di loro. Nella struttura del modello, il grado di variazioni che si trascurano è determinato dalla *Gestione-della-Qualità-nella-sua-Completezza*. Quando i cambiamenti trascurati ("cambiamento nascosto") vengono distribuiti all'attività del successore, possono peggiorare la qualità del lavoro del successore.

In sintesi, questa sezione ha presentato la struttura del modello generico di processo. Il modello dispone di processi generici e una serie di parametri, comuni a progetti di costruzione, con la possibilità di personalizzarlo per un progetto specifico.

### **Conferma dell'Affidabilità del Buffer**

Come si può intuire dalla discussione sulla struttura del modello, il processo di costruzione comporta molte iterazioni aggiunte di nessun valore causate da cambiamenti e il loro impatto sulle prestazioni della costruzione è significativo. I modelli, i percorsi e l'entità di tale cambiamento variano a seconda del tempo della scoperta e della localizzazione, e se le modifiche sono state fatte

di proposito o intenzionalmente. Quando il buffer affidabilità è applicato, è possibile assorbire l'impatto della variazione sulle attività del successore, controllando il tempo di inizio e l'andamento delle attività del successore. In questo paragrafo, l'efficacia di buffer di affidabilità viene esaminata con una simulazione del modello dinamico del progetto con vari scenari. Inoltre, viene analizzato il ruolo delle caratteristiche costruttive nel determinare l'effettiva dimensione del buffer. Infine, sono discusse le conseguenze del buffer ottenute dal modello di comportamento.

### Scenario di Base

Al fine di esaminare l'efficacia del buffer di affidabilità, in primo luogo, lo scenario di base di cui alla Tabella 2 è stato simulato con due casi, uno con un buffer di affidabilità ("caso buffer ") e uno che non ha un buffer di affidabilità ("no caso buffer").

**Table 2.** Base Scenario for Model Simulation

Descriptions		Activity	
		A	B
Duration (days)		50	50
Precedence relationships		Start-to-start 25 days	
Constructions characteristics	Production types	Fast	Fast
	Reliability	Types	Unreliable
		Value	0.85
	Sensitivity	Types	Sensitive
Value		1	1
Buffering	Schedule contingency	0.2	0.2
	Fraction of buffering	NA	0.5
	Buffer size (days)	NA	5
Quality management	Thoroughness	0.5	0.5
	Period (days)	5	5

Lo scenario di base comprende 50 giorni di durata per entrambe le attività e un legame di precedenza in modo tale che l'Attività B può iniziare solo 25 giorni dopo l'inizio della Attività A (SS 25 giorni). Per chiarezza, nello scenario base, si assume che il 20% della durata di entrambe le attività (50 giorni \* 20% = 10 giorni) è un programmazione di emergenza (buffer per assorbire gli imprevisti) e il 50% della programmazione di emergenza (10 giorni \* 50% = 5 giorni) può essere utilizzato per il buffer di affidabilità (in applicazioni reali, le dimensioni dei buffer di affidabilità sono determinati attraverso una simulazione). Come illustrato in Fig.6, la programmazione originale è regolata in base ai passi del buffer di affidabilità nel caso di buffering. Dieci giorni di "contingency buffer" sono tolti da entrambe le Attività

A e B. Poi, 5 giorni di buffer di affidabilità sono inseriti all'inizio della durata dell'Attività B e si sono caratterizzati come un tempo per aumentare le risorse necessarie per l'Attività B e per trovare i problemi nell'Attività A. Nel frattempo, durante la simulazione, nessuna azione di gestione per raggiungere la programmazione in ritardo è considerata al fine di misurare più efficacemente il ruolo di affidabilità del buffer sulle prestazioni di pianificazione.

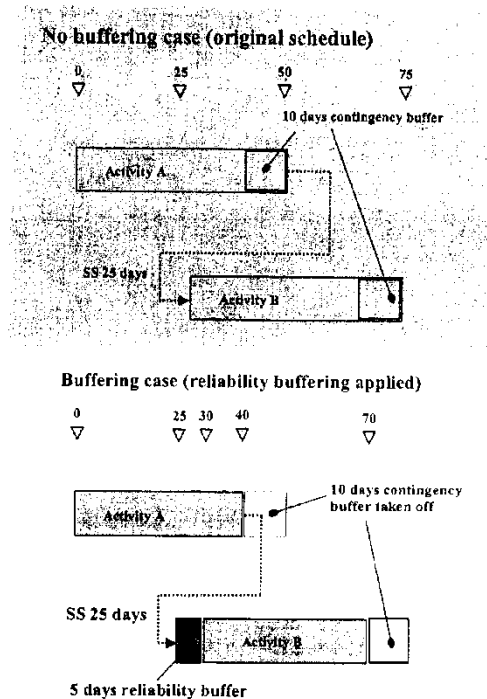


Fig. 6. Base scenario for model simulation

Come risultato della simulazione, lo scenario di base è completato al giorno 90° senza buffer, mentre è completato al 85° giorno nel caso di buffer. Per l'Attività B, il 15,4% del buffer di affidabilità richiesto salvato della durata originaria (65-55 giorni), dà la stessa quantità di risorse e nessun intervento dall'esterno del sistema. La differenza nelle durate simulate indica che il buffer di affidabilità applicato assorbe l'impatto del cambiamento dall'Attività A riducendo gli sprechi di risorse e di tempo minimo delle risorse. Nel frattempo, le durate simulate di entrambi i casi sono più lunghe rispetto alla durata del CPM-base, che è di 75 giorni. Questo perché il modello di progetto dinamico simulato non aggiunge nessun valore alle iterazioni in base alle caratteristiche dell'attività proposta, che non sono considerate nel calcolo del metodo del percorso critico CPM-base.

La Fig.7 mostra che durante il periodo iniziale, l'Attività B nel caso di buffer progredisce a un ritmo più lento piuttosto che nel

caso dove non c'è il buffer a causa di una partenza in ritardo. Nel caso di buffering, tuttavia, le variazioni nascoste generate nell'Attività A sono significativamente diminuite durante il periodo del buffer.

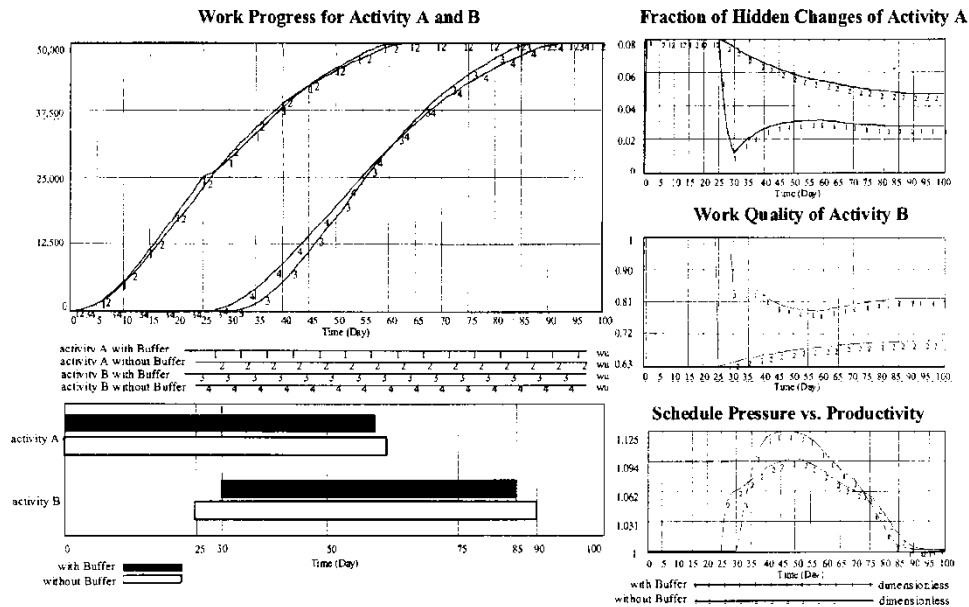


Fig. 7. Base scenario simulation results

Come risultato, l'Attività B nel caso con buffer può avere una maggiore qualità del lavoro e tasso di utilizzo delle risorse, che rende, quindi, possibile raggiungere miglioramenti rispetto al caso senza buffer. Inoltre, un'appropriata pressione di pianificazione creata dalla durata di riferimento ridotta (da 50 a 40 giorni) aumenta la produttività di entrambe le attività, che aiuta anche a terminare prima le attività. Questi risultati della simulazione confermano che il buffer di affidabilità potrebbe risultare utile per la pianificazione delle prestazioni. Una volta che le azioni manageriali per correggere eventuali scostamenti dalla performance della programmazione originale sono consentiti, il ruolo del buffer di affidabilità può essere esteso. A seconda dei vincoli imposti, il project manager può tentare di recuperare la programmazione in ritardo, a scapito dei costi. In questo caso, il buffer di affidabilità può essere vantaggioso per il costo delle prestazioni, nonché per ridurre e portare al minimo l'uso improprio delle risorse.

### Sensibilità del Test

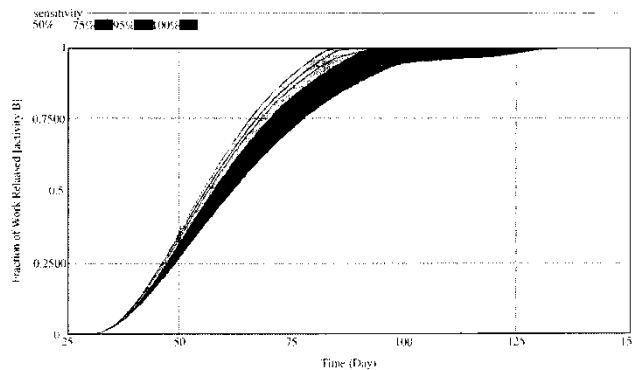
Dopo aver esaminato l'efficacia di affidabilità del buffer con lo scenario di base in cui la dimensione del buffer è determinata arbitrariamente, in questa sezione si analizza il ruolo delle

caratteristiche di costruzione nel determinare l'effettiva dimensione del buffer, data i diversi legami di precedenza. La discussione inizia con la presentazione dei risultati delle simulazioni con sensibilità multivariata. Queste simulazioni sono state eseguite 500 volte adattando lo scenario di base alle diverse condizioni, riportate nella Tabella 3.

**Table 3.** Simulation Settings for Sensitivity Test

Description	Precedence relation	Buffer applied to Activity B (days)	Production type (both activities)	Reliability (Activity A)	Sensitivity (Activity B)
Minimum	Start-to-start 25 days	5	Fast	0.5	0
Maximum				1	1

Il risultato della simulazione in Fig.8 mostra che con la stessa dimensione del buffer, la data di completamento dell'attività del successore, l'Attività B spazia da 80 a 142, a seconda dei valori di affidabilità del lavoro del predecessore e di sensibilità del lavoro del successore. Ciò implica che i buffer di affidabilità con le stesse dimensioni sono vantaggiosi per la programmazione solo con una determinata condizione e per questo motivo, il dimensionamento del buffer dovrebbe variare a seconda delle caratteristiche di un dato sistema costruttivo.



**Fig. 8.** Multivariate sensitivity simulations of successor activity progress

Nella sezione precedente, è stato ipotizzato che un'attività del predecessore più lenta o inaffidabile e un'attività del successore più veloce o sensibile richiede un periodo più lungo di buffer. Per convalidare queste ipotesi, la dimensione del buffer dell'Attività B che riduce al minimo la durata dell'attività è stata esaminata considerando condizioni diverse (i legami di precedenza, i tipi di attività produttiva, l'affidabilità del predecessore e la sensibilità del successore). In seguito, i rapporti tra i valori ottenuti sono stati confrontati. I risultati della simulazione globale sostengono le argomentazioni di Pena-Mora e di Li sulle sovrapposizioni efficaci. Come indicato in Tabella 4, il caso del successore più veloce richiede un più lungo buffer rispetto al caso del successore

più lento (Caso 3). Inoltre, meno sarà affidabile il lavoro del predecessore (caso 4) e più sensibile il lavoro del successore (Caso 5), più lungo sarà il periodo di buffer richiesto.

**Table 4.** Optimal Buffer Sizes in Different Conditions<sup>2</sup>

Description		Base scenario		Alternatives
Case 1	Precedence relationships	SS25	SS30	SS35
	Buffer size	6.3	4.0	3.0
Case 2	Predecessor production	Fast		Slow
	Buffer size	6.3		1.9
Case 3	Successor production	Fast		Slow
	Buffer size	6.3		4.2
Case 4	Predecessor reliability	Unreliable (0.85)	Reliable (1.0)	Highly reliable (1.0)
	Buffer size	6.3	2.0	0.0
Case 5	Successor sensitivity	Sensitive (1.0)	Insensitive (0.75)	Totally insensitive (0)
	Buffer size	6.3	4.9	0.0

<sup>2</sup>unit=days.

Tuttavia, più veloce è il lavoro di produzione del predecessore più si è rivelato necessario un buffer più lungo rispetto ad un più lento lavoro di produzione del predecessore (Caso 2), che è in opposizione con l'ipotesi della ricerca. Ciò è dovuto al The Ripple Effect ("Effetto a Catena") considerato nel modello di progetto dinamico e nel legame di precedenza applicato alle attività. Quando le attività del predecessore una volta completate devono essere corrette a causa di una richiesta dell'attività del successore, avviene un effetto a catena. Questo effetto a catena è in proporzione all'avanzamento dell'attività del predecessore al punto di impatto. Poiché un'attività di produzione più veloce compie più compiti durante la prima metà della durata totale, più compiti sono interessati da un effetto a catena. In questo studio sulla sensibilità, il buffer di affidabilità inizia 25 giorni dopo l'inizio dell'attività del predecessore e, successivamente, l'attività del predecessore è stato influenzato dai cambiamenti scoperti nell'attività del successore. Di conseguenza, è stato richiesto un periodo più lungo di buffer per una attività del predecessore più veloce. Questo risultato implica che il ruolo del tipo di produzione dell'attività del predecessore è strettamente legato ai legami di precedenza coinvolti nelle attività, che non è stato preso in considerazione nel primo lavoro di ricerca di Pena-Mora e Li. Il nostro studio di sensibilità dimostra anche l'effetto dei legami di precedenza sulla dimensione del buffer (Caso 1). Poiché il ritardo del legame di precedenza applicato aumenta (25-35 giorni), la dimensione del buffer necessaria per l'attività del successore diminuisce (6.3-3giorni). Riassumendo questo paragrafo, l'efficacia di buffer di affidabilità



è stata esaminata dalla simulazione del modello dinamico del progetto con vari scenari. I risultati di questa sezione confermano che il buffer di affidabilità può aiutare a migliorare l'esecuzione del progetto, riducendo gli impatti dei cambiamenti. Inoltre, la non linearità dei loro impatti spiega perché deve essere introdotto un approccio di simulazione per determinare efficacemente la dimensione del buffer.

### **Applicazioni**

Il buffer di affidabilità viene applicato alla costruzione di 27 ponti, al fine di esaminare la sua applicabilità in un contesto del mondo reale. La costruzione è una parte di un disegno da 400 milioni dollari tra Disegno/Costruzione / Metter in Opera / Cessione del progetto assegnato alla Modern Continental Companies, Inc. per il miglioramento della carreggiata lungo la State Route 3. Lo sviluppo del progetto è previsto un periodo di tempo di 42 mesi per il completamento del progetto realizzato nel Febbraio 2004. L'ambito del progetto prevede l'ampliamento dei 21 chilometri di carreggiata e l'attuale stato di 15 ponti di sottopassaggio, e ristrutturazione di 12 ponti cavalcavia. In questo lavoro, l'applicazione del buffer di affidabilità è affidata alla costruzione della Treble Cove Road Bridge, che è uno dei cavalcavia.

Il modello di progetto dinamico è stato creato per rappresentare il caso progetto utilizzando i dati di progetto ottenuti da interviste con i pianificatori e gli ingegneri coinvolti nel progetto. Le attuali attività del progetto sono state aggregate a 28 attività di progettazione e costruzione, e le caratteristiche costruttive delle attività riassunte nell'Appendice II sono state utilizzate come input per i parametri del modello. Inoltre, la politica del team di costruzione sul controllo del lavoro e la pratica generale sulla gestione della costruzione sono riflesse anche come ipotesi di pianificazione per la simulazione del modello.

Seguendo l'impostazione del modello, il caso progetto è stato simulato con i vari scenari di buffer; non avendo un buffer unico, con buffer uniforme e con buffer in base alle caratteristiche delle attività. Dopo aver simulato il modello del progetto dinamico con i vari scenari, abbiamo ottenuto i risultati in Fig.9 e Tabella 5. La durata effettiva della simulazione con nessun caso di buffer (Caso 1) è 559 giorni. Questo è di 6 mesi superiore alla durata del CPM-based del caso senza buffer, che è 391 giorni. La differenza nel tempo di completamento implica che vi sono state molte iterazioni non aggiungendo nessun valore. In realtà, il team della

costruzione è al lavoro per occuparsi del problema che lo sviluppo di ideazione del progetto Cove Treble Road Bridge (circa il 16,3% totale) aveva già mostrato un notevole ritardo a partire dal 1° Febbraio 2001 e la costruzione non era ancora stata avviata.

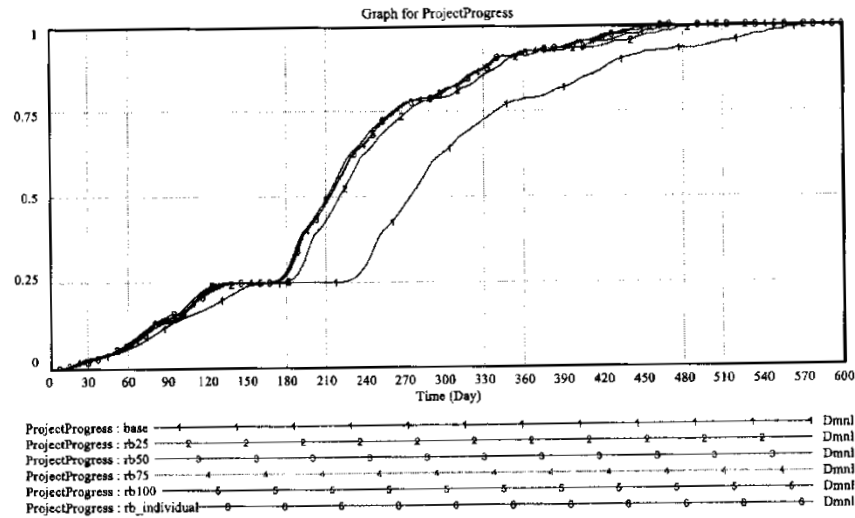


Fig. 9. Case project progress of different buffering cases

Inoltre, come indicato nella Tabella 5, i casi con i buffer hanno durate simulate effettive più brevi (477, 463, 452, 451 e 445 nei casi 2, 3, 4, 5 e 6, rispettivamente). Nei casi di buffer, il buffer di affidabilità applicato ha contribuito a ridurre l'impatto del cambiamento del predecessore e le iterazioni con nessun valore aggiunto. Come risultato, il tempo di inattività delle risorse e sprecato è stato ridotto, il che ha consentito di utilizzare in modo più efficace la forza lavoro data. In particolare, il Caso 6, dove è stato applicato il buffer di affidabilità in base alle caratteristiche delle attività, si è rivelato più efficace per migliorare le prestazioni di pianificazione.

Table 5. Project Completions According to Buffering

Cases	Buffering (buffer size) <sup>a</sup>	Completion time (days)	Deviation from Case 1		
			Days	%	Output
CPM <sup>b</sup>	None	391	—	—	—
1	None	559	—	—	base
2	Uniform (25%)	477	-82	-14.6	rb25
3	Uniform (50%)	463	-96	-17.1	rb50
4	Uniform (75%)	452	-107	-19.1	rb75
5	Uniform (100%)	451	-108	-19.3	rb100
6	Subject to activity characteristics	445	-114	-20.3	rb individual

<sup>a</sup>Buffer size=fraction of takenoff contingency buffer

<sup>b</sup>Critical path method.

Una cosa da notare è che nessuno degli interventi gestionali (per esempio, l'aumento della forza lavoro per recuperare il ritardo) è

stato considerato durante la simulazione del modello per chiarezza nell'analisi. Pertanto, una volta considerati gli interventi manageriali, la durata effettiva dei casi simulati nella Tabella 5 sarebbe ulteriormente ridotta. Sebbene i risultati di simulazione ottenuti possono variare a seconda delle impostazioni del modello, dimostrano come il buffer affidabilità può contribuire a migliorare le prestazioni della programmazione del progetto nel contesto del mondo reale, utilizzandolo come input per il modello dinamico del progetto.

## **Conclusioni**

Il buffer per assorbire gli imprevisti tradizionale spesso non riesce a proteggere la performance di pianificazione del progetto, determinando un tempo minimo di risorse inutile. La mancanza di qualità, le perdite in un punto di fusione e un dimensionamento inefficiente del buffer contribuiscono a rendere il “contingency buffer” tradizionale inefficace. Per risolvere questo problema, questo articolo presentato ha presentato il buffer di affidabilità, una strategia per la simulazione-basato sul buffer, che mira a generare un solido piano di costruzione contro le incertezze. L'efficacia del buffer di affidabilità è stata esaminata dalla simulazione del modello dinamico del progetto di Park e Pena-Mora. Sulla base dei risultati della ricerca, possiamo concludere che un buffer adeguatamente messo in comune, ridimensionato, riposizionato e ricaratterizzato può contribuire a rendere più breve la durata del progetto senza aumento dei costi. Inoltre, un caso di studio di un progetto di costruzione di un ponte ha dimostrato come i progetti di costruzione possono beneficiare del buffer di affidabilità in contesti del mondo reale. Sebbene sia necessario un'ulteriore convalida, il buffer di affidabilità presentato in questo lavoro ha il suo possibile impatto sul mondo accademico e dell'industria, secondo i seguenti aspetti:

1. Introduzione di un nuovo concetto di buffer per la pianificazione dei progetti di costruzione, che aiuta a preparare un piano di costruzione robusto contro le incertezze, riducendo il potenziale impatto dei cambiamenti.

2. Estensione dei concetti di buffer per il controllo dei progetti di costruzione, che aiutano a ridurre al minimo le risorse durante la costruzione. Questo è realizzato attraverso l'introduzione del buffer dinamico, che regola sistematicamente i piani di costruzione durante la costruzione stessa.

3. Esame delle informazioni coinvolte nel processo di costruzione e delle caratteristiche costruttive quali l'affidabilità delle attività, i tipi di produzione e la sensibilità nel determinare la posizione e le dimensioni del buffer, il che rende possibile la realizzazione di un buffer più realistico ed efficace.

4. Utilizzarlo come input per un modello di progetto dinamico che integri l'approccio di simulazione con l'approccio tradizionale di pianificazione di rete.

**Appendix I. Buffer Location and Precedence Relationship Change Patterns**

Descriptions	C-Precedence Relationship	Without Lags/Leads		With Leads		With Lags		Precedence Relationship
		Initial	Updated	Initial	Updated	Initial	Updated	
FS	Initial							FS(L)
	Updated							FS(L)
FF	Initial							FF(L)
	Updated							FF(L)
SS	Initial							SS(L)
	Updated			Not applicable by definition of reliability buffer	Not applicable by definition of reliability buffer			SS(L)
SF	Initial							SF(L)
	Updated	Not applicable by definition of reliability buffer	Not applicable by definition of reliability buffer	Not applicable by definition of reliability buffer	Not applicable by definition of reliability buffer			SF(L)

\* Note: D: Initially Planned Duration; DF: Forecasted Duration; B: Initially Planned Buffer Size; BF: Forecasted Buffer Size; BS: Initially Planned Buffer Start Time; BSF: Forecasted Buffer Start Time; L: Initially Planned Lead or Lag

**Appendix II. Input Data for Treble Cove Project**

Item	Activity code	Activity name	Duration (days)	Driving precedence relation	Production	Reliability	Sensitivity	Effective buffering ratio
1		Sketch plans	33		S	HU	IS	0
2		Final plans	66	1 ss20	S	HU	S	1
3		ROW acquisition	130	2 ss3	S	R	IS	0.25
4		Shop drawing submittals	35	2	F	R	S	1
5		Shop drawing review/BPads	30	4	S	U	IS	0.5
6		Shop drawing review/struct steel	30	4	S	U	IS	0.5
7		Shop drawing review/Rebar	30	4	S	U	IS	1
8		Shop drawing review/SOE plans	30	4	S	U	IS	1
9		Steel fabrication/Rebar	60	7 ss5	S	N	S	0.75
10		Steel fabrication/BPads	120	5 ss5	S	N	S	0.75
11		Steel fabrication/structural steel	120	6 ss5	S	N	S	0.75
12		Steel fabrication/Sheet & brace	45	8 ss5	S	N	S	0.75
13		Prepare site for abutment E-W	33	8	F	R	IS	0.25
14		Prepare site for center pier	13	12	S	R	IS	0
15		Construct abutment E/W	30	13 fs2	S	N	S	0.5
16		Construct center pier	15	15	N	N	IS	0
17		Set BPads and girders	5	10	S	N	IS	0.5
18		Construct superstructure	20	17	S	N	IS	0
19		Bell telephone cable	80	17 ss0	S	U	IS	0.75
20		Relocate gas line	15	18	S	U	S	1
21		Relocate water line	15	20	S	U	S	1
22		Install telephone DB	15	21	S	U	S	1
23		Realign treble cove Rd	10	22	S	R	S	1
24		Realign Rte 3 NB Ramps	20	23	F	R	S	1
25		Realign Rte 3 SB Ramps	20	24	F	R	S	0.75

### **3.LA PROGRAMMAZIONE OPERATIVA**

Effettuata la messa a punto degli strumenti e delle metodologie atti all'analisi delle alternative decisionali, è bene fare alcuni cenni al problema immediatamente conseguente, ovvero al problema del coordinamento delle decisioni.

Tenuto conto del fatto che nella realtà i livelli decisionali sono fondamentalmente due, ovvero:

- 1) livello strategico,
- 2) livello operativo

il management non potrà prescindere da questa duplicità di livelli, con particolare riferimento al loro coordinamento, ossia nel momento in cui incominciano a presentarsi i primi risultati conseguenti alla scelta effettuata.

E' bene ricordare che il "Management Science" (MS) può essere definito come 'applicazione del metodo scientifico al fine di consentire al responsabile delle decisioni di avere basi quantitative su cui impostare il sistema decisionale riferito alle situazioni complesse che sono sotto il suo controllo: si tratta in sostanza di individuare le possibilità di scelta nell'ambito delle alternative che costituiscono appunto il sistema decisionale.

Il "Management Science", per quanto riguarda la sue funzioni nell'ambito di un'organizzazione, si distingue per quattro sue caratteristiche fondamentali:

1. mira a definire le interrelazioni tra i problemi di base nell'ambito di un'organizzazione e a risolvere i problemi stessi in modo da ottenere una soluzione ottimale per l'organizzazione stessa e non per i singoli problemi;
2. sviluppa l'utilizzazione di metodologie specialistiche per la soluzione dei diversi problemi che si presentano;
3. utilizza uno sforzo di gruppo per affrontare e risolvere i diversi problemi;
4. deve fare riferimento ai problemi essenzialmente pratici e alla loro gestione, o management, nell'ambito dell'organizzazione.

In sostanza si tratta di un approccio logico e sistematico indirizzato all'individuazione di una base razionale per le scelte di pace del responsabile delle decisioni: ed è questa la filosofia della Ricerca Operativa.

La stesura di una programmazione implica, in generale, una serie di problemi organizzativi il cui giusto approccio è essenziale ai fini della sua successiva gestione.

Programmare significa compiere due operazioni ben distinte:

1. Pianificazione, quale premessa essenziale alla
2. Redazione della programmazione.

Pianificare significa rendere utilizzabile, in termini operativi, l'oggetto da programmare.

Nel caso delle metodologie reticolari, la pianificazione conduce all'individuazione delle attività elementari, per l'individuazione delle quali si presentano due possibilità di errore:

- a) **eccessivo frazionamento**, con conseguente ottenimento di un elevatissimo numero di attività elementari la cui interconnessione diverrebbe pericolosamente complessa;
- b) **ridotto frazionamento**, avente per conseguenza immediata l'individuazione di attività elementari a loro volta risultanti da più operazioni e, successivamente, il rischio di trascurare importanti interconnessioni a causa dell'impossibilità di evidenziarle falsando la giusta interpretazione del processo da pianificare.

Ne consegue l'esigenza di operare per passi successivi, secondo uno schema assimilabile ad un grafo ad albero nel quale è possibile individuare:

- 1) **blocchi di programma** che possono, al limite, dar luogo a reticoli del tutto indipendenti e che, solitamente, sono fra di loro interconnessi attraverso un limitato numero di vincoli;
- 2) **enti responsabili**, rappresentati da persone fisiche o giuridiche la cui responsabilità nei confronti della programmazione sia diretta. Un caso particolare si ha qualora esista un unico responsabile nei confronti del programma: il "general contractor" o il "capocommessa". Solitamente si avranno diversi enti responsabili fra cui, logicamente, dovrà elencarsi lo stesso ente programmatore;
- 3) **gruppi di attività omogenee**, quali sono individuabili in ogni processo produttivo.  
Se ci si riferisce, ad esempio, ad un'opera edile, potranno individuarsi i gruppi omogenei seguenti: scavi, getti in calcestruzzo armato, murature in calcestruzzo, murature in laterizio, ecc.;
- 4) **attività elementari**, da individuarsi nell'ambito dei gruppi di cui sopra.

L'aver individuato tutte le attività elementari porta, come immediata conseguenza, la possibilità di redigere il reticolo, a base della pianificazione.

La stesura di un reticolo, soprattutto se ci si riferisce a programmi di una certa complessità, risulta un'operazione di una difficoltà non indifferente.

Una volta individuato il reticolo, occorre procedere alla sua ristrutturazione e al suo riordino attraverso l'operazione di ordinamento in livelli che può effettuarsi secondo gli algoritmi già esaminati. Ordinare un reticolo in livelli significa, in sostanza, avere la certezza che le interconnessioni fra le attività elementari siano state individuate correttamente e nella misura strettamente necessaria per la soluzione del problema proposto. Solo a questo punto sarà possibile passare alla programmazione mediante l'inserzione nel reticolo dei dati quantitativi raccolti quali:

- a. durata delle attività elementari;
- b. disponibilità di risorse per ogni attività;
- c. date imposte intermedie e finali;
- d. costi unitari per ogni attività "in allungamento" o "in accorciamento";
- e. unità temporale di base del programma, ecc.

### **Progetto del Cantiere**

Il progetto del cantiere ha come obiettivo l'organizzazione plano-altimetrica delle aree funzionali (*postazioni*), degli impianti e delle attrezzature (*componente statica*) per garantire la sicurezza e il benessere delle maestranze e per ottimizzare il flusso delle risorse che si muovono fra le componenti dell'organizzazione del cantiere (*componente cinematica*). Una buona progettazione consente di individuare, dimensionare e posizionare le postazioni e i mezzi d'opera, macchine, attrezzature e magazzini, e di definire i sistemi di connessione nell'area del cantiere.

Operare secondo un processo di tipo sistematico permette di definire il progetto operativo, composto da:

- a. individuazione delle componenti del cantiere: le postazioni e il sistema delle connessioni;
- b. modello di organizzazione funzionale delle postazioni;
- c. scelta delle macchine e attrezzature;
- d. dimensionamento delle aree per le postazioni;
- e. vincoli dell'ambiente fisico esterno all'area;
- f. vincoli derivati dai caratteri morfologici e dimensionali dell'area di cantiere;
- g. schemi di layout delle postazioni;
- h. scelta dello schema;
- i. progetto del cantiere.

Le postazioni sono le aree funzionalmente omogenee che costituiscono le componenti elementari del cantiere. La loro

tipologia, la loro dotazione e dimensione dipendono dal tipo di cantiere:

- dall'oggetto della produzione e dalle relative lavorazioni;
- dal tipo di intervento.

Le principali postazioni dei cantieri edili si distinguono in:

- **postazioni di produzione:** coincidono con l'organismo edilizio da realizzare e si localizzano nella sua area di sedime. Nelle aree di produzione sono compresi gli stoccaggi a piè d'opera delle materie prime e delle forniture prima di entrare nel ciclo produttivo e le aree necessarie per le opere provvisorie (ponteggi, aree di sicurezza, ecc.);
- **postazioni di produzione dei componenti semilavorati:** sono le aree comunemente riservate alla lavorazione delle carpenterie, al confezionamento del conglomerato e delle malte, alla lavorazione delle armature, degli inerti (frantumazione), alla produzione a piè d'opera di componenti, ai prefabbricati. La loro localizzazione è normalmente baricentrica con le aree di stoccaggio delle materie prime e quelle di consumo delle utilità, in modo da semplificare la forma e ridurre la dimensione dei flussi di trasporto, ma dipende anche dalla frequenza e dalla quantità degli approvvigionamenti, dai modi e tempi di utilizzazione dei materiali e delle forniture per la produzione;
- **postazioni di stoccaggio delle scorte di utilità:** sono le postazioni di raccordo fra le attività di rifornimento e quelle di trasformazione;
- **postazioni di supporto alla produzione:** sono presenti in cantieri ubicati in zone defilate dai centri di fornitura dei servizi e degli approvvigionamenti o in grandi cantieri ove è indispensabile assicurare un controllo costante della produzione;
- **postazioni direzionali:** la loro consistenza è in relazione alla struttura di gestione del cantiere e sono ubicate all'accesso del cantiere per garantire il controllo;
- **postazioni di servizio agli operai:** sono defilati dalla produzione e qualche volta esterni al cantiere. La quantità e qualità ambientale degli spazi sono condizionate dalle norme sulla medicina del lavoro e il benessere dei lavoratori.
- **recinzioni:** garantiscono il cantiere dall'intrusione e dall'effrazione e ne assicurano la sicurezza.



I metodi di dimensionamento delle postazioni sono diversi in relazione al grado di precisione richiesto:

- **metodo dei calcoli:** la superficie si ottiene per aggregazione degli spazi elementari che compongono la postazione di lavoro: ingombri delle macchine, spazi di movimentazione personale, depositi a bordo macchina, movimentazione materiali, sicurezza del personale e manutenzione;
- **metodo degli spazi standard:** si utilizzando per tipo di postazione la media di spazio rilevata in realtà consimili. Si ritrovano su manuali o si derivano dall'esperienza dell'impresa;
- **metodo dell'estrapolazione dei rapporti:** si avvale di coefficienti che esprimono la superficie rapportata a elementi caratteristici della postazione (quantità di personale, unità di produzione, numero di utilità, ecc.)

Per poter definire in maniera dettagliata la superficie delle postazioni e la successiva posizione è necessario determinare le quantità degli elementi e delle lavorazioni del progetto in esame.

## Schemi della produzione

Gli schemi della produzione consentono di calcolare la durata delle attività elementari tramite la quota percentuale di incidenza percentuale della manodopera, i cui dati (%MDO) verranno desunti dal prezziario, e di definire la disponibilità di risorse per ogni attività, attraverso una serie di legami tra diverse grandezze, qui di seguito elencati ed esplicitati.

A	B	C	D		E	F	G	H	I	L	M	N			
N. ord	Cod. Art E.P.	Cod. Lavoraz.WBS	INDICAZIONI delle opere e provviste		U. mis	Q.ta	Prezzo unitario €	IMPORTO €	INCIDENZA % MANODOPE RA	IMPORTO MANODOPE RA	PREZZO GIORNALIER O MANODOPE RA	GIORNATE MANODOPE RA (UG)	SQUADRA	UNITA' MANODOPE RA E PER SQUADRA	DURATA (GIORNI)
							DA CME	DA ASSEGNARE	=ExF	PREDEFINITO	=G/H		DA ASSEGNARE	=I/M	
		<b>A.MU</b>	<b>murature</b>												
1	A65009d	A.MU.001	muratura esterna di tamponamento		mq	14,00	€ 57,30	€ 802,20	59%	€ 473,30	€ 155,52	3,0	MURATORI A	1	3
2	d25021a	A.MU.002	consolidamento di murature lesionate cuci -		mc	1,32	€ 700,97	€ 925,28	78%	€ 721,72	€ 155,52	4,6	MURATORI A	1	5
3	A65009e	A.MU.003	tramezzi interni sp. Cm 8 forati 8x25x25		mq	34,00	€ 23,36	€ 794,24	75%	€ 595,68	€ 155,52	3,8	MURATORI A	1	4
		<b>A.LE</b>	<b>tetto in legno</b>												
4	A75001B	A.LE.001	Grossa orditura del solaio di copertura in legno		mc	4,20	€ 814,63	€ 3.421,45	61%	€ 2.087,08	€ 155,52	13,4	MURATORI A	2	7
5	a75012	A.LE.002	svolato in legno per solaio di copertura in		mq	47,00	€ 33,22	€ 1.561,34	64%	€ 999,26	€ 155,52	6,4	MURATORI A	2	3
6	A85092a	A.LE.003	isolante termico in poliuretano espanso cm 6		mq	47,00	€ 15,08	€ 708,76	51%	€ 361,47	€ 155,52	2,3	MURATORI A	2	1
7	A95009b	A.LE.004	impermeabilizzazione con guaina bituminosa		mq	47,00	€ 15,72	€ 738,84	32%	€ 236,43	€ 155,52	1,5	MURATORI A	2	1
		<b>A.CO</b>	<b>copertura</b>												
8	a75016a	A.CO.001	manto di copertura in coppi di laterizio		mq	47,00	€ 38,69	€ 1.818,43	56%	€ 1.018,32	€ 155,52	6,5	MURATORI A	1	7
9	a75057c	A.CO.002	comignolo in cis cm 25x25		cad	1,00	€ 118,48	€ 118,48	33%	€ 39,10	€ 155,52	0,3	MURATORI A	1	1
10	a75057a	A.CO.007	comignolo per sfitti diam 120 mm		cad	1,00	€ 59,51	€ 59,51	33%	€ 19,64	€ 155,52	0,1	MURATORI A	1	1
11	c15057f	A.CO.003	canale di gronda in rame 6/10 svil. 60		ml	9,40	€ 95,18	€ 894,69	11%	€ 98,42	€ 155,52	0,6	MURATORI A	1	1
12	c15057f	A.CO.004	scossaline in rame 6/10 svil. 60		ml	12,00	€ 95,18	€ 1.142,16	11%	€ 125,64	€ 155,52	0,8	MURATORI A	1	1
13	c15063f	A.CO.005	pluviali in rame sp.6/10 diam. 100		ml	13,00	€ 37,25	€ 484,25	26%	€ 125,91	€ 155,52	0,8	MURATORI A	1	1
14	c15066b	A.CO.006	terminali pluviali in rame sp.6/10 diam. 100		cad	2,00	€ 79,94	€ 159,88	39%	€ 62,35	€ 155,52	0,4	MURATORI A	1	1
		<b>A.MA</b>	<b>Sottofondi - massetti</b>												
15	A85001e	A.MA.001	massetto isolante alleggerito granulato di		mc	6,00	€ 239,07	€ 1.434,42	51%	€ 731,55	€ 155,52	4,7	MURATORI A	2	2
16	A45001a	A.MA.002	massetto per sottofondi per pavimenti		mc	1,20	€ 322,02	€ 386,42	38%	€ 146,84	€ 155,52	0,9	MURATORI A	1	1
		<b>A.IN</b>	<b>intonaci</b>												
17	B15004c	A.IN.001	intonaco per interni con malta bastarda di		mq	206,00	€ 22,33	€ 4.599,98	96%	€ 4.415,98	€ 155,52	28,4	INTONACATOR	2	14
18	B15005c	A.IN.002	intonaco per esterni con malta bastarda di		mq	50,00	€ 22,20	€ 1.110,00	93%	€ 1.032,30	€ 155,52	6,6	INTONACATOR	2	3

**Cod.Art. E.P.:** rimanda al codice dell'elenco prezzi cui l'attività elementare si riferisce. In base ad uno specifico prezziario o a ricerche di mercato si definisce l'elenco prezzi per lo specifico

progetto. L'elenco prezzi unitari per lo specifico progetto è l'insieme dei prezzi riferiti a parti dell'apparecchiatura tecnologica o a procedimenti fabbricativi/voci di lavoro classificate in base a categoria di opera.

