

Università degli Studi di Bologna

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

SCIENZA DELLE COSTRUZIONI

**STUDIO FINALIZZATO ALLA
CARATTERIZZAZIONE MECCANICA IN SITU
DI CONGLOMERATI CEMENTIZI ADDITIVATI
CON PFU (PNEUMATICI FINE USO)**

Tesi di Laurea di:

Adriano Cirasole

Relatore:

Prof.ssa Ing. Elena Ferretti

Correlatori:

Prof.ssa Maria Chiara Bignozzi

Prof. Ing. Cesare Sangiorgi

Dott. Ing. Domenico Terra

Anno Accademico 2011-2012

Ringraziamenti

Desidero ringraziare chi, accompagnandomi pazientemente nei mesi di scrittura, ha contribuito alla realizzazione della tesi. Innanzitutto i miei genitori sono i compagni del lungo percorso che si conclude in queste pagine. Non ci sono parole per quantificare il loro contributo.

Questo studio è il risultato di oltre un anno di sperimentazione presso il Lisg sotto la guida della Prof. Elena Ferretti. Le attività di laboratorio si sono avvalse della collaborazione del Sig. Roberto Carli, che ha curato anche i rilevamenti in situ, e dell'assistenza dei Sig. Roberto Betti, Sig. Gregorio Bertolotta e Sig. Luca Capuzzi.

Voglio ringraziare infinitamente la Prof. Maria Chiara Bignozzi che mi ha accompagnato nel gettare le basi della sperimentazione, soprintendendo alla realizzazione delle miscele. Desidero ringraziare anche il Sig. Giampietro Boldrini che ha concretamente realizzato le miscele.

Al Prof. Cesare Sangiorgi voglio dire grazie per il suo apporto nella progettazione e durante la stesura della tesi.

Un ringraziamento speciale va al Dott. Domenico Terra, che ci ha accolto presso l'Aeroporto "Guglielmo Marconi" e ha reso possibile la costruzione del tratto sperimentale lungo la via di rullaggio. Con il suo impegno ha coordinato, insieme al Dott. Davide Serrau, il personale SAB e il personale tecnico che hanno materialmente messo in opera la sperimentazione: desidero ringraziare il Sig. Pirazzoli e tutta la squadra che ha operato in cantiere, il Sig. Mazzini, il Sig. Armando e il Sig. Abbatecola, oltre al personale dell'ufficio tesseramento dell'Aeroporto. Grazie!

INDICE

INTRODUZIONE	3
GLI PNEUMATICI A FINE USO	5
1.1 <i>Introduzione</i>	5
1.2 <i>Lo pneumatico</i>	5
1.3 <i>Gli Pneumatici a Fine Uso e il riciclo</i>	9
1.4 <i>Gli aspetti legislativi sui PFU</i>	13
1.5 <i>La valorizzazione e le modalità di recupero</i>	20
1.5.1 <i>La granulazione a temperatura ambiente</i>	22
1.5.2 <i>La granulazione criogenica</i>	24
1.5.4 <i>Il Water-jet</i>	25
1.5.5 <i>Il recupero di materia prima</i>	26
1.5.6 <i>Il recupero energetico</i>	27
1.6 <i>Gli effetti dei PFU sulla salute umana</i>	30
IL CALCESTRUZZO	33
2.1 <i>Introduzione</i>	33
2.2 <i>Le componenti del calcestruzzo</i>	34
2.2.1 <i>Acqua</i>	34
2.2.2 <i>Cemento</i>	35
2.2.3 <i>Aggregati</i>	40
2.2.4 <i>Additivi</i>	48
2.3 <i>Il granulato di gomma</i>	51
LE SOVRASTRUTTURE AEROPORTUALI	55
3.1 <i>Le pavimentazioni stradali</i>	55
3.2 <i>Le caratteristiche delle sovrastrutture aeroportuali</i>	56
3.3 <i>Le sovrastrutture rigide e flessibili</i>	60
3.4 <i>I problemi legati alle pavimentazioni aeroportuali</i>	67
3.5 <i>Il caso dell’Aeroporto “Guglielmo Marconi” di Bologna</i>	71
LA PREPARAZIONE DELLA MISCELA	75
4.1 <i>Introduzione</i>	75
4.2 <i>Mix-Design</i>	75
4.3 <i>Le miscele</i>	79
4.3.1 <i>Miscela 1</i>	81
4.3.2 <i>Miscela 2</i>	89
4.3.3 <i>Le prove in laboratorio</i>	96
4.3.4 <i>Miscela 3</i>	98
4.4 <i>Il confronto tra le miscele</i>	101
4.4.1 <i>I costi delle miscele</i>	104
LA PROGETTAZIONE DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO	107
5.1 <i>Introduzione</i>	107
5.2 <i>Gli estensimetri</i>	107
5.3 <i>Il sistema di monitoraggio</i>	111
5.4 <i>Il posizionamento degli estensimetri</i>	113
5.5 <i>La messa in opera</i>	120
5.5.1 <i>La via di rullaggio</i>	121