L'elenco prezzi contiene la definizione delle voci di lavoro, delle provviste, delle somministrazioni o forniture che il progettista ritiene che saranno necessarie per la realizzazione del progetto. La sua determinazione è strettamente connessa alla scelta progettuale e in particolare alle condizioni tecniche del capitolato alle differenze tecnico-economiche che definiscono una voce di lavoro, un elemento tecnico, ad es. le differenti tipologie di murature.

L'elenco prezzi contiene:

- a. l'articolo della voce di lavoro che la codifica e la individua; può essere rappresentato da un solo numero o da una sigla e da un numero. La prima rappresenta le categorie dei lavori quale appartiene la voce di lavoro e il numero progressivo.
- b. la descrizione sintetica, affinché la voce di lavoro sia specificabile e riconoscibile;
- c. l'unità di misura: - di volume, di superficie, lineare  
- a ore  
- a corpo  
- a peso;
- d. il prezzo unitario.

**Cod. Lavoraz. WBS:** è il codice di riferimento della Work Breakdown Structure (WBS), base per tutte le analisi successive.

Il codice (es. PM.VE.P001.01.01) è suddiviso in 5 livelli:

- 1° liv: nome della commessa (PM: People Mover) ;
- 2° liv: area in esame (VE: Viadotto "E"\_Area Aeroporto);
- 3° liv: macrofase operativa (P001: Pila 001);
- 4° liv: fase di lavoro (01: Fondazioni);
- 5° liv: attività elementare (01: Scavo).

La vera attività della WBS è sempre ed esclusivamente quella dell'ultimo livello (*work package*) del raggruppamento in cui si trova, ed è inoltre l'unica alla quale si andrà ad assegnare delle durate.

La divisione delle attività deve essere effettuata nel modo più preciso e attento possibile per poter pervenire ad uno schema che rifletta in modo adeguato tutti i processi di lavorazione presenti nel cantiere.

La WBS permette di organizzare il progetto, in modo che sia possibile redigere sia in fase preventiva e sia durante i momenti

produttivi documenti omogenei e quindi confrontabili. Senza la WBS sarebbe impensabile mantenere la medesima logica durante la stesura degli elaborati, e quindi risulterebbero vane tutte le analisi effettuate perché costruite in un ambito non comune. La WBS va infatti vista come base per la redazione dei computi metrici e delle analisi delle risorse, del programma lavori particolareggiato, del programma lavori riassuntivo utilizzato nelle fasi di aggiornamento e rilievo dei dati di cantiere, delle fasi contrattuali di ordine o di subappalto e per tutti gli elaborati di confronto preventivo-consuntivo. La WBS risulta essere utile a diversi operatori che coinvolti nella commessa potrebbero a loro volta lavorare su attività appartenenti a livelli diversi: ad esempio il responsabile operativo del cantiere inserirà i costi su attività riassuntive, mentre il responsabile della preventivazione elaborerà i prezzi in funzione di attività più particolareggiate e il responsabile gestionale degli aspetti economici leggerà la commessa a livello di macrofasi in prima battuta, andando poi a livelli più particolareggiati alla ricerca degli scostamenti occorsi.

**Importo (I):** è dato dal prodotto tra la quantità della lavorazione in esame e il prezzo unitario [ $I = Q.tà \cdot \text{Prezzo unitario}$ ].

**Incidenza % Manodopera (%MDO):** desunta dal prezzario di riferimento, da assegnare, quindi, ad ogni attività.

**Importo Manodopera (IM):** risultato del prodotto tra l'importo e l'incidenza percentuale della manodopera [ $I \cdot \%MDO$ ].

**Prezzo Giornaliero Manodopera (PGM):** il prezzo, desunto dalla Tabella dei Prezzi, redatta dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti e dal Provveditorato Interregionale per le Opere Pubbliche Emilia Romagna – Marche, in collaborazione con la Commissione Regionale per il rilevamento del costo della manodopera, dei materiali, dei trasporti e dei noli, è moltiplicato per le ore lavorative (8h).

La tabella distingue la manodopera in:

- Operaio Specializzato
- Operaio Qualificato
- Manovale Specializzato
- Operaio 5° Livello
- Operaio 3° Livello

e assegna il prezzo orario in base anche alla provincia a cui si fa riferimento.

**Giornate Manodopera (UG):** il numero delle giornate che un operaio impiega per completare la relativa attività elementare è dato dal rapporto tra l'importo della manodopera e il prezzo giornaliero della manodopera [ $UG = IM / PGM$ ].

**Squadra:** identifica quale tipo di manodopera andrà a comporre la squadra.

**Unità Manodopera per Squadra (UMS):** rappresenta il numero di unità che si intende assegnare alla squadra per completare l'attività.

**Durata (Giorni) Calcolata (DC):** indica il numero di giorni che la squadra impiega per completare l'attività [ $DGC = UG / UMS$ ], in base ai dati inseriti nello schema di produzione.

**Durata (Giorni) Effettiva (DE):** indica il numero di giorni che effettivamente la squadra impiega per completare l'attività, ottenuti dall'esperienza di chi opera.

**Buffer (B):** è una quantità di tempo, espressa in giorni e data dalla differenza tra la durata effettiva e la durata calcolata [ $B = DE - DC$ ], che i responsabili di progetto o i programmatori di progetto utilizzano come circostanza temporale volta a garantire il completamento di un'attività.

### **Programma dei lavori: Cronoprogramma di GANTT**

A conclusione di un'elaborazione del programma, si renderà utilissima la rappresentazione dei risultati mediante un diagramma di Gantt, la cui semplicità di interpretazione lo rende prezioso a tutti i livelli di un organigramma aziendale. Il diagramma a barre è un sistema di rappresentazione delle attività su scala temporale. Un'attività è definita come un obiettivo, o un gruppo di obiettivi strettamente correlati, da raggiungere tramite una serie di azioni, il cui risultato contribuisce al completamento del progetto. Nel processo costruttivo le attività rappresentate possono essere o cicli fabbricativi o semplici procedimenti in relazione al livello di approssimazione definito per la programmazione. Nel cronoprogramma di Gantt si rappresentano le attività da svolgere con barre orizzontali in un diagramma bidimensionale.

- La lunghezza delle barre è proporzionale alla durata dell'attività. L'ascissa del grafico riporterà i tempi a partire dall'istante "0", di inizio del processo, stabilito convenzionalmente.
- L'ascissa corrispondente all'inizio di ogni barra corrisponde alla data di inizio dell'attività rappresentata.
- L'ascissa corrispondente all'inizio di ogni barra corrisponde alla data di inizio dell'attività rappresentata.
- L'ascissa corrispondente alla fine della barra rappresenta la data di ultimazione dell'attività.

Per facilitare la lettura del diagramma si rappresentano le attività situando le prime da svolgere in alto a sinistra e ordinandone la progressione secondo le date di inizio scendendo nel diagramma verso il basso; inoltre si cerca di mantenere ravvicinate le attività per aree omogenee di lavoro oppure secondo la sequenza dei cicli fabbricativi.

Per questo il diagramma si dice "a cascata" o "a scaletta".

Il principale vantaggio dei sistemi di programmazione grafica a barre consiste nella loro facilità di lettura e nell'immediatezza della comprensione della situazione rappresentata. La semplicità nel rappresentare le attività di processo senza inserire dettagli consente una maggiore capacità di rappresentare situazioni non ancora perfettamente definite. La semplicità di redazione rende i cronogrammi a barre adatti a programmare lavori di tipo ripetitivo, che comportano l'esecuzione di un numero limitato di attività ripetute più volte, come la costruzione di strade o la posa di infrastrutture sotterranee o aeree.

Di questo diagramma non deve essere sottovalutata la "validità istantanea", ovvero la staticità, e starà quindi al responsabile della programmazione di operare in modo tale che i diversi enti responsabili siano sempre in possesso di dati aggiornati.

I cronogrammi a barre contengono informazioni riguardo a inizio, durata e fine dell'attività, stato di avanzamento dei lavori e date di controllo.

D'altro canto la semplicità dei cronogrammi a barre non consente di definire:

- la rappresentazione grafica dei legami di dipendenza logica tra le diverse attività;
- la rappresentazione grafica dei vincoli da rispettare che permettono l'inizio di un'attività;
- l'indicazione di quali siano le attività strategiche del programma, quelle cioè che debbono essere eseguite

prioritariamente per permettere la fine del programma entro una tale data;

- le eventuali dilazioni che possono essere concesse all'inizio e/o alla fine di una determinata attività senza compromettere la data di ultimazione dei lavori.

A questo si sommano i seguenti aspetti critici:

. se il numero di attività da programmare diventa elevato e il diagramma si sviluppa su più pagine diventa difficile la lettura e l'interpretazione dei dati, in particolare è difficile "vedere" le relazioni tra le attività;

- è difficile l'introduzione di metodi matematici per la gestione delle risorse;

- non consente la rappresentazione dinamica dell'andamento del processo in relazione alle mutevoli situazioni che si verificano nell'esecuzione dei lavori, o meglio non consente di individuare i cambiamenti nel programma che possono intervenire a seguito di cambiamenti di durata o di risorse in una attività;

- non consente di prevedere lo svolgimento della singola attività programmata;

- è difficile il suo utilizzo come strumento di controllo dell'avanzamento dei lavori.

Per sopperire a questi difetti sono stati introdotti sistemi di rappresentazione più specializzati che rappresentano con simbologie differenti le attività sul diagramma, come i diagrammi spazio-tempo.

## 4. IL “PEOPLE MOVER

### **Descrizione generale dell’infrastruttura**

Il Sistema di Trasporto denominato People Mover è un sistema di trasporto pubblico innovativo a guida vincolata, con alimentazione elettrica e ad automazione integrale, che utilizza per l’esercizio due rotabili di tipo leggero su gomma che avanzano su una unica “rotaia” metallica, che ha funzione sia di supporto del veicolo sia di guidovia. I due rotabili si muovono appoggiati alla parte superiore della trave monorotaia, e non richiedono altre strutture di guida; il rotabile infatti, avanza sulle ruote principali del carrello ed è guidato lateralmente per mezzo delle ruote di guida laterali.



### *Tecnologia del Sistema*

Il sistema di trasporto denominato “People Mover” rientra tra i sistemi avanzati con motore di trazione a bordo del rotabile, a guida vincolata, denominati Monorail. Nella terminologia trasportistica, la parola Monorail designa il sistema complessivo costituito dal rotabile e dalla sua trave monorotaia, inclusi i sistemi di controllo e guida.

Un sistema Monorail è un innovativo sistema di trasporto a guida vincolata, ad alimentazione elettrica e ad automazione integrale, che utilizza per l’esercizio un rotabile di tipo leggero su gomma che avanza su una unica “rotaia” metallica, che ha funzione sia di

supporto sia di guidovia. I rotabili si muovono appoggiati alla parte superiore della trave monorotaia, e non richiedono altre strutture di guida; il rotabile infatti, avanza sulle ruote principali del carrello ed è guidato lateralmente per mezzo delle ruote di guida laterali. La trasmissione dell'energia avviene attraverso una linea di contatto a 750 V in corrente continua, posta a lato della trave-guida e viene captata dai rotabili tramite una spazzola che striscia sulla linea stessa.

Il Sistema Monorail INTAMIN P30, proposto per la città di Bologna, come tutti i sistemi INTAMIN People Mover, è basato su una piattaforma tecnologica comune, la cui progettazione è stata ulteriormente affinata rispetto a quella dei sistemi già in funzione in altre città (Mosca, Stoccarda, Seul, Taejon, Shenzhen, Rio de Janeiro, Magdeburgo, Tampa, Gelsenkirchen).

Tutti i sistemi INTAMIN People Mover sono stati sviluppati su una base modulare che permette una facile e rapida adattabilità dei sistemi e della capacità di trasporto in relazione alla possibilità di adeguamento alle variazioni quantitative della domanda nonché alla eventuale evoluzione spaziale della stessa in funzione dello sviluppo dell'assetto territoriale della città di Bologna.

Il sistema di trasporto è dotato di caratteristiche proprie e differenziate rispetto ad altri sistemi attualmente in esercizio; in questo senso può definirsi "sistema di trasporto di tipo innovativo" in quanto presenta le seguenti caratteristiche peculiari sia dell'infrastruttura che dei rotabili:

- è guidato lungo una monorotaia, come un sistema ferroviario, ma invece di avere due rotaie parallele, è composto da un'unica trave centrale, più stretta del rotabile;
- i rotabili si muovono avanti e indietro lungo la monorotaia : non esiste una rete o un anello, ma solo tre stazioni (incluse i due Capolinea terminali);
- il sistema è ad automazione integrale ed è progettato per operare senza conducente a bordo;
- la monorotaia è completamente dedicata all'esercizio del rotabile del People Mover; a nessun altro rotabile è consentito l'uso della trave monorotaia e non esistono interferenze con altri sistemi di trasporto; inoltre la trave monorotaia è separata dall'ambiente circostante lungo tutto il tracciato ed è sopraelevata rispetto al livello del suolo, con accessi riservati e limitati ad uso esclusivo per l'evacuazione dei viaggiatori in caso di emergenza;



- la monorotaia è provvista per l'intero suo sviluppo, di una passerella di emergenza, che consente l'evacuazione dei passeggeri.

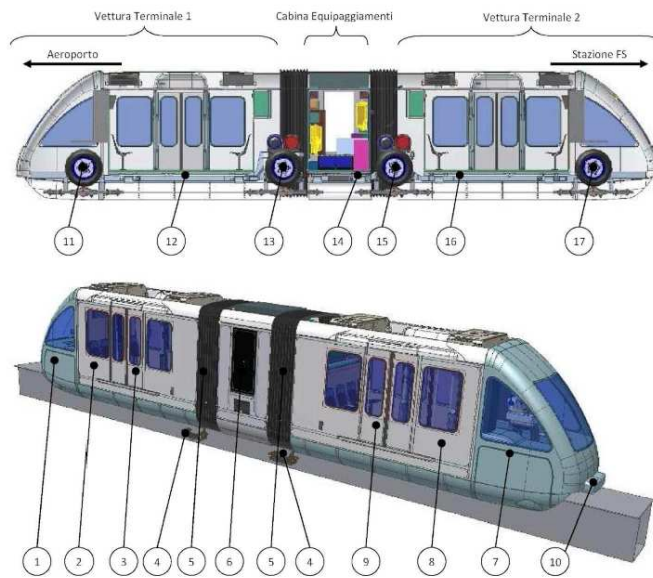
- i rotabili in esercizio si muovono lungo la monorotaia per mezzo di pneumatici in gomma: non esiste un contatto acciaio su acciaio tra il rotabile e la monorotaia, e questo permette di avere un coefficiente di attrito migliore nonché una diminuzione delle vibrazioni trasmesse al rotabile dalla monorotaia, grazie anche all'effetto smorzante delle ruote in gomma.

Il People Mover per la città di Bologna è un sistema di trasporto a trazione elettrica (750 V c.c.) progettato specificamente e particolarmente per il trasporto pubblico cittadino, gli aeroporti e i servizi metropolitani. Caratterizzato da un design moderno, con 2 cabine spaziose e particolarmente confortevoli per i passeggeri che viaggiano sia in piedi che seduti; il sistema prevede porte a grande apertura che permettono un accesso agevole ai passeggeri, anche se muniti di bagagli, e ai passeggeri disabili. Oltre ai sedili e all'area dove i passeggeri stanno in piedi, ogni rotabile presenta una posizione sufficientemente ampia per una sedia a rotelle e uno scomparto bagagli situato dietro i sedili.

Un rotabile "INTAMIN P30" della lunghezza complessiva di 17,66 m e larghezza di 2,33 m, è in grado di trasportare fino a 50 passeggeri (in configurazione  $C2=4$  pass/mq) e viaggiare ad una velocità massima di 70 km/h, con un tempo di percorrenza tra il Capolinea Aeroporto ed il Capolinea Stazione FS pari a 15 minuti (andata e ritorno). Ad entrambe le estremità dei rotabili è presente una cabina di guida con una consolle operativa, per consentire l'azionamento manuale del rotabile da parte di un conducente. Il Sistema di controllo del rotabile si trova all'interno della cabina di guida e comprende tutte le attrezzature necessarie per garantire il funzionamento in sicurezza del Rotabile.

Il sistema di propulsione di ogni rotabile consiste di due assi motore, ciascuno dotato di due motori elettrici asincroni; ogni motore è controllato da un sistema di controllo a frequenza variabile. La cabina equipaggiamenti è collocata fra le due cabine passeggeri e comprende sia le unità per accumulo di energia (supercondensatori) sia le unità di alimentazione a bordo. Il normale funzionamento avviene in modalità completamente automatica, senza conducente, ed è controllato dal Sistema Automatico di Guida del Rotabile (ATGS). Il sistema ATGS, tra le sue funzioni di sicurezza, include anche il controllo della distanza di sicurezza fra i rotabili ed è inoltre responsabile delle

normali sequenze operative. È anche prevista la possibilità di funzionamento con conducente a bordo. Il sistema offre quindi diverse modalità di funzionamento, senza o con conducente, per coprire tutte le situazioni che potrebbero verificarsi (manutenzione, controlli, emergenze, ecc.). Il Centro di Comando Operativo (OCC) è situato nella stazione intermedia di Lazzaretto. Il Centro di Controllo Operativo è il cuore del funzionamento dell'intero sistema di trasporto. Tutte le informazioni relative allo stato di tutti componenti del Sistema, comunicazioni e telecamere a circuito chiuso confluiscono all'OCC.



1	Estremità anteriore 1		Vettura	10	Respingente
2	Cabina passeggeri 1		terminale 1	11	Carrello non motorizzato 1
3	Porte cabina passeggeri 1			12	Telaio 1
4	Dispositivi di presa della corrente (collettori)		13	Carrello motore 1	
5	Soffietti		14	Telaio centrale	
6	Cabina equipaggiamenti		15	Carrello motore 2	
7	Estremità anteriore 2		Vettura	16	Telaio 2
8	Cabina passeggeri 2		terminale 2	17	Carrello non motorizzato 2
9	Porte cabina passeggeri 2				

In condizioni normali il personale OCC dovrà monitorare costantemente il sistema per essere pronto ad eventuali condizioni anomale e reagire rapidamente a situazioni di pericolo. In particolare vengono segnalati all'OCC la posizione e lo stato operativo dei rotabili per consentire al personale addetto di adottare misure tempestive e appropriate. Guasti, disturbi e allarmi di dispositivi automatici che potrebbero compromettere la sicurezza delle operazioni (con rischio di lesioni alle persone o danni materiali) vengono segnalati all'OCC. Sono altresì garantite le comunicazioni tra passeggeri a bordo dei rotabili e quelli in

banchina di stazione nonché con il personale operativo all'OCC. Le immagini video visualizzate nell'OCC sono organizzate in modo da consentire al personale OCC di identificare chiaramente il luogo da cui provengono. Per garantire la sicurezza durante l'accesso dei passeggeri nelle banchine delle stazioni, oltre che sui rotabili, sono installate due porte automatiche. Il sistema informativo passeggeri fornisce tutte le informazioni necessarie ai passeggeri. Il sistema comprende vari altoparlanti e display sia sui rotabili sia nelle stazioni. In situazioni d'emergenza, sono previsti i dispositivi per chiamate d'emergenza che garantiscono le comunicazioni con il personale OCC. Per l'esercizio del People Mover di Bologna, tra i componenti del Sistema è presente anche un rotabile di servizio per la manutenzione e il soccorso in linea (denominato MRV), azionato da un motore diesel, per consentire agli addetti di eseguire le necessarie operazioni di manutenzione ed emergenza lungo il tragitto, così come il controllo della trave Monorotaia, lo scongelamento, la rimozione della neve o il traino di un rotabile in avaria in linea.

#### *Recupero dei viaggiatori dai rotabili immobilizzati in linea*

Nella progettazione del sistema si è tenuto conto dell'eventualità di un arresto accidentale prolungato dei rotabili in linea e della conseguente necessità di evacuazione dalla linea. In fase di esercizio del servizio di trasporto pubblico, si possono presentare due situazioni in cui è necessario l'evacuazione del rotabile intesa come operazione che porta al totale abbandono del rotabile da parte dei viaggiatori:

- La "evacuazione normale" intesa come sgombero di un rotabile del People Mover per il quale è previsto un prolungato arresto in linea senza che sussista una situazione di pericolo per i viaggiatori.
- La "evacuazione di emergenza" intesa come sgombero di un rotabile in linea a seguito di incidente o di un principio di incendio, con possibile pericolo per i viaggiatori.

#### *Parametri del Sistema*

Il sistema People Mover proposto è caratterizzato, in fase di start-up, da una singola "via di corsa" su cui si svolge un servizio navetta tra il Capolinea Aeroporto e il Capolinea Stazione FS con fermata intermedia a Lazzaretto. Tramite un bypass con due deviatori (scambi) alla stazione di Lazzaretto, i due veicoli possono incrociarsi nei pressi di questa fermata.

Nella prima fase di start up il sistema di trasporto prevede l'implementazione di due rotabili della lunghezza di 17,66 metri/cad con una capacità di trasporto pari a 50 persone per rotabile (in configurazione  $C2=4\text{pass/mq}$ ) che effettueranno il servizio con una frequenza di 7,5 minuti generando una capacità di trasporto in questa prima fase di 400- 420 pphpd (passeggeri per ora per direzione).

In una seconda fase, al crescere della domanda nel tempo, sempre sull'infrastruttura composta da una singola via di corsa, ai due rotabili si potranno aggiungere un terzo ed eventualmente anche un quarto rotabile, ottenendo in questo modo una capacità di trasporto doppia rispetto alla capacità totale di trasporto di prima fase.

CARATTERISTICHE GENERALI DEL SISTEMA			
	Elemento.	Sistema Monorail P30	Commento
1	Numero di Rotabili	n. 2 Rotabili	<ul style="list-style-type: none"> <li>In fase iniziale (start – up)</li> <li>Con possibile estensione fino a 4 rotabili in una fase futura</li> </ul>
2	Numero di Monorotaie	1 Monorotaia con bypass di incrocio alla stazione di Lazzaretto	
3	Numero di stazioni	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Capolinea Aeroporto</li> <li>Fermata intermedia Lazzaretto</li> <li>Capolinea Stazione FS</li> </ul>
4	Numero di Deviatori	2	prima e dopo la Fermata Lazzaretto
5	Lunghezza della Monorotaia	ca. 4944 m	
6	Raggio minimo di curvatura orizzontale	55 m	nei due deviatori posti in prossimità della Fermata Lazzaretto
7	Raggio minimo di curvatura verticale	1000 m	
8	Pendenza max.	5,50 %	
9	Velocità max.	70 km/h	
10	Accelerazione longitudinale max.	1 m/s <sup>2</sup>	
11	Accelerazione laterale max.	1 m/s <sup>2</sup>	
12	Decelerazione max. in normale funzionamento	-1 m/s <sup>2</sup>	
13	Decelerazione max. in frenata di emergenza	-3,5 m/s <sup>2</sup>	In base alla norma EN 13452-1
14	Tempo di trasferimento	ca. 7,5 min	da Capolinea Aeroporto a Capolinea Stazione FS
15	Frequenza media dei Rotabili	Da 7,1 a 7,5 min	con 2 rotabili in esercizio
16	Tempo medio di attesa alla Fermata Lazzaretto	25 s	
17	Capacità max. a carico nominale (C2)	ca. da 400 a 420 pphpd (persone/ora per direzione)	con 2 rotabili in esercizio
18	Passerella di emergenza e di manutenzione	Lungo l'intero sviluppo della monorotaia, da un solo lato	<ul style="list-style-type: none"> <li>Il lato in cui si trova la passerella, cambia lungo il percorso.</li> <li>Nelle zone di cambio lato della passerella, c'è una sovrapposizione pari alla lunghezza del rotabile</li> </ul>
19	Tensione di alimentazione alle bus bar	750 V c.c.	+20% / -33%
20	Alimentazione alle bus bar	1200 kW	

### Classificazione del Sistema

Il sistema di trasporto pubblico denominato People Mover per la città di Bologna è un sistema a guida vincolata ed automazione integrale, di tipo “innovativo” in quanto introduce elementi di innovazione sia in campo tecnologico afferenti il rotabile utilizzato, la regolamentazione dell'esercizio, nonché alle caratteristiche dell'infrastruttura atta ad ospitarlo. Una prima classificazione dei sistemi di trasporto porta a suddividere

preliminarmente i sistemi a seconda della tipologia di guida del rotabile utilizzato per l'esercizio.

- \_ Sistemi di trasporto a guida libera;
- \_ Sistemi di trasporto a guida assistita;
- \_ Sistemi di trasporto a guida vincolata.

Sono classificabili tra i sistemi di trasporto a guida libera quelli che utilizzano veicoli in grado di muoversi, in quanto dotati di volante, con due gradi di libertà nel loro piano di rotolamento (piano stradale). Appartengono a questa categoria gli autobus, i mezzi più diffusi di trasporto pubblico collettivo, sia quelli ad alimentazione termica convenzionale che utilizzano come energia di trazione quella fornita da un motore termico alimentato da combustibili tradizionali (gasolio, benzina), sia gli autobus ad alimentazione termica alternativa la cui energia di trazione è fornita da un motore termico alimentato con combustibili alternativi (Biodiesel, Gecam, GPL), nonché infine gli autobus elettrici alimentati da un motore elettrico, la cui energia di trazione è fornita da batterie ricaricabili.

Sono classificabili tra i sistemi di trasporto a guida assistita quelli che utilizzano veicoli in grado di muoversi con un solo grado di libertà (muoversi longitudinalmente) mentre il secondo grado di libertà (muoversi trasversalmente) è solo facoltativo e di tipo assistito. Appartengono a questa categoria tutta una nuova generazione di veicoli stradali di tipo filoviario quali ad esempio il "rotabile CIVIS " prodotto da un consorzio italo-franco-tedesco, IRISBUS, di prossima implementazione in Italia nella città di Bologna, dotato di guida ottica, in grado di mantenere in modo automatico, il rotabile su una traiettoria prefissata costituita da una doppia linea discontinua verniciata sul fondo stradale.

Sono classificabili tra i sistemi di trasporto a guida vincolata quelli che utilizzano veicoli in cui la funzione di guida e mantenimento della traiettoria non viene svolta da conducente ma dalla via di corsa stessa che è fissa, per cui i movimenti trasversali non possono avvenire in maniera autonoma, ma solo in determinati punti della linea (deviatoi). Appartengono a questa categoria il tram ordinario, il tram-bus e il tram-treno, la metropolitana (classica, leggera, a guida completamente automatica) ed infine la ferrovia.

Il sistema di trasporto pubblico denominato People Mover per la città di Bologna è da classificare tra i sistemi di trasporto a guida vincolata in quanto prevede l'utilizzo di rotabili articolati e bidirezionali, provvisti di ruote gommate, con trazione elettrica,

che si muovono su una monorotaia che si sviluppa quasi completamente in viadotto e che costituisce l'infrastruttura stessa e in quanto assolve contemporaneamente i compiti di sostentamento del rotabile nonché di guida direzionale. Il sostentamento del rotabile e la sua trazione, avvengono attraverso due "ruote motrici gommate "ad asse orizzontale" per ogni carrello, mentre la guida vincolata è garantita da una serie "ruote di guida gommate" ad asse verticale che scorrono lateralmente alla monorotaia e che trasferiscono alla trave di via di corsa, le forze centrifughe. Ulteriori due "ruote up-stop" sono presenti per gestire tutte le coppie eccessive risultanti dalla combinazione di condizioni estreme di forza centrifuga e vento laterale e contribuiscono inoltre a stabilizzare il rotabile quando questo viaggia in curva.

Al fine di poter assimilare il sistema di trasporto denominato "People Mover" per la città di Bologna ad uno dei sistemi a guida vincolata previsti dalla normativa vigente, occorre fare riferimento alla norma UNI 8379 "Sistemi di trasporto a guida vincolata (ferrovia, metropolitana, metropolitana leggera, tranvia veloce e tranvia) – Termini e definizioni".(aprile 2000)

In base a tale normativa, la classificazione dei sistemi di trasporto a guida vincolata viene effettuata in base ai seguenti parametri :

1. caratteristiche del servizio offerto (portata oraria, frequenza, capacità del rotabile, distanza media fra le stazioni, velocità commerciale, lunghezza del rotabile);
2. al regime di circolazione (sede promiscua o sede propria);
3. caratteristiche della circolazione (sicurezza e regolarità, operatività di marcia e supervisione della circolazione).

La norma UNI 8379 definisce i seguenti sistemi di trasporto a guida vincolata:

\_ Ferrovia : Sistema di trasporto per persone e/o cose, per lunghe distanze e per elevati livelli di traffico, mediante veicoli automotori, veicoli rimorchiati e motrici, a guida vincolata, in sede propria, con circolazione regolata da segnali.

\_ Metropolitana: Sistema di trasporto rapido di massa, di elevata portata e frequenza nell'ambito delle conurbazioni, costituito da veicoli automotori o rimorchiati dai medesimi, a guida vincolata, con circolazione regolata da segnali e completamente autonoma da qualsiasi altro tipo di traffico.

\_ Metropolitana leggera: Sistema di trasporto rapido di massa che mantiene le caratteristiche della metropolitana di cui al precedente punto ad eccezione della portata oraria, che risulta

ridotta a causa della limitata capacità dei convogli per ridotte dimensioni dei veicoli e/o per ridotta composizione.

\_ Tranvia : Sistema di trasporto per persone negli agglomerati urbani costituito da veicoli automotori o rimorchiati dai medesimi, a guida vincolata, in genere su strade ordinarie e quindi soggetto al Codice della Strada, con circolazione a vista.

\_ Tranvia veloce (metrotranvia) : Sistema di trasporto che mantiene le caratteristiche della tranvia, con possibili realizzazioni anche in tratte suburbane, ma che consente velocità commerciali e portate superiori grazie ad adeguati provvedimenti (per esempio delimitazioni laterali della sede, riduzione del numero di attraversamenti, semaforizzazione degli attraversamenti con priorità per il sistema, ecc.), atti a ridurre le interferenze del sistema con il restante traffico veicolare e pedonale. Essendo questo sistema la soluzione tecnologicamente evoluta del precedente, possono esistere sistemi misti (tranvia-tranvia veloce) composti da tratte di linea funzionalmente concepite con riferimento ai due sistemi. Le tratte di linea afferenti alle diverse tipologie di sistema mantengono le caratteristiche rispettivamente previste e di conseguenza il sistema di trasporto sarà costituito in parte da tranvia ed in parte da tranvia veloce.

Stante i parametri trasportistici e di esercizio del People Mover di Bologna quali: sede propria protetta (via di corsa sopraelevata), portata per ora e per direzione (400-420 p.p.h.p.d.), frequenza del servizio (7,5 minuti), capacità del singolo convoglio (50 posti), distanza media fra le stazioni, lunghezza max del convoglio (17,66 m), ed infine la completa automazione del sistema, si assimila il sistema di trasporto a guida vincolata, a completa automazione denominato "People Mover" ad una metropolitana leggera.

Conseguentemente nella progettazione del Sistema di Trasporto, si è fatto riferimento a quanto previsto dalle "Linee guida per la redazione di progetti di metropolitane, metropolitane leggere anche ad automazione parziale e/o integrale" allegate alla Lettera Circolare n.81 del 31/05/1996 del Ministero dei Trasporti, relativa alla progettazione degli interventi nel settore dei sistemi di trasporto rapido di massa.

#### Potenziamenti sviluppi futuri del Sistema

Il sistema INTAMIN People Mover è progettato e sviluppato su una base modulare che permette una facile e rapida adattabilità dei sistemi e della loro capacità di trasporto, in relazione alla possibilità di adeguamento alle variazioni quantitative della



domanda nonché alla eventuale evoluzione spaziale della stessa in funzione dello sviluppo dell'assetto territoriale della città di Bologna.

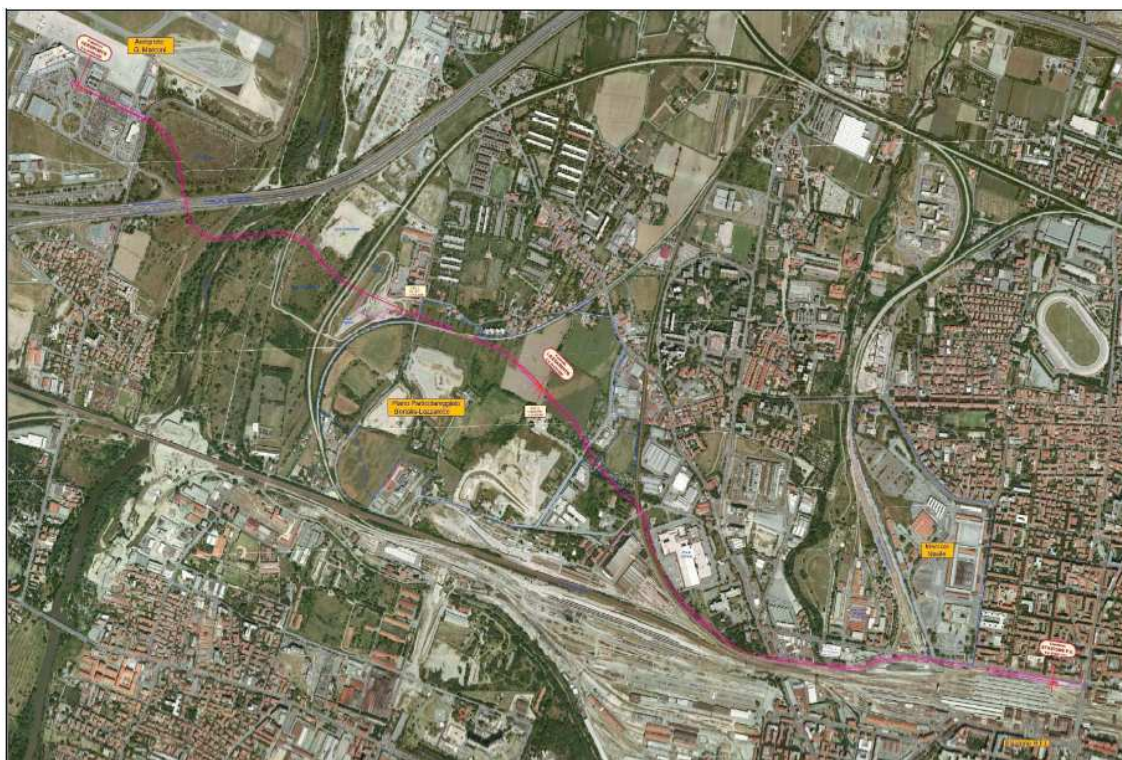
Sull'infrastruttura composta da una singola via di corsa, partendo da una configurazione iniziale a due rotabili è possibile implementare un terzo rotabile ed in seguito, qualora la richiesta di trasporto lo richieda, si potrebbe introdurre un quarto rotabile identico ai precedenti.

Nel caso di tre rotabili, la capacità di trasporto aumenta rispetto alla configurazione iniziale fino a circa 560-570 passeggeri/ora per direzione; il tutto semplicemente con l'aggiunta del terzo rotabile, utilizzando la singola via di corsa e il sistema di segnalamento e di controllo centralizzato già esistente, senza ulteriori modifiche.

Inoltre l'implementazione di un quarto rotabile permetterebbe di aumentare ulteriormente la capacità di trasporto, semplicemente utilizzando le dotazioni in essere (il sistema installato in fase di start up è già predisposto per accogliere in esercizio un quarto rotabile).

#### Tracciato di progetto

Il sistema di trasporto è stato concepito prevedendo una prima fase di realizzazione, con una sola via di corsa e un punto di incrocio in corrispondenza della fermata intermedia "Lazzaretto", con la possibilità di implementazioni successive in funzione di eventuali aumenti della domanda di trasporto. L'infrastruttura è composta, oltre che dalla monorotaia della lunghezza totale di 4944 metri, dai due Capolinea "Aeroporto" e Stazione Fs, dalla fermata intermedia "Lazzaretto" posta a circa metà del percorso (Km 2+3975) dove si incrociano i rotabili e dove è dislocato il Centro di Comando Operativo (OCC9) nonché l'Officina di manutenzione.



E' caratterizzata da un'architettura aerea, leggera e trasparente costituita da una monorotaia metallica, completamente sospesa nell'atmosfera e sorretta ogni circa 35 - 40 metri da eleganti pile in conglomerato cementizio armato.

Il tracciato di progetto del People Mover ha inizio in corrispondenza del Capolinea posto all'interno del sedime dell'aeroporto G. Marconi, in posizione baricentrica rispetto ai terminal A e B (partenze e arrivi) e collegato direttamente al terminal partenze attraverso una passerella coperta, (realizzata a cura e spese della società aeroportuale) e termina al Capolinea Stazione F.S. , dopo un percorso complessivo di circa 4,925 km. Dopo il Capolinea Aeroporto il tracciato imbocca, con una livelletta pressoché orizzontale, il corridoio esistente compreso tra la zona cargo (piazzale carico/scarico merci) e l'antistante struttura metallica del parcheggio multipiano, fino a sovrappassare la Via Triumvirato. Proseguendo verso il Capolinea Stazione FS, la via di corsa si inoltra all'interno della ex cava Berleta dove, salendo una pendenza del 4,72%, scavalca la complanare (tangenziale/autostrada A14) in corrispondenza dello svincolo Aeroporto; attraversata la complanare il tracciato ridiscende con una livelletta della lunghezza di 195 metri e pendenza del 4,72% per attraversare, con campate da 35-40 metri disposte perfettamente in orizzontale, il fiume Reno ad altezza dell'intradosso della monorotaia, non inferiore a quelle del vicino

ponte della tangenziale/autostrada A14. Oltrepassato l'argine destro del Reno il tracciato si riabbassa, con pendenza del 4,53%, mantenendosi ad idonea distanza dai pozzi di emungimento dell'acquedotto (area "ex tiro a segno) per poi sotto-attraversare, all'interno della cava Santa Maria, la bretella dell'Alta Velocità Interconnessione per Venezia il cui piano del ferro, a lavori ultimati, si attesterà circa a quota +42,90 m q.s.l.m. Il manufatto scatolare in c.a. che verrà spinto con dispositivi oleodinamici al si dotto della linea ferroviaria Bologna - Venezia, avrà una larghezza atta ad accogliere successivamente anche una seconda via di corsa, ed altezza pari a 7,05 m. In uscita dal sottoattraversamento della linea ferroviaria la rampa della galleria artificiale permette la costruzione della programmata strada di PRG (con quota del piano stradale + 40,30 q.s.l.m.) contenuta all'interno del Piano Particolareggiato Bertalia - Lazzaretto avente una larghezza prevista di 22,60 m (2 corsie per senso di marcia oltre alle barriere centrali e marciapiedi laterali). Sempre in viadotto il tracciato entra per un breve tratto all'interno della cava Pigna 2 dalla quale risale (con pendenza 5,50%) scavalcando la Via Agucchi con un'altezza minima sottotrave di 5,00 m per poi posizionarsi all'interno del comparto Lazzaretto.

La linea prosegue all'interno del comparto Lazzaretto e, dopo 2397,5 metri dal capolinea

Aeroporto, raggiunge la fermata intermedia "Lazzaretto" collocata in prossimità dei futuri fabbricati della facoltà di ingegneria; nei volumi della fermata sono stati ricavati i locali per l'officina di manutenzione nonché per il Centro di Comando Operativo (OCC). Il tracciato esce poi dal Comparto Lazzaretto e, costeggiando gli edifici già realizzati della Facoltà di Ingegneria, si innalza con una pendenza del 2,81%, per sovrappassare i binari della linea Bologna - Padova in corrispondenza del passaggio a livello ferroviario di Via Lazzaretto; successivamente lambendo l'area ove sorge il fabbricato delle Poste di Via Zanardi, si dispone lungo il corridoio tra il confine ferroviario e l'area delle Poste, per poi incanalarsi nell'area dell'ex-sedime del binario ferroviario dismesso per il raccordo alle Poste. Mantenendosi lungo il binario ferroviario dismesso del raccordo Poste, procede in quota su viadotto in parallelo al fascio binari, oltrepassa via Zanardi e scavalcando il raccordo ferroviario per l'Arcoveggio nonché il futuro asse stradale nord-sud, il tracciato aereo del People Mover discende con pendenza del 3,96%, disponendosi a raso

all'estradosso del solettone di copertura della nuova stazione ferroviaria dedicata all'Alta Velocità, progettata ad una profondità di circa 23 metri sotto l'attuale "piano del ferro" e che occupa un'area di 640 metri di lunghezza per 40 metri di larghezza, in corrispondenza del sedime dell'ex-binario 16, riservato dagli accordi sottoscritti con RFI, al People Mover . In questa ultima parte del percorso, il People Mover avrà come quinta architettonica rivolta verso nord, la nuova Sede Unica degli Uffici Comunali con i suoi alti edifici con grandi pareti vetrate, raccordati da una vela metallica a falde trasparenti, che si affacciano sulla grande piazza accessibile da Via Carracci e posta di fronte all'ingresso della futura Stazione Ferroviaria per l'Alta Velocità.

Il "Capolinea Stazione FS" avrà due accessi ben distinti: il primo dal marciapiedi di Via Carracci attraverso l'atrio di accesso alla Stazione Alta Velocità; Il secondo accesso avverrà dalla banchina ferroviaria del binario 15 con la possibilità di accedere al sistema di sottopassi di stazione. Dopo meno di 7,5 minuti dalla partenza dal "Capolinea Aeroporto", il rotabile del People Mover si appresta all'arrivo al "Capolinea Stazione FS" per concludere il suo percorso e prepararsi per una nuova corsa verso l'Aeroporto.

#### *Circolabilità dei rotabili*

La geometria del tracciato della via di corsa del People Mover è stata individuata avendo come riferimento gli standard previsti dalle Norme UNI per le metropolitane leggere, specificatamente, al fine di garantire la compatibilità fra l'infrastruttura ed i rotabili ammessi a circolare sulla linea, si è proceduto a verificare il rispetto di quanto prescritto dalla UNI 7360-74 (aggiornamento giugno 1997) "Metropolitane. Distanze minime degli ostacoli fissi dal materiale rotabile e interbinario". Gli elementi del tracciato sono influenzati dai dati tecnici e prestazionali del materiale rotabile (accelerazione, potenza, sagome statiche e cinematiche, ecc.); nella redazione del progetto del People Mover, sono considerati i limiti imposti dalla larghezza del rotabile (2330 mm) e dall'altezza del pianale interno del rotabile dal piano del ferro costituito dall'estradosso della monorotaia metallica. Note le caratteristiche geometriche (sagoma statica) dei rotabili INTAMIN P30 che si muoveranno lungo la via di corsa, si sono individuati gli spazi che devono essere lasciati liberi da qualsiasi ostacolo per garantire il transito sicuro dei rotabili in esercizio. Ovvero si è individuato un limite geometrico detto "profilo minimo di installazione degli ostacoli

fissi” all’esterno del quale tutti gli ostacoli fissi che si incontrano lungo l’intero tracciato si devono trovare al fine di permettere la circolabilità dei rotabili in sicurezza. La circolabilità fra l’infrastruttura di linea ed i rotabili ammessi a circolare è stata verificata secondo i criteri stabiliti nella norma UNI 7360 attraverso il rispetto della sagoma cinematica nonché della sagoma limite delle “parti basse del rotabile” e dei limiti di ingombro dovuti all’iscrizione in curva, sia nella configurazione di singola via di corsa (fase di start up) nonché per le due vie di corsa (configurazione prevista per i potenziali sviluppi futuri del sistema), in modo tale che i rotabili durante l’esercizio non possano mai urtare qualsiasi ostacolo fisso, continuo o discontinuo. Gli ostacoli fissi possono essere sia ostacoli esterni al sistema di trasporto, quali ad esempio le strutture di un ponte o di un cavalcavia oppure i sostegni della linea di contatto in area RFI, sia quelli relativi al sistema stesso come ad esempio i marciapiedi delle fermate, le strutture della galleria artificiale che sotto passerà la costruenda bretella ferroviaria Alta Velocità, interconnessione per Venezia. Le distanze minime prescritte dalla UNI 7360, sono state confrontate e assunte come compatibili con gli scostamenti laterali massimi dei rotabili dovuti ai giuochi, ai consumi, alle dissimmetrie di costruzione e di carico, alla deflessione delle sospensioni, nonché all’eventuali di avere un pneumatico a terra.

Tali condizioni degli scostamenti laterali massimi assumibili dai rotabili in esercizio, determinano la cosiddetta “sagoma cinematica” intesa come l’involuppo di tutte le suddette posizioni estreme che il rotabile può assumere nei casi più sfavorevoli.

Nelle figure seguenti vengono riportate le “sagome cinematiche” fornite dal produttore dei rotabili e riscontrabili in esercizio:

1. Sagoma cinematica in rettifilo pari a 3050 mm (vedasi figura 1).
2. Sagoma cinematica in curva pari a 3170 mm (vedasi figura 2).
3. Sagoma cinematica in stazione pari a 2691 mm (vedasi figura 3).

### Sagoma Cinematica: Rotabile in rettilifo

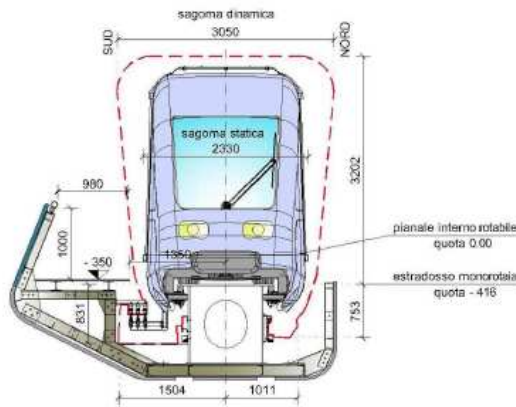


Figura 1

### Sagoma Cinematica: Rotabile in curva

R. min.=55 m (zona scambio)

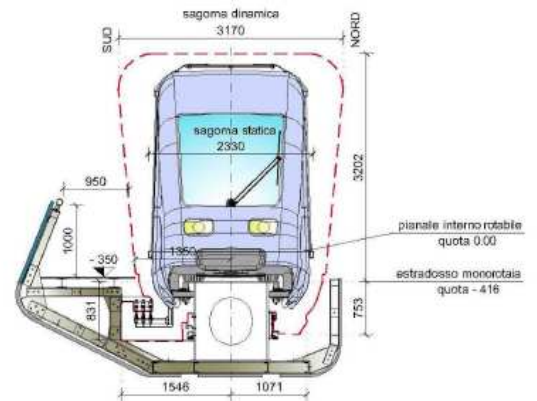


Figura 2

### Sagoma Cinematica: Rotabile in fermata

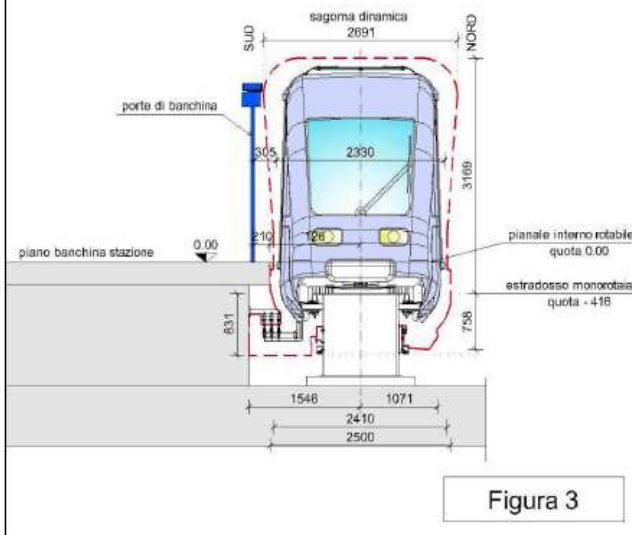


Figura 3

Come si evince dai dati sovraesposti, il comportamento del rotabile in curva porta ad un incremento della distanza dagli ostacoli fissi a causa dell'iscrizione geometrica del rotabile nella curva e del comportamento dinamico dello stesso. Al fine di identificare l'involucro massimo della sagoma cinematica in curva, è stata analizzata quella

che presenta il raggio minimo presente lungo il tracciato (raggio 55 m) in corrispondenza dei deviatori posti in prossimità della fermata Lazzaretto.

La "sagoma cinematica in fermata" si deduce dalla sagoma cinematica in linea, tenendo conto dell'effetto guida in fermata e della bassa velocità del rotabile in arrivo alla stazione. In funzione della posizione assunta da ogni qualsivoglia ostacolo fisso posto in prossimità della via di corsa del People Mover nei confronti del materiale rotabile, la Norma UNI 7360 prescrive differenti distanze minime da rispettare, così riassumibili:

\_ Distanza minima, misurata in orizzontale, da qualunque ostacolo fisso nei tratti scoperti (in viadotto) non minore di 800 mm (vedasi punto 1.3.2 e 1.2.1.2. della UNI 7360); nel caso del People Mover di Bologna tale distanza è pari a 1198 mm (vedasi Figura 4);

\_ Distanza minima, misurata in qualunque direzione; da tutti gli ostacoli fissi di altezza minore delle banchine di stazione, non minore di 100 mm. Tale distanza minima è misurata a partire dalle parti sottostanti della cassa del rotabile rispetto al piano della banchina di emergenza (vedasi punto 1.3.2 e 1.2.4. della UNI 7360); nel caso del People Mover di Bologna tale distanza è pari a 185 mm. (vedasi Figura 5);

\_ Distanza minima, misurata in orizzontale, delle banchine di stazione non minore di 80 mm (vedasi punto 1.3.2 e 1.2.2. della UNI 7360); nel caso del People Mover di Bologna tale distanza è pari a 45 mm. Tale distanza, minore di 80 mm, è ammessa dal punto 1.2 della UNI 7360 nella sua revisione del giugno 1997 in quanto viene assicurato, anche con tale distanza, il transito del rotabile in stazione nonché l'apertura delle porte, anche in condizioni di degrado sia della sede che del rotabile. Tale distanza orizzontale tra le porte del rotabile e il bordo della banchina pari a 45 mm, risulta altresì conforme a quanto prescritto (distanza non maggiore di 100 mm) (dalla UNI 7508 punti 4.1 e 4.2 (Metropolitane – banchine di stazione) (vedasi Fig. 6);

\_ Distanza minima, misurata in qualunque direzione, dal “cielo della galleria) non minore di 150 mm (vedasi punti 1.2.6.della UNI 7360) ; nel caso del People Mover di Bologna tale distanza è pari a 2640 mm.....(vedasi Figura 7).

UNI 7360 punto 1.3.2 e 1.2.1.2  
Distanze minime da ostacoli fissi laterali

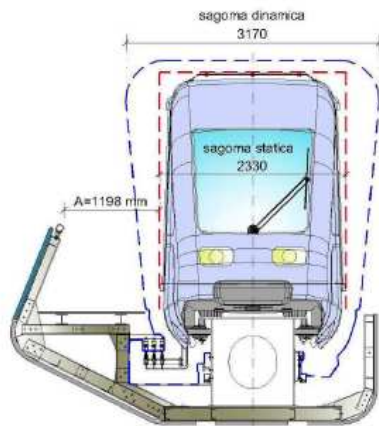


Figura 4

UNI 7360 punto 1.3.2 e 1.2.4  
Distanze minime da ostacoli fissi di altezza minore di quelle delle banchine di stazione

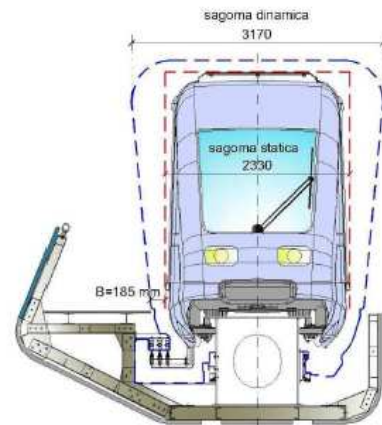


Figura 5

UNI 7360 punto 1.3.2 e 1.2.2  
Distanze minime in banchina di stazione

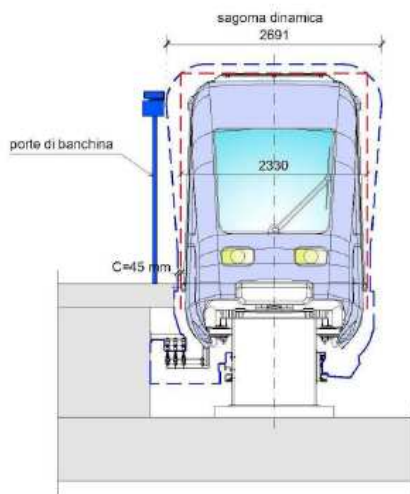


Figura 6

UNI 7360 punto 1.2.6  
Distanze minime dal cielo della galleria

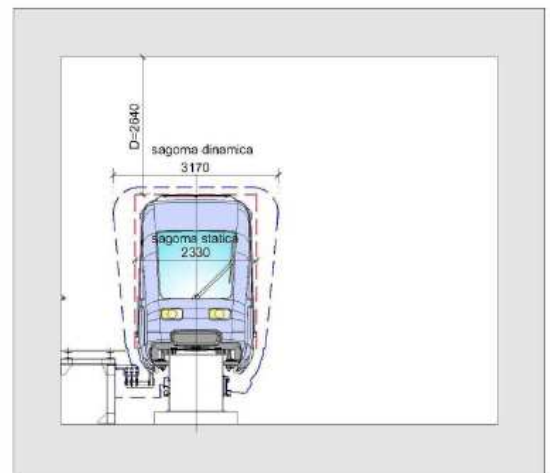


Figura 7

Caratteristiche della trave monorotaia

La trave monorotaia è utilizzata sia come superficie di scorrimento delle ruote portanti sia come guidovia per le ruote laterali e ruote up-stop.

Al fine di consentire il corretto inserimento del rotabile “a cavalcioni” della trave metallica, le dimensioni delle superfici di



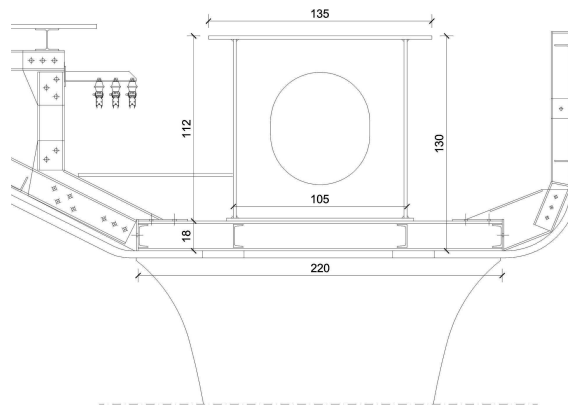
rotolamento delle ruote portanti, delle ruote up-stop e delle ruote laterali saranno:

larghezza della superficie di rotolamento della monorotaia: 1.35 m

Scartamento della trave: 1.05 m

Spessore della piastra superiore della monorotaia: 20 mm

#### SEZIONE MONOROTAIA



Le caratteristiche geometriche della trave monorotaia sono compatibili con i limiti accettabili di esercizio del rotabile :

- Raggio orizzontale minimo: 120 m
- Raggio orizzontale minimo nello cambio: 55 m (a velocità ridotta nel deviatoio)
- Lunghezza della clotoide: vedasi §.5.1.5.6
- Raggio verticale minimo: 1000 m
- Pendenza max.: 5,50 %
- Dilatazione orizzontale del giunto di espansione: la massima fessura su cui le ruote portanti possono avanzare è di 40 mm, nella direzione di marcia.
- Dilatazione verticale del giunto di espansione: il massimo gradino verticale su cui le ruote portanti possono avanzare è di 2 mm.
- Forma del giunto di espansione: a sezioni inclinate, per limitare la fessura e il gradino verticale intercettati dalle ruote portanti o laterali nella direzione di movimento.
- Irregolarità della rotaia: In base a EN 12663 §.4.6.4 tabelle 15 e 16.
- Uniformità di tutte le superfici di scorrimento in direzione longitudinale: 1:1500 (1.33 mm su una lunghezza di 2m)
- Massima flessione laterale della monorotaia:  $\pm 50$  mm rispetto al livello teorico, in qualsiasi punto della Trave monorotaia

- Max. flessione verticale in stazione : +0/-10 mm rispetto alla posizione nominale (Rotabile fermo in corrispondenza delle porte della banchina)
- Max. flessione laterale in stazione:  $\pm 10$  mm rispetto alla posizione nominale (Rotabile fermo in corrispondenza delle porte della banchina)
- Le superfici superiori della trave monorotaia sulle quali scorrono le ruote portanti saranno rivestite con trattamento antiscivolo in specifiche zone critiche, al fine di aumentare il coefficiente di attrito dei pneumatici.

Il valore minimo del coefficiente di attrito tra i pneumatici e la Trave monorotaia dopo il trattamento superficiale deve essere:

- Condizioni degradate di bagnato:  $\mu = 0,2$
- Condizioni ottimali di asciutto:  $\mu = 0,3$

Questo trattamento, che deve garantire una sufficiente aderenza, può essere ottenuto attraverso diverse tecnologie: zigrinatura, sabbiatura, applicazione di vernici speciali o rivestimenti antiscivolo idonei, ecc. Ogni tecnologia ha caratteristiche differenti e prevede requisiti di manutenzione diversi.

Le specifiche aree critiche interessate da questo trattamento sono:

- Sezione di monorotaia prima del Capolinea Aeroporto
- Sezioni di monorotaia attorno ai deviatori, presenti prima e dopo la fermata Lazzaretto
- Sezione di monorotaia prima del Capolinea Stazione FS
- Nei tratti all'interno dei due Capolinea e della fermata Lazzaretto

Lo spessore del rivestimento della monorotaia è coerente con la distanza di frenata, calcolata ad una determinata velocità, nelle condizioni peggiori per lo specifico punto del tracciato e considerando una distanza di sicurezza equivalente ad un tempo di reazione di 5 secondi alla velocità di 20m/s (che significa una distanza di sicurezza pari a 100m).

Il rivestimento è quindi applicato:

- sui 450 m che seguono il Capolinea Aeroporto
- sui 350 m che precedono il deviatore posto prima della fermata Lazzaretto.
- sui 350 m che seguono il deviatore posto dopo la fermata Lazzaretto
- sui 350 m che precedono il Capolinea FS

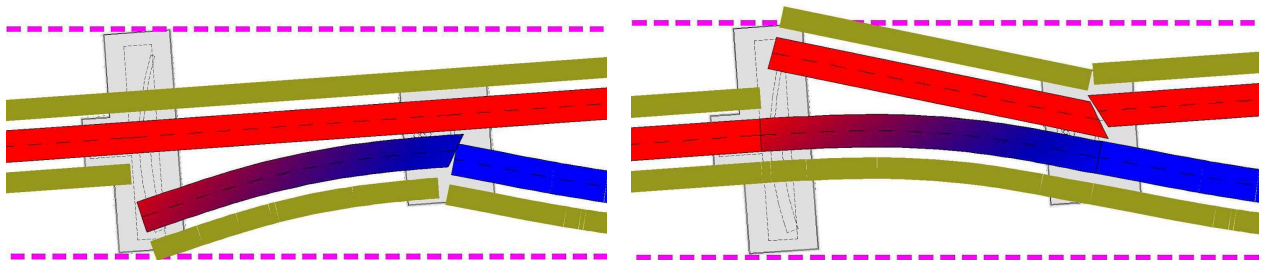
La superficie della trave monorotaia sarà tenuta pulita, libera da ghiaccio o neve, al fine di mantenere il coefficiente di attrito dei

pneumatici al livello dei valori specificati sopra. In condizioni di gelo, lo stato della Trave monorotaia sarà monitorato, mentre la formazione di ghiaccio sarà prevenuta spruzzando appositi prodotti antigelo.

### Deviatoi

Percorrendo il tracciato dal Capolinea Aeroporto al Capolinea Stazione FS. In prossimità della fermata Lazzaretto sono previsti due deviatoi totalmente automatici a piattaforma girevole, uno prima e uno dopo la fermata. Questi due deviatoi, unitamente alla seconda monorotaia presente in banchina della fermata Lazzaretto, permetteranno l'incrociarsi dei rotabili nella fase di "start up". Per ognuno dei deviatoi, la struttura di commutazione mobile che comprende due tratti di monorotaia, effettua un movimento rotatorio attorno ad un asse verticale ed è guidata attraverso robuste ruote di acciaio. Ogni deviatoio è azionato da due motori elettrici indipendenti (ridondanti) per migliorare la disponibilità. L'eventuale guasto di un motore sarà segnalato all'OCC, ma lascia il deviatoio in una situazione di funzionamento automatico (ridotto). Dei convertitori di frequenza sono installati per garantire che i deviatoi siano commutati rapidamente e posizionati con precisione. In ciascuna delle posizioni finali e per ciascuna estremità, un sistema di fissaggio blocca in modo sicuro e nella corretta posizione le diverse sezioni della monorotaia, per permettere il passaggio dei rotabili. La posizione e il blocco del deviatoio sono monitorati dal sistema automatico di guida del Rotabile ATGS.

In caso di malfunzionamento il sistema offre la possibilità di manovrare il deviatoio attraverso un pannello di controllo remoto situato sulla piattaforma sotto la trave monorotaia o manualmente azionando i motori attraverso delle manovelle (una che blocca il meccanismo e l'altra la rotazione).



La **modalità operativa del deviatoio** può essere selezionata sul

pannello di controllo operativo (OCP) dal personale autorizzato (l'accesso avviene attraverso un nome utente e una password).

**Funzionamento automatico del deviatoio:** entrambi i deviatoi sono controllati dall'ATGS (Sistema automatico di guida del Rotabile) secondo il programma selezionato; non occorrono interventi e il sistema di segnalamento è attivo.

**Funzionamento manuale del deviatoio:** il deviatoio può essere azionato manualmente dall'OCC o localmente dal pannello di controllo vicino al deviatoio. Il pannello di controllo locale è provvisto di un interruttore a chiave per disattivarne l'azionamento dall'OCP.

La posizione e lo stato di blocco sono monitorati dall'ATGS, il sistema di segnalamento è attivo. Il conducente deve osservare i segnali per conoscere la posizione corretta del deviatoio e fermarsi al segnale di rosso.

Per evitare l'attivazione accidentale, il pannello operativo locale del deviatoio sarà protetto con un piombino di sigillo. Il pannello operativo locale del deviatoio sarà attivato dall'operatore OCC. Una volta rimosso il piombino di sigillo dal pannello locale, è possibile commutare la procedura di manovra del deviatoio, da remota a locale. In tal modo, è disattivata la modalità automatica e l'operatore autorizzato sarà in grado di manovrare il deviatoio attraverso il pannello operativo locale.

#### Giunti di dilatazione

Tenuto conto delle condizioni climatiche di Bologna, la trave monorotaia include dei giunti di espansione, necessari a compensare le variazioni di lunghezza del materiale per effetto delle più severe variazioni termiche.

#### Respingenti finali

In corrispondenza di tutte le estremità della Trave monorotaia sono installati dei respingenti finali, per arrestare i rotabili in caso di avaria.

Le sezioni di monorotaia interessate sono:

- L'estremità del Capolinea Aeroporto
- L'estremità Capolinea Stazione FS
- L'estremità della monorotaia di manutenzione alla stazione di Lazzaretto
- L'estremità della monorotaia per il rotabile di soccorso (MRV) alla stazione di Lazzaretto

Tutte le strutture di supporto sono state progettate per assorbire una forza d'urto di 200 kN. I respingenti finali in corrispondenza dei Capolinea Aeroporto e FS sono equipaggiati con un ammortizzatore in grado di assorbire l'energia cinetica di un rotabile a bassa velocità.

### Passerella di servizio e di emergenza

Al fine di assicurare un adeguato livello di sicurezza agli utenti del People Mover, al personale di servizio addetto alle operazioni di manutenzione, agli operatori incaricati delle operazioni di evacuazione dai rotabili immobilizzati in linea in caso di avaria nonché ai soccorritori in caso di incidente o di un incendio,



lungo tutto il percorso dell'infrastruttura, così come espressamente richiesto dal progetto di norma E 10.04.902.0 richiamato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (diventata oggi Norma UNI 11289 del febbraio 2009) all'atto del rilascio del parere sul progetto preliminare espresso con nota prot. 67077/12.10.01 del 17/05/2006, verrà realizzata una singola banchina laterale utilizzabile anche come percorso di emergenza per l'evacuazione dei viaggiatori di un rotabile fermo lungo la via di corsa.

L'evacuazione dei passeggeri dal rotabile verso la passerella di emergenza, avverrà solo ed esclusivamente dopo aver tolto la tensione elettrica dalla linea di alimentazione del rotabile, ai fini di evitare il rischio di folgorazione per le persone che percorrono la passerella di emergenza. Analogamente tutte le operazioni di manutenzione che si dovranno svolgere utilizzando la passerella, dovranno obbligatoriamente essere eseguite solo dopo aver tolto tensione alla linea di alimentazione relativa alla tratta interessata dai lavori. La larghezza della passerella laterale di emergenza è di 95 cm misurata alla quota del corrimano, con il piano di camminamento per l'evacuazione dei viaggiatori in caso di emergenza, posto a quota - 35 cm dalla quota del pianale interno del rotabile.

Nei tratti all'aperto, lungo i viadotti, nella prima fase di implementazione del sistema di trasporto, la via di corsa sarà dotata di una singola banchina laterale che sarà posizionata lato

Sud della monorotaia, al fine di utilizzare i pannelli fotovoltaici presenti lungo la fascia perimetrale della passerella, nei sub-tratti ricompresi dal Km 0+000 al Km 0+598, dal Km 0+758 al Km 1+463, dal Km 1+547,6 al Km 2+244,6, dal Km 2+509,7 al Km 3+058, dal Km 4+484 al Km 4+860. Nella sub-tratta posta tra il Km 3+094,7 e il Km 4+447,8 (tratta in affiancamento alla linea ferroviaria Bologna Padova) la singola banchina laterale verrà disposta lato Nord della via di corsa al fine di rispettare sia le distanze di sicurezza dalla linea elettrica di contatto della linea ferroviaria con tensione di 3 Kv in corrente continua, nonché per il rispetto della fascia di inedificabilità dall'asse del binario ferroviario, dalle pile di sostegno della via di corsa del People Mover.

Nel tratto in galleria presente dal Km. 1+463 al Km 1+547 per sottopassare la costruenda bretella ferroviaria dell'Alta Velocità linea Bologna Padova -- Interconnessione per Venezia, in conformità a quanto previsto dalla Norma UNI 11289, si è fatto riferimento a quanto al D.M. 11/01/1988 "Norme di prevenzioni incendi nelle metropolitane" che al punto 5.1 prescrive la realizzazione di una banchina di servizio su ogni lato, utilizzabile anche come percorso di emergenza per l'evacuazione di rotabile fermo in galleria. La banchina avrà larghezza utile 120 cm al netto del corrimano posto a 100 cm dal piano di camminamento.

Il percorso di emergenza è dotata di apposito corrimano nonché di idonea segnaletica di emergenza (cartelli di tipo riflettente) che indichi la distanza e la direzione delle uscite più vicine. La passerella di emergenza ed è altresì provvista un sistema integrato di illuminazione, da utilizzarsi sia come illuminazione permanente che per illuminazione di emergenza, tale da garantire un livello di illuminazione medio di almeno 40 lux ad un metro di altezza in qualsiasi condizione.

#### Uscite di emergenza

Lungo il percorso della passerella di emergenza, sono state inserite apposite uscite di emergenza (scale ) atte a consentire ai viaggiatori di abbandonare la banchina di evacuazione e di raggiungere un luogo sicuro posto a livello del piano di campagna. Queste uscite costituiscono anche la via di accesso alla piattaforma del People Mover per i servizi di pronto intervento. State l'orografia dei luoghi, sono state progettate n. 8 uscite di emergenza poste tra loro ad una interdistanza di circa 500 metri; In corrispondenza del capolinea Aeroporto è previsto un piazzale

di emergenza che costituisce uno spazio adeguato per la sosta degli automezzi di soccorso.

### Capolinea e fermate

L'infrastruttura di trasporto prevede tre stazioni: due Capolinea terminali (Aeroporto e Stazione FS) e una fermata intermedia (Lazzaretto) posta a circa metà percorso. La stazione intermedia di Lazzaretto dispone di due deviatori per l'incrocio dei rotabili.

### Capolinea Aeroporto



Il Capolinea Aeroporto si inserisce all'interno del sito aeroportuale come un elemento organico posto in posizione baricentrica rispetto ai terminal partenze ed arrivi in modo da facilitare, grazie ad un passaggio coperto che sarà realizzato direttamente da SAB, l'interdeviatoio fra i due differenti sistemi di

trasporto.

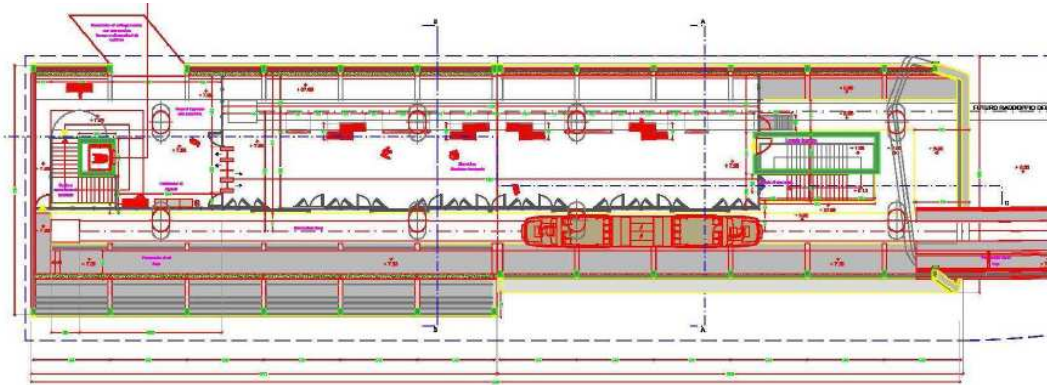
L'architettura del capolinea ripete l'idea delle altre stazioni, elementi progettati che riprendono le forme architettoniche e linee dell'architettura rurale della pianura, dove la rete metallica microforata dello involucro alleggerisce la struttura, dandole trasparenza e integrando la stazione del "People Mover", al paesaggio moderno del flusso aeroportuale. Il Capolinea si distingue rispetto agli edifici dell'aeroporto, diventando per il viaggiatore, l'indicatore segnaletico del diverso sistema di trasporto: il "People Mover".

I passeggeri in arrivo dall'aeroporto tramite la passerella coperta, accedono ad un atrio illuminato di luce naturale da una parete vetrata rivestita con rete metallica microforata.

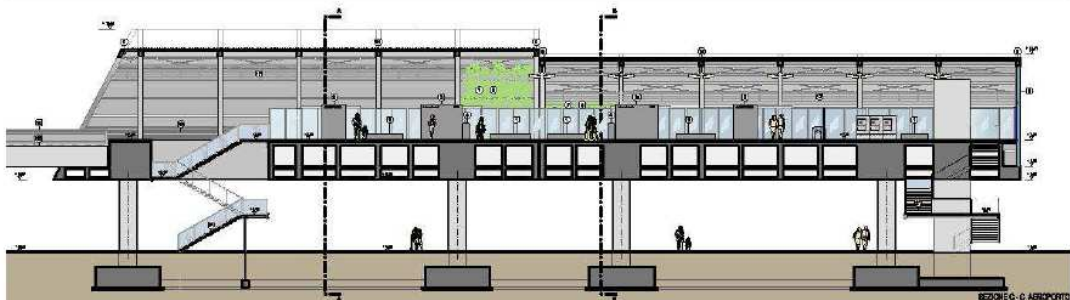
Nella definizione delle scelte architettoniche, rivolte in particolar modo ai materiali, l'idea è quella di realizzare un oggetto architettonico "sospeso" sopra l'area aeroportuale a circa sette metri sopra il piano dei parcheggi a quota stradale.

La lunghezza della struttura è di circa 60 metri, ed una larghezza di circa 17 metri. Sono previste due rampe di scale come vie di fuga, segnalate a terra con linee di orientamento a pavimento per disabili.

Al piano terra sono presenti soltanto le scale che collegano al piano superiore ed i pilastri che reggono il volume della stazione.



*Pianta e sezione longitudinale del Capolinea Aeroporto*



L'impianto funzionale della stazione del People Mover in area Aeroporto è estremamente semplice nella sua impostazione e per gli stessi fruitori.

L'accesso dei passeggeri alla banchina di stazione è gestito da una linea di tornelli dove l'utente dovrà obliterare il biglietto. Nell'ampio spazio banchina, studiato per accogliere il flusso di passeggeri, si trovano delle panchine per l'attesa e appositi "punti informativi" costituiti da "totem tecnologici" che consentano ai passeggeri di orientarsi e di assumere tutte le informazioni utili



inerenti il servizio di trasporto pubblico.

Una caratteristica specifica del "People Mover" è la presenza delle doppie porte: le porte automatiche di banchina, oltre a quelle di cui è dotato lo stesso rotabile. La



stazione è simile nella concezione architettonica a quella del Lazzaretto: due gallerie che si uniscono in un effetto telescopico, una “maggiore” ed una “minore”. L’ossatura delle stesse è costituita da portali metallici, la cui pelle esterna è caratterizzata da lamiera stirata metallica. Mentre alla stazione Lazzaretto sono previsti fin da questa prima fase due binari, qui, in fase di “start up”, viene realizzata una sola via di corsa; tuttavia la struttura della banchina, per dimensioni, geometria e strutture portanti, è progettata e realizzata già per il raddoppio della via di corsa, senza dover realizzare operazioni di demolizioni e/o rifacimenti che stravolgano l’impianto stesso.

Il tema del rispetto dell’ambiente e risparmio energetico è legato alla scelta dei materiali. La rete metallica stirata permette l’aerazione e l’illuminazione naturale delle stazioni, filtrando i raggi diretti nel periodo estivo e lasciando passare la luce nelle stagioni invernali.

Allo stesso tempo, grazie alla possibilità di naturale ancoraggio della vegetazione nelle microforature del rivestimento stesso, permetterà la realizzazione di rivestimento di verde nelle chiusure verticali, al fine di ottenere un isolamento naturale, una protezione dagli agenti ambientali e il filtraggio dalle sostanze inquinanti presenti nell’aria.

Ogni materiale è studiato per alleggerire la struttura: le pile che fino all’altezza di 7 metri hanno una base di dimensioni modeste e si ingrossano al raccordo con il resto della struttura; la rete metallica stirata che per i fori permette di diminuire il peso dell’involucro. La rete metallica stirata crea, sugli elementi strutturali ed all’interno delle stazioni, particolari giochi di luce, disegni creati dall’inclinazione dei raggi solari, integrandosi con l’ambiente urbano e campestre, dialogando per la trasparenza non eccessiva con le architetture preesistenti.

Il linguaggio architettonico rispecchia la volontà di realizzare un progetto che dialoghi con l’aspetto tecnologico delle nuove risorse energetiche con l’attenzione rivolta alle problematiche riguardanti, la qualità dell’ambiente ed il risparmio energetico.

L’uso di pannelli fotovoltaici è attualmente considerato desiderabile per il contributo alla produzione di energia elettrica senza inconvenienti ambientali. Pertanto la presenza di pannelli sulla balaustra della passerella già in area aeroportuale, subito a ridosso la Stazione People Mover, rende innovativa la tipologia dell’infrastruttura.

Elemento fortemente caratterizzante le stazioni è l’involucro, pensato come un elemento in grado di definire una volumetria, ma

al tempo stesso di lasciare massima permeabilità visiva, per costituire una trasparenza nel contesto urbano. Il materiale individuato è la rete metallica stirata, la cui percezione materica permette di soddisfare le esigenze sopracitate. E' infatti possibile percepire ed intravedere la struttura che sorregge la stazione stessa, costituita da grandi "costole" in carpenteria metallica, a disegno semplice e lineare.

Nel pacchetto di copertura, sopra i portali, è prevista una orditura strutturale di appoggio per la posa della lamiera grecata preverniciata (che costituisce la chiusura opaca orizzontale della stazione). Sul lato interno della stazione i pannelli di lamiera grecata sono verniciati di colore chiaro, per dare un senso di luminosità allo spazio percepito dai passeggeri sulla banchina. Nelle testate invece, i portali sono rivestiti in elementi metallici tipo "carter", che costituiscono anche un rivestimento per il solaio strutturale in c.a.

Per dare un effetto di luminosità e per sottolineare gli elementi strutturali all'interno della stazione, sono stati previsti faretti posti al piede di ciascun portale, per ogni lato.

Un altro elemento che è stato studiato pensando all'utenza del People Mover è la pavimentazione della banchina passeggeri. Si è scelto un materiale che unisca prestazioni in termini di durezza e durabilità e di comfort per gli utenti, rispondendo alle più recenti normative in termini di antiscivolosità.

E' stata inoltre data grande attenzione anche all'utenza con disabilità, prevedendo percorsi loges che possano guidare il passeggero non vedente dall'uscita del rotabile fino all'uscita ed ai collegamenti verticali (e viceversa).