5.5.2 <i>La strumentazione della pista</i>	124
L'ACQUISIZIONE E L'ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI	129
6.1 <i>La calibrazione del sistema di monitoraggio</i>	129
6.1.1 <i>L'errore strumentale e la distorsione termica</i>	130
6.2 <i>Il rilevamento dei dati</i>	133
6.3 <i>L'analisi dei dati</i>	135
6.4 <i>La distribuzione delle deformazioni nella sezione trasversale</i>	143
6.5 <i>Lo stato tensionale nella sezione trasversale</i>	148
6.6 <i>Il comportamento deformativo nelle due dimensioni</i>	159
6.7 <i>Lo stato tensionale nella pavimentazione</i>	162
LE CONCLUSIONI E GLI SVILUPPI FUTURI	169
APPENDICE	173
BIBLIOGRAFIA	177
SITOGRAFIA	178

INTRODUZIONE

Oggetto della presente tesi di Laurea è la sperimentazione in situ di un prodotto tecnico innovativo a basso impatto ambientale, al fine di valorizzare, attraverso idonee forme di riutilizzo, gli pneumatici a fine uso (PFU). Questi rappresentano, infatti, una minaccia per l'ambiente e la salute umana se, non sottoposti ad opportuni trattamenti di recupero, finiscono abbandonati in discariche abusive o nei campi.

Questo studio si propone di fornire una soluzione per il rimpiego di PFU, opportunamente trattati, all'interno di conglomerati cementizi, sostituendo parte degli aggregati fini con particelle di gomma derivate dai pneumatici a fine uso. A tale scopo è stato realizzato presso l'Aeroporto "Guglielmo Marconi" un tratto sperimentale della pavimentazione della pista di rullaggio in calcestruzzo additivato con PFU per poterne definire il comportamento meccanico e confrontarlo con i materiali delle tradizionali pavimentazioni aeroportuali. L'applicazione in situ è stata suggerita dagli studi, effettuati su questo materiale a partire dal 2005 presso i laboratori del Lisg della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna, che hanno evidenziato un buon comportamento in relazione alle principali problematiche riguardanti le pavimentazioni aeroportuali.

Tale studio si inserisce in un quadro legislativo ben chiaro in quanto, con l'approvazione del Testo Unico Ambientale D.lgs 152/2006 e del D.L. 208/2008 sulle discariche di rifiuti, non è più possibile smaltire i PFU in discarica. Con tale divieto, e considerato che fino al 2009 ancora il 25% del PFU aveva tale destinazione finale (fonte Legambiente), si rende necessario e obbligatorio trovare idonee forme alternative di valorizzazione delle ingenti quantità di PFU che ogni anno si producono. Secondo l'ETRMA (European Tyre & Rubber Manufacturers' Association) nel 2009 sono stati prodotti in Europa 2.6 milioni di tonnellate di PFU e in Italia il quantitativo raggiunge 315 mila tonnellate. Inoltre secondo il CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) "dato che la domanda mondiale di gomma attualmente supera l'offerta, l'industria del riciclo rappresenta la possibilità più economica" in termini di "risorse ed emissioni" per soddisfare le richieste di mercato. L'utilizzo di PFU all'interno di conglomerati cementizi si inserisce, quindi, in un contesto di sviluppo di nuovi prodotti eco-compatibili e poco impattanti sull'ambiente.

Al fine di costituire una valida alternativa al calcestruzzo ordinario, risulta di fondamentale importanza la definizione delle proprietà meccaniche e tecniche in relazione agli standard tecnici di qualità, affidabilità e rispondenza alle normative di settore, con particolare attenzione all'aspetto economico. E' quindi necessario operare un bilancio dei costi-benefici che comporta l'utilizzo del prodotto in questione, a confronto con i prodotti già disponibili sul mercato.

In questa ottica rientra la comparazione delle prestazioni delle pavimentazioni aeroportuali tradizionali, rigide o flessibili, e la pavimentazione sperimentale in conglomerato cementizio additivato con PFU.

Dopo un breve cenno al quadro normativo, nazionale e internazionale, sullo smaltimento dei PFU, qui di seguito saranno descritti i principali processi di trattamento e riutilizzo di tale materiale, con relativa analisi costi-benefici da un punto di vista economico, energetico, sociale e dei materiali.

Nel capitolo sul calcestruzzo verranno definiti i criteri per la caratterizzazione tecnica di conglomerati cementizi in relazione ai materiali utilizzati per produrli ed alle applicazioni nelle sovrastrutture aeroportuali.

Queste saranno descritte più approfonditamente nel capitolo successivo, confrontando le varie possibili soluzioni tecniche presenti in normativa.

Quindi verrà descritta la fase di progettazione e realizzazione di un sistema di monitoraggio delle prestazioni della pavimentazione. I dati da esso acquisiti permetteranno di fornire una caratterizzazione meccanica del conglomerato cementizio additivato con PFU.

La rilevazione dei dati sperimentali e il loro confronto rappresenta il contenuto del 6° capitolo: dall'analisi dei parametri tecnici e meccanici del materiale in esame è stato possibile valutarne l'affidabilità e la rispondenza ai requisiti tecnici di settore.

In conclusione verranno evidenziati eventuali studi di approfondimento necessari ai possibili sviluppi futuri del conglomerato cementizio additivato con PFU.

GLI PNEUMATICI A FINE USO

1.1 Introduzione

Lo pneumatico rappresenta l'elemento che, montato sulla ruota dei veicoli, realizza il contatto tra il veicolo e la strada, permettendone il movimento. Inventato nel 1846, lo pneumatico viene oggi utilizzato sulle maggior parte dei mezzi di trasporto su strada ed è prodotto in molteplici tipi e misure, per adattarsi a biciclette, autocarri e trattori, senza dimenticare l'utilizzo aeronautico nei carrelli di atterraggio. Si tratta di un oggetto molto sofisticato, che da quasi 150 anni viene studiato e migliorato per assicurare sempre le migliori prestazioni e presenta una struttura complessa, costituita principalmente da gomma e nerofumo, ma anche da rinforzi metallici e tessili, con tracce di ossido di zinco e zolfo. Gli pneumatici sono beni di consumo e le sollecitazioni a cui sono sottoposti ne provocano l'usura del battistrada, che induce l'utente alla sostituzione dopo un certo tempo. Dopo questa prima vita, gli pneumatici usurati (PU) possono essere avviati al riutilizzo e alla rigenerazione, per essere rimessi sul mercato e vivere una seconda vita. Quando lo pneumatico non presenta più i requisiti di sicurezza ed efficienza per essere reimpiegato, neanche attraverso la ricostruzione, diventa un rifiuto (PFU) e viene inviato alla raccolta e al recupero energetico e dei materiali.

1.2 Lo pneumatico

La prima idea di pneumatico si deve a Robert William Thomson, che nel 1846 ipotizzò di rivestire le cerchiature delle carrozze con supporti elastici contenenti una camera d'aria "allo scopo di diminuire lo sforzo necessario a trainarli, rendere il loro movimento più facile e attutire il rumore che fanno quando si muovono." Al tempo però biciclette e automobili non erano state ancora inventate e l'idea fu dimenticata per diversi anni. La diffusione dello pneumatico si deve al veterinario scozzese John Boyd Dunlop che lo ideò indipendentemente e per primo lo brevettò nel 1888. L'idea gli era