### *Fermata Lazzaretto*

La posizione baricentrica della Stazione Lazzaretto risulta ottimale dal punto di vista del funzionamento del sistema. Inserita all'interno della nuova espansione urbanistica del comparto Lazzaretto, costituisce elemento di coesione del tessuto urbanistico, facilitando il collegamento tra questa nuova area urbanizzata ed il centro della città.

La Stazione Lazzaretto si inserisce in un contesto urbano periferico, rispetto al centro di Bologna. Siamo nell'area Lazzaretto, compresa tra la via Zanardi e la linea ferroviaria Bologna - Padova ad Est, la linea ferroviaria Bologna - Milano a Sud, e la via Agucchi e le cave a Ovest.



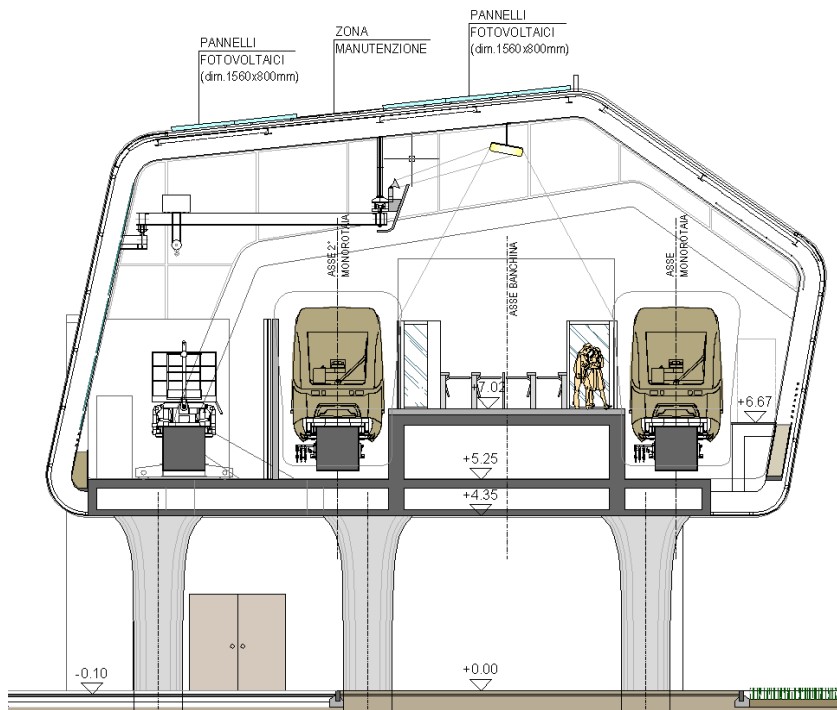
E' un'area attualmente inserita in un contesto poco costruito: campi e coltivazioni. Su questa area è operativo uno sviluppo che prevede la realizzazione del Comparto Lazzaretto: un'area destinata ad un insediamento residenziale ed al nuovo sviluppo del polo universitario, con il completamento di diverse strutture. Nella zona che prevede il nuovo polo universitario di Bologna, la fermata si inserisce come elemento architettonico moderno, dove l'impianto è stato studiato per prevedere tutte le funzioni utili ad accogliere il maggior numero di persone, caratterizzata dal sistema di trasporto ad alta velocità dei veicoli, da tempi di discesa e salita di pochi secondi.

Per agevolare la fruibilità dei passeggeri è stata predisposta una scala mobile, ed un ascensore per i disabili. Una ulteriore scala, completamente libera al piano terreno, costituisce un ulteriore elemento di collegamento al piano banchina per i passeggeri.

Gli spazi di semplice uso diventano luminosi ed aperti grazie alla struttura ricoperta dalla rete metallica stirata. In questo caso le falde orientate a sud-ovest sono coperte dai pannelli fotovoltaici che svolgono

l'importante funzione di immagazzinare l'energia.

L'orientamento delle strutture è una delle linee guida dell'idea progettuale

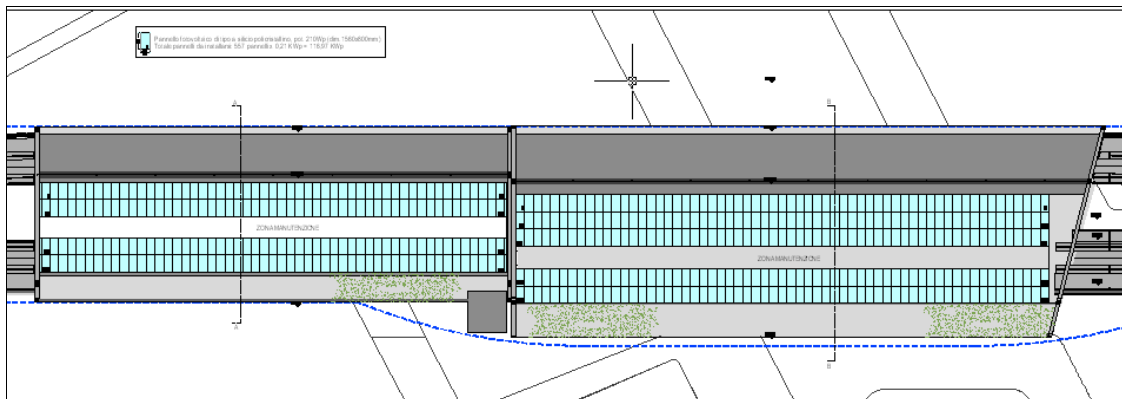


grazie al quale sono posti i pannelli fotovoltaici, sia sulla balaustra della passerella sia sulle falde inclinate della fermata Lazzaretto; nel primo caso il disegno nasce per migliorare la resa dei moduli, nel secondo la copertura della stazione è sfalsata per permettere l'inserimento dei pannelli a sud ovest.

L'attenzione nei confronti dell'ambiente e dell'uso razionale delle risorse energetiche ha portato a progettare elementi architettonici avendo come linee guida l'orientamento e l'inclinazione degli stessi, rendendoli funzionali.

L'uso di pannelli fotovoltaici è attualmente considerato desiderabile per il contributo alla produzione di energia elettrica senza inconvenienti ambientali. Pertanto la presenza di pannelli sia sulla copertura della stazione "Lazzaretto" sia sulla balaustra della passerella rende innovativa la tipologia dell'infrastruttura.

La superficie della rete metallica si collega alla struttura, permettendo l'alloggiamento dei sistemi fotovoltaici non disturbando l'architettura del paesaggio circostante, ma mantenendo la loro funzione di generatori di energia. Dal punto di vista energetico questi pannelli, per il loro posizionamento, garantiscono i requisiti di performance energetica, ma non compromettono il sistema strutturale dell'involucro delle stazioni e del percorso.



*La copertura della Fermata Lazzaretto, con i pannelli fotovoltaici*

Il Centro di Comando Operativo (OCC) è situato nella stazione intermedia di Lazzaretto e costituisce il cuore del funzionamento dell'intero sistema di trasporto. Tutte le informazioni relative allo stato di tutti componenti del Sistema, comunicazioni e telecamere a circuito chiuso confluiscono all'OCC.

La fermata Lazzaretto di impianto lineare, costituito da uno sviluppo in lunghezza di oltre 80 metri è caratterizzata dai grandi portali (le "costole") vera struttura dell'impianto, sono di due dimensioni : un portale grande ed un portale minore.

Nella definizione delle scelte architettoniche, rivolte in particolar modo ai materiali, l'idea è quindi quella di realizzare un oggetto architettonico "sospeso" sopra l'area verde del Lazzaretto. Ricordiamo infatti che siamo all'interno della grande area parco verde al limite dell'area sede dell'università. Al piano terra sono presenti soltanto le scale che collegano al piano superiore e il volume dei locali tecnici (magazzini, spogliatoi e locali trasformazione).

La stazione, sospesa, appoggia sulle grandi pile; mentre il piano inferiore è caratterizzato da grande area porticata, il piano superiore è caratterizzato dal rivestimento in rete stirata.

Nel pacchetto di copertura, sopra i portali è prevista una orditura strutturale in appoggio per la posa della lamiera grecata preverniciata (che costituisce la chiusura opaca orizzontale della stazione).

Sul lato interno della stazione i pannelli di lamiera grecata sono verniciati di colore chiaro, per dare un senso di luminosità allo spazio percepito dai passeggeri sulla banchina. Nelle testate invece i portali sono rivestiti in elementi metallici tipo "carter", che costituiscono anche un rivestimento per il solaio strutturale in c.a.

Per dare un effetto di luminosità e per sottolineare gli elementi strutturali all'interno della stazione, sono stati previsti faretto posti al piede di ciascun portale, per ogni lato.

Elemento che caratterizza fortemente la funzionalità e l'impatto visivo della Fermata Lazzaretto, al suo interno, è certamente il carro ponte, situato nell'area officina manutenzione. Per dare uniformità di coerenza estetica, è stato previsto un elemento di caratterizzazione sul lato della banchina. Tale elemento permette il posizionamento di proiettori che realizzano l'illuminazione indiretta della stazione nell'area banchina.

Un altro elemento che è stato studiato pensando all'utenza del People Mover è la pavimentazione della banchina passeggeri. Si è scelto un materiale che unisca prestazioni in termini di durezza e durabilità (in ottica di diminuire gli interventi manutentivi nel tempo) e di comfort per gli utenti, rispondendo alle più recenti normative in termini di antiscivolosità.

E' stata inoltre data grande attenzione anche all'utenza con disabilità, prevedendo percorsi loges che possano guidare il passeggero non vedenti dall'uscita del rotabile fino all'uscita ed ai collegamenti verticali (e viceversa).

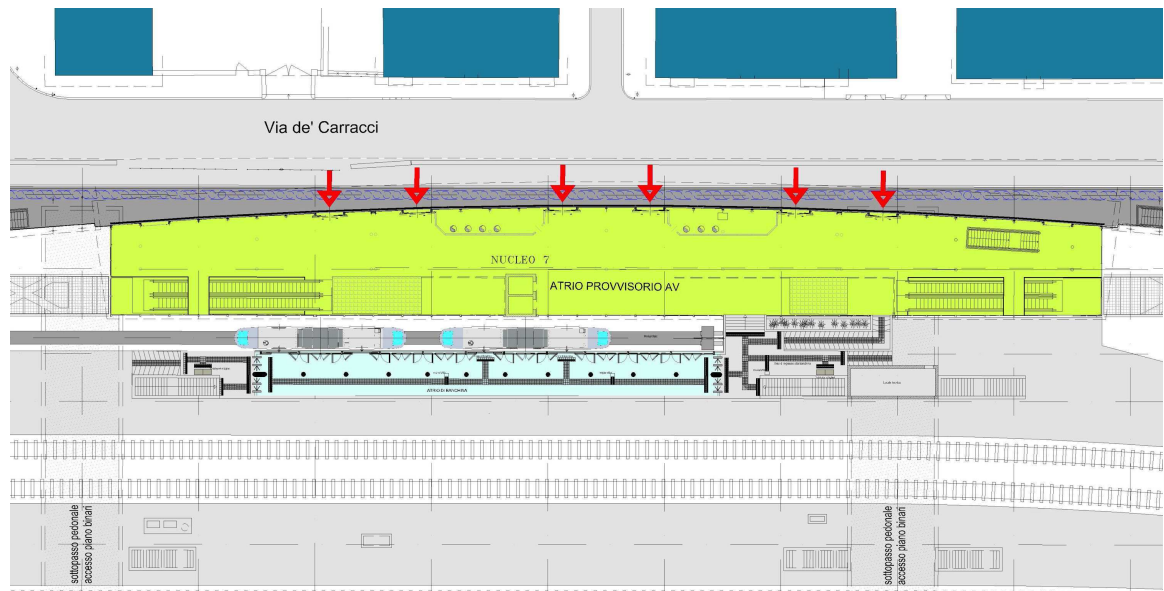
Capolinea Stazione FS

Il Capolinea del People Mover in corrispondenza della Stazione FFS si inserisce all'interno del tessuto urbanistico come un elemento funzionale in posizione strategica rispetto al nodo ferroviario bolognese, in modo da facilitare, grazie ad un collegamento diretto ed immediato, l'interdeviatoio fra i due differenti sistemi di trasporto.

In particolare la posizione della stazione di testa del People Mover consente al passeggero in arrivo dall'Aeroporto differenti possibilità: di uscire direttamente all'esterno, attraversando la Hall provvisoria della stazione A.V. verso il marciapiede di via Carracci, di accedere ai binari della stazione FFS attraverso le scale di collegamento ai sottopassi di stazione, oppure di accedere attraverso il futuro sistema di collegamenti meccanizzati, alla stazione ferroviaria dell'Alta Velocità.

L'architettura del capolinea ripete l'idea delle altre stazioni, elementi progettati che riprendono le forme architettoniche e linee dell'architettura rurale della pianura, dove la rete metallica stirata dell'involucro alleggerisce la struttura, dandole trasparenza e integrando la stazione del "People Mover", al paesaggio moderno del contesto urbano.

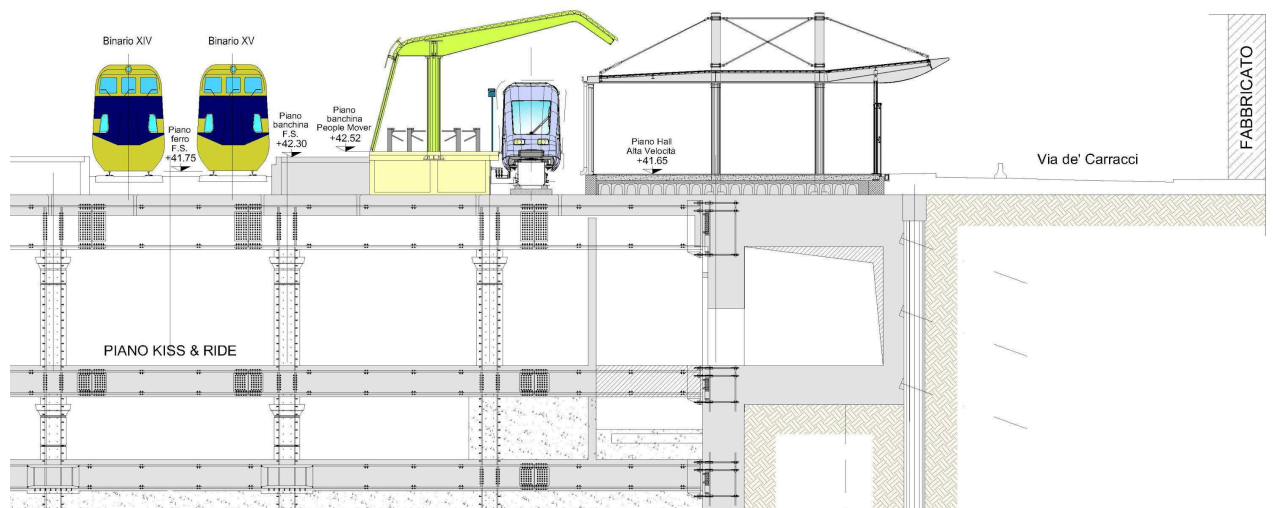
La lunghezza della struttura è di circa 47 metri, ed una larghezza di circa 4,50 metri. Il Capolinea si sviluppa completamente alla quota del piano stradale, appena più alto della quota del piano del marciapiede di via Carracci.



*Pianta della Stazione FFS in corrispondenza della banchina passeggeri*

L'accesso per i passeggeri del "People Mover" è gestito da una linea di tornelli posti sulla banchina compresa tra la Hall della

nuova stazione AV e il binario XV. Nello spazio banchina studiato per accogliere il flusso di passeggeri, trovano posto panchine per l'attesa e delle apposite illuminazioni, utili ad individuare l'ingresso delle porte. Analogamente alle altre stazioni, nella banchina di fermata sono presenti le doppie porte: le porte automatiche di banchina, oltre a quelle dello stesso rotabile. Essendo una stazione di "testa" la monorotaia inizia e termina all'interno dell'elemento architettonico di copertura. Anche al Capolinea Stazione FS come a Capolinea Aeroporto, siamo in presenza, in fase di "start up" di una sola "via di corsa". La stazione qui è differente dalla stazione Aeroporto e Lazzaretto nella concezione architettonica e strutturale: lo sviluppo avviene interamente al livello terreno, semplificando enormemente l'impianto funzionale e strutturale. Tuttavia l'architettura è omogenea alle altre due stazioni: l'ossatura della copertura è costituita da portali metallici, la cui pelle esterna è caratterizzata da lamiera stirata metallica pensata come un elemento in grado di definire una volumetria, ma la tempo stesso di lasciare massima permeabilità visiva, per costituire una trasparenza nel contesto urbano. E' infatti possibile percepire ed intravedere la struttura che sorregge la stazione stessa, costituita da grandi "costole" in carpenteria metallica, a disegno semplice e lineare.



*Sezione trasversale del Capolinea Stazione FS del People Mover*

### **Soluzioni Strutturali**

#### *Via di corsa a cassone*

Il progetto degli impalcati metallici è stato informato sia dalla disposizione planimetrica delle sottostrutture, su tutto lo sviluppo del viadotto sia dai vincoli di deformazione geometrica

conseguenti al sistema di trasporto adottato. Questi, in particolare, hanno imposto una soluzione statica in grado di soddisfare adeguatamente una inflessione massima pari al cinquecentesimo della luce, un ridotto scorrimento (minore di +/- 20 mm) ed una ridotta deformazione angolare dei giunti; valori entrambi necessari per garantire un confortevole transito delle ruote dei mezzi direttamente sulle lamiere del cassone portante.

La ridotta base di appoggio del cassone sulle pile, anch'essa legata alla geometria stessa dei mezzi, genera, inoltre, rilevanti azioni di trazione sugli appoggi (fino a valori di circa 50 KN) per effetto delle torsioni indotte dal carico eccentrico della passerella, dalla spinta del vento o dalle azioni di serpeggiamento.

L'ipotesi progettuale migliore per soddisfare entrambi i requisiti ha indotto ad utilizzare uno schema statico a trave gerber secondo la tipologia del telaio zoppo, con un giunto in ogni campata posto nella sezione di annullamento del momento flettente derivante dalle azioni distribuite ed un collegamento a cerniera bilatera (realizzato con coppie di tirafondi con diametro di 27 mm e l'interposizione di cuscinetto in neoprene) in corrispondenza delle teste delle pile.

Così facendo il sistema mantiene una situazione di isostaticità globale senza induzione di azioni parassite per effetto delle azioni termiche, minimizza le deformazioni angolari nella sede di giunto (rispetto, ad esempio, ad una soluzione di travate appoggiate sulle pile) ed elimina sulle sottostrutture la necessità di posizionare dispositivi di vincolo, che richiedono nel tempo oneri di manutenzione ed ispezione.

La realizzazione di un giunto gerber, inoltre, elimina anche la possibilità di slivellamenti tra le porzioni successive di impalcato come si potrebbe verificare per la mera compressibilità degli appoggi qualora le travate fossero appoggiate sulle pile indipendentemente.

Lo schema statico, grazie alla sua intrinseca possibilità di essere adottato in condizioni geometriche difformi, è stato adottato sull'intero viadotto, con luci variabili tra 24 m e 43 m.

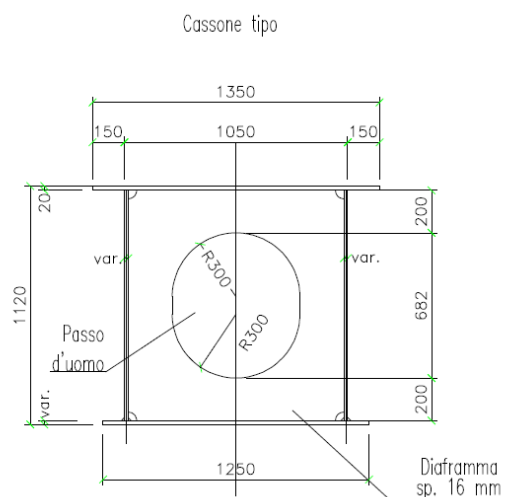
Al fine di garantire la stabilità delle campate di scavalco ed attraversamento di assi interferiti, in corrispondenza cioè di sovrappassi di strade o linee ferroviarie, lo schema è stato modificato inserendo campate in appoggio sulle pile a cavallo della viabilità sottostante con coppie di giunti gerber prima e dopo di esse.



Così facendo si è semplificato anche il montaggio di tali campate che potrà avvenire senza soggezione del traffico sottostante, mediante il semplice sollevamento della singola campata sulle pile.

Costituisce eccezione la campata di superamento del sistema tangenziale, con luce di massima di 95 m, laddove i giunti sono posti all'interno della campata stessa e la parte terminale del viadotto, posto all'interno dell'area della stazione ferroviaria di Bologna laddove, essendo il viadotto posizionato sopra la soletta di copertura della stazione ferroviaria della linea ad Alta velocità Milano-Roma, l'interferenza con detta struttura ha imposto l'adozione di uno schema statico in grado di ripartire le dilatazioni termiche su un numero maggiore di giunti.

L'impalcato metallico è costituito da un cassone unicellulare realizzato in composizione saldata di sezione pressoché quadrata; il mantenimento della forma è garantito da diaframmi interni posti a passo costante di 2.5 m. Pur in presenza di dimensioni ridotte l'intero impalcato è ispezionabile all'interno grazie alla presenza di passi d'uomo.



Lo spessore della briglia superiore è pari a 20 mm così come prescritto dal costruttore dei mezzi, le anime verticali e la briglia inferiore hanno spessore variabile tra 18 mm e 24 mm in funzione dello stato tensionale al fine di garantire la verifica a deformazione nel limite di 1/500 della luce.

Al fine di contribuire a mantenere la deformabilità trasversale, entro i limiti imposti dal produttore del mezzo, si è introdotta una controventatura di piano posta in corrispondenza dei montanti che sorreggono la passerella laterale.

Nella campata sulla tangenziale, con luce di 95 m il cassone mantiene una forma analoga, con un'altezza incrementata fino a

2,5 m e variabile dal valore tipico di 1,12 m a 2,5 m nelle due campate di approccio.

Stante la particolarità dell'attraversamento esso è realizzato, già in questa fase, a due vie di corsa, affiancando due cassoni con interasse trasversale di 3,2 m. i due cassoni collaborano all'assorbimento delle azioni longitudinali grazie all'interposizione di una controventatura e di adeguati diaframmi con passo di 2,5 m.

### *Il sistema dei giunti e degli appoggi*

Il progetto del giunto di dilatazione è stato sviluppato al fine di garantirne la rispondenza ottimale ai principi statici mantenendo una buona economicità, un'elevata durevolezza ed una facile manutenibilità.

Dal punto di vista statico il giunto consente la completa trasmissione delle azioni taglianti e grazie alla disposizione dei tre perni anche delle azioni torcenti.

Lo scorrimento longitudinale è permesso fino a valori di +/- 3 cm e lievemente contrastato dalle molle di ricentraggio che hanno una rigidità di 7,5 KN/cm.

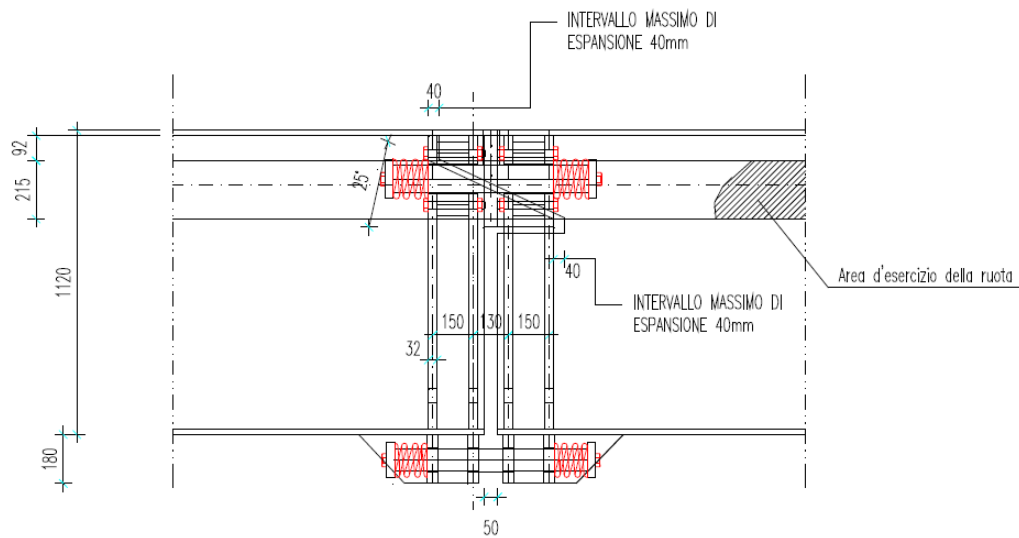
Al fine di garantire il funzionamento a compressione delle molle in tutte le condizioni di funzionamento esse verranno precomprese mediante le piastre di contrasto dei perni. Ciò permette di realizzare anche una sostanziale continuità (sia pure in regime elastico) anche in relazione alla azioni longitudinali di frenatura ed accelerazione.

Dal punto di vista costruttivo il giunto è realizzato con tre perni, uno all'estradosso (con diametro di 100 mm), posto all'interno delle impronte delle ruote portanti e due all'intradosso, posti all'esterno della briglia inferiore del cassone e con diametro di 80 mm.

Il perno superiore è alloggiato in sedi bullonate al cassone così da poter essere estratto facilmente qualora fosse necessario rimuoverlo; i due perni inferiori, invece, possono essere estratti semplicemente svitando le viti che trattengono le piastre di contrasto.

Il giunto è stato dimensionato in modo da poter rimuovere e sostituire un singolo perno senza l'ausilio di sostegni provvisori, naturalmente con il viadotto chiuso al traffico.

Al fine di garantire nel tempo lo scorrimento longitudinale dei perni essi sono previsti in acciaio inox, così come le boccole fisse.



Le porzioni di cassone soggette direttamente al transito delle ruote sono sagomate a dente di sega secondo una geometria approvata dal costruttore dei mezzi.

#### *Sottostrutture – fusti pila*

La grande maggioranza dei fusti pila viene proposta a sezione piena in c.a. con la stessa sagoma già prevista del Progetto Preliminare.

Per soddisfare l'esigenza di contenere la deformazione trasversale totale (via di corsa, fusti, fondazioni) entro il valore massimo di 50 mm., indipendente dall'interasse delle pile, quando i fusti pila superano i 10÷12 metri di altezza è necessario adottare sezioni resistenti gradualmente maggiorate, così da proporzionarne la rigidità in funzione dell'altezza.

Questo anche quando le esigenze statiche non lo richiederebbero. E' stata studiata una sagoma variabile che assicuri un buon livello estetico e nel contempo non penalizzi troppo la costruzione della carpenteria.

In alcuni casi, per contenere la distanza degli appoggi della via di corsa è stato necessario progettare pile a bilanciere, dove la via di corsa è sostenuta a sbalzo da una robusta trave in acciaio doppiamente vincolata. Il vincolo anteriore (compresso) è costituito da una colonna in c.a., mentre quello posteriore (teso) è un tirante formato da più barre di acciaio, protette agli urti da un unico getto in c.a..

Dove il People Mover corre parallelo alla linea Bologna-Padova, ad una distanza a rischio di collisione di treni deragliati, le pile assumono la configurazione di muri in grado di resistere alle azioni longitudinali (più elevate) e trasversali indotte dall'urto.

#### *Sottostrutture – Pile – Spalla*

Nel progetto preliminare la travata (già prevista per le due vie di corsa) che sovrappassa l'Autostrada A14 e Tangenziale, di 95 m. di luce, era stata progettata come elemento unico in semplice appoggio. A causa della distanza eccessiva che ne sarebbe conseguita per i giunti di dilatazione, ed anche alle difficoltà di montaggio, è stato progettato un cavalcavia a tre campate e quattro appoggi del tipo a Gherber (la travata centrale risulta di 60 m.). Con questa soluzione le due sottostrutture di appoggio ai lati dell'autostrada perdono l'originale funzione di "spalla" per la travata di 95 metri, assumendo invece la funzione di pile centrali del cavalcavia a tre campate. Nonostante ciò è stata conservata la sagoma ed il dimensionamento dei manufatti originali, pensati come forte segnale della presenza della nuova infrastruttura sul territorio.

#### *Sottostrutture – fondazioni superficiali e profonde*

Dove è stato possibile, in funzione delle caratteristiche del terreno, cioè nella prima parte a Nord, sono state progettate fondazioni dirette a plinto isolato a pianta quadrata, con lato e altezza proporzionate all'altezza delle pile. La pressione massima di contatto di questi plinti in tutte le combinazioni di carico per verifiche agli stati limite ultimi e di esercizio è sempre molto inferiore alla portata limite critica assunta come portata caratteristica. Questo perché pressioni di contatto più elevate avrebbero causato deformazioni in testa pila, soprattutto per pile alte, inconciliabili con la necessità di mantenere deformazioni totali di valore massimo 50 mm. Per le fondazioni profonde sono stati adottati in prevalenza pali eseguiti ad elica continua nei diametri  $\varnothing 600$  e  $\varnothing 800$ . In corrispondenza delle cave già completamente ritombate, ed in quelle per le quali si presume che il riempimento venga completato prima dei lavori di costruzione del People Mover, sono stati previsti pali trivellati  $\varnothing 1200$  e  $\varnothing 1000$ . Per questi il primo tratto attraversa lo strato di materiale eterogeneo di riempimento e non ha funzione portante, anzi è soggetto al fenomeno dell'attrito negativo. La seconda parte

portante penetra nello strato di ghiaie in matrice sabbiosa per la lunghezza necessaria alla stabilità della pila.

A causa della loro notevole lunghezza (superiore a 30 metri) ben difficilmente questi pali potranno essere eseguiti con elica continua. Se ne prevede quindi l'esecuzione con impiego di fanghi bentonitici o polimeri non inquinanti, rivestiti eventualmente con lamierino per tutta la zona di attraversamento del materiale di ritombamento.

Solamente nei casi in cui, per la assoluta ristrettezza dello spazio a disposizione, l'operatività della macchina di trivellazione dei pali di medio diametro fosse preclusa, sarà necessario prevedere l'utilizzo di micropali, armati con tubi di acciaio di idonei diametro e spessore.

Come già detto, solamente per tutte le pile in alveo attivo del fiume Reno, è previsto un monopalo diametro 2000. Anche per questi si prevede la trivellazione con impiego di polimeri, e, per la prima parte in acqua, di lamierino metallico. Solamente se da ulteriori indagini si dovesse accertare il rischio di inquinamento delle falde profonde, dalle quali attingono acqua i pozzi dell'HERA, si utilizzerà la tecnologia di scavo con impiego di tubo-forma.

#### *Strutture per vie di fuga*

La passerella pedonale adiacente alla trave a cassone, e le scale che realizzano le vie di esodo sono sostenute da strutture in carpenteria metallica a profili aperti. La passerella prevede piccoli telai, collegati a sbalzo con passo 5,00 metri alla reticolare inferiore della via di corsa. Tutti i collegamenti sono bullonati. Le scale invece prevedono una struttura modulare ripetitiva (in totale le scale sono dieci). Ogni modulo (due per ogni scala), è preassemblato in officina con collegamenti saldati, contiene i montanti ed i pianerottoli e viene bullonato ai tirafondi predisposti nella platea di fondazione in c.a. I due moduli "pianerottolo" vengono collegati in opera attraverso le rampe scala, pure loro preassemblate in officina, con collegamenti bullonati. In tal modo si realizza una struttura rigida, in grado di far fronte a tutte le azioni statiche e dinamiche previste dalla normativa.

#### *Strutture su cassone alta velocità*

L'ultimo tratto del percorso fino alla Stazione FFS insiste sulle strutture in acciaio ed in c.a. del camerone sotterraneo a tre livelli della futura Stazione A.V. di Bologna.

Il progetto di queste strutture ha tenuto conto in maniera generica della presenza del People Mover, solamente assegnando ad esso una fascia longitudinale di ingombro.

Il progetto invece non prevede né le posizioni né l'entità dei carichi che gli elementi di collegamento della via di corsa trasmettono al solettone di copertura del camerone. Tantomeno non prevede i dispositivi di collegamento. Nonostante ciò, essendo i carichi del People Mover molto ridotti rispetto al complesso delle azioni, ben più gravose, per le quali è stata dimensionata la struttura del camerone, è stato possibile ottenere un risultato strutturalmente corretto e soddisfacente per la funzionalità di entrambe le infrastrutture. Tenendo conto delle possibilità indicate dai progettisti di Italferr, e nel pieno rispetto dei limiti di carico da questi imposti, sono stati progettati nella parte in cui la travata è ancora in quota opportuni cavalletti metallici che trasmettono sui pilastri del camerone solamente azioni verticali, mentre si fanno assorbire la totalità delle azioni orizzontali alla trave a C perimetrale del camerone, che essendo fondata sul sistema dei diaframmi profondi possiede una capacità elevatissima di assorbire azioni di questo tipo. Nell'ultima parte, quando la travata del People Mover è già alla quota corrispondente al piano del ferro della stazione, è stato necessario prevedere una serie di appoggi ad intervallo di 12 metri. Particolare cura è stata posta nel rendere congruenti le dilatazioni e l'ampiezza dei giunti della travata del People Mover, con quelle molto superiori dei vari conci del solettone di copertura del camerone (ognuno di lunghezza pari a 60 m.). La congruenza è stata ottenuta introducendo, per i conci della trave a cassone, un comportamento a catena cinematica, per mezzo di appoggi scorrevoli e, nei giunti, di molle di ritegno a rigidità prefissata.

#### *Strutture per le stazioni: Stazione Aeroporto*

La stazione è posta alla quota del piazzale partenze dell'Aerostazione e quindi è totalmente sopraelevata.

Dal punto di vista strutturale è costituita da un solettone nervato in cemento armato a pianta rettangolare di lati 65x10,40 m. ed altezza 0,90 m. sostenuto da due travi longitudinali molto alte perché raggiungono il livello di estradosso della banchina, sopraelevata rispetto al solettone di 1,70 m. La banchina a sua volta è sostenuta da queste travi e da un sistema di nervature di controvento ordite trasversalmente.

L'insieme che ne deriva è molto rigido pur rimanendo sufficientemente leggero, e si comporta come un'unica trave continua su quattro appoggi e sbalzi di estremità.

Gli appoggi sono costituiti da cavalletti sempre in c.a. a due colonne e trasverso in spessore del solettone. Le colonne, in analogia con le pile, hanno una sezione rettangolare a spigoli arrotondati che si allarga in alto a forma di calice.

La copertura della stazione è realizzata con pannelli tipo sandwich, in lamiera preverniciata e strato coibente, ed è sostenuta da caratteristici portali metallici posti ad interasse di 5,40 m. sagomati in modo da realizzare una sorta di galleria sopraelevata.

Le fondazioni sono di tipo superficiale, a piccole platee che collegano le coppie di colonne dei cavalletti, e a loro volta sono collegate da travi con funzione di puntone-tirante.

Le vie di corsa delle navette, la prima che si realizza e quella di previsione futura sono previste appoggiate solamente in corrispondenza dei cavaletti, indipendenti e quindi isolate dal solettone che sorregge la banchina. In questo modo non si trasmettono le vibrazioni indotte dalla navetta in movimento al piano di stazione.

#### *Strutture per le stazioni: Stazione Lazzaretto*

L'impianto strutturale di questa stazione presenta molte analogie con quello dell'Aeroporto, nonostante abbia una pianta di maggiori dimensioni (lunghezza circa 97 metri) e più articolata. Inoltre dovendo contenere tutta una serie di funzioni non previste nella prima, contiene elementi strutturali anche a piano terra (prevalentemente muri in c.a.) oltre ai cavalletti su colonne. Nella zona di maggiore larghezza (verso Est) l'ultimo cavalletto è a tre colonne anziché due.

Anche in questo caso la copertura in pannelli metallici leggeri è sostenuta da portali metallici sagomati in modo da formare un tunnel. Una parte di questi portali, nella zona dell'officina di manutenzione, ha la funzione di sostenere anche un carroponete.

I terreni di sedime della stazione del Lazzaretto presentano un primo strato di terreni limosi ed argillosi che non consente la realizzazione di fondazioni dirette.

Sono state quindi progettate fondazioni profonde, con impiego di pali eseguiti con elica continua  $\varnothing 600$ .

Anche in questo caso le vie di corsa a cassone appoggiano in corrispondenza solo delle strutture di sostegno del solettone.

Nell'officina di manutenzione un tratto della via di corsa può essere traslato, attraverso un sistema di binari, così da permettere la manutenzione del materiale rotabile, ed al limite la sua calata in basso per il trasporto all'officina di manutenzione centralizzata. Il progetto di questi dispositivi è ampiamente illustrato negli elaborati specifici prodotti dalla ditta produttrice.

#### *Strutture per le stazioni: Stazione FS*

Le strutture di questa stazione vengono tutte realizzate sul solettone in c.a. di chiusura del camerone della Stazione A.V. di Bologna.

Si distinguono in: strutture in c.a. necessarie a realizzare il piano di banchina, sopraelevato di 1,67 metri rispetto all'estradosso del solettone strutture metalliche a sostegno della copertura.

Le prime sono essenzialmente costituite da muretti perimetrali di contenimento e da solai eseguiti con casseri a perdere così da realizzare una intercapedine di notevole altezza utile per il passaggio degli impianti. I portali metallici destinati a sostenere la copertura ripetono fedelmente le dimensioni e la sagoma a loro assegnata nel progetto architettonico ed hanno sezione tubolare (quadrata o rettangolare) ottenuta con piatti saldati di vario spessore.

#### **Programmazione**

Il cronoprogramma prevederà in sintesi la seguente tempistica fondamentale:

- a) Approvazione Generale: 570 gg
  - Scooping su progetto preliminare;
  - Espressioni del Comune su scooping;
  - Progettazione Definitiva;
  - Verifica del Comune completezza del Progetto Definitivo;
  - Conferenza dei Servizi;
  - Progettazione Esecutiva;
  - Iter approvativo Progetto Esecutivo;
  - Procedura per immissione in possesso.
- b) Tempi di Esecuzione dei lavori e delle forniture: circa 1130 gg
  - Opere Propedeutiche all'inizio dei lavori;
  - Opere Civili;
  - Finiture ed Impianti;
  - Opere Specialistiche Sistema Innovativo;



c) Tempi per Prove Funzionali, Verifiche, Collaudi, Pre-esercizio e ogni altra prestazione necessaria alla piena funzionalità e alla immissione in esercizio: **270 gg.**

Il tempo complessivamente previsto per la realizzazione risulta pari a circa **1970 giorni naturali e consecutivi.**

### **Esecuzione**

Nella fase di cantiere, la componente traffico sarà originata per lo più dall'approvvigionamento dei materiali da costruzione. Per minimizzare i flussi è stato messo a punto un sistema di collegamento interno alle aree di cantiere il più possibile autonomo rispetto alla rete stradale esterna. Per la movimentazione dei mezzi operativi e per i trasporti dei materiali d'opera, è prevista la realizzazione di una pista di cantiere, coincidente con il tracciato del People Mover, e ricompresa all'interno della fascia di esproprio temporaneo. Tale pista si raccorda con la viabilità ordinaria mediante tratti di raccordo, posizionati in modo da servire correttamente ogni punto del tracciato. Le strade di cantiere sono realizzate, previo scotico e livellamento delle aree, mettendo in opera uno strato di 30 cm di terreno opportunamente trattato a calce, ben costipato, coperto da misto stabilizzato.