nata quando si trovò a cercare una soluzione per la bicicletta del figlio piccolo, che era troppo lenta e pesante da guidare. Dunlop pensò ad una gomma vuota riempita d'aria, in modo da dare alla ruota una sezione adeguata senza il peso eccessivo delle ruote piene. La diffusione dello pneumatico come equipaggiamento per biciclette ebbe subito un successo formidabile, seguita qualche anno più tardi dall'applicazione nel campo dell'automobile. Oggi gli pneumatici equipaggiano la maggior parte dei mezzi di trasporto destinati ad un utilizzo su strada. Essi sono costituiti da una struttura toroidale elastica di gomma naturale o sintetica e possono essere di due tipi:

- I tube type sono pneumatici con camera d'aria che racchiude l'aria compressa per ottenere un effetto di adattamento e sospensione del veicolo dal terreno; la copertura è costituita da gomma (in passato naturale e oggi sintetica), essenziale nel trasmettere gli attriti che si generano con il movimento, e tele di fibra o di metallo;
- I tubeless sono pneumatici che posseggono la funzione di camera d'aria e non ne richiedono l'utilizzo, mentre la copertura è identica a quella dei tube type.



Figura 1: Struttura dello pneumatico.

Attualmente tutte le autovetture vengono prodotte con pneumatici tubeless, mentre gli autobus e gli autocarri utilizzano entrambi i modelli.

La struttura dello pneumatico, rappresentata nella Figura 1, è costituita dal battistrada e dalla carcassa:

- Il battistrada (1): è la parte del pneumatico destinata al contatto con il terreno per assicurare l'attrito. Esso consiste in un anello di gomma compatta che avvolge la carcassa, alla quale è unito nella zona di rotolamento. Il disegno del battistrada viene scelto dalla casa costruttrice per migliorare le caratteristiche di aderenza, silenziosità, prestazioni ad alta velocità. Esso risulta particolarmente importante per le superfici bagnate, poiché i canali che vanno dal centro al bordo del battistrada servono ad allontanare l'acqua, permettendo alla restante superficie drenata di fornire attrito necessario alla stabilità del veicolo. Il battistrada è essenziale per l'aderenza fra pneumatico e terreno poiché permette lo scambio degli sforzi e quindi garantisce il moto e la direzionalità della vettura. Fondamentale poi è la mescola, che deve garantire un giusto compromesso tra la resistenza all'usura e una buona aderenza in tutte le condizioni di esercizio. Le mescole tradizionali sono costituite da composti elastomeri (gomma naturale, SBR, copolimeri butadiene-stirene, polibutadiene, polisoprene di sintesi, gomma butilica) in dosi variabili e da additivi (quali il nerofumo, gli oli, i plastificanti e lo zolfo) che permettono di esaltare determinate caratteristiche;
- La carcassa (2): è la parte strutturale dello pneumatico su cui è vulcanizzato il battistrada, ottenuta dalla sovrapposizione di tele incrociate di materiale tessile o sintetico impregnate di gomma ed eventualmente rinforzate con fili metallici. Essa termina con due robusti talloni (4) che contengono i cerchietti, formati da anelli di fune metallica che hanno la funzione di mantenere la carcassa ben aderente al cerchio. Le varie tele sono fra loro unite con procedimento di vulcanizzazione che le rende una struttura unitaria. In base all'orditura delle tele sovrapposte lo pneumatico può essere di tipo cord o radiale. Nel tipo cord le tele si estendono fra i due talloni e sono sovrapposte incrociate (orditura incrociata) in modo da fornire un angolo piuttosto ampio, circa 40°. Il tipo radiale è caratterizzato dal fatto che una parte delle tele si estende fra i due talloni con orditura radiale, su cui viene sovrapposta una seconda orditura, la cintura stabilizzante (limitata alla sola zona corrispondente alla fascia di rotolamento, che verrà poi ricoperta dal battistrada), formata da tele

incrociate in modo da formare un angolo di circa 20°. I pneumatici stradali radiali sono stati introdotti sul mercato una quarantina di anni fa e, grazie alla migliore aderenza dovuta alla più uniforme distribuzione delle pressioni al suolo, hanno praticamente soppiantato i cord. La carcassa di uno pneumatico da autovettura include la componente tessile, non presente invece negli pneumatici per autocarri che invece inglobano una percentuale maggiore di acciaio. La parte laterale della carcassa viene chiamata spalla (3) e assolve due obiettivi. La flessibilità in senso verticale serve a minimizzare il trasferimento delle irregolarità del terreno sul veicolo, mentre la rigidità orizzontale serve a trasferire sul terreno i carichi dovuti a sottosterzo, frenata e accelerazione.

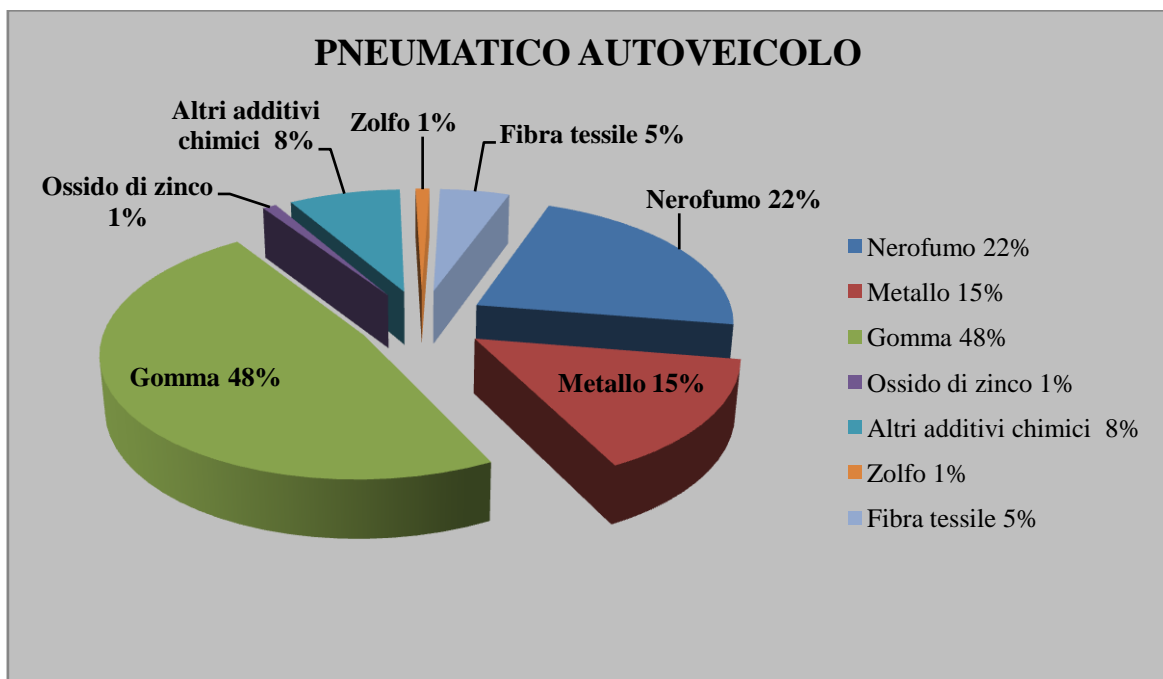


Figura 2: Composizione degli pneumatici da autoveicolo.

La composizione degli pneumatici da autovettura è diversa da quella degli pneumatici da autocarro. Queste differenze non si esprimono solo in termini di dimensioni, di acciaio o tessile inclusi nella loro struttura, ma anche nei tipi e nelle proporzioni tra gomma naturale e sintetica, nerofumo e silice e gli altri ingredienti usati nelle mescole. Nelle Figure 2 e 3 sono riassunte le composizioni medie degli pneumatici di autoveicoli ed autocarri. Ciascun ingrediente della mescola contribuisce a dare allo pneumatico delle specifiche caratteristiche al fine di favorirne una vita più lunga. Una gomma non trattata è relativamente debole e morbida. Per attribuire alla gomma cruda delle caratteristiche tecniche di robustezza ed elasticità occorre sottoporla a processi di vulcanizzazione che diano origine a legami tra le molecole che la compongono. In questa maniera la gomma diviene resistente alle abrasioni, impermeabile e poco reattiva alle azioni chimiche, al

calore e all'elettricità. Un'altra conseguenza di questi trattamenti è l'elevata resistenza all'azione di microrganismi, che impiegano più di 100 anni prima di riuscire a distruggerli, rendendo impossibile lo smaltimento degli pneumatici, quando questi diventano rifiuto (PFU), nelle discariche. Con l'entrata in vigore in Italia del D.lgs 36/2003, che recepisce la direttiva europea 99/31/CE, lo smaltimento obbligatorio per tali categorie di residui è stata individuata negli impianti di recupero di materia e energia.