Per il contenimento delle emissioni di polveri dal passaggio di automezzi sulle piste di cantiere, si prevede di attuare un programma di bagnature delle piste per mezzo di autobotte, con frequenze commisurate alle condizioni meteo-climatiche; la velocità di transito sulle piste sarà limitata ai 30 km/h e i vani di carico degli autocarri con carichi polverulenti saranno opportunamente telonati. Inoltre, in corrispondenza dell'accesso carraio dalle piste alla viabilità ordinaria, la pista di accesso sarà asfaltata per una lunghezza pari a 100 m, al fine di consentire la pulizia delle ruote da detriti e fango raccolti sulle piste di cantiere, evitando così l'imbrattamento della sede stradale.

I tratti asfaltati delle piste di cantiere saranno oggetto di lavaggio programmato mediante autobotte e autospazzatrice, così come i tratti di innesto sulla viabilità urbana. In corrispondenza del sovrappasso del fiume Reno si prevede di realizzare un guado temporaneo proprio per accedere all'area di lavoro direttamente dallo svincolo della tangenziale dell'aeroporto, senza sovraccaricare la viabilità locale già normalmente congestionata. L'accesso alle aree di lavorazione poste sulla bretella ferroviaria BO-PD avverrà mediante utilizzo della pista di cantiere a servizio

del cantiere AV Condotte, che sarà reso disponibile a conclusione delle lavorazioni della galleria Alta Velocità.

Per l'accesso alle aree di lavorazione poste sul sedime ferroviario in adiacenza alla via Carracci saranno utilizzati, quando disponibili, i varchi di accesso attualmente utilizzati da RFI, mentre sarà necessario allestire un percorso di accesso riservato attraverso le aree di pertinenza della concessionaria Emilianauto, per accedere alle aree di assemblaggio e varo dell'impalcato adiacenti al tracciato, in quanto la realizzazione di una pista interna all'area RFI non appare possibile, per la ristrettezza degli spazi disponibili, la presenza di traffico ferroviario e di linee elettriche in tensione in stretta adiacenza al cantiere. La viabilità ordinaria viene usata, ove strettamente necessario, per la movimentazione delle travi d'impalcato, per la fornitura dei materiali da costruzione per la realizzazione delle fondazioni ed il trasporto all'area di cantierizzazione delle terre di scavo.

Per le principali aree di cantierizzazione sono state individuate le seguenti modalità di accesso:

- **ACCESSO 1** (area aeroporto): accesso dalla rotonda di via del Triumvirato, raggiungibile dalla tangenziale. In dettaglio, nell'ambito aeroportuale è stato predisposto un piano di cantierizzazione specifico, concordato con i referenti tecnici SAB, curando attentamente la fasizzazione della viabilità, per garantire la continuità dell'accesso ai taxi, ai pullman, all'area doganale al fine di scongiurare episodi di congestione del traffico e di disagio per l'utenza nei periodi di massimo afflusso stagionale.

- **ACCESSO 2** (pila Triumvirato, cava Berleta, spalla Nord scavalco A14): da via del Triumvirato si dà accesso a più piste, di cui una affianca la stessa via del Triumvirato e che si ricongiunge, in corrispondenza della pila 9 con un'altra che ripercorre il tracciato del People Mover, e che giunge fino alla pila 16. La terza pista, conduce direttamente all'area di cantiere che ospita la realizzazione della pila 17, della spalla A dello scavalco dell'A14 e necessaria alle operazioni di varo dell'impalcato in questione.

- **ACCESSO 3**: dalla rotonda Faccioli di via del Triumvirato si accede alla pista che conduce al cantiere necessario alla realizzazione della Spalla B dello scavalco dell'autostrada A14. Inoltre si ha accesso anche alle pile che vanno dalla n.18 alla n.23, in pratica si arriva al fiume Reno. Al fine di porre in opera la porzione di viadotto interferente con l'alveo, si realizza un

guado, che darà continuità anche alla pista di cantiere che poi riprende sull'altra sponda e serve le opere a sud del corso d'acqua.

- ACCESSO 4 (campo base e area sottopasso linea Alta Velocità): posizionato su via Agucchi, costituisce l'ingresso al cantiere base e a quello operativo. Inoltre dà la possibilità di proseguire a ritroso rispetto al tracciato del People Mover, costeggiando Cava Pigna 2, sito di deposito delle terre di scavo, e, dopo aver attraversato la bretella della linea ferroviaria dell'Alta Velocità Bologna-Padova, utilizzando un'opera esistente, conduce al cantiere relativo proprio al sottopasso dell'Alta Velocità previsto in progetto. Il sistema di piste prosegue utilizzando dei percorsi esistenti nella zona di cava Santa Maria fino ad arrivare al fiume Reno, e permettendo quindi, la realizzazione delle pile che vanno dalla 25 alla 37.

- ACCESSO 5: posizionato sempre su via Agucchi, di fronte l'accesso 4, consente di fruire della pista che si sviluppa proprio a ridosso delle pile che vanno dalla n.45 alla n.57, fino a giungere, quindi, alla stazione del Lazzaretto, al cui cantiere si accede tramite l'ACCESSO 6. Tale continuità è stata resa possibile mediante l'utilizzo di un'opera di scavalco esistente del canale della Ghisiliera.

- ACCESSO 7: posizionato in corrispondenza di Via Terracini, nei pressi della rotatoria creata dall'interferenza con via del Lazzaretto, dà accesso all'area di assemblaggio travi in corrispondenza delle pile 63 e 64, e poi tramite una pista consente di arrivare al cantiere della stazione del Lazzaretto, costituendone l'accesso sud.

- ACCESSO 8: direttamente posizionato sulla rotatoria di via Terracini citata al punto precedente, consente di lavorare alle pile che vanno dalla 66 alla 73, in corrispondenza della quale c'è l'accesso 9.

- ACCESSO 9: da via del Lazzaretto, in corrispondenza dell'attraversamento ferroviario si accede all'area di cantiere che inizia dalla pila 73 e si ricongiunge all'accesso 8.

- ACCESSO 10: posizionato di fronte l'accesso 9, dà la possibilità di effettuare le lavorazioni relative le pile che vanno dalla 74 alla 98. Inoltre permette l'accesso all'area necessaria all'assemblaggio delle travi posizionata in corrispondenza

dell'area delle Poste. Qui vengono assemblate le travi dell'impalcato che si sviluppa tra le pile 66 e 73, il cui trasporto in sito e successivamente posizionamento prevede di effettuare un tragitto più lungo, percorrendo via del Lazzaretto per poi, superata la rotatoria "35° reggimento fanteria Pistoia", immettersi in via Terracini, accedendo ai siti di destinazione dal varco 9. La pista che in questo tratto segue la linea di sviluppo dell'infrastruttura in oggetto, si sviluppa interamente su di un sedime privato delle Poste Italiane. Infatti, è presente lungo il confine del piazzale privato una strada di servizio privata, di cui una corsia viene dedicata esclusivamente ai mezzi di cantiere, in modo tale da non creare promiscuità che potrebbero dar luogo ad indesiderati conflitti. In corrispondenza delle pile 95-96-97 è presente un'altra area operativa, sempre dedicata all'assemblaggio delle travi. Per il montaggio e il varo dell'impalcato tra le pile 97 e 98 è prevista la chiusura nelle ore notturne del tratto di via Zanardi che si diparte dalla rotatoria che la interseca con via De' Carracci.

- ACCESSO 11: è situato su Via De' Carracci, e consente di eseguire le lavorazioni dalla pila 98 a seguire. In questo tratto di linea sono presenti anche diverse aree operative, alle quali si può accedere, per le sole operazioni di varo delle travi di impalcato tramite tre accessi privati

I varchi appena descritti sono più specificatamente, sia accessi in linea (Ac.L.), cioè nella fascia di sviluppo del People Mover, che non in linea (Ac.a), ma comunque direttamente interferenti con la viabilità ordinaria. Sono presenti comunque altri accessi che servono in maniera diretta ed esclusiva singole aree di lavorazione, ossia cantieri veri e propri e aree di assemblaggio. Con tale pianificazione, la pista di cantiere è in grado di servire ogni punto del tracciato, impegnando la viabilità pubblica per soli 4,5 km circa compresi i percorsi di avvicinamento dalla tangenziale.

Durante lo studio della viabilità in fase di cantierizzazione, ai fini della quantificazione dei volumi di traffico dei mezzi d'opera, sono stati individuati i flussi di traffico maggiormente significativi in termini di volumi trasportati e durata nel tempo, in entrata e uscita dal cantiere, concentrando l'analisi su questi elementi.

Per quanto attiene i terreni di scavo, da conferire presso la Cava Pigna 2, i percorsi eseguiti dagli autocarri sono tutti di cantiere,

per cui non generano impatti di alcun tipo sulla circolazione stradale.

Per tutte le forniture sono stati considerati quali punti di origine gli svincoli della tangenziale più prossimi (le uscite n°4 e n°5) e da questi sono stati individuati i percorsi di avvicinamento.

Per il trasporto dei materiali inerti e sciolti, le simulazioni sono state svolte considerando che i mezzi di trasporto vengano utilizzati al massimo delle proprie capacità di carico. Nel caso del trasporto del ferro, invece, è stata simulata una situazione media di trasporto, in quanto l'acciaio d'armatura sarà approvvigionato al cantiere pre-assemblato in gabbie di peso variabile, oppure pre-assemblato in area destinata al campo base e trasportato in loco.

Infine, per il trasporto delle travi prefabbricate da assemblare in cantiere, considerato il peso e le dimensioni, è stato ipotizzato il trasporto di una trave per volta.

Gli ulteriori materiali in ingresso al cantiere non sono stati considerati significativi ai fini del calcolo dei volumi di traffico.

Dalle caratteristiche e peculiarità dell'infrastruttura che si va a realizzare, descritte in precedenza, facilmente si comprende la necessità di avere svariate aree di lavoro che seguano lo sviluppo di tutte le strutture. La realizzazione del viadotto, consta di fasi ripetitive, per le quali occorre predisporre dei piccoli cantieri momentanei, sufficienti alla costruzione delle pile ed a varare le travi d'impalcato. Tuttavia, lungo lo sviluppo dell'opera sono presenti tre interferenze importanti la cui soluzione ha determinato delle scelte ingegneristiche più accurate e la cui complessità ha dei riflessi anche in fase realizzativa.

La prima interferenza viene a crearsi con l'autostrada A14 e la tangenziale. Il progetto prevede il superamento della viabilità primaria esistente mettendo in opera un'unica campata.

La seconda interferenza è rappresentata dallo scavalco del fiume Reno, la cui risoluzione comporta un'organizzazione in fase realizzativa più complessa. Infatti, al fine di dare continuità alle piste di cantiere, e per eseguire tutte le operazioni costruttive, si prevede la realizzazione di un guado, mediante l'affondamento dei cassoni in cemento armato prefabbricato.

La terza interferenza che il tracciato del People Mover incontra è rappresentata dalla linea dell'Alta Velocità in corrispondenza della quale il progetto prevede la realizzazione di un sottopasso.

Infine, occorre realizzare le due stazioni terminali dell'Aeroporto e della Stazione FS e quella intermedia del Lazzaretto, posta a metà del tracciato.

Data le caratteristiche dell'opera a farsi, al fine di una corretta programmazione e pianificazione del lavoro, si prevede di predisporre delle aree di accantieramento di tipo permanente, in relazione all'intera durata dei lavori, e di tipo provvisorio.

In particolare si realizza un campo permanente, diviso in due aree distinte, che rappresenta il centro organizzativo e logistico del cantiere per la durata delle opere, ed è destinato ad ospitare sia uffici e servizi igienico assistenziali, sia aree per lo stoccaggio di materiali (campo base), nonché l'area per la caratterizzazione delle terre di scavo ed il ricovero dei mezzi operativi (campo operativo).

L'area individuata per ospitare le attività appena descritte, è stata individuata nei pressi della cava Pigna, lungo la pista di cantiere, in prossimità della Via Agucchi .

Nell'ambito della dislocazione delle opere in oggetto, ha una posizione ottimale, in quanto è nelle immediate vicinanze delle strutture maggiormente significative, quali il sottopasso ferroviario ed i viadotti su Fiume Reno e Autostrada/Tangenziale. Come detto, l'area è divisa dalla pista di cantiere in due settori, campo base e campo operativo, con accessi separati posti proprio sui due lati della viabilità di servizio.

Su tutto il tracciato sono presenti cantieri temporanei di varia entità e durata a seconda dell'opera da realizzare.

In corrispondenza di ciascuna pila si predispose una micro-cantierizzazione, servita da piste di cantiere, di dimensioni approssimative di 10 x 16 m necessarie alle operazioni di scavo, di armatura e getto delle fondazioni e delle pile.

Differenti, senz'altro più complessi e articolati, sono i cantieri predisposti per la realizzazione delle tre stazioni, che si configurano come cantieri edili veri e propri.

La loro gestione, soprattutto nelle aree dei due terminal, è resa ancor più delicata poiché si inseriscono in contesti ricchi di attività delle quali occorre garantire continuità.

Lungo tutto il tracciato, come detto in precedenza si incontrano delle interferenze le cui risoluzioni sono ingegneristicamente più complesse, e che richiedono, per questo motivo una pianificazione delle lavorazioni più elaborata. È questo il caso dello scavalco dell'autostrada A14 e della tangenziale, dell'attraversamento del fiume Reno, del sottopasso della Linea Ferroviaria dell'Alta Velocità. Per ognuna di queste opere si predispose un cantiere specifico, servito, se necessario, da apposite aree per l'assemblaggio delle travi e da un sistema viario più articolato.

### Cantiere Tipo

La preparazione del sito di cantiere comporta le seguenti attività:

- scotico del terreno;
- formazione dei piazzali da adibire a viabilità e alla movimentazione dei mezzi d'opera, con materiali inerti e stabilizzato,
- delimitazione dall'area con rete in polietilene dell'altezza di 2,00 m e installazione di cancelli d'ingresso.

Come da norma, l'area di cantiere deve essere resa inaccessibile ai non addetti.

I cantieri previsti per l'opera a farsi, sono delimitati da una rete in polietilene di color arancio, di un'altezza pari a 2.00 m, retta da paletti/tondini infissi. Invece, le lavorazioni previste in ambito aeroportuale sono confinate a mezzo di una recinzione in legno, della medesima altezza.

Nella zona della stazione ferroviaria, a causa degli esigui spazi a disposizione e della vicinanza ai binari, quindi a loro protezione, si predispone, solo in corrispondenza della singola pila, una recinzione costituita da montanti in legno, alti 5,00 m, tra cui si interpone, fino 2.00 m di altezza, una tamponatura in tavole di legno, e per i restanti 3.00 m alcuni registri di cavi di nylon ad alta resistenza.

In alcune aree dei cantieri in ambito aeroportuale e ferroviario, si installano delle recinzioni, sempre dell'altezza di 2.00 m, ma coperte da banner contenenti riproduzioni dell'opera a farsi.

### Cantiere Tipologico

Per cantiere tipologico, si intende un cantiere di linea, relativo alla realizzazione del generico tratto di viadotto in condizioni ordinarie, per il quale, cioè, non sono previste delle soluzioni ingegneristiche particolari mirate alla risoluzione di interferenze che si riscontrano lungo tutto il tracciato dell'opera infrastrutturale.

Ai fini della realizzazione di ciascuna pila, si predispone un'apposita area di cantiere di circa 570 mq, delimitata da una rete in polietilene di altezza pari a 2,00 m e dotata di due varchi disposti in maniera speculare rispetto alla stessa area, per agevolare la movimentazione dei mezzi d'opera.

All'interno del cantiere sono definite delle aree necessarie allo stoccaggio dei ferri di armatura e dei casseri e, per fondazioni

profonde realizzate con pali trivellati, di vasche contenenti fanghi bentonitici.

Nel caso di pile su fondazioni profonde, la prima operazione da eseguire è quella della trivellazione dei pali. Durante lo scavo il terreno viene asportato e contemporaneamente viene pompato il fango bentonitico, necessario a scongiurare la chiusura del foro praticato. Dopo aver armato il palo si procede al getto di calcestruzzo e alla contemporanea eliminazione del fango bentonitico, che può essere così riutilizzato previa setacciatura.

Segue l'operazione di scavo necessario all'alloggiamento della piattabanda in calcestruzzo armato a completamento della fondazione. Per rendere i pali solidali alla piastra segue l'operazione di "scapitozzatura", che consiste nel mettere a nudo l'armatura dei pali per un'altezza poco inferiore a quella della piattabanda, in modo tale che essa venga inglobata nel getto a completamento della fondazione.

Nel caso di pile su fondazioni dirette, si scava esclusivamente l'alloggiamento del plinto, lo si arma ed esegue il getto di calcestruzzo.

Successivamente si pone in opera la parte in elevazione della pila gettata in step di 4.50 m in altezza, mediante l'ausilio di casseri rampanti.

Il cantiere allestito per il varo dell'impalcato ha un'area di circa 1060 mq, sviluppato soprattutto in una direzione prevalente, data la lunghezza della trave e tale comunque da ospitare due gru necessarie al suo sollevamento.

L'impalcato dei viadotti, consiste in una trave monorotaia, a cavallo della quale correrà il convoglio, e da una passerella metallica. I due corpi possono essere assemblati al piede delle pile, oppure varati separatamente e successivamente riuniti in quota.

Le due parti devono essere issate mediante l'utilizzo di due gru da 90 tonnellate. Nel caso di pre-assemblaggio occorre utilizzare dei bilancieri da sollevamento, in quanto l'unicum costituito dalla trave e dalla passerella, presente su di un unico lato, tenderebbe a ruotare durante il sollevamento.

#### *Cantierizzazione ambito RFI dal passaggio a livello Lazzaretto allo scavalco Arcoveggio*

Proprio in corrispondenza dell'attraversamento ferroviario in via del Lazzaretto, ha inizio la porzione di tracciato del People Mover che è direttamente interferente con le aree della stazione RFI. Esclusivamente dal varco 10 si accede al cantiere che si



sviluppa in maniera lineare seguendo in modo continuo l'andamento del viadotto, occupando una fascia di larghezza variabile, intorno ai 20 m, che diventa più esigua nella parte terminale (dalla pila 97 alla 110) poiché fortemente limitata dall'edificato e appunto, dal sedime RFI. Come più dettagliatamente descritto nel seguito, esclusivamente nella fase di varo delle travi di impalcato si useranno anche altri varchi.

Il tratto di viadotto ricompreso tra le pile 74 e 96 è servito da una pista consistente in una corsia della strada di servizio privata delle Poste Italiane, attualmente utilizzata come ingresso del cantiere AV realizzato dalla società Condotte.

Per le rimanenti pile, data l'esiguità degli spazi, le opere sono realizzate in opera in modo tale da poter utilizzare la stessa area di cantiere anche per la movimentazione dei mezzi. È per questo motivo che dalla struttura di fondazione delle pile non sono lasciati ferri d'attesa per la prosecuzione in elevazione, e che ogni fase realizzativa è pensata ed attuata in modo tale da non essere di intralcio per le attività successive.

Sono presenti due aree operative, necessarie per depositare materiali e assemblare le travi d'impalcato. La prima in prossimità dell'accesso 10, proprio in corrispondenza delle Poste e l'altra vicino a via Zanardi, entrambe di circa 2700 mq.

Le aree di lavoro sono delimitate da una recinzione in polietilene di un'altezza pari a 2,00 m. Inoltre, nella zona più prossima alla stazione, in corrispondenza della singola pila, il cantiere è separato dal piano del ferro mediante una barriera fisica più consistente, di un'altezza pari a 5.00 m, realizzata con montanti in legno e i cui primi 2.00 m sono tamponati con tavelle di legno, mentre i restanti con registri di fili di nylon ad alta resistenza, avente lo scopo di contenere eventuali "invasioni" delle gabbie metalliche movimentate per la realizzazione dei pali, della sede ferroviaria, che in ogni caso, per maggior cautela, sono previste di una lunghezza massima pari a 6.00 m.

Nel tratto di viadotto in questione, le pile sono tutte su fondazioni profonde. In particolare dalla pila 74 a 97, si tratta di strutture interamente in cemento armato. Invece, quelle che vanno da numero 97 a 110, hanno la parte in elevazione realizzata da un primo basamento in calcestruzzo armato sormontato da un "pilastro" in carpenteria metallica.

#### *Fasi operative dalla Pila 74 alla Pila 97*

Le prime operazioni da eseguire sono relativa alla realizzazione dei pali di fondazione. Dunque, occorre:

- Trivellare i pali con fanghi bentonitici;
- Calare la gabbia di armatura;
- Eseguire il getto del calcestruzzo.

Seguono le seguenti operazioni per la realizzazione della piattabanda superiore:

- scavo;
- scapitozzatura dei pali;
- pulitura del fondo con getto di calcestruzzo magro;
- predisposizione dell'armatura e dei ferri d'attesa;
- getto di calcestruzzo.

Con l'ausilio di casseri rampanti si arma e getta il fusto della pila, in maniera modulare, con passo di 4,50 m.

Come detto in precedenza, le travi di impalcato sono assemblate nell'area adiacente l'ingresso 10. È proprio da tale posizione che vengono movimentate e allocate al piede delle rispettive pile. Infine, con l'ausilio di gru si predispongono le operazioni di varo.

#### *Fasi operative dalla Pila 98 alla Pila 110*

La realizzazione delle pile prevede svariate operazioni, fortemente condizionate dal ristretto spazio a disposizione.

Per la realizzazione delle fondazioni delle pile, si procede dalla pila 98 alla 110, effettuando le seguenti lavorazioni:

- scavo dei pali con l'ausilio dei fanghi bentonitici;
- posa della gabbia di armatura;
- getto di calcestruzzo;
- scapitozzatura dei pali;
- armo e getto della piattabanda.

Realizzate dette operazioni la struttura non sporge dal piano campagna, quindi i mezzi d'opera possono muoversi più facilmente all'interno del cantiere.

Successivamente, partendo, questa volta dalla pila 111, si prosegue, con le lavorazioni di seguito elencate:

- realizzazione degli innesti dei ferri di ripresa, tramite perforazione della piattabanda e successivo fissaggio delle barre d'acciaio con resine epossidiche;
- montaggio della casseratura e relativa struttura di sostegno necessaria alla realizzazione della base della pila in carpenteria;
- posa della gabbia di armatura;
- getto della base per strati, per evitare spanciamenti della casseratura;
- realizzazione degli innesti per i tirafondi;
- posizionamento e ancoraggio della pila in carpenteria metallica.

In corrispondenza delle pile 95-96-97 è presente un'altra area operativa, sempre dedicata all'assemblaggio delle travi.

Per il varo delle stesse, si accede al piede delle opere interessate utilizzando quattro varchi su via De'Carracci, tramite delle viabilità private al termine delle quali si dispongono di piccole aree operative necessarie per la movimentazione delle gru.

Inoltre, in corrispondenza delle ore notturne, si prevede la chiusura di via Zanardi, per il varo delle travi comprese tra le pile 96 e 98.

#### *Cantierizzazione Stazione Lazzaretto*

La stazione del Lazzaretto, collocata intorno alla progressiva km 2+400.00 è l'unica fermata intermedia del tracciato del People Mover. La stazione è principalmente a servizio del Campus universitario che andrà a svilupparsi nelle vicinanze.

In corrispondenza del "Lazzaretto" è presente lo scambio dei binari, e quindi, è presente un doppio binario tra le pile 58 e 59 del viadotto, cioè proprio in all'interno della stazione.

Il corpo di fabbrica ha un'architettura simile a quella delle stazioni terminal, ovvero è sopraelevata rispetto al piano campagna, ed ha una struttura di copertura telescopica, realizzata sempre a mezzo di portali in carpenteria metallica preassemblati.

La fondazione è di tipo profondo. Nella parte centrale viene realizzata una vera e propria platea, mentre nelle parti marginali ci sono piloni a se stanti. Il piano di calpestio è realizzato tramite un solettone in calcestruzzo gettato in opera. I collegamenti con il piano terra sono assicurati a mezzo di scale in carpenteria

metallica, scale mobili e ascensori. Il piano terra, sono presenti oltre agli spazi necessari per l'accesso al piano superiore, sono presente dei locali di servizio. Al piano primo, sono presenti non solo gli spazi ordinari dedicati all'utenza e al funzionamento stesso del People Mover, ma anche locali per la manutenzione delle vetture e degli uffici di direzione. Le sottostrutture del viadotto nella "campata di scambio", dovendo garantire un piano d'appoggio ampio, con dei carichi più consistenti di quelli tipologici, sono completamente differenti dalle ordinarie pile, anche se costituite sempre dal medesimo sistema costruttivo, cioè di pile su fondazioni profonde realizzate interamente in cemento armato gettato in opera.

Per l'esecuzione delle opere, viene allestito un cantiere avente una superficie di circa 9300 mq, che ricomprende le quattro pile realizzate per effettuare lo scambio del doppio binario, le pile 58 e 59 del viadotto e quelle relative alla struttura della stazione. Il sito può essere raggiunto tramite piste interne, sia dal campo base, sia da via Terracini, tramite l'accesso 5.

L'area è delimitata da una rete in polietilene di color arancio, di un'altezza pari a 2.00 m, retta da paletti/tondini infissi. Al suo interno, si predispongono esclusivamente aree per lo stoccaggio dei materiali e dei baraccamenti, costituiti da box prefabbricati, che accolgono un ufficio, un deposito e i servizi igienici. Anche l'assemblaggio delle travi di impalcato viene effettuato in loco. La movimentazione dei mezzi d'opera all'interno del cantiere è del tipo circolare, in modo da non ostacolare le lavorazioni. La fornitura di energia elettrica sarà garantita mediante allacciamento alla rete ENEL, mentre l'approvvigionamento d'acqua avviene, se possibile, tramite allacciamento alla rete pubblica che poi dovrà comunque esser predisposto per la stazione; altrimenti, se ciò non è possibile, in fase di cantiere, si installeranno delle apposite cisterne. Prima di eseguire le lavorazioni vere e proprie, nella fase di accantieramento, occorre installare un traliccio dell'alta tensione in maniera tale da poter alzare la linea dei cavi elettrici ivi presenti ed eliminare possibili interferenze con i mezzi d'opera.

#### *Fasi operative per la realizzazione della stazione*

Dopo le operazioni di accantieramento e di spostamento del traliccio della linea elettrica, seguono le seguenti operazioni:

- realizzazione dei pali di fondazione con fanghi bentonitici;

- scapitozzatura dei pali;
- scavo per la realizzazione della platea e delle piattabande;
- getto di calcestruzzo magro;
- disposizione delle armature delle solette e dei ferri d'attesa per le strutture in prosecuzione;
- getto della fondazione;
- armatura e getto delle pareti e dei pilastri;
- montaggio dei ponteggi su tutto il perimetro della struttura, armatura e getto del solettone di calpestio;
- montaggio delle scale metalliche;
- posa della trave monorotaia;
- montaggio della copertura;
- installazione degli impianti, delle opere accessorie e delle finiture.

#### *Fasi operative per la realizzazione delle pile di scambio*

Per la realizzazione delle pile di scambio, la prima operazione da eseguire è la realizzazione dei pali di fondazione a mezzo di scavo con fanghi bentonitici. Dopo l'armo e il getto, la parte sommitale del palo viene scapitozzata per essere solidale alla piattabanda che si va a porre in opera. Dopo lo scavo e la pulitura della superficie a mezzo di un getto di calcestruzzo magro, si dispone l'armatura della soletta e dei ferri per la prosecuzione della struttura, in particolare dei fusti delle pile. Segue la fase di getto.

Tramite casseri rampanti, aventi una corsa di 4.50 m, si realizzano i fusti in cemento armato; successivamente si realizza la parte sommitale, ossia il pulvino svasato, che costituirà il piano d'appoggio delle travi e delle parti meccaniche dello scambio.

Solo successivamente, tramite gru, si vara l'impalcato.

#### *Cantierizzazione ambito Aeroportuale*

Il tracciato del People Mover si diparte dall'aerea aeroportuale, dove sono collocati il Terminal e le prime otto pile del viadotto,

per la cui realizzazione occorre eseguire delle operazioni non particolarmente articolate per loro natura, ma che acquisiscono un livello di difficoltà superiore, dato il contesto ricco di attività e soggetto alla continua e numerosa presenza di utenti e operatori dello scalo aeroportuale. L'organizzazione del cantiere e delle attività lavorative, dunque, sia in termini di utilizzo dello spazio, di scelta delle attrezzature piuttosto che per la tempistica, è stata totalmente concepita e studiata, in maniera tale da essere meno impattante possibile. Dalla rotatoria di Via Del Triumvirato si ha accesso diretto alle aree di lavorazione delle prime 8 pile. Per giungere al cantiere del Terminal, invece, viene sfruttata una corsia della strada riservata ai mezzi autorizzati e parte dell'area dedicata al posteggio dei taxi. L'ordinario accesso all'area Check-in dei mezzi privati e dei taxi viene chiuso al traffico in una prima fase delle lavorazioni, cioè fino alla realizzazione dell'impalcato del Terminal. Infatti, dopo l'installazione di un apposito ponteggio, la strada viene riaperta, ripristinando la normale circolazione.

Durante questo periodo il traffico viene deviato nella corsia adiacente a quella descritta per l'accesso al cantiere, per poi passare in corrispondenza dell'area di sosta dei pullman, e infine riallacciarsi alla viabilità ordinaria. La struttura del Terminal presenta fondazioni dirette. Il piano di calpestio, sopraelevato rispetto al piano campagna, è costituito da un solettone in cemento armato, retto a mezzo di pile. La struttura di sostegno della copertura è costituita da portali in acciaio preassemblati. I collegamenti verticali sono assicurate da due corpi di scala in carpenteria metallica. Naturalmente è prevista anche l'installazione di un ascensore, realizzato a cura e spese dell'aeroporto (SAB).

Anche le pile presenti nell'ambito di cui trattasi (dalla pila 1 alla 8) hanno fondazioni dirette, di diverse dimensioni. La prima pila è inclusa nel cantiere predisposto per realizzazione del Terminal. Si accede alle rimanenti in maniera diretta, come innanzi detto, tramite la viabilità che serve, da via Del Triumvirato il nuovo Terminal per i voli low-cost dell'aeroporto.

#### *Cantiere realizzazione Terminal*

Il cantiere necessario alla realizzazione del Terminal, ha un ingombro di circa 3500 mq. L'area è delimitata da barriera coperta da banner pubblicitari. Prima di eseguire le lavorazioni vere e proprie saranno eliminate in via provvisoria e/o definitiva le interferenze. Il cantiere non si presenta articolato; al suo

interno infatti, è predisposta solo un'area per lo stoccaggio del materiale. Esclusivamente per il periodo strettamente necessario al montaggio dei portali di copertura si intende usufruire di un'ulteriore area adiacente al cantiere, nella zona del parcheggio. Mentre per l'assemblaggio delle travi monorotaia, si predispone un'area collocata all'imbocco della viabilità che conduce direttamente alle aree di realizzazione delle pile, di circa 1000 mq.

#### *Cantiere realizzazione Pile*

Le aree di cantiere previste per realizzare le pile sono due, aventi accesso speculare rispetto alla viabilità da cui sono servite, e con superficie di circa 1700 mq, per la realizzazione delle pile da 2 a 6, e di 670 mq circa per le pile 7 e 8. Le recinzioni previste sono in rete di polietilene retta da paletti o tondini infissi, avente un'altezza pari a 2.00 m. Prima delle lavorazioni vere e proprie, sarà rimosso ogni arredo e cordolo d'aiuola. Il primo gruppo di pile è posizionato a ridosso dello stabile "Parcheggio P3".

Nella fase di realizzazione delle opere, gli utenti che, dopo aver eseguito il check-in al nuovo Terminal low-cost, devono raggiungere l'imbarco, non potendo più usufruire del passaggio pedonale presente che si configura proprio in corrispondenza delle pile, utilizzando un corridoio parallelo al precedente, ma annesso al Parcheggio P3, quindi coperto. Esclusivamente nella fase di varo delle travi di impalcato saranno occupate ulteriori aree del piazzale antistante per il posizionamento delle gru. Per minimizzare le interferenze con le attività dei magazzini che si affacciano sul medesimo piazzale, il varo è effettuato solo nelle ore notturne di giorni festivi e comunque concordato con il personale SAB.

#### *Assemblaggio e varo dell'impalcato*

Come precedentemente riportato, è stata individuata un'area di lavoro, localizzata come da allegato grafico, predisposta per l'assemblaggio delle travi costituenti la via di corsa, nel tratto compreso fra la stazione e la pila 8. L'area di cantiere, opportunamente delimitata come le precedenti e con un controllo degli accessi eseguito per mezzo di cancello metallico, è stata definita in variante rispetto a quanto riportato nel progetto definitivo a seguito di richieste della società di gestione dello scalo.

L'area di assemblaggio sarà servita in orari concordati con i responsabili SAB, dai mezzi pesanti che trasporteranno le travi

semi-assemblate aventi lunghezza compatibile con un trasporto su strada ordinario per ingombri e pesi; qui le diverse sezioni della trave saranno assemblate e portate sul luogo del varo per mezzo di carrelli o mezzi sfilabili. Le operazioni di trasporto e di varo saranno eseguite nei giorni negli orari indicati e concordati con SAB per limitare il disagio allo svolgimento dell'attività aeroportuale. Il varo delle travi comprese fra le pile 2 e 6 avverrà dall'area esterna di manovra del terminal merci e sarà condotta con l'impiego di due gru ed un mezzo per il trasporto dell'elemento metallico. Tutti gli interventi saranno condotti nel rispetto dei limiti di altezza previsti dal progetto definitivo per la salvaguardia del piatto aereo; le lavorazioni condotte nelle aree di cantiere non sporcheranno la viabilità pubblica e/o a servizio dell'attività aeroportuale.

#### *Fasi operative per la realizzazione del Terminal*

Dopo le operazioni di accantieramento e di spostamento dei sottoservizi, è necessario eseguire uno scavo di sbancamento per un'altezza di circa 2.60 m al fine di predisporre il piano di posa della fondazione.

Previa pulitura del piano con un getto di calcestruzzo magro, seguono le seguenti operazioni:

- armo dei solettoni di fondazione delle pile, delle travi di collegamento e della platea dell'ascensore, avendo cura di lasciare i ferri d'attesa per la prosecuzione delle pareti e delle pile
- getto di tutta la fondazione;
- armo e getto delle pile e delle pareti dell'ascensore;
- realizzazione del vespaio;
- ripristino del tratto del piano stradale interrotto;
- armo e getto del solettone di calpestio;
- montaggio del ponteggio sul perimetro della struttura;
- riapertura viabilità in corrispondenza dell'opera;
- posa in opera della trave monorotaia;
- montaggio della copertura;
- montaggio delle scale in carpenteria metallica;
- installazioni impianti, opere accessorie, finiture.

#### *Fasi operative per la realizzazione delle pile*

In questo caso, le operazioni di scavo sono localizzate in corrispondenza della fondazione delle pile. Non sono presenti pali, dunque dopo la pulitura del fondo si può disporre direttamente l'armatura del solettone, predisponendo anche i ferri



d'attesa per il collegamento al fusto. Successivamente è possibile eseguire il getto della piastra. Tramite l'uso di casseri rampanti, si arma e getta la parte in elevazione. Solo successivamente si vara l'impalcato. All'occorrenza, è necessario chiudere la strada di accesso al cantiere che va fino al terminal low-cost, solo per le ore strettamente necessarie al varo della trave in corrispondenza della strada stessa. La chiusura sarà concordata con il gestore dell'aeroporto.

### *Cantierizzazione Viadotto Tipo*

Il tracciato del People Mover si diparte dall'aerea aeroportuale, per poi arrivare fino alla Stazione FS, e si sviluppa per la quasi totalità in sopraelevato. È per tale ragione che l'opera principale a farsi consiste proprio in un viadotto.

L'impalcato è costituito essenzialmente dalla trave monorotaia sul quale viaggia il convoglio, mentre la sottostruttura è realizzata da pile in calcestruzzo armato, aventi fondazioni dirette o profonde.

Nel seguito si intende descrivere un cantiere tipologico, ovvero un cantiere di linea, relativo alla realizzazione del generico tratto di viadotto in condizioni ordinarie, per il quale, cioè, non sono previste delle soluzioni ingegneristiche particolari mirate alla risoluzione di interferenze che si riscontrano lungo tutto il tracciato dell'opera infrastrutturale.

Ai fini della realizzazione di ciascuna pila, si predispone un'apposita area di cantiere di circa 570 mq, delimitata da una rete in polietilene di altezza pari a 2,00 m e dotata di due varchi disposti in maniera speculare rispetto alla stessa area, per agevolare la movimentazione dei mezzi d'opera.

All'interno del cantiere sono definite delle aree necessarie allo stoccaggio dei ferri di armatura e dei casseri e, per fondazioni profonde realizzate con pali trivellati, di vasche contenenti fanghi bentonitici.

### *Fasi operative*

Nel caso di pile su fondazioni profonde, la prima operazione da eseguire è quella della trivellazione dei pali. Durante lo scavo il terreno viene asportato e contemporaneamente viene pompato il fango bentonitico, necessario a scongiurare la chiusura del foro praticato. Dopo aver armato il palo si procede al getto di calcestruzzo e alla contemporanea eliminazione del fango bentonitico, che può essere così riutilizzato previa setacciatura.

Segue l'operazione di scavo necessario all'alloggiamento della piattabanda in calcestruzzo armato a completamento della

fondazione. Per rendere i pali solidali alla piastra nella parte superiore del palo viene eliminato il calcestruzzo e vengono messe a nudo le armature per un'altezza poco inferiore a quella della piattabanda, in modo tale da essere inglobate nel getto a completamento della fondazione.

Nel caso di pile su fondazioni dirette, si scava esclusivamente l'alloggiamento del plinto, lo si arma ed esegue il getto di calcestruzzo. Successivamente si pone in opera la parte in elevazione della pila gettata in step di 4.50 m in altezza, mediante l'ausilio di casseri rampanti. Il cantiere allestito per il varo dell'impalcato ha un'area di circa 1060 mq, sviluppato soprattutto in una direzione prevalente, data la lunghezza della trave e tale comunque da ospitare due gru necessarie al suo sollevamento.

L'impalcato dei viadotti, come detto, consiste in una trave monorotaia, a cavallo della quale correrà il convoglio, e da una passerella metallica. I due corpi possono essere assemblati al piede delle pile, oppure varati separatamente e successivamente riuniti in quota.

Le due parti devono essere issate mediante l'utilizzo di due gru da 90 tonnellate. Nel caso di preassemblaggio occorre utilizzare dei bilancieri da sollevamento, in quanto l'unicum costituito dalla trave e dalla passerella, presente su di un unico lato, tenderebbe a ruotare durante il sollevamento.

#### Cantierizzazione ambito fiume Reno

Il contesto fluviale in cui si inserisce l'opera, ricompreso tra gli argini maestri del Fiume Reno, è caratterizzato da una fascia occupata dall'alveo inciso cui si affiancano aree golenali di diversa profondità e sviluppo. Tale contesto è sicuramente quello che, lungo tutto il tracciato del People Mover, presenta gli elementi più significativi di naturalità, e quindi deve essere maggiormente tutelato affinché sia in fase di realizzazione che di esercizio dell'opera si ottenga il minor impatto ambientale possibile, raggiunto anche mediante interventi compensativi. Le alberature censite ricadenti all'interno delle aree di lavorazione previste come definito al punto precedente sono da considerarsi direttamente impattate dall'opera, quindi soggette ad abbattimento. Prima dell'installazione del cantiere occorre quindi, abbattere le alberature e le piante interferenti con il tracciato. L'area è servita interamente da piste di cantiere, alle quali si accede dal varco 3, posto in corrispondenza della rotonda Faccioli di via del Triumvirato. Per agevolare le lavorazioni e per dare

continuità alla viabilità è prevista la realizzazione di un guado immediatamente a monte del viadotto che, naturalmente, sarà rimosso dopo le lavorazioni e che il cui accesso sarà interdetto durante le ore non lavorative. In alveo, le aree di intervento occupate dal cantiere comprendono una fascia di 20 m circa. A compensazione, si prevede la messa a dimora di nuove piante nell'area golenale, che saranno oggetto di manutenzione e cura durante tutto il periodo delle lavorazioni per garantire il loro attecchimento. A fine cantiere le superfici fluviali sono ripristinate, risagomate e rinverdite anche con l'ausilio di opere di ingegneria naturalistica. Durante le lavorazioni le piste nell'area di pertinenza fluviale saranno regolarmente soggette a manutenzione e pulizia con frequenza variabile a seconda delle lavorazioni eseguite e delle condizioni meteo-climatiche, al fine di evitare accumuli di fango che potrebbero essere trascinati dai mezzi pesanti in transito e che potrebbero riversarsi in acqua. Accidentali dispersioni di calcestruzzo in alveo, sono scongiurate, poiché il lavaggio delle betoniere avviene presso lo stabilimento di produzione.

Durante tutte le lavorazioni saranno applicate in maniera rigida tutte le procedure necessarie a garantire adeguate condizioni di sicurezza degli operatori anche in funzione di un'eventuale allerta in caso di piena.

Le pile in area fluviale presentano fondazioni profonde, costituite da un singolo palo di grande diametro, soluzione tecnica prevista per la minimizzazione delle interferenze idrauliche fra le pile e il flusso delle acque.

Nel dettaglio, si tratta di monopali trivellati ( $\phi$  2000 mm), spinti a circa 20 metri dal piano di campagna. Visto che dallo studio idrogeologico è emerso che non è possibile escludere, nel lungo periodo, comunicazioni tra la falda interessata dalle perforazioni e quella da cui avviene l'emungimento per scopo idropotabile, per scongiurare il pericolo di inquinamento della falda e, non potendo prediligere una perforazione a secco, si prevede di eseguire la perforazione dei pali con fanghi a base polimerica. Tali fanghi, infatti, sono biodegradabili (caratterizzati da vita molto breve) e di origine naturale o artificiale, a base di polimeri derivati dalla cellulosa del mais o dai semi di guar. Tali sostanze si decompongono senza rilasciare sostanze tossiche o nocive.

In corrispondenza di ogni pila viene predisposto un singolo cantiere, di circa 500 mq, all'interno del quale è previsto solo una piccola area di deposito del quantitativo d'acciaio di armatura strettamente necessario all'esecuzione dell'opera e la vasca per i

fanghi biodegradabili. Il cantiere è delimitato da una rete in polietilene di color arancio, di un'altezza pari a 2.00 m, retta da paletti/tondini infissi.

#### *Realizzazione Guado*

Il guado è costituito da scatolari prefabbricati in calcestruzzo vibrocompresso di diverse dimensioni, posizionati in modo tale da permettere il passaggio dell'acqua. Il piano viabile è realizzato tramite una pavimentazione rigida, ottenuta sovrapponendo ad uno spessore di circa 15 cm di calcestruzzo magro, una soletta armata di 20 cm di altezza, necessaria a ripartire i carichi mobili dei mezzi d'opera. Sui bordi della sede stradale, inoltre, si realizza in opera un cordolo in calcestruzzo armato, dell'altezza di 30 cm, necessari ad evitare che residui delle lavorazioni e il fango trascinati dai mezzi d'opera possano cadere in acqua. Per l'esecuzione del guado, realizzato in mesi di secca, si prevede di deviare, in due tempi il corso d'acqua, a mezzo di dune in terra, di un'altezza tale da non costituire ostacolo alla corrente nel caso di improvvisa piena. In questo modo è possibile mettere in opera l'attraversamento in due parti successive lavorando in assenza d'acqua, prima in prossimità della sponda in sinistra idraulica e poi su quella in destra. La prima operazione da seguire, quindi, è rivestire la sponda in sinistra con blocchi in arenaria, non solo per tutta la larghezza del guado, ma anche per 3.00 m a monte e 5.00 m a valle dello stesso.

Prima di posizionare gli scatolari, il fondo viene regolarizzato con uno strato di calcestruzzo magro, inoltre, dalla parte di monte dell'attraversamento vengono disposti dei taglioncini in blocchi di calcestruzzo. Dunque possono porsi in opera gli scatolari, che vengono stabilizzati, posizionando dal lato di valle dei materassi in pietrame tipo "Reno", aventi funzione anti-scalzamento.

Si eseguono successivamente le medesime operazioni deviando la vena d'acqua sul lato opposto. Successivamente si stende il calcestruzzo magro. In corrispondenza dei rilevati di approccio, viene creato un vero e proprio cuneo in calcestruzzo, per solidarizzare l'opera ed evitare cedimenti differenziali che porterebbero, soprattutto considerato il peso dei mezzi d'opera, alla formazione di fratture trasversali al piano viario, con la conseguente creazione di pericolosi dislivelli. Infine si realizzano la soletta e il cordolo armati.

#### *Fasi operative per la realizzazione delle pile e varo dell'impalcato*

Come detto, le pile in alveo presentano una fondazione profonda realizzata con un monopalo trivellato con fanghi biodegradabili.

Le operazioni per la realizzazione del monopalo sono le seguenti:

- prescavo con alloggiamento nel foro di una camicia in lamiera della lunghezza di 2.00 m;
- scavo di tutta la lunghezza del palo;
- posa delle gabbia di armatura;
- getto di calcestruzzo.

Dopo la scapitozzatura della parte superiore del palo, necessario per collegare l'armatura di fondazione con quella del fusto della pila, con l'ausilio di casseri rampanti si esegue l'armo e il getto del fusto, in tronchi di 4,50 m di altezza. Le travi di impalcato sono assemblate in un'apposita area adiacente l'accesso 3, avente una superficie di circa 1400 mq. Successivamente le travi sono portate al piede delle pile da un camion "sfilabile" e posizionate da una gru di portata adeguata. Per il varo della trave in corrispondenza del fiume Reno, tra le pile 23 e 24, avente una luce maggiore, si adoperano due gru da 200 t posizionate sulle due sponde a valle del guado.

Dopo la realizzazione delle opere, verrà ripristinato lo status quo ante, anche mediante l'ausilio di opere di ingegneria naturalistica.

#### Cantierizzazione viadotto su Autostrada

Il tracciato del People Mover, all'altezza della progressiva km 0+600.00, supera il sistema stradale costituito dall'autostrada A14 Bologna – Taranto e dalla tangenziale di Bologna. Nel dettaglio l'opera d'arte consiste in un cavalcavia a tre campate, ricomprese tra le pile adiacenti le spalle del ponte. L'impalcato è costituito da due travi monorotaie in affiancamento tra loro solidali. Questo per avere già un'opera di scavalco completa in funzione del futuro raddoppio della linea. La lunghezza totale dell'impalcato è di 160 m, ed è ottenuta dall'unione di tre tronchi:

- due di riva posizionati tra la singola pila e che prosegue a sbalzo oltre la spalla (in corrispondenza della tangenziale),
- uno centrale (che copre tutta la larghezza dell'autostrada) messo in opera e reso solidale agli adiacente in una seconda fase.

Le pile summenzionate, cioè la 17 e la 18, si differenziano dalle altre in linea poiché si sviluppano in elevazione con un doppio

fusto, che consente di avere una superficie di appoggio del pulvino raddoppiata, capace quindi di accogliere l'ingombro e il peso della

trave aggiuntiva. La pila 18, inoltre, a differenza dell'altra, è caratterizzata da fondazioni profonde. Le spalle hanno una struttura in elevazione costituita da un fusto a sezione cava variabile sormontato da una soletta trapezoidale a base variabile, sulla quale si innestano 5 portali ad arco metallici che formano un guscio di chiusura, rivestito in lamiera stirata. Le fondazioni sono su pali solo per una spalla. Per la realizzazione della sottostruttura del cavalcavia, è necessario predisporre due cantieri puntuali, di circa 3.500 mq ciascuno, in corrispondenza di ognuna delle due spalle e

delle pile adiacenti. L'accesso alla spalla A e alla pila 17 avviene da via del Triumvirato (Accesso 2). Mentre si giunge alla spalla B e alla pila 18 tramite l'accesso 3, sulla rotonda Faccioli di via del Triumvirato. Ogni area è delimitata da una rete in polietilene di altezza pari a 2,00 m. Al suo interno sono definite aree per lo stoccaggio dei materiali e di vasche con fanghi bentonitici. Inoltre,

sono previste anche aree per l'assemblaggio delle travi di riva.

#### *Fasi operative per la realizzazione delle pile 17 e 18*

Come detto, la pila 18 è caratterizzata da fondazioni profonde. Dunque, la prima operazione da eseguire è relativa proprio alla realizzazione dei pali. Nello specifico, occorre:

- Trivellare i pali con fanghi bentonitici;
- Calare la gabbia di armatura;
- Eseguire il getto del calcestruzzo.

Seguono le seguenti operazioni per la realizzazione della piattabanda superiore:

- scavo;
- scapitozzatura dei pali;
- pulitura del fondo con getto di calcestruzzo magro;
- predisposizione dell'armatura e dei ferri d'attesa;
- getto di calcestruzzo.

Con l'ausilio di casseri rampanti si arma e getta il fusto della pila, in maniera modulare, con passo di 4,50 m.

L'esecuzione della pila 17, con fondazioni dirette, prevede le medesime operazioni, partendo però dallo scavo per l'alloggiamento del plinto.

#### *Fasi operative per la realizzazione delle spalle*

Prima dell'esecuzione delle lavorazioni strettamente legate alla realizzazione delle opere, occorre riprofilare il terreno al fine di avere un piano di lavoro regolare per poter eseguire le perforazioni dei micropali della paratia posta a protezione dello scavo necessario per realizzare la parte fondazionale delle spalle. Dopo che ci si è portati alla quota di imposta della piattabanda, si esegue, nel caso della spalla B, la trivellazione dei pali di fondazione a mezzo di fanghi bentonitici. Seguono le operazioni di armo e getto degli stessi, avendo cura di lasciare i ferri di attesa che verranno inglobati nel successivo getto.

A questo punto, per entrambe le spalle si eseguono le medesime lavorazioni, quali:

- pulitura del fondo con getto di calcestruzzo magro;
- predisposizione dell'armatura della piattabanda e dei ferri d'attesa;
- getto di calcestruzzo.

Di seguito è realizzata la parte in elevazione delle spalle, mediante l'utilizzo di cassetta classica, quindi armo e getto del fusto e del pulvino. Il cantiere predisposto per la realizzazione delle opere prevede anche degli spazi per l'assemblaggio delle travi di impalcato, le quali saranno posizionate al piede dei tratti tra la pila 17 e la spalla A e tra la pila 18 e la spalla B, e varate a mezzo di una gru da 500 tonnellate.

Il varo avviene previa chiusura per una notte, dalle ore 22:00 alle ore 6:00 del tratto di tangenziale nella direzione interessata.

Solo successivamente il portale di copertura è assemblato al piede di ogni spalla, sollevato da gru e naturalmente fissato alla soletta in calcestruzzo. Infine, il terreno viene risagomato ripristinando il naturale andamento del declivio ante operam.

#### *Fasi operative per il varo del tronco centrale d'impalcato*

Il tronco centrale d'impalcato costituito dalla doppia trave monorotaia, è assemblato nell'area in prossimità dell'accesso 3.

Durante tutte le operazioni di varo, che avvengono in una notte, dalle ore 22:00 alle 6:00, sono chiusi i tratti di tangenziale ricompresi tra l'uscita n.2 – Borgo Panigale e la n.5 – Lame e dell'autostrada A14 tra i caselli di Casalecchio di Reno e quello di Arcoveggio.

Per effettuare le operazioni di spostamento della trave sono utilizzati dei pattini elettrici telecomandati, che consentono di limitare l'ingombro della sagoma movimentata esclusivamente a quella della trave. Inoltre, inserendo delle ralle, si ottiene un

piano di appoggio snodato rispetto al sostegno sottostante, consentendone la completa rotazione. Le stesse ruote, singolarmente, girano di 360°. Tali caratteristiche consentono di movimentare la trave effettuando le manovre in ingombri ridotti.

Il piano di appoggio dei pattini, considerando anche l'ingombro delle ralle, è ad un'altezza di circa 1.65 m. Ciò permette di far scorrere la trave sulla sede stradale al di sopra della divisione delle carreggiate costituita dai guard-rail. Si pone in evidenza, inoltre, che durante le operazioni di varo oltre alle due gru necessarie, è presente anche una gru di riserva, al fine di minimizzare i possibili disagi sulla circolazione autostradale in caso di malfunzionamento dei mezzi di cantiere.

**Fase 1:**

Alla chiusura dei tratti stradali, sulla rampa che ad est della rotatoria Faccioli consente l'immissione in tangenziale in direzione San Lazzaro, tramite due gru, si posiziona la trave al di sopra di due pattini elettrici. Una terza gru, invece, è posizionata sulla rampa di svincolo opposto.

**Fase 2:**

Una delle due gru che ha sollevato il tronco di impalcato si sposta sulla rotatoria, in modo da consentire il passaggio della trave che, appunto, superata la rotonda, si dirige verso l'altra rampa di ingresso alla tangenziale. Nel frattempo, anche le altre due gru si spostano, portandosi nella posizione necessaria a eseguire il varo. La trave, mediante un passaggio esistente tra le due carreggiate dell'autostrada e la rimozione di alcuni new-jersey che separano la sede autostradale dalla tangenziale, si posiziona nella carreggiata dell'A14 opposta a quella d'entrata. Tale manovra consente di superare l'interferenza costituita dal portale di segnaletica presente nelle carreggiate in direzione San Lazzaro. La trave quindi viene movimentata nella direzione della posizione di varo.

**Fase 3:**

Superato il portale della segnaletica, tramite un terzo carrello posto nell'altra carreggiata dell'autostrada, la trave viene posizionata diagonalmente alla stessa. Uno dei due carrelli presenti dalla stessa parte viene eliminato ed inserito in una posizione più baricentrica della trave, al posto del carrello presente all'altro estremo.

Dunque, la trave viene spostata muovendosi al di sopra del guard-rail. Una volta superata la rampa che ad Est della rotonda consente l'immissione in tangenziale, anche la terza gru, si avvia



a raggiungere, preceduta dalla trave, la configurazione finale. A questo punto è possibile procedere al varo della trave tramite due gru.

E' previsto un piano di viabilità alternativa.

**5. DEFINIZIONE DI TEMPI E PROCEDURE:  
la WBS e le schede di produzione**

**6. PROGRAMMAZIONE OPERATIVA  
DEL “PEOPLE MOVER”:  
i programmi lavori ASAP e ALAP**

Vedi allegati nel box in allegato.

## 7. I SOFTWARE:

### Microsoft Project 2007 e Primavera Project Planner P6

Negli ultimi anni sono avvenuti parecchi cambiamenti per quanto riguarda i sistemi applicativi per il *project management*, tra cui:

- la schedulazione di progetto si è associata sempre più alla gestione integrata delle risorse;
- la gestione dei progetti non è più condotta caso per caso, ma per più casi che fanno riferimento a un database comune;
- i sistemi di pianificazione e di schedulazione dei progetti e quelli di gestione delle risorse si sono collegati sempre più ai sistemi informativi e di controllo per la:
  - la stima dei costi,
  - il rendiconto delle ore lavorate,
  - la contabilità industriale,
  - il controllo dei documenti (ordini d'acquisto, contratti, ecc.),
  - il controllo della produzione, ecc.;
- l'architettura di database relazionale si è affermata anche nel software per il *project management*;
- è migliorata sensibilmente e costantemente l'interazione fra l'utilizzatore e il sistema, grazie a:
  - menu di dialogo,
  - risposta pronta e diretta ai cambiamenti di piano specificati,
  - interfacce grafiche;
- la varietà e la qualità grafica degli output è migliorata costantemente. Sono disponibili piani reticolari temporali e diagrammi a barre in varie fogge e combinazioni (bar-nets, diagrammi di Gantt con indicazione grafica delle interdipendenze), istogrammi temporali per le risorse umane e finanziarie con l'indicazione del tasso d'utilizzo e del suo ammontare cumulativo, programmi generali di progetto (*project master schedules*) con l'indicazione dei *milestones* e degli eventi d'interfaccia, WBS (*work breakdown structure*) e OBS (*organisational breakdown structures*), oltre all'usuale repertorio di *business graphics* (diagrammi a spicchi, istogrammi, grafici tridimensionali, e così via).

## **Microsoft Project 2007**

Microsoft Project è il prodotto di punta microsoft per il project management software e costituisce uno dei prodotti leader mondiale del settore. La maggior parte dei project management software prevedono un'integrazione con Microsoft Project molto semplice ed intuitiva, è possibile sia importare progetti verso Project, sia esportare progetti da Project nella propria interfaccia project management preferita. Data la familiarità di molti professionisti con Microsoft Project, questa capacità di import / export diminuisce la curva di apprendimento richiesta da alcuni project management software. Questa funzione consente inoltre di importare ed esportare i progetti creati su altre interfacce e, quindi, conservare i dati che si sono già sviluppato. L'obiettivo di Microsoft Project, comune a tutti i project management software, è quello di fornire gli strumenti necessari per svolgere le attività in modo efficace e gestire le risorse in modo da poter completare tutti i progetti in tempo e rientrando nel budget. Microsoft Project, grazie alla sua capacità d'integrazione e in merito ai suoi tools di project management riesce perfettamente a raggiungere l'obiettivo.

Analizziamo adesso gli aspetti principali di Microsoft Project.

### **Collaborazione tra utenti:**

Questo aspetto costituisce l'area più debole di Microsoft Project. Cio' nonostante le sue caratteristiche di collaborazione sono tuttavia entro la media. Tale project management software è privo di un dashboard (cruscotto), che consenta ai



responsabili del progetto di vedere tutti i progetti in corso, di avere un rapido accesso ai report, nonché di visualizzare l'andamento dei progetti. Tuttavia, queste caratteristiche possono essere inserite integrando Microsoft Project con altri software, come Intellisys, OpenMind e Project KickStart. Project inoltre si integra facilmente con Microsoft Outlook, eliminando la necessità di costruire un nuovo elenco di contatti e permettendo così di contattare le risorse attraverso la rubrica indirizzi già stabilita. Il

calendario del team inoltre, offre una molto leggibile panoramica giornaliera dei tasks e milestone (scadenze) da completare, da parte di gruppi e/o singoli dipendenti.

### **Gestione risorse:**

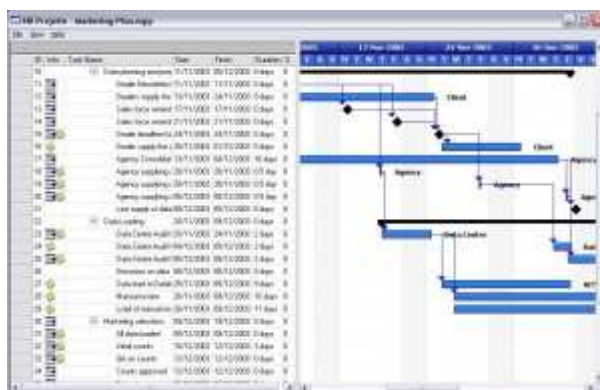
Microsoft Project Standard consente di aggiungere e gestire le risorse (sia dipendenti che risorse materiali) in maniera estremamente facile, il che è essenziale per la gestione dei progetti di successo. Con Microsoft Project, è possibile creare slot per le risorse e assegnarli ai task con la stessa semplicità in cui si inseriscono i dati in un foglio di calcolo. Tramite i dettagli delle risorse, le note connesse ed i settaggi delle abilità è possibile collezionare, all'interno di Microsoft Project, informazioni sugli'impiegati, in maniera tale da essere in grado di assegnare correttamente le risorse ai vari task, ottimizzando l'efficienza.

Microsoft Project consente, inoltre, di tenere traccia delle ore di lavoro dei dipendenti, i materiali e forniture, nonché i costi del progetto, parte essenziale per mantenere il progetto nel rispetto del budget.

### **Project Management:**

Sebbene Microsoft Project non vanta una lista completa delle funzionalità di gestione del progetto, esso ha le funzioni e le caratteristiche necessarie per gestire i progetti in modo efficace.

In Microsoft Project, i task ricorrenti sono facilmente a portata di mano ed organizzare riunioni con team di programmazione o per semplice manutenzione periodica risulta facile e veloce. I progetti possono comprendere centinaia di task e milestone, cosicché la lista di elementi connessi a un progetto potrebbe diventare molto lunga. In questi casi è molto utile la possibilità di nascondere ed espandere i task a proprio piacimento, in maniera tale da avere una visione tempestiva della view desiderata. Per quel che



milestone

all'interno

riguarda le features di pianificazione (scheduling), Microsoft Project include calendari giornalieri, la ripartizione dei compiti e dei tempi per una visione globale del progetto, eventi specifici connessi alle del calendario.

Una delle caratteristiche sicuramente più interessanti di Microsoft Project è il Diagramma di Gantt interattivo. Vista la facilità con cui i ritardi si verificano nei progetti, risulterà fondamentale avere uno strumento per il Gantt molto semplice ed intuitivo per fare cambiamenti ed aggiornamenti tempestivi direttamente sul grafico, rispetto che aggiornare i dati manualmente nei fogli di calcolo.

Così come lo scheduling, anche i reports giornalieri sono fondamentali affinché il project manager sia sempre aggiornato sui progetti, avendo così un completo controllo dell'andamento generale. Report personalizzabili in Microsoft Project sono disponibili per i project manager, permettendo loro di tenere traccia dei diversi aspetti del progetto, come ad esempio le statistiche, i carichi di lavoro dei dipendenti, e lo stato finanziario.

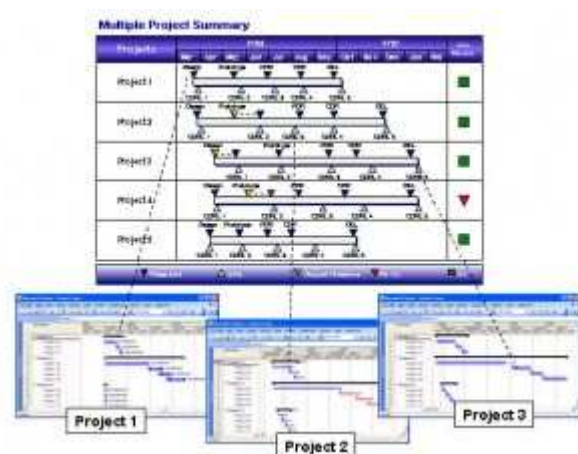
Un'area che potrebbe essere migliorata invece, è la gestione dei documenti. Sebbene la funzionalità di collegamento ipertestuale dei documenti connessi a determinati task sia disponibile (ed estremamente comoda durante la visualizzazione di un progetto e la visione dei documenti critici connessi), Microsoft Project non offre alcuna possibilità di tenere traccia delle diverse versioni dello stesso documento. Questo può rappresentare un problema se i dipendenti cominciano a sbagliare nel consultare l'ultima versione e ottenere informazioni dalle versioni obsolete di un documento.

### **Facilità d'uso:**

Microsoft Project predispone quattro aree principali, comuni ai project management software: attività, le risorse, controllo e la reportistica. Queste sezioni diverse dividono ogni progetto in categorie che permettono di navigare facilmente attraverso il programma.

Questa disposizione rende veloce la ricerca delle informazioni pertinenti disponibili con un semplice click di mouse.

Microsoft Project rende estremamente facile la creazione del progetto, la sua interfaccia (simile ad un foglio di calcolo),



consente di utilizzare la tastiera per i dati di input. Non è necessario spostare il mouse su tutto lo schermo. Con Microsoft Project inoltre, è possibile aggiungere milestones, tasks, date e assegnare risorse al progetto in modo rapido ed efficiente, senza dover fare cliccare col mouse su ogni singolo campo.

Il diagramma di Gantt interattivo, come già accennato, è estremamente utile quando si aggiornano i progressi dei task, cambiando le date e / o l'ordine in cui stanno per essere completati. Questa caratteristica è molto utile anche nel caso in cui importiamo progetti da altri project management software che non hanno grafici interattivi.

Microsoft Project consente di applicare i procedimenti di gestione progettuale descritti nel PMBOK (Project Management Body of Knowledge) del PMI (Project Management Institute). Per un corretto uso, è possibile seguire il metodo del percorso critico (*Critical Path Method* o CPM) o il PERT (Program Evaluation and Review Technique - Tecnica di revisione e valutazione dei progetti).

### **Primavera Project Planner P6**

Primavera P6 è una suite di Project Portfolio Management potente e versatile, caratterizzata da una struttura a moduli: Project Management (cuore del pacchetto, attorno a cui gravitano tutte le altre parti), Methodology Management, Timesheets, P6 Web Access, Primavera Integration API (Application Programming Interface), Software Development Kit (SDK), Schedule Comparison e ProjectLink.

Utilizzabile in qualsiasi contesto, la suite si rivolge al Top Management, a Portfolio Manager, Program Manager, Project Manager, Project Planner, Project Controller e al PMO (Project Management Office).

L'installazione della suite può essere stand-alone o realizzata tramite architettura distribuita. È garantito l'accesso a più utenti, che avviene sempre tramite Login e Password.

Per quel che concerne il database, è possibile utilizzare sia Microsoft SQL sia Oracle, da scegliere in fase di accesso, dopo il quale si ha la possibilità di selezionare un portafoglio di progetti, scegliendo una più opzioni: creare un nuovo progetto, aprirne uno esistente o quello più recente, oppure accedere ai dati globali, che sono utilizzabili a livello di Enterprise, cioè dell'intera azienda.

In Primavera P6, infatti, i dati possono essere definiti a livello globale (quindi validi per la maggior parte dei progetti passati,



presenti e futuri), o associati in maniera esclusiva a un singolo progetto o risorsa. È il caso dei calendari per la schedulazione del lavoro, che possono essere definiti non solo a livello globale ma anche con riferimento a un progetto o a una risorsa specifici.

Per esempio, un'azienda italiana potrebbe avere diversi cantieri, di cui alcuni sul territorio nazionale e gli altri in un Paese Arabo. Per il progetto corrispondente a questi ultimi si potrebbe costruire un Project Calendar ad hoc, avente il venerdì festivo. Per tutti gli altri sarebbe più conveniente adoperare un unico Global Calendar di default, con il sabato e la domenica non lavorativi.

Sono previste ampie possibilità di personalizzazione, sia a livello di amministratore (*Admin Preferences*, nel menu Admin) sia per quel che concerne i singoli utenti (*User Preferences*, nel menu Edit). Per velocizzare le varie operazioni si possono utilizzare i seguenti strumenti: *Command Bar*, *Directory Bar*, *Menu Bar*, *Navigation Bare Toolbar*. La *Status Bar*, situata nella parte più bassa di ciascuna schermata, riepiloga le principali informazioni di carattere generale.

La suite permette di organizzare i progetti secondo una struttura gerarchica ad albero, che prende il nome di *Enterprise Project Structure* (EPS). Articolata su più livelli o nodi, può avere una o più radici e permette di gestire ambienti di pianificazione differenti, consentendo la scomposizione dei programmi nei progetti che li costituiscono.

Scelto o creato il ramo dell'EPS ritenuto più adatto, l'inserimento di un nuovo progetto avviene tramite il menu File, selezionando *New*. Grazie alla struttura di scomposizione dell'organizzazione, definita nel menu Enterprise (scegliendo *OBS*), è possibile associare un *Responsible Manager* a ciascun ramo dell'EPS.

I Project Details offrono la facoltà d'inserire tutta una serie d'informazioni utili per la gestione di ciascun progetto. L'opzione *Customize Project Details* permette di decidere quali Tab visualizzare, nascondendo tutti gli altri.

Le principali voci nei vari Tab dei Project Details sono:

- **Planned Start:** data d'inizio previsto del progetto, stabilita in sede di pianificazione;
- **Data Date:** in fase di schedulazione coincide con la Planned Start e in fase di avanzamento fa invece riferimento all'ultimo aggiornamento del progetto;

- **Finish:** presunta data di fine progetto, in base alla schedulazione corrente. Calcolato ricorrendo al Critical Path Method (CPM);
- **Percent Complete Type:** natura o tipo della percentuale di completamento di un'attività. Può essere fisica o espressa in termini di durata o di ore/uomo.

La **WBS** è articolata su più livelli proprio come l'EPS e l'OBS.

Il lavoro da svolgere è scomposto in *Work Package* e in attività, particolarmente agevoli da inserire in ogni ramo della WBS, una volta che si sia provveduto ad aprire un progetto precedentemente creato, cosa che può essere fatta con Open Project.

Oltre alle WBS Summary, la suite prevede altri quattro tipi di attività. Quelle Task Dependent vengono schedulate in base al calendario che si è deciso di utilizzare, globale o di progetto. Se invece un'attività fosse Resource Dependent verrebbe programmata in base al calendario assegnato alla *Primary Resource*, chiamata a svolgere il compito in questione.

Le attività Level of Effort sono continuative e si estendono per tutta la durata del progetto. È il caso, ad esempio, dell'attività di Project Management o di quelle finalizzate ad assicurare la qualità o la sicurezza. Infine, le (Start/Finish) Milestone rappresentano delle vere e proprie pietre miliari, spesso associate all'inizio (Start) o alla fine (Finish) di un'importante fase del progetto, con riferimento al suo ciclo di vita.

### **La pianificazione**

Per ogni attività, fuorché per le Milestone, è possibile inserire la corrispondente Duration, definita *Original* poiché suscettibile di successive modificazioni, e le relazioni logiche che legano l'attività ai suoi predecessori e successori. Insieme a questi legami (*Finish to Start*, *Finish to Finish*, *Start to Start* o *Start to Finish*), la durata delle varie attività permette la schedulazione del lavoro, che porta all'individuazione del cammino critico, che può anche non essere unico.

Conseguentemente, diventa possibile la determinazione delle date d'inizio e di fine al più presto (Early Start/Early Finish) e al più tardi (Late Start/Late Finish) per ogni attività. Fatto questo, il modulo Project Management di Primavera P6.1 calcola in maniera automatica il Total Float e il Free Float di tutte le attività.

Il primo esprime il massimo ritardo possibile nell'esecuzione di un singolo Task, senza che si compromettano gli impegni presi

con il committente sul completamento dell'intero progetto entro la data prestabilita.

Il secondo esprime invece il massimo ritardo possibile per lo svolgimento di una singola attività senza che ci sia un impatto sull'inizio di quella immediatamente successiva. Salvando la Baseline si mantiene un'istantanea del proprio piano, che diventa un utile riferimento per l'esecuzione del progetto.

La suite permette di costruire dei vincoli temporali per ogni attività:

- **As Late As Possible:** il Task viene ritardato il più possibile, magari per far fronte a ritardi negli approvvigionamenti, e la logica reticolare viene rispettata;
- **Finish On:** indica il giorno in cui deve concludersi l'attività, nel rispetto della logica reticolare;
- **Finish On or After:** specifica la giornata prima della quale il Task non può terminare, sempre nel rispetto della logica reticolare;
- **Finish On or Before:** impone il completamento entro una certa data, senza alterare la logica reticolare;
- **Mandatory Finish:** a prescindere dalla logica reticolare, l'attività deve obbligatoriamente concludersi nel giorno indicato, qualunque cosa succeda;
- **Mandatory Start:** permette di forzare la logica reticolare affinché il Task rispetti la data d'inizio imposta;
- **Start On:** indica il giorno in cui deve iniziare l'attività, nel rispetto della logica reticolare;
- **Start On or After:** specifica il primo giorno utile per la fine del Task, rispettando la logica reticolare;
- **Start On or Before:** impone l'inizio entro una certa data, purché la logica reticolare sia rispettata.

### **Avanzamento, monitoraggio, controllo e reportistica**

Il modulo Project Management non è soltanto un potente strumento di pianificazione ma anche un tool per il monitoraggio e il controllo degli avanzamenti. Così, per esempio, diventa possibile confrontare la "Schedule Percent Complete" (percentuale di avanzamento prevista in base al piano originario, che costituisce la Baseline) con la "Performance Percent Complete" (percentuale di avanzamento effettiva). La prima sta al Planned Value Cost come la seconda sta all'Earned Value Cost. Poiché il "Budget At Completion" è il "Baseline Total Cost",

moltiplicandolo per la "Schedule Percent Complete" si ottiene il Planned Value Cost, la cui curva prende anche il nome di BCWS (*Budgeted Cost of Work Scheduled*).

Il prodotto fra "Budget At Completion" e "Performance Percent Complete" porta invece all'Earned Value Cost: per indicare questo concetto si parla anche di BCWP (*Budgeted Cost of Work Performed*). Alle due voci appena esaminate occorre aggiungere anche l'*Actual Cost of Work Performed*, (ACWP). Grazie a questi parametri diventa possibile tenere sotto controllo l'efficacia ( $\text{Schedule Performance Index} = \frac{\text{Earned Value Cost}}{\text{Planned Value Cost}}$ ) e l'efficienza ( $\text{Cost Performance Index} = \frac{\text{Earned Value Cost}}{\text{Actual Cost of Work Performed}}$ ) con cui si sta procedendo nell'esecuzione del progetto.

Primavera P6.1 offre anche una reportistica personalizzabile: nel menu Tools è disponibile lo strumento denominato Report Wizard, utile per la creazione guidata della reportistica più in linea con le proprie necessità.

Il modulo Timesheets si rivolge alla totalità delle persone che, a vario titolo, sono coinvolte nel progetto. E infine, il modulo Methodology Management costituisce una sorta di grande Repository, in cui inserire tutti i progetti consolidati e dar vita a una vera e propria Best Practice aziendale, da utilizzare come utile riferimento per il futuro.

## **MS-Project e P6 a confronto**

I due programmi presentano differenze sin dalla fase di inserimento dati, dove già si comincia a comprendere come Primavera Project Planner sia un software nato appositamente per la programmazione operativa di progetti civili ed edilizi, mentre Ms-Project è stato progettato per aiutare un project manager nello sviluppo di un qualsiasi tipo di progetto. Si prosegue ora il confronto approfondendo le caratteristiche dei programmi, così come si sono presentate inserendo i dati relativi al caso di studio il "People Mover" di Bologna, descritto nel capitolo quarto.

### **MS-Project 2007**

Aperto Ms-Project e osservando la schermata principale del programma, sono evidenti sin da subito le affinità con gli altri programmi di Microsoft ed, in particolare, con Microsoft Excel. Analogie confermate dall'efficace interfaccia dati tra i due programmi; infatti, tutte le relazioni grafiche che Ms-Project offre (Relazione Flusso di Cassa, Relazione Riepilogo Costi

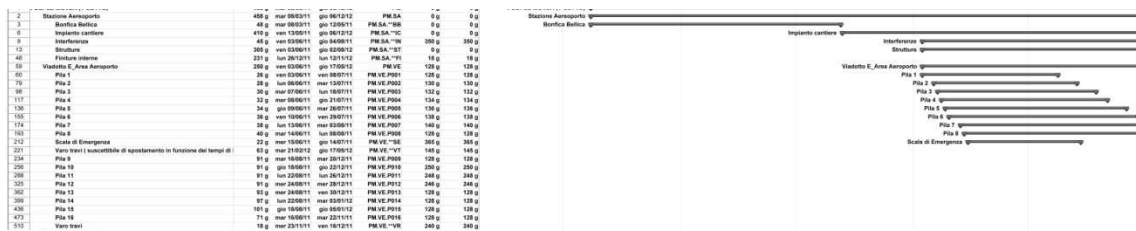
Risorse, Relazione Riepilogo Lavoro Risorse, ecc.) si visualizzano in Excel, sia a livello di grafici sia a livello di dati numerici. La familiarità di Project con gli altri software del pacchetto Microsoft fa sì che la personalizzazione della schermata, l'inserimento dei dati, la ricerca di comandi siano intuitivi e flessibili.

Il primo passo che un project manager compie per comprendere, analizzare e organizzare un progetto è la WBS (Work Breakdown Structure), ossia l'elenco e l'insieme delle attività, gerarchicamente organizzate e collegate. Project non offre la possibilità di creare la WBS e, di conseguenza, visualizzarla, ma solo di definire i codici e di rinumerarli in caso di necessità. I codici, inoltre, sono molto rigidi nella loro definizione; infatti, se si hanno attività che prevedono un codice formato in alcuni casi da quattro caratteri (sia numerici sia letterali) e in altri da due o tre, Project provvede a riempire i caratteri mancanti con degli asterischi. Inoltre, si è verificato come sia preferibile inserire i codici WBS in un secondo momento, dopo l'inserimento di tutte le attività, sia cardine sia elementari; infatti, se si inseriscono o si eliminano delle attività, Project non genera il nuovo codice né modifica quelli delle attività successive, controlla solamente che il codice che si va ad inserire sia univoco. Se, al contrario, si modifica il codice dell'attività amaca, Project automaticamente modifica i codici delle attività elementari, legati alla suddetta attività amaca.