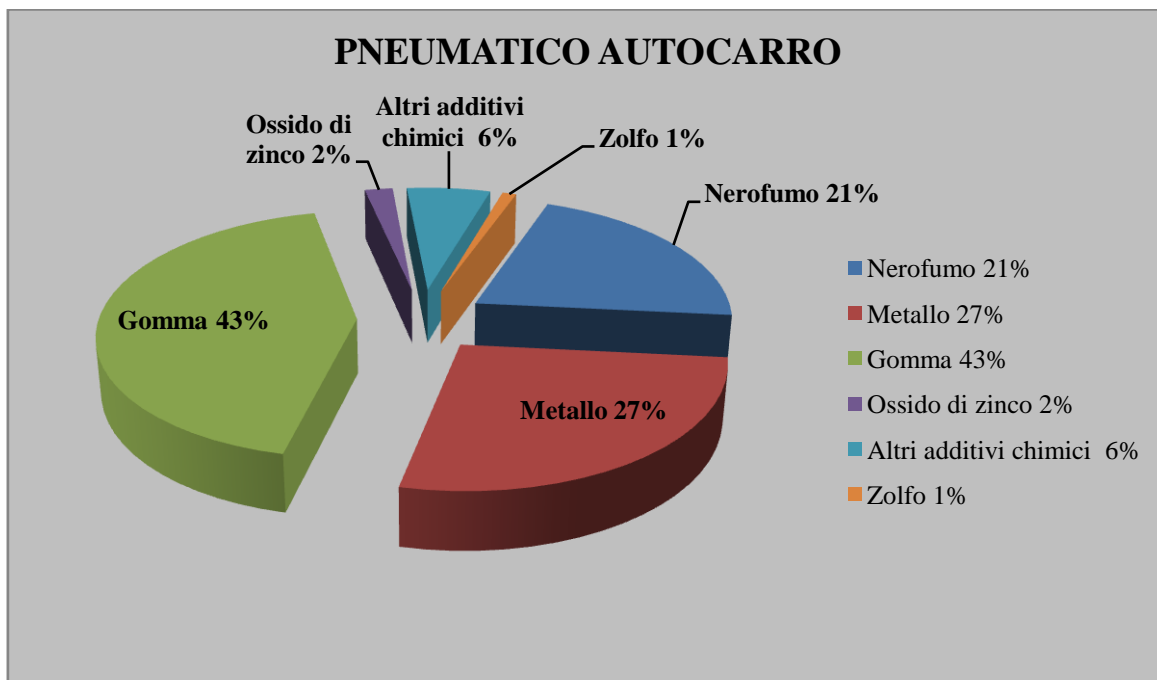


Figura 3: Composizione degli pneumatici da autocarro.

1.3 Gli Pneumatici a Fine Uso e il riciclo

Nel 2009 l'Unione Europea ha dovuto affrontare la sfida di gestire, secondo criteri ecologici, 3.2 milioni di tonnellate di pneumatici usati PU, di cui 581 mila tonnellate vengono avviate al riutilizzo, ricommercializzazione o esportazione, mentre circa 2.6 milioni di tonnellate rimangono nel mercato come PFU. I dati raccolti dall'ERTMA (European Rubber & Tyre Manufacturers' Association) mostrano che la gestione di una tale mole di materiale è stata possibile solo con la diffusione di sistemi di gestione in grado valorizzare i materiali attraverso il riciclaggio. Fondata nel 1989, l'ERTMA è costituito da un gruppo di esperti provenienti dai principali produttori di pneumatici in Europa ed ha lo scopo di promuovere una gestione economica ed ecologica dei PFU in quei paesi dove questi vengono ancora inviati in discariche, a volte in circuiti illegali. Il problema è aggravato dalla presenza di discariche interrato di PFU, stimati in circa 5.5