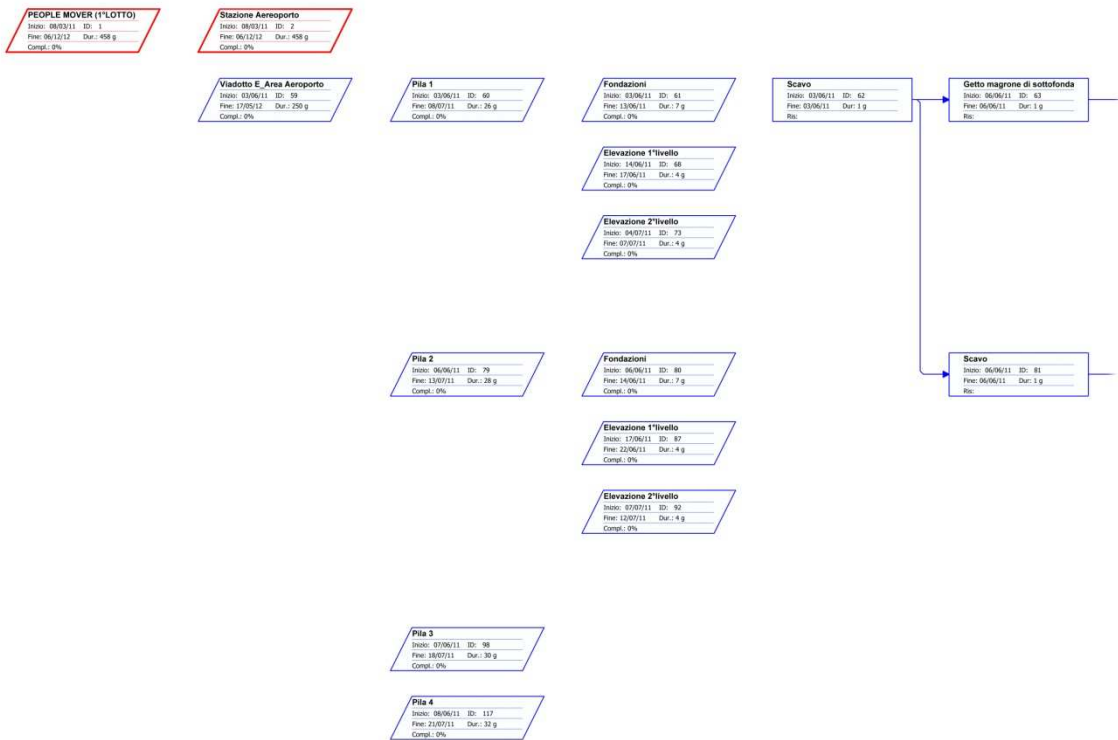
Le analogie tra Project ed Excel sono confermate anche quando si inseriscono le attività, si modificano e si assegnano predecessori e successori. Il software interpreta le attività come dati o celle e non attività in quanto tali e l'assenza di una WBS sottolinea quest'aspetto. Infatti, la determinazione delle attività cardine, amaca ed elementari è gestita tramite il comando Struttura attraverso "rientra" o "annulla rientra"; inoltre, per assegnare predecessori e/o successori è sufficiente ricordare il numero della cella e non l'attività in sé. Molto utile e veloce è la possibilità di modificare un'opzione comune a più attività, selezionandole contemporaneamente. Questa particolarità, però, non induce il programmatore a riflettere sulle modifiche che apporta alle attività.

Dopo aver inserito tutti i dati necessari alla definizione del diagramma di Gantt, per un progettista è molto utile e importante visualizzare il percorso critico, quel percorso che condiziona in modo determinante il conseguimento degli obiettivi del progetto (normalmente il cammino più lungo in termini di tempo). In

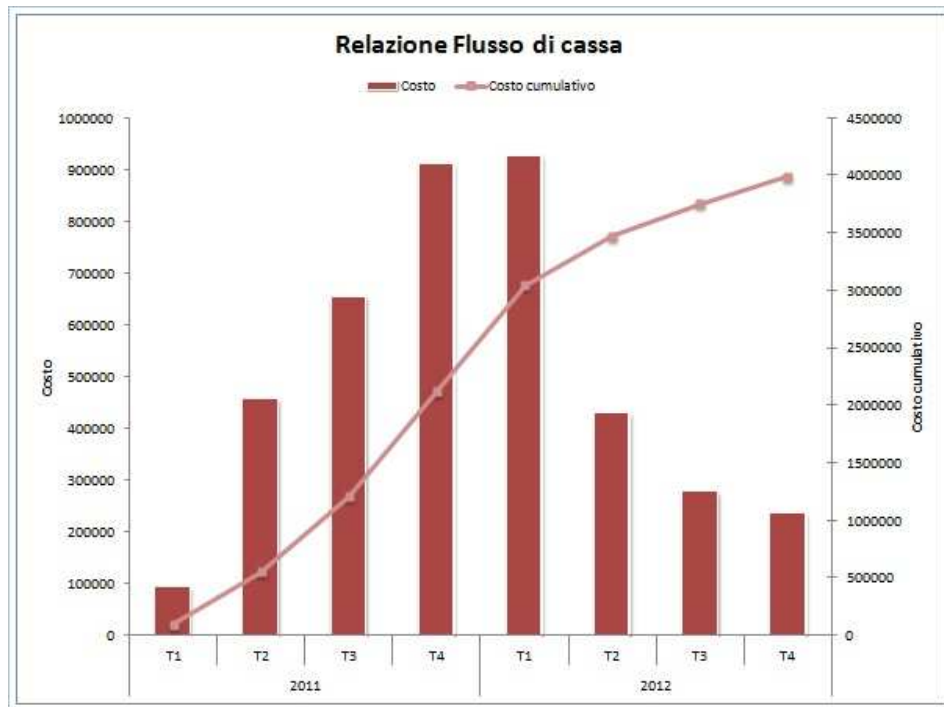
Project è necessario apportare delle modifiche alla normale visualizzazione del diagramma di Gantt per poter vedere rappresentati il percorso critico e le informazioni basilari per una buona comprensione della programmazione. Inoltre, quando un progetto è complesso e include un elevato numero di attività e l'unica possibilità per avere una visione completa del progetto è impacchettare le stesse, mostrando solo le attività amaca, Project non prevede la possibilità di visualizzare il percorso critico e, quindi, l'unico modo per poter esaminare il critical path è fare delle stampe di grandi dimensioni, non facilmente maneggiabili e gestibili.



Il percorso critico è visibile anche nel diagramma reticolare, che permette di avere importanti informazioni sulle attività, personalizzando le caselle con le informazioni che più si ritiene importanti. Aspetto negativo del diagramma reticolare di un progetto complesso e con molte attività è anche in questo caso una visualizzazione completa ed efficace; infatti, le attività cardine e amaca non hanno collegamenti, quindi, risultano isolate e non è possibile comprendere in maniera veloce ed intuitiva la loro posizione all'interno del progetto. Si ripresenta la difficoltà di rappresentare la programmazione in maniera completa.



Per quanto riguarda l'assegnazione delle risorse, Project offre la possibilità di creare gruppi, di distinguere tra risorsa tipo lavoro, tipo materiale, tipo costi, di assegnare un costo/orario alla risorsa e un diverso calendario in base alle necessità, creando anche un apposito calendario, con differenti turni di lavoro. Completata l'assegnazione, è possibile visualizzare i risultati del lavoro delle risorse, dei costi previsti o preventivati, del lavoro rimanente delle risorse, dei costi realizzati tramite delle relazioni grafiche, esportate in Excel, che prevedono grafici e dati effettivi.



### Primavera Project Planner P6.0

Che Primavera Project Planner sia un programma completamente diverso da Ms-Project è evidente sin dall'installazione del software e dall'apertura del programma, che prevede l'inserimento di un Login Name e di una Password, in quanto P6 offre la possibilità di gestire il progetto tramite diversi utenti. L'interfaccia iniziale è tutt'altro che intuitiva, così come ogni operazione che si va ad affrontare, ma ciò impone al progettista di riflettere e di ragionare sulla programmazione che si accinge a definire.

Al contrario di Project, in P6 per poter inserire le attività devi impostare la WBS, creando un codice che si può modificare liberamente; in base alla posizione dell'attività, che è facilmente gestibile attraverso delle frecce che spostano l'attività in alto, in basso, a destra e a sinistra, l'attività diventerà un'attività cardine o *milestone* o un'attività amaca, perché le attività elementari, a cui assegnare i legami, la durata, le risorse, predecessori, successori, ecc, andranno inserite solo in un secondo momento, quando la WBS sarà completata. La WBS può essere visualizzata sia come elenco (*WBS Table*) sia come diagramma ad albero (*Chart View*), riferimento importante per comprendere velocemente la posizione di un'attività all'interno dell'intero progetto. Nel caso in cui si debba cancellare un'attività dalla WBS, P6 non aggiorna automaticamente i codici ed, inoltre, non



torna indietro e se erano già assegnate attività elementari, legami, risorse, ecc. il programma cancella tutto.

WBS Code	WBS Name
PM	People Mover - Bologna
PM.SA	Stazione Aeroporto
PM.VE	Viadotto "E" Area Aeroporto
PM.PA	Ponte sull'Autostrada
PM.VG	Viadotto "G"
PM.VG.P019	Pila 019
PM.VG.P019.01	Impianto Cantiere
PM.VG.P019.02	Fondazioni
PM.VG.P019.03	Elevazione 1° Livello
PM.VG.P019.04	Elevazione 2° Livello
PM.VG.P019.05	Pulvino d'appoggio
PM.VG.P020	Pila 020
PM.VG.P020.01	Impianto Cantiere
PM.VG.P020.02	Fondazioni
PM.VG.P020.03	Elevazione 1° Livello
PM.VG.P020.04	Elevazione 2° Livello
PM.VG.P020.05	Pulvino d'appoggio
PM.VG.P021	Pila 021
PM.VG.P021.01	Impianto Cantiere
PM.VG.P021.02	Fondazioni
PM.VG.P021.03	Elevazione 1° Livello
PM.VG.P021.04	Elevazione 2° Livello
PM.VG.P021.05	Pulvino d'appoggio

WBS Table

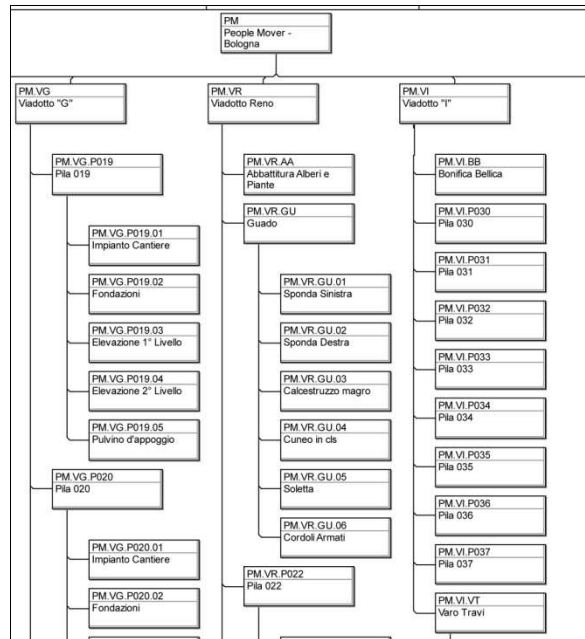
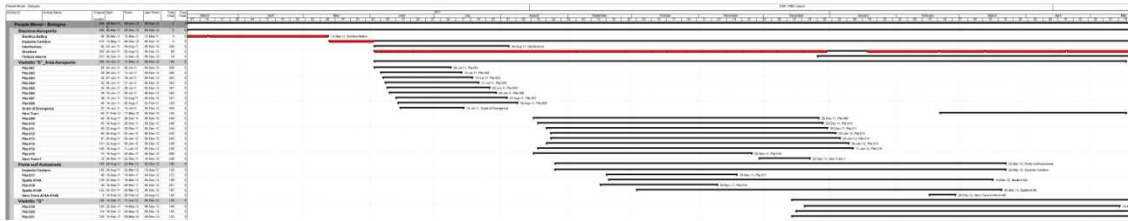


Chart View

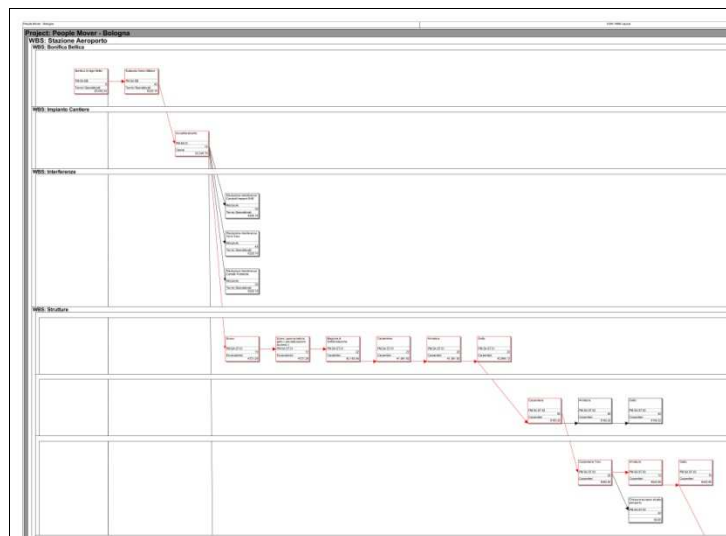
Il passo successivo è assegnare ad ogni attività cardine le attività elementari. P6 crea anche per tali attività un codice, che può essere personalizzato, ma quando si inserisce un'attività in un secondo momento, il programma la numera partendo dall'ultima attività inserita in ordine di tempo +10, ovviamente può essere modificata manualmente e P6 controllerà se il codice è univoco. Quando, invece, l'attività si elimina anche Primavera come Ms-Project non rinumerava automaticamente i codici. Assegnate le attività elementari, attraverso l'*Hide Detail Window* è evidente quanti dettagli possono essere inseriti per una singola attività, dal tipo di durata al tipo di calendario, alle risorse, ai legami, ai tipi di vincoli.

Per poter cominciare a visualizzare il diagramma di Gantt si inseriscono le durate di ogni attività e soprattutto i legami tra le stesse; in P6 per poter assegnare predecessore e/o successore è importante tenere a mente il percorso logico della fasi di costruzione, in quanto si sceglie l'attività e non il numero della cella, cui corrisponde l'attività prescelta, come in Ms-Project. A confermare che Primavera Project Planner è un software sì complicato ma sviluppato per la programmazione operativa di cantieri civili ed edilizi, è la resa grafica dei risultati che si ottengono. Infatti, le informazioni base utili ad un progettista per

programmare al meglio sono fornite di default, ovviamente possono essere modificate secondo le preferenze degli utenti. Il percorso critico è visibile anche nel diagramma di Gantt del progetto tutto impacchettato, ciò permette al programmatore di inquadrare le attività critiche anche se il progetto è complesso e contiene un elevato numero di attività.



Anche il diagramma reticolare che genera P6 è di più facile lettura rispetto a quello creato da Project, in quanto le attività cardine e amaca non sono caselle ma riquadri al cui interno sono posizionate le attività elementari con i loro legami, in tal modo il programmatore ha sempre presente la posizione delle attività nel quadro generale del progetto.



Dall'inserimento dei dati alla visualizzazione dei risultati si comprende come Ms-Project è più intuitivo e di più facile uso per chi è alle prime armi con programmi di programmazione, mentre Primavera Project Planner sia più impegnativo ma le rappresentazioni grafiche sono più adeguate all'uso che ne fa un project manager nel campo dell'edilizia, delle costruzioni in generale.

Per quanto riguarda la programmazione vera e propria e quindi i risultati in termini di tempi, la programmazione *ASAP* (*As Soon As Possible*) fornisce gli stessi esiti, sia per il progetto totale (data di inizio: 8 marzo 2011; data di fine: 6 dicembre 2012), sia

per le attività cardine intermedie (Stazione Aeroporto, Viadotto "E"\_Area Aeroporto, Ponte sull'Autostrada, Viadotto "G", Viadotto "Reno", Viadotto "I", Sottopasso Ferroviario, Viadotto "L").

Le maggiori e rilevanti differenze si riscontrano nella programmazione *ALAP (As Late As Possible)*.

Quest'aspetto ci fornisce la possibilità di approfondire un significativo nuovo approccio al project management, introdotto dal Dott. Eliyahu Goldratt nel 1997 e definiti "Agile Project Management" o "Extreme Project Management". In entrambi i casi, siamo di fronte al tentativo di facilitare, con strumenti più immediati, la gestione dei progetti caratterizzati da un'elevata dose di incertezza, di rischio e di cambiamento.

### **Il metodo Critical Chain di E.Goldratt**

Il proposito della metodologia di Goldratt è quello di **comprimere i tempi di progetto** e di raggiungere una migliore affidabilità della programmazione. In sostanza, si propone di evitare una serie di elementi negativi che sono la frequente causa di consegne oltre il budget o il tempo stabilito.

Il Critical Chain Method (CCM) deriva fundamentalmente dalla "Theory of Constraints" (TOC), una teoria nata dall'esperienza dello stesso Goldratt che, in una visione sistemica, punta al miglioramento di performance dei processi organizzativi. La TOC, in poche parole, afferma che il rafforzamento di un sistema, e il raggiungimento del suo obiettivo, passa inevitabilmente dall'individuazione e dal consolidamento del suo elemento più debole (vincolo). Vediamo ciò che Goldratt ha ottenuto applicando questa teoria al Project Management.

### La debolezza delle programmazioni "tipiche"

Il metodo di Goldratt parte dall'osservazione dell'uso delle tecniche del tradizionale Project Management e in particolare dal consueto impiego del CPM (Critical Path Method). Sebbene l'analisi PERT consenta di trattare le stime in modo probabilistico, per semplicità i Project Manager preferiscono trattare, con la tecnica CPM, le durate delle attività in modo deterministico. Tuttavia, la valutazione dei fattori contingenti che possono far slittare un'attività oltre il tempo tecnico probabile non è ignorata. Una prassi diffusa induce i PM a inserire, nel loro piano di progetto, delle durate che sono la somma del tempo

tecnico e di un certo margine temporale di sicurezza. In sostanza, secondo Goldratt: l'incertezza è controllata accrescendo la durata delle attività. Questa prassi conduce a una programmazione strutturata sull'ipotesi peggiore, che dovrebbe essere la garanzia del completamento entro la data prevista. Eppure, anche se non accadono gli imprevisti valutati nella maggiorazione delle stime, il progetto rischia di terminare oltre la data stimata. Secondo Goldratt, è proprio l'inserimento di una durata aggiuntiva di sicurezza senza indicarla come tale a costituire un problema. Questa "sicurezza nascosta", anche per il fatto che viene posta su ogni singola attività, rischia di compromettere la puntualità del progetto. I motivi sono spesso legati a tratti tipici del comportamento umano riscontrabili anche nel mondo dei processi organizzativi.

### Sindrome dello studente

Come primo motivo, si può osservare un'abitudine comportamentale che viene chiamata da Goldratt "sindrome dello studente". Con questo termine, egli intende quella tendenza a procrastinare fino all'ultimo momento utile l'avvio di un'attività, proprio ciò che fanno molti studenti quando devono preparare un esame e pensano di impiegare meno tempo di quello a disposizione. Come gli studenti, molti operai non completano quanto prima le loro assegnazioni. Anzi, concentrano i loro sforzi verso la fine del tempo stimato e si riducono sovente a un lavoro concitato per effettuare una consegna all'ultimo minuto. Inutile affermare che questo atteggiamento spreca, già all'inizio dell'attività, il margine di sicurezza programmato. Inoltre, se dovesse effettivamente presentarsi un imprevisto, non si avrebbe più a disposizione il tempo preventivato per gestirlo. L'attività, dunque, potrebbe solo ritardare.

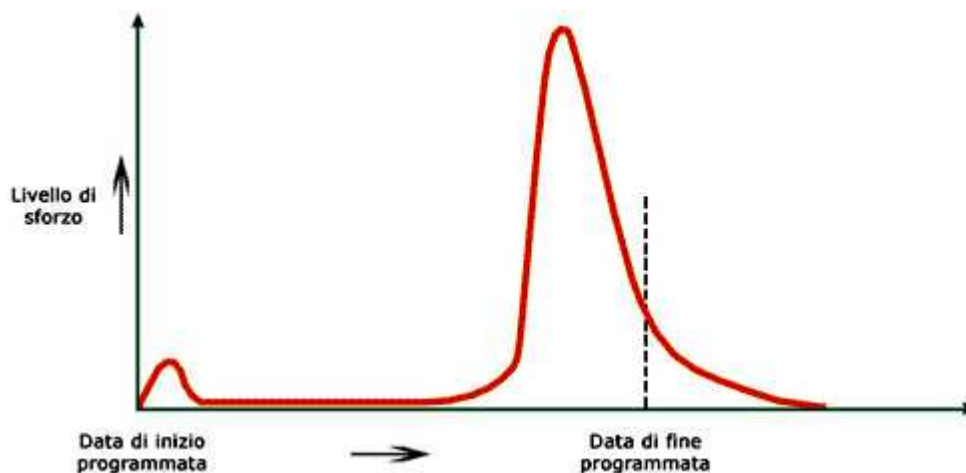


Figura 1. Sindrome dello studente

### Legge di Parkinson

C'è un altro aspetto che unito al primo sembra vanificare quella "sicurezza nascosta" inserita nelle durate delle attività. Si tratta della legge di C. Northcote Parkinson, la quale afferma che il lavoro si espande in modo da riempire il tempo a disposizione per completarlo (The Economist, Novembre 1955). In sostanza, questo significa che una risorsa completerà la propria attività assegnata in un tempo non inferiore a quello stabilito, dilaterà quindi la durata delle operazioni - incrementando i costi - con l'impiego di tutto il tempo a disposizione. A questo punto si può aggiungere un altro aspetto. Anche se la risorsa finisse in anticipo il suo lavoro, potrebbe trovare sconveniente segnalarlo perchè costituirebbe un precedente utilizzabile nei futuri processi di stima. Se l'obiettivo è finire in tempo, e non finire prima, la risorsa potrebbe preferire garantirsi la sicurezza di raggiungere lo scopo e magari il premio. Questo aspetto andrebbe considerato sia nell'accertamento del termine delle attività sia nel coinvolgimento delle risorse operative nei processi di stima.

### Lavoro "Multi-Tasking"

Un altro elemento può causare il ritardo di un'attività o di un progetto, a parere di Goldratt. Si tratta dell'esecuzione del lavoro Multi-Tasking. La cultura che induce a iniziare il lavoro prima possibile e a impostare come durata un valore pessimistico (stima probabile + margine) conduce sovente al lavoro frammentato su più attività o progetti. Le risorse potrebbero pensare di far progredire più attività nello stesso periodo passando da una all'altra. Del resto, la pressione che sulle risorse possono fare i PM, preoccupati unicamente dei loro progetti, può indurre una risorsa a modificare la priorità delle sue attività per non scontentare nessuno.

Tuttavia, questo passare da un'attività incompiuta all'altra conduce allo smarrimento del margine per la gestione del rischio e a protrarre il completamento delle varie attività. Immaginiamo, ad esempio, di dover terminare tre progetti. Come si può vedere osservando il Caso1 di figura 2, ciascun progetto ha una sola attività di due settimane e una programmazione che prevede il completamento di ogni attività prima di passare alla successiva. Se frammentassimo il lavoro di ogni progetto in due parti, come rappresentato nel Caso2, otterremmo il completamento di ogni

attività in 4 settimane, in un periodo che è sostanzialmente il doppio. La Figura 2 rappresenta appunto questa estensione del tempo richiesto (lead-time), senza però tener conto del tempo di set-up che occorre quando si passa da un'attività all'altra.

In definitiva, in una situazione simile, ogni attività rischia di terminare più tardi e rimane aperto l'interrogativo su dove posa finire il margine di sicurezza collocato originariamente.

Caso1		1s	2s	3s	4s	5s	6s
	Pj1	A	A				
	Pj2			B	B		
	Pj3					C	C
Caso2		1s	2s	3s	4s	5s	6s
	Pj1	A			A		
	Pj2		B			B	
	Pj3			C			C

Figura 2. Effetto del "Multi-Tasking"

### Struttura del progetto

Un altro elemento che può compromettere la "sicurezza nascosta" è insito nella struttura della programmazione. Nel momento in cui un'attività ha più predecessori (Figura 3), il ritardo di uno solo di essi causerà il ritardo dell'attività successore. La conclusione anticipata di un unico predecessore, al contrario, non si propagerà affatto e rimarrà confinato alla sola attività conclusa in anticipo. Il tempo risparmiato, dunque, verrà sprecato.

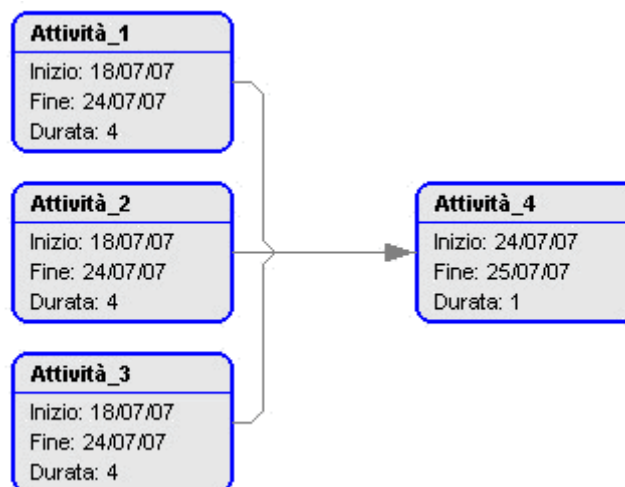


Figura 3. Predecessori

Inoltre, a causa della programmazione per date certe, anche se tutti i predecessori finissero prima l'avvio anticipato dell'attività successore è improbabile. La risorsa assegnata a quest'ultima, infatti, potrebbe non essere disponibile ad avviare i lavori in quel dato momento. Il tempo guadagnato su un'attività, quindi, potrà essere difficilmente utilizzato per compensare i ritardi di progetto.

### Il metodo Critical Chain

Per ovviare a tutti gli inconvenienti riscontrati nelle prassi delle programmazioni tipiche, Goldratt propone un insieme di tecniche per meglio gestire la pianificazione e il controllo di un progetto:

1. Tagliare le stime altamente probabili sulla durata delle attività prediligendo valutazioni medie
2. Programmare all'indietro a partire dalla data di fine del progetto, questo dovrebbe assicurare l'inizio dei lavori solo quando è necessario iniziarli.
3. Recuperare il margine escluso dalle stime disponendo degli ammortizzatori complessivi (buffer) nel piano di progetto.
4. Utilizzare il consumo dei buffer per controllare l'andamento del piano.

### Riduzione delle durate

Se inglobare il margine di sicurezza nella durata delle attività mette in serio pericolo la puntualità del progetto, occorre modificare questa prassi effettuando un cambiamento culturale nei processi di stima. Secondo Goldratt, è necessario modificare la tendenza a utilizzare valutazioni "sicure" in favore di un approccio probabilistico, ossia effettuare delle stime che abbiano solo il 50% di successo.

Eventualmente, di fronte a stime altamente probabili, è possibile applicare un taglio proprio al loro 50%. Questo metodo, che Goldratt raccomanda, deve essere inteso dalle risorse come un nuovo modo di operare che non intende ignorare i rischi. Infatti, la protezione tagliata dalle diverse attività verrà aggregata e strategicamente inserita come "ammortizzatore" per più attività e per l'intero progetto.

### Schedulazione ALAP

La metodologia Critical Chain propone di programmare dalla data di fine definita per il progetto. Il piano viene dunque sviluppato all'indietro, ottenendo la data di inizio delle attività e del progetto

"al più tardi possibile" (As Late As Possible, ALAP). Tale metodo differenzia la pianificazione Critical Chain da ciò che spesso accade nella programmazione tradizionale, ossia partire da una data di inizio per ottenere, impostando la partenza delle attività "al più presto possibile", la data di fine del progetto. Questo approccio conferisce degli indubbi vantaggi come:

- Trovarsi all'inizio del progetto solo le attività che è indispensabile iniziare
- Ridurre il work in progress (WIP), quindi posticipare o ridurre i costi
- Diminuire le ri-lavorazioni. Questo vantaggio è ottenuto consentendo alle scarse conoscenze di inizio progetto di crescere fino al momento in cui è indispensabile avviare i lavori.

Tuttavia, se si valutasse la questione in termini di percorso critico tradizionale, si potrebbe obiettare che la programmazione ALAP ha lo svantaggio di rendere critiche anche le attività che potrebbero non esserlo. Si vedrà come Goldratt risponda a questo problema con l'ingegnoso sistema dei buffer.

#### Risoluzione dei conflitti

Quando si programma un progetto con il tradizionale "Critical Path Method", il percorso critico può essere considerato prima ancora di aver livellato le risorse, ossia con la sola considerazione dei legami logici tra le varie attività (impostazione a risorse infinite). Nel metodo proposto da Goldratt, la sequenza o catena (Chain) più lunga di un progetto, quella appunto critica, può essere individuata aggiungendo all'analisi dei legami logici fra attività quella sulle dipendenze fra risorse.

Anche quest'ultime sono unite tra loro da dei vincoli di dipendenza e, a partire dalla data di fine del progetto, occorre valutarli per risolvere eventuali sovraccarichi. Del resto, anche un ritardo per indisponibilità di risorse può compromettere la puntualità di un progetto.

Si potrebbe quindi affermare che il livellamento non è solo una procedura per rendere realizzabili le attività pianificate, ma un'operazione che disegna il piano e la catena critica. Osservando la Figura 4, si può notare come il livellamento della risorsa "A" abbia ridisegnato il percorso delle attività critiche.





Figura 4. Livellamento

### Inserimento dei buffer

Nel metodo Critical Chain i buffer sono ammortizzatori che vengono posizionati all'interno del progetto per compensare l'eliminazione del margine dalla stima delle durate. Nel reticolo delle attività, possono essere disposti due tipi di buffer.

- Il *Project Buffer* viene inserito alla conclusione del progetto per aggregare i margini di sicurezza tolti dalle attività critiche
- Il *Feeding Buffer* (buffer di alimentazione) viene posto su tutti i percorsi che alimentano la catena critica. Ossia nel punto in cui le varie catene di attività non critiche si innestano a quella critica.

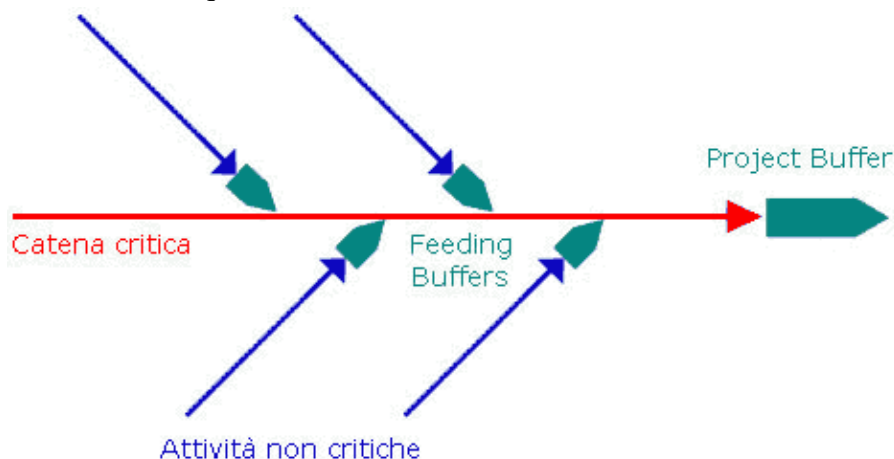


Figura 5. Posizione dei buffer

Sebbene i buffer abbiano il compito di raccogliere le "sicurezze nascoste" eliminate, la loro dimensione non è pari al valore tagliato dalle stime "sicure", ovvero il loro 50%. Se così fosse, si otterrebbero dei buffer della stessa durata delle catene a cui fanno seguito. In realtà, dato che nell'aggregazione l'ammontare della protezione necessaria è inferiore alla somma di ogni singola "sicurezza nascosta", Goldratt raccomanda un valore pari al 50% della durata complessiva della catena da proteggere. Osservando la Figura 6, il valore raccomandato dei buffer dovrà essere simile a quella ottenuto dopo il dimensionamento (i numeri si riferiscono alle durate).

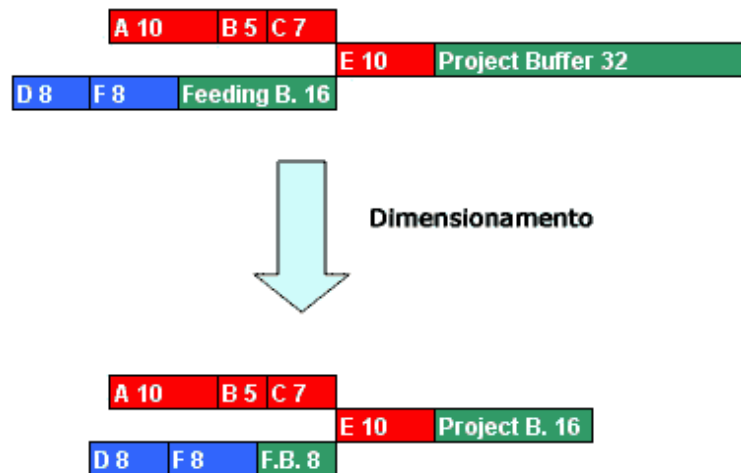


Figura 6. Dimensionare i buffer

### Gestione dei buffer

La gestione dei buffer, e in modo particolare del Project Buffer, è la chiave per tracciare la performance del progetto. Ogni volta che un'attività sulla catena critica è in ritardo, il consumo del Project Buffer aumenta e la sua analisi consente al PM di ottenere preziose informazioni. Con quest'ultime, infatti, egli potrà modificare le stime di partenza, intraprendere azioni correttive e rinegoziare per tempo la data di consegna con il cliente. Il Buffer Management si propone, quindi, come uno strumento importante sia per prendere delle decisioni sia per formulare delle previsioni.

### Conclusioni

Sebbene il metodo sia relativamente nuovo e ancora bisognoso di ricerche per ottimizzarne l'utilizzo, in particolare per quanto concerne la gestione delle stime, l'amministrazione dei buffer nel processo di controllo e l'integrazione con costi e qualità, il metodo apre alla valutazione di fattori diversi, non solo algoritmici, e propone un approccio davvero interessante.

Se si volesse sintetizzare i tratti caratteristici del metodo, potremmo elencare i seguenti punti:

- un cambiamento nella cultura della pianificazione dei progetti;
- scoraggia il lavoro Multi-Tasking, in modo particolare sulla catena critica, e impedisce i sovraccarichi di lavoro;
- protegge la data di fine del progetto aggregando il margine temporale di sicurezza alla fine della catena critica e sulle sue giunzioni;

- con l'obiettivo di iniziare più tardi e finire prima, riduce la probabilità di cambiamenti in corso d'opera richiesti dai committenti.

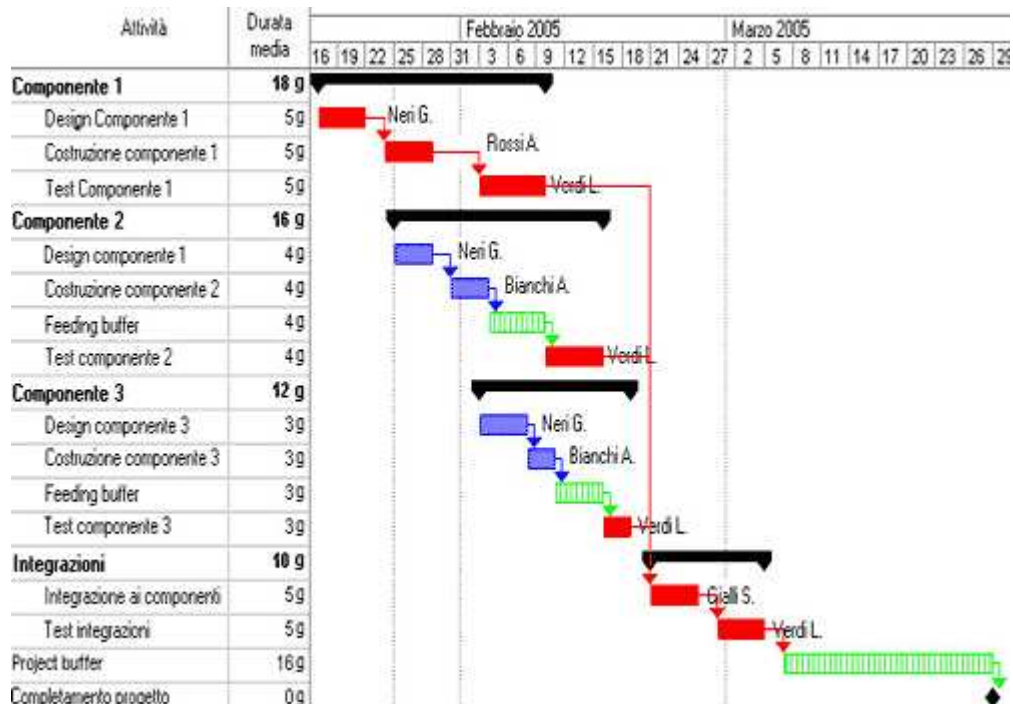


Figura 7. Esempio di programmazione "Critical Chain"

Fatto questo breve approfondimento sulla teoria di Eliyahu Goldratt per un approccio più snello alla gestione dei progetti, che ottimizzi i tempi tenendo conto delle falle tipiche dei metodi tradizionali, torniamo ad analizzare i risultati ottenuti dalla programmazione ALAP con Ms-Project e con Primavera Project Planner P6, esaminando quelle che possono essere le cause di una così differente programmazione.

Analizzando in dettaglio la programmazione ALAP sviluppata da Project, si nota come il software assegna a quelle attività che non hanno il successore, le attività cosiddette open-ended, come data di fine o la data di fine del progetto o la data finale dell'ultima attività del gruppo della WBS di cui quell'attività fa parte o meglio che Project ha considerato come tale. E' come se Project creasse un'attività fittizia alla fine della programmazione, come ultimo nodo, che diventa il successore di tutte quelle attività, che in realtà non hanno un successore. Inoltre, in Project non è possibile visualizzare l'EarlyStart, il LateStart, l'EarlyFinish e il LateFinish e ciò non permette una visione completa e dettagliata della programmazione. La programmazione ALAP elaborata da Ms-Project non è attendibile; infatti, la realizzazione del Guado

del Fiume Reno, che deve avvenire in un determinato periodo dell'anno, ossia durante i mesi di secca del fiume (maggio-settembre), deve essere riprogrammata, in quanto Project, pur avendo impostato il vincolo di Inizio al 02/05/2011 all'attività di "Abbattitura alberi e piante", pianifica l'inizio delle attività successive da ottobre in poi.

A dimostrazione di quanto Primavera Project Planner sia un software ideato appositamente per la programmazione operativa di opere edilizie e civile, P6 offre la possibilità di scegliere come gestire le attività open-ended. Infatti, tra le opzioni del comando "Schedule" c'è la possibilità di spuntare o meno tale preferenza (*"Make open-ended activities critical"*). L'affidabilità del software è confermata dalla programmazione corretta del Guado del Fiume del Reno, che anche nella programmazione ALAP, rimane del periodo di secca del fiume. L'opportunità di visualizzare l'EarlyStart, il LateStart, l'EarlyFinish e il LateFinish consente di avere una maggiore e soprattutto completa e approfondita conoscenza della programmazione e delle possibilità di modifica e di miglioramento della stessa da parte del Project Manager e di tutti gli utenti che ne devono usufruire.

Quest'ulteriore possibilità conferma le considerazioni fatte in precedenza, ossia che Primavera Project Planner, pur essendo un software molto più complicato, poco intuitivo e con una quantità di dettagli da inserire decisamente maggiori rispetto a Ms-Project, aiuta il management ad affrontare direttamente la sfida della programmazione attraverso le più complete funzionalità di analisi dei percorsi critici, livellamento delle risorse, capacity planning, analisi e costruzione della WBS (Work Breakdown Structure) di progetto. Ciò consente ai project manager di determinare le migliori

opzioni per completare i progetti nei tempi previsti, assicurando allo stesso tempo che le date di consegna e le milestones di progetto pianificate siano rispettate, le risorse siano allocate adeguatamente e i costi vengano mantenuti in linea con il budget.

### **Le conseguenze della programmazione operativa sul cantiere**

La programmazione operativa ha come primo obiettivo quello di risolvere problemi relativi alla ottimizzazione dei tempi attraverso un opportuno trattamento delle date e delle durate di esecuzione, proprie delle attività fabbricative componenti e nell'ambito tempi previsti per il conseguimento dei fini costruttivi.

In quanto inerente e connaturata ad ogni programmazione, la *tecnica organizzativa* deve promuovere inizialmente un processo generativo di informazioni che sia poi riconducibile ad un sistema di gestione e di fruizione delle variabili temporali e che, inoltre, consenta di concentrare l'analisi di tali fattori sulla determinazione della strategia di intervento cui siano riferibili i più elevati livelli di produttività, derivanti cioè da una utilizzazione ottimale delle risorse disponibili. Conseguentemente il trattamento dell'aspetto temporale non può in ogni caso prescindere dalle altre variabili, quali metodi e risorse, o costi.

Le determinazioni da assumere in ordine ai tempi e alle date di esecuzione comportano, più o meno implicitamente, valutazioni e scelte di alternative riferite ai processi di lavorazione da attuare. Per cui alla individuazione delle durate, si viene ad associare la conoscenza delle risorse compatibili con i costi unitari ammessi e con le tipologie produttive richieste.

In effetti, se la durata di un'attività è adeguatamente dimensionata e opportunamente collocata nell'arco temporale del processo così da verificarsi il completamento nel termine previsto, tale coincidenza deve potersi intendere come ulteriore sintomo della migliore utenza delle risorse e del minore dispendio nella utilizzazione dei mezzi finanziari impegnati. Quindi ogni programmazione, concepita come sistema di gestione dei tempi, non potrà mai essere considerata avulsa dalla problematica e dal contesto più generale della *pianificazione*.

La ricerca tecnologica e l'organizzazione operativa riferite alla pianificazione degli eventi fabbricativi di cantiere, ancor più che nella loro attitudine strumentale vengono dalle più avanzate tendenze prospettate come componenti essenziali, teoricamente preminenti sugli altri aspetti che concorrono a definire e qualificare i caratteri della produzione edilizia.

Nella pratica costruttiva è difficile distinguere il contenuto della ricerca tecnologica da quello della organizzazione operativa; si può forse dire che a tale ricerca, nell'edilizia, compete tanto maggior rilievo in quanto i programmi di produzione non possono essere riproposti in maniera uniforme, secondo cicli ripetitivi; attraverso la tecnica si tende ogni volta, a migliorare, perfezionare le caratteristiche dei processi produttivi rispetto a quelli già realizzati, o rinnovandoli o individuando altri processi, inediti.

Nell'attività di organizzazione è invece prevalente il fine di determinare in maniera specifica le condizioni in cui deve

svolgersi il singolo processo costruttivo, così che esso possa attuarsi nel modo più efficiente possibile.

Tecnica e organizzazione si pongono come attività definibili complementari nella realizzazione dei processi di cantiere e nello stesso tempo come premessa concettuale alla pianificazione della costruzione; sono attività complementari nella realizzazione dei processi di cantiere ogni volta che la loro impostazione non consente di fornire, inizialmente, le caratteristiche tecnologiche della produzione da attuare. In tal caso la tecnica tende a stabilire con la precisione necessaria quali sono i processi che, in alternativa, possono essere impiegati; il che permette, se necessario, attraverso un riesame dei dati di partenza, di approfondire ulteriormente l'indagine preliminare e pervenire così alla completa identificazione del tipo di produzione che struttura imprenditoriale e caratteri della costruzione indicano come quello di più conveniente adozione e, quindi, suscettibile di maggior rendimento economico e produttivo.

Tecnica e organizzazione costituiscono parte essenziale della pianificazione della costruzione in quanto è ad esse devoluto il compito di individuare quali sono le combinazioni di fattori e risorse atte a configurare, nel modo più conveniente e conforme, i programmi per la produzione da intraprendere.

L'attività edilizia si rende esplicita nel cantiere inteso come l'organizzazione tecnica dei luoghi nei quali porre in atto un determinato programma di fabbricazione, da eseguire con lavorazioni di prestabiliti materiali da trasformare e componenti intermedi da collocare in sito, mediante l'impiego di mezzi d'opera costituiti da dotazioni meccaniche e da un insieme composito e variabili di operatori, dotati delle qualifiche necessarie allo svolgimento delle lavorazioni, e che si susseguono in conformità al programma.

Il cantiere, l'impianto cioè nel quale si materializza la costruzione, è congegnato in modo da fornire una pluralità di lavorazioni intermedie e concomitanti anche se, in definitiva, unitariamente concepite per un risultato terminale. Entro un periodo limitato di tempo, i cicli operativi si alternano attraverso successivi e molteplici adattamenti e, in concomitanza al progredire della costruzione, mutano le prerogative, le collocazioni e le esigenze dei posti di lavoro.

In edilizia, quindi, vi è, da una parte, un fondamento tecnico imposto dalla natura delle lavorazioni che caratterizza queste secondo processi discontinui; e, dall'altra parte vi è un fondamento organizzativo che induce, come risultato di una

scelta, a quella che potrebbe definirsi la decentralizzazione di attività unificate.

In conclusione, si può affermare che perché la pianificazione e la programmazione di un progetto/cantiere non falliscano ma, anzi, siano efficienti ed efficaci, più elementi spesso completamente differenti tra loro devono interagire e soprattutto avere la capacità di modificarsi nel tempo, con l'avanzamento dei lavori ed è proprio questo il ruolo fondamentale del project manager: pianificare, coordinare e gestire.

## 8. ANALISI ECONOMICO-FINANZIARIE

A un teorico processo edilizio corrispondono molteplici modelli organizzativi del processo. Ogni modello operativo è condizionato da diversi elementi:

- il numero e la tipologia delle fasi, le loro relazioni;
- il tipo, il numero, i ruoli e la responsabilità degli operatori del processo.

I principali operatori che intervengono nei processi edilizi sono i seguenti: - committente

- project manager RdP
- progettisti: generali e settoriali
- direttore dei lavori
- appaltatore e impresa di costruzione
- contraente generale
- concessionario
- produttori di materiali e componenti;

- tipologia dei contratti stipulati fra committente e appaltatore e, per le opere pubbliche, dei contenuti della legislazione che regola il processo.

Nell'ambito dei lavori pubblici, la legislazione attuale ammette due sistemi di realizzazione, due tipologie di contratto:

1. Contratto di Appalto: un Contratto nel quale il Committente assegna attraverso una gara di appalto all'Impresa o a forme organizzate di Imprese la realizzazione dell'opera a fronte del riconoscimento del pagamento di un prezzo, la cui modalità di valutazione è regolata nel contratto stesso.
2. Concessione di Costruzione e Gestione: un contratto nel quale il Committente assegna attraverso una gara all'Impresa o a forme organizzate di Imprese la realizzazione e la gestione economica di una opera, che naturalmente deve produrre reddito, con il vincolo che la remunerazione del costo della realizzazione avviene in tutto o in parte attraverso gli utili di gestione e con il pagamento di una somma.

L'assegnazione della realizzazione dell'infrastruttura di trasporto rapido di massa per il collegamento tipo "People Mover" tra l'Aeroporto G. Marconi e la Stazione Centrale FF.SS. di Bologna è avvenuta tramite un contratto di concessione di progettazione, esecuzione e gestione.

Il rapporto di concessione è disciplinato dal contratto concluso in forma scritta e dai seguenti documenti:

- il Capitolato Speciale;



- i Capitolati Prestazionali:
  - Norme per progettazione definitiva ed esecutiva
  - Impianti di sistema e materiale rotabile
  - Opere al rustico
  - Opere stradali e sottosuolo
  - Opere di finitura
  - Impianti elettrici, speciali di linea, di fermata e di deposito
  - Impianti meccanici di linea, di fermata e di deposito
  - Servizio di conduzione tecnica
  - Servizio di manutenzione
- il Progetto Preliminare posto a base di gara
- l'intera offerta del Concessionario corredata del piano economico finanziario di copertura degli investimenti (PEF)
- chiarimenti ai fini della verifica di accettabilità sotto lo specifico profilo della coerenza e sostenibilità del Piano Economico Finanziario.

L'oggetto della Concessione comprende la progettazione definitiva, la progettazione esecutiva, la realizzazione, la messa in esercizio, la gestione funzionale ed economica, compresa la manutenzione globale, dell'infrastruttura di trasporto denominata People Mover, che collegherà l'Aeroporto G. Marconi e la Stazione Centrale di Bologna.

La concessione ha durata di 35 anni dalla data di stipulazione del suddetto contratto.

Il contratto di Costruzione e Gestione impone al Concessionario di costituire una società di progetto in forma di società di capitali, che consente di separare il fabbisogno finanziario della società da quello del gruppo promotore, nell'interesse dei soggetti finanziatori che hanno fornito il capitale di rischio. I finanziatori non rischiano in questo modo che l'eventuale insolvenza dei promotori possa incidere sul rimborso del proprio prestito, dato che i proventi della gestione dell'opera vengono versati alla società di progetto.

### **Piano Economico Finanziario**

Ai fini dell'analisi concernente la sostenibilità finanziaria dell'iniziativa, è stato realizzato un modello di piano economico finanziario.

Il piano economico finanziario (PEF) è il documento che esplicita i presupposti e le condizioni di base che determinano l'equilibrio

economico-finanziario degli investimenti e della gestione per l'intero arco del periodo concessorio. Esso, pertanto, costituisce lo

strumento che consente di stimare la redditività del progetto giustificando l'entità di tariffe o canoni (nel caso di opere destinate all'utilizzo diretto della pubblica amministrazione) proposti, nonché l'eventuale necessità di contributi pubblici a fronte della realizzazione dell'investimento.

Il PEF è inoltre richiamato dall'art.153 del Codice come elemento fondamentale nella valutazione della proposta. Tale articolo prevede infatti che, tra i differenti profili rispetto ai quali debbono essere valutate le proposte, debba essere considerato il "valore economico-finanziario" del piano. Detto valore, peraltro, costituisce elemento

cardine per le offerte nella successiva fase di gara.

Il piano economico finanziario ("PEF") di un progetto può essere definito come uno strumento di pianificazione strategica e di valutazione reddituale utilizzato nelle decisioni di investimento in grado di valutare preventivamente le opportunità ed i rischi di un nuovo progetto. Un PEF ha la finalità di individuare:

- le capacità di reddito dell'attività che si intende gestire con la realizzazione del progetto (erogazione di servizi o produzione di beni);
- i fabbisogni finanziari correlati alla realizzazione delle opere e dell'investimento nel suo complesso.

Il PEF si sviluppa attraverso un sistema di conti interdipendenti che permette di determinare la convenienza economica di un nuovo progetto d'investimento e la capacità del progetto di rimborsare il debito e di remunerare il capitale di rischio.

Il primo passo da compiere nella predisposizione del PEF consiste nella individuazione di un dettagliato e plausibile insieme di ipotesi da impiegare come base informativa per la costruzione successiva degli schemi di Conto economico e Stato patrimoniale previsionali nonché per il calcolo dei Flussi di cassa generati dall'investimento.

Per una corretta elaborazione di un PEF è necessario elaborare un'approfondita analisi dei seguenti dati di input:

- Ipotesi relative alla tempistica: (anno di inizio costruzione, anno di fine costruzione, anno di fine concessione, etc.);
- Ipotesi tecniche (costi di investimento);
- Ipotesi di gestione operativa (ricavi operativi, costi operativi, utenze, tariffe, etc.);

- Ipotesi di gestione finanziaria (tasso d'interesse, linee di credito, margini sul tasso d'interesse, commissioni bancarie, fattore di sconto, struttura finanziaria, contributo pubblico, etc.);
- Ipotesi fiscali (imposizione fiscale, metodi e aliquote d'ammortamento);
- Ipotesi su riserve (riserva legale, riserva di cassa, riserva di cassa a servizio del debito);
- Ipotesi relative al capitale circolante: tempi medi di pagamento e incassi.

Le date di riferimento prese in considerazione nel modello sono le seguenti:

- Data di inizio concessione: 20 Marzo 2008;
- Data di inizio lavori di costruzione: 08 Marzo 2011;
- Durata lavori di costruzione: 30 Mesi;
- Data di fine lavori di costruzione: 31 Agosto 2013;
- Data di inizio fase di collaudi: 01 Settembre 2013;
- Durata periodo collaudi: 6 Mesi;
- Data fine fase di collaudi: 28 Febbraio 2014;
- Data di inizio gestione: 01 Marzo 2014;
- Durata concessione: 30 anni (comprensivi del periodo di costruzione);
- Data fine gestione/concessione: 19 Marzo 2044;
- Il piano finanziario è stato costruito:
  - Su un orizzonte temporale pari al periodo di costruzione ed il periodo di gestione dell'opera;
  - Su base semestrale.

### **I Costi di Costruzione**

Il totale dei costi di costruzione del Progetto può essere scomposto nelle seguenti macrovoci:

- Opere Civili;
- Impianti.
- Spese Tecniche

Il totale Costi di Costruzione ammonta a circa 89,3 Mln di Euro; la tabella seguente riporta, nel dettaglio, la suddivisione dei costi di costruzione tra le diverse voci.

<b>COSTI DI REALIZZAZIONE</b>		
<b>Opere Civili</b>	<i>Aliquota IVA</i>	Importi (Euro)
Deposito e Officina	10,0%	1.543.610
Fermata (Lazzaretto)	10,0%	1.782.696
Fermata (Aeroporto)	10,0%	1.527.146
Fermata (Stazione FS)	10,0%	1.349.113
Viadotto Luce 25 mt	10,0%	17.273.638
Passarella Evacuazione	10,0%	2.637.800
Ponte sul Reno	10,0%	8.384.331
Spingitubo sotto autostrada/tangenziale	10,0%	3.591.200
Spingitubo sotto linea RFI BO-PD	10,0%	4.623.670
Tratti in Trincea	10,0%	1.047.900
Oneri per la Sicurezza su opere civili	10,0%	850.000
<b>Totale Opere Civili</b>		<b>44.611.104</b>
<b>Impianti</b>		
Spostamento sottoservizi, ripristini, innalzamento linea 132 KV	10,0%	1.328.482
impianti tecnologici di sistema e materiale rotabile	20,0%	34.000.000
Dotazione Ricambi	20,0%	1.800.000
Espropri	20,0%	4.350.000
Oneri per la Messa in Esercizio	20,0%	2.100.000
Spese tecniche e di collaudo	20,0%	1.100.000
<b>Totale Impianti</b>		<b>44.678.482</b>
<b>Totale</b>		<b>89.289.585</b>

### Assunzioni sui ricavi

I ricavi sono stati stimati sulla base delle assunzioni riportate nella tabella seguente:

<b>RICAVI DI GESTIONE</b>				
<b>Passeggeri</b>		Traffico a Tariffa piena	Traffico a Tariffa agevolata	Traffico complessivo
Pax per anno (domanda al 2012)	2012			2.261.574
Pax per anno (domanda al 2015)	2015	1.400.000	1.000.000	2.400.000
Tasso di crescita pax (anno base 2006) fino al 2023				2%
<b>Tariffa (Anno Base 2006)</b>		% Pax	Netto IVA	Lordo IVA
Piena		58%	5,83	7,00
Agevolata		42%	0,42	0,50
IVA sulla tariffa				20%

In merito al numero di passeggeri, è stato stimato un tasso di crescita annuale del numero di passeggeri (a tariffa piena ed a tariffa agevolata) pari al 2% nell'intervallo 2012/2023. Nei restanti anni, è stata assunta una crescita percentuale nulla.

La tariffa agevolata sarà applicata ai dipendenti dell'Aeroporto, agli abbonati ed agli utenti della fermata intermedia "Lazzaretto".

Il modello prende in considerazione l'ipotesi in cui, nel corso del periodo concessorio, il rapporto tra viaggiatori a tariffa piena (58% del totale) e viaggiatori a tariffa agevolata (42% del totale) non subisca variazioni.

### **Valutazione dei risultati**

Una volta assegnate le risorse alle attività elementari, risorse calcolate negli schemi di produzione, sia Ms-Project sia Primavera Project Planner elaborano relazioni e reports, grafici e non, sul lavoro delle risorse, suddiviso per ogni categoria, sui costi previsti e soprattutto sviluppano la cosiddetta "Curva s S" o "Curva Sigmoide".

Prima di analizzare i costi ottenuti dalla programmazione, definiamo il significato di "Curva a S". Le curve sigmoidi o curve a "S" rappresentano su un piano cartesiano ortogonale definito da due assi orientati la progressione dei lavori nel tempo in relazione a particolari parametri. Sull'asse delle ascisse si riporta la scala dei tempi, mentre sull'asse delle ordinate si riporta la scala di una unità di misura dell'avanzamento dei lavori, quale può essere:

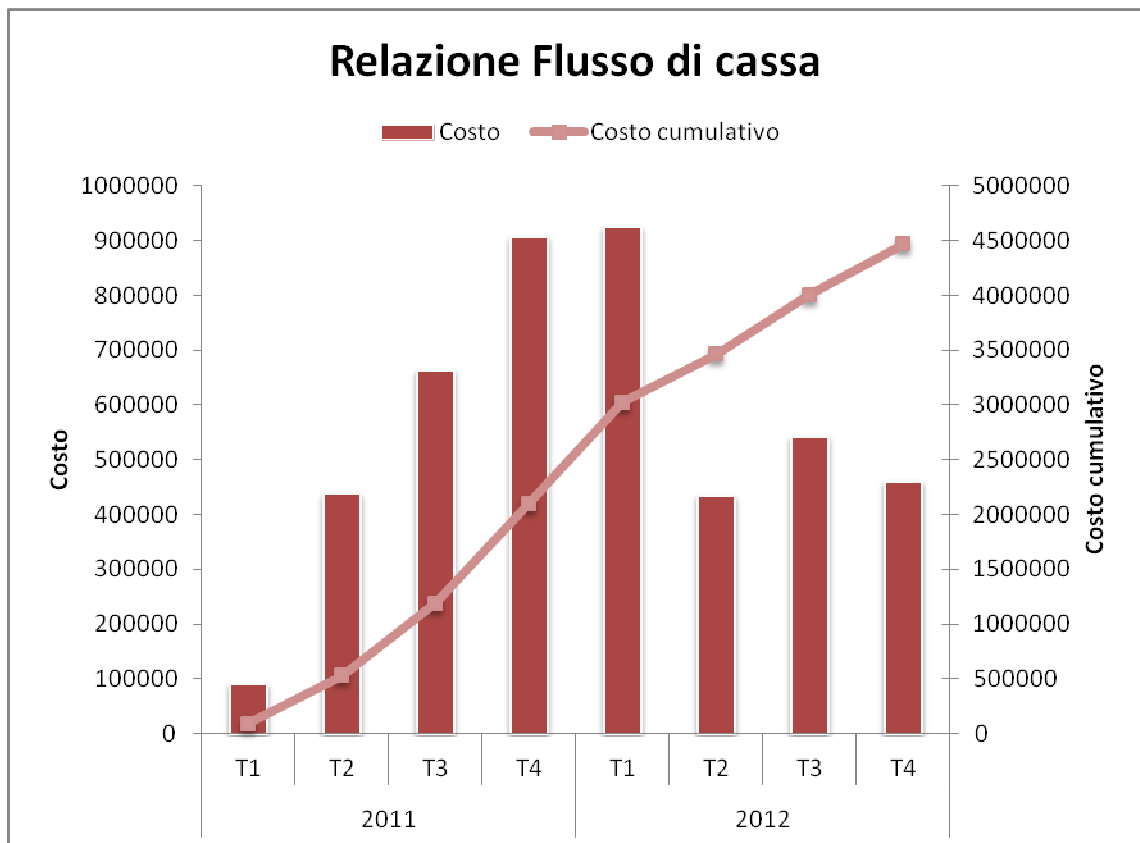
- il costo cumulativo delle opere realizzate
- la quantità di produzione realizzata dall'inizio dei lavori alla data considerata
- il numero di ore-uomo impiegate complessivamente dall'inizio lavori

e così via.

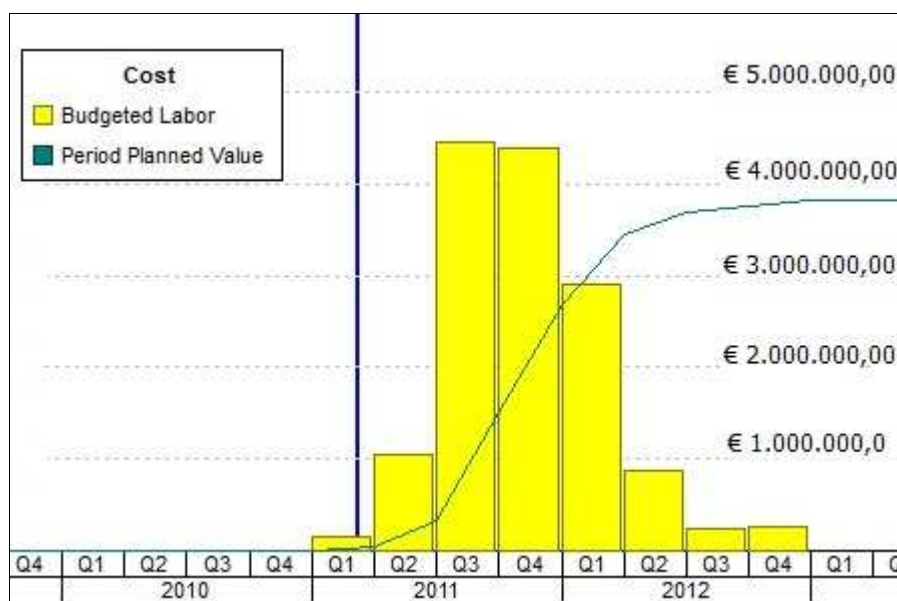
Le curve sigmoidi devono la loro particolare forma al fatto che in ordinata compare sempre il valore cumulativo dell'indicatore dello stato di avanzamento dei lavori. L'ordinata della curva, relativa ad una determinata ascissa, è quindi l'integrale della produzione sino al momento indicato dall'ascissa stesso.

La curva a "S" si ottiene semplicemente sommando la produzione realizzata sino all'unità di tempo indicata.

Le curve sigmoidi sono anche molto utilizzate in corso d'opera per realizzare delle proiezioni a finire. Infatti, una volta costruita la curva relativa all'effettivo andamento dei lavori sino al momento del controllo, se ne può estrapolare il proseguimento sino al termine dei lavori e compararlo con quanto programmato. L'estrapolazione della curva avviene generalmente in base al coefficiente angolare della tangente alla curva stessa nell'ultimo periodo.



Curva a “S” di Ms-Project



Curva a “S” di Primavera Project Planner

I risultati ottenuti a livello di costo sono ovviamente gli stessi, che da qui a breve andremo ad analizzare e valutare, facendo riferimento al PEF, visto in precedenza.

Da un punto di vista grafico, la relazione che elabora Project in Excel è molto dettagliata, infatti è possibile avere i costi per ogni

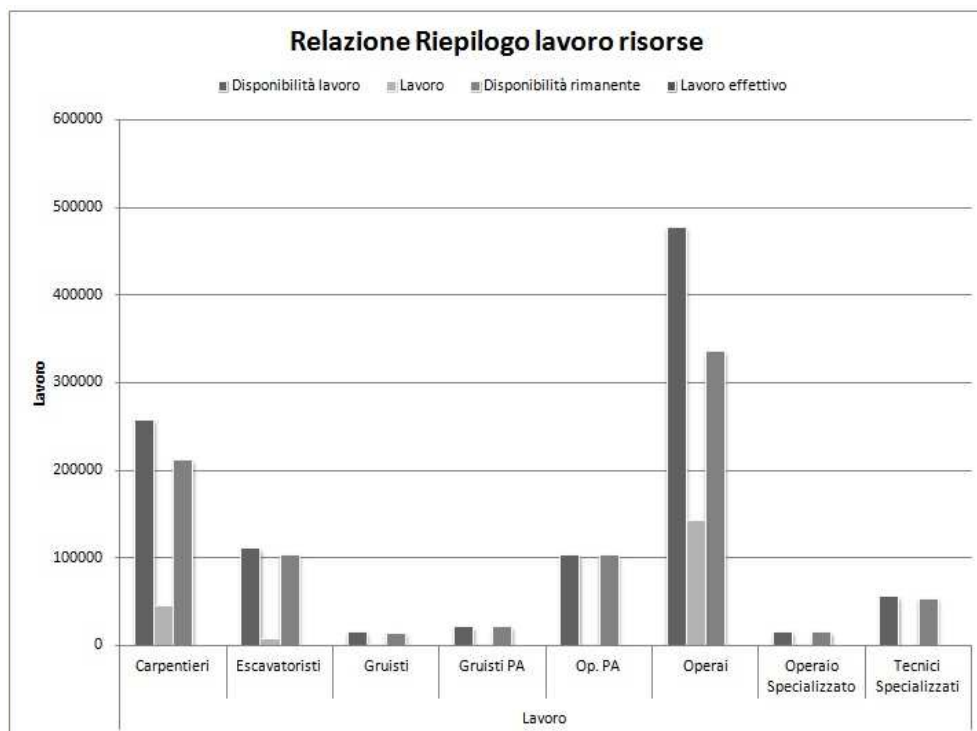
singolo giorno del progetto, ma a questa precisione di dati non corrisponde una resa grafica adeguata, in quanto man mano che si aumentano le informazioni le scritte sull'asse delle ascisse si sovrappongono e non c'è modo di ingrandire il grafico più di una predefinita quantità.

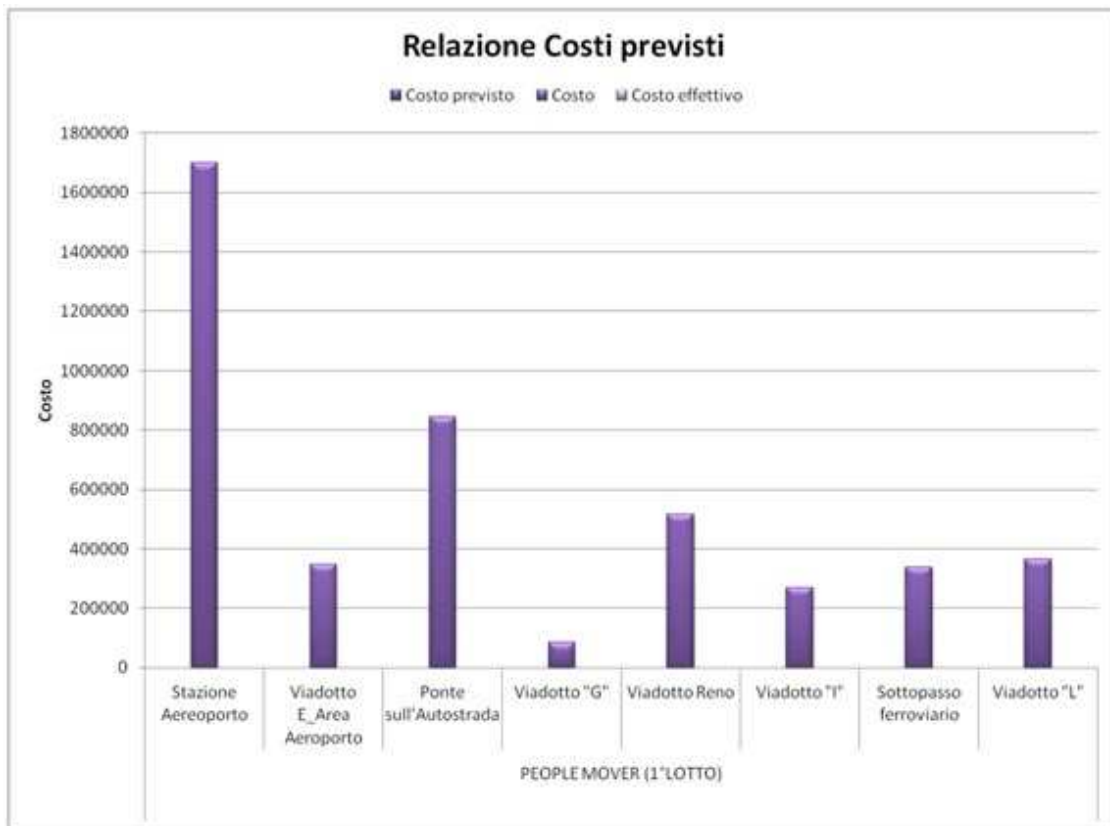
Al contrario, Primavera oltre ad una dettagliata relazione, elabora un grafico che è più gestibile nella resa grafica, in quanto è possibile scegliere il calendario che più si addice alle necessità degli utenti e automaticamente il software adatta l'immagine.

Tornando ai costi ottenuti, il costo totale della manodopera prevista per il 1° lotto del "People Mover" è di €4.466.875,04; dal PEF si verifica che l'ammontare delle opere civili per l'intera opera è €44.611.104. Il 1°lotto è circa la metà dell'intera opera, quindi le opere civili hanno un costo pari a circa €22.305.665,60; secondo il Decreto Ministeriale del 11/12/1978, la percentuale di manodopera varia dal 20% al 30% per infrastruttura di questo genere.

Calcolando il 20% di €22.305.665,60, si ottiene €4.461.110,40, un valore molto vicino a quello ottenuto dalla programmazione (€4.466.875,04).

Di seguito si riportano i grafici relativi al riepilogo del lavoro delle risorse, suddivisi in base al tipo di risorsa, e i costi previsti per ogni macroattività.





Attraverso questi grafici e attraverso le relazioni sulla distribuzione delle risorse riportate qui di seguito, si comprende come legame fra i tempi e risorse è fondamentale; le date schedate debbono infatti essere valutate sia in relazione al raggiungimento delle *milestone* di progetto, sia in termini del “come” e del “quando” utilizzare le risorse con disponibilità limitata. In numerosi casi il tempo stesso rappresenta una risorsa scarsa del progetto. La schedulazione risulta quindi strettamente collegata alla pianificazione delle risorse, in quanto ogni alterazione della pianificazione tempi può determinare una variazione del fabbisogno di risorsa, così come modificare l’opera, o il momento, in cui si richiede l’impiego della risorsa stessa; dall’altro lato, una variazione nell’impiego delle risorse dovuta alla disponibilità provoca effetti sui tempi delle attività. Quando in progetto si definiscono, si selezionano e si programmano le risorse coinvolte si fa riferimento alle tipologie più disparate: risorse umane, materiali, informative. Il primo passo da affrontare nella programmazione delle risorse consiste nella stima e nella previsione dell’impiego delle risorse e, talvolta, anche nella loro identificazione puntuale. Come già visto nel capitolo 5, le risorse umane sono state calcolate attraverso gli



schemi di produzione; il passo successivo è integrare tempo e risorse, un aspetto non proprio immediato.

Per comprendere se l'assegnazione delle risorse oltre ad essere efficace, è efficiente, è buona norma confrontare simultaneamente il diagramma di carico con il diagramma di Gantt; infatti, i report grafici e tabellari indicano come il progetto si muoverà e come gli obiettivi verranno raggiunti. Le attività da eseguire sono quantificate, come si svolgeranno in termini di tempi, di risorse e di costi, chi sono le risorse coinvolte e i relativi responsabili: questo è il punto di partenza per la fase successiva di esecuzione e controllo del progetto.

Di seguito si riportano esempi di relazioni prodotte da Ms-Project e da Primavera Project Planner.

## 9. VALUTAZIONI CRITICHE

### **Considerazioni sull'applicazione delle tecniche di programmazione per il cantiere del "People Mover"**

A conclusione del lavoro svolto occorre precisare che alcune scelte fatte in corso di elaborazione della programmazione rappresentano solo uno dei modi possibili per la realizzazione dell'opera, ogni possibilità porta con sé conseguenze legate alla qualità ed al tempo impiegato per la realizzazione dell'infrastruttura. In particolare, nel caso in esame, escludendo la Stazione dell'Aeroporto, il cantiere è un cantiere itinerante, che si sviluppa lungo tutto il percorso del "People Mover", spesso con dei micro cantieri per ogni pila. Si sono definite delle squadre per ogni lavorazione (accantieramento/smobilizzo cantiere, scavi, elevazioni, ecc.) così che ogni squadra terminato il proprio compito per quel micro cantiere, potesse passare al microcantiere successivo, lasciando alla squadra della lavorazione seguente spazi e mezzi. In questo modo, si evita l'eccessivo affollamento dei micro cantieri, limitando i rischi legati alla sicurezza. La sistemazione del Campo Base e del Cantiere Operativo di Via Agucchi in una posizione centrale rispetto a tutto il percorso dell'infrastruttura e la sua permanenza per tutto il periodo di cantierizzazione, consente di avere un unico punto di riferimento e anche un centro funzionale per la distribuzione e la raccolta dei materiali di impiego e di risulta.

Osservando i risultati della programmazione operativa del cantiere del primo lotto dell'infrastruttura, si può notare come la cantierizzazione della Stazione dell'Aeroporto si protrae per tutto il periodo della programmazione (data inizio 08/03/2011 – data fine 06/12/2012); inoltre, la realizzazione del guado del Fiume Reno e di tutte le opere in quell'area prevede il vincolo di iniziare e terminare nel periodo di secca del fiume, che da fonti Arpa è previsto da maggio a settembre; di conseguenza le opere dei viadotti successivi possono iniziare terminata quest'area e quelle dei viadotti precedenti cominciare finita la bonifica bellica e terminare in prossimità del periodo di secca del fiume.

Da tali considerazioni, si comprende come il principio primario usato per la programmazione è stato collegare in sequenza le attività della stessa categoria, con i necessari giorni di ritardo per impiegare al meglio anche le squadre delle varie categorie di lavoro.

Il numero degli uomini per ogni attività è stato calcolato con gli schemi di produzione, come già illustrato nel cap. 3, quindi attraverso dei dati analitici ed economici, i primi desunti dai disegni esecutivi e i secondi dal computo metrico estimativo, di conseguenza solo l'esperienza e una volta iniziati i lavori sarà possibile verificare se il numero delle squadre è adeguato o meno. Le potenzialità della programmazione operativa sono totalmente espresse solo quando questa risulta il passo successivo ad una corretta ed efficace disaggregazione del progetto e ad un'analisi accurata dei singoli procedimenti che tenga conto delle particolarità del processo edilizio ipotizzato e che porti ad un'affidabile valutazione delle durate.

I vantaggi legati ad un'accurata progettazione e programmazione del cantiere non si esauriscono con la possibilità di diminuire i tempi di esecuzione e possono essere individuati attraverso un controllo che deve avvenire durante tutto lo svolgimento del progetto.

Il controllo dell'esecuzione di un progetto è, quindi, quell'attività in cui si verifica la congruenza tra il progetto realizzato ed il progetto definito, in fase di programmazione, dall'insieme degli elaborati che compongono la progettazione e la programmazione esecutiva, al fine di evidenziare eventuali scostamenti e di impostare le necessarie azioni correttive. Solo allora si potrà comprendere se la programmazione svolta è stata positiva.

Inoltre, un efficiente sistema di reporting stabilito dal project manager consente di monitorare le informazioni più rappresentative dell'avanzamento del progetto in rapporto con gli obiettivi da raggiungere ed eventuali scostamenti possono essere risolti in corso d'opera attraverso una tempestiva riprogrammazione.

In conclusione, l'analiticità del metodo adottato ha permesso di ottenere una precisa e puntuale conoscenza del processo costruttivo, ottimo esempio per poter analizzare e confrontare i due programmi, Ms-Project 2007 e Primavera Project Planner P6.0, oggetto della presente trattazione; per comprendere quale software aiuta il Project Manager a gestire le complessità di un progetto per soddisfare i bisogni dei clienti, ad avere un controllo più stretto sulle strutture di progetto e sui suoi requisiti di rendicontazione, nonché la comprensione di tutto ciò che può ostacolare il corretto avanzamento del programma. Quale programma aiuta le aziende a pianificare e gestire sia i singoli progetti sia il programma complessivo, a implementare e monitorare i livelli di performance necessari e valutare

agevolmente l'impatto delle modifiche di programma sui piani di lavoro, sui budget, sull'utilizzazione delle risorse. Un'efficace visione d'insieme dell'intero programma, combinata con la continua verifica delle metriche di produttività, consente ai program manager di mitigare proattivamente i rischi e ottenere come risultato il puntuale rispetto dei tempi e del budget.

Dai risultati ottenuti e prodotti graficamente, schematizzando le caratteristiche si possono così riassumere i requisiti dei due software:

	Ms-Project 2007	Primavera P6.0
Per immissione dati da visualizzare	efficiente	scarsa
Programmazione ASAP	molto efficiente	molto efficiente
Programmazione ALAP	scarso	molto efficiente
Earned Value	scarso*	molto efficiente
Aggiornamenti risorse e costi	scarso*	molto efficiente
WBS	efficiente	molto efficiente
Rapporti di controllo	efficiente*	molto efficiente
Copia/Incolla	molto efficiente	scarso
Filtri	efficiente	molto scarso
Costi di gestione	molto scarsa	molto efficiente
Gestione Multiprogetto	efficiente	molto efficiente
Resa Grafica	efficiente	molto efficiente

\*Richiede Excel

## BIBLIOGRAFIA

- BRAGADIN M.A., *La Programmazione dei Lavori con i Metodi Reticolari*, Politecnica, Maggioli Editore, Agosto 2008.
- ALLODI D., *Project Management per l'Architettura*, Francoangeli, Milano 2008.
- DE AMBROGIO W., *Programmazione Reticolare Vol.1°, Tecniche Reticolari di Programmazione*, Etas Libri, Milano 1977.
- RIGAMONTI G., *La Gestione dei Processi di Intervento Edilizio*, UTET, Torino 2001.
- MAWDESLEY M., ASKEW W., O'REILLY M., *Planning and Controlling Construction Projects: The Best Laid Plans*, Longman, 1997.
- POJAGA L., *Ricerca Operativa, Per il Management e il Project Management*, Ed. Unicopli, Milano 1994.
- RUSSELL D. ARCHIBALD, *Project Management La gestione di Progetti e Programmi Complessi*, Franco Angeli, Milano 1997.
- BAGLIERI E., BIFFI A., COFFETTI E., ONDOLI C., PECCHIARI N., PILATI M., SAMPIETRO M., *Organizzare e gestire progetti Competenze per il project management*, Etas, Milano, 2005.
- CHATFIELD C., JOHNSON T., *Passo per Passo Microsoft Office Project 2007*, Mondadori Informatica, 2011.
- PICONE M., *Tecnologia della produzione edilizia*, UTET, 1984.
- KERZNER H., *Project Managment. Pianificazione, scheduling e controllo die progetti*, HOEPLI, Milano, 2009.

### Articoli

- KYUNGHWAN K., DE LA GARZA J. M., *Critical Path Method with Multiple Calendars*, Journal of Construction Engineering and Management, A.M. ASCE, 2005.
- PARK M., PENA MORA F., *Reliability Buffering for Construction Projects*, Journal of Construction Engineering and Management, A.M. ASCE, 2004.
- RUSSELL A.D., WONG W. C. M., *New Generation of Planning Structures*, Journal of Construction Engineering and Management, A.M. ASCE, 1993.