milioni di tonnellate, che sono stati accumulati negli anni e che rappresentano una seria minaccia per la salute umana e l'ambiente circostante. La ricerca e la promozione di metodi innovativi per il trattamento e il riciclo tende a creare un mercato sostenibile per i derivati dei PFU in grado di assorbire nei prossimi anni questi materiali stoccati in depositi pericolosi. La nascita di prodotti innovativi sia per le industrie che per i consumatori ha permesso negli ultimi 16 anni un aumento costante del tasso di raccolta dei PFU, fino a raggiungere il 95% nel 2009. La Figura 4 mostra tale andamento, con una crescita media annua del 25% delle quantità recuperate. Questo ha permesso all'Europa di porsi tra le regioni più avanzate al mondo nel riutilizzo e riciclo dei PFU.

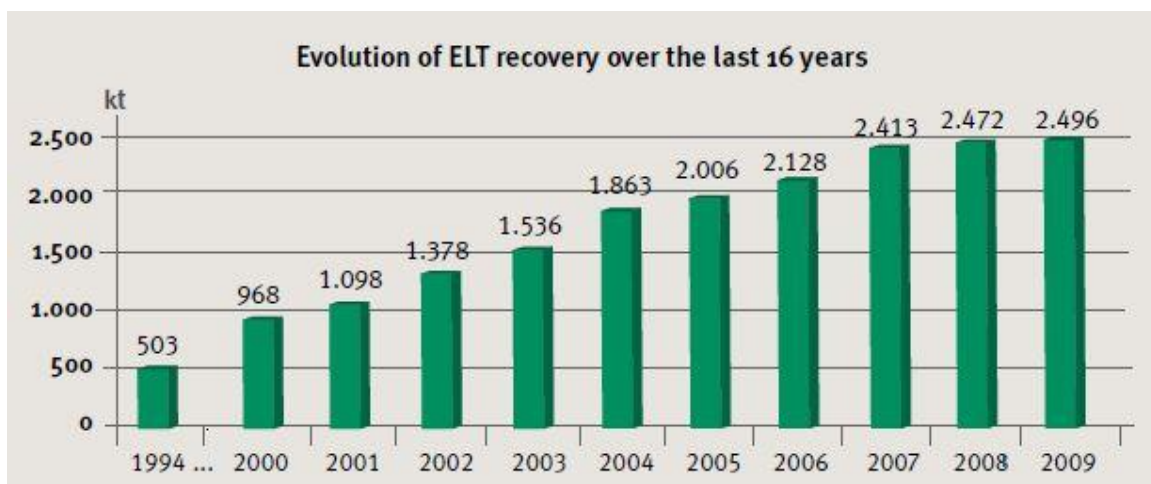


Figura 4: Evoluzione del recupero di PFU negli ultimi 16 anni.

Oggi in Europa esistono tre diversi sistemi di gestione dei PFU:

- Sistema a tassazione: vige in Danimarca e Slovacchia. Ciascun paese è responsabile per il recupero e il riciclo dei PFU. I produttori pagano una tassa allo Stato che è responsabile dell'organizzazione e remunera gli operatori nella catena del recupero. La tassa viene successivamente applicata al consumatore;
- Libero mercato: vige in Austria, Bulgaria, Croazia, Germania, Irlanda, Regno Unito e Svizzera. La legge stabilisce gli obiettivi da raggiungere e i referenti per i singoli settori di attività ma non prevede il responsabile di filiera. In tal modo tutti gli operatori del sistema stipulano contratti secondo le condizioni del libero mercato e agiscono in conformità con la locale legislazione sui rifiuti;
- Responsabilità del produttore: vige in Belgio, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Italia, Norvegia, Polonia, Paesi Bassi, Portogallo, Romania, Slovenia, Spagna, Svezia, Turchia, Ungheria. La legge definisce l'assetto legale e conferisce la responsabilità ai produttori di organizzare la gestione dei PFU. Questo sistema ha portato alla costituzione di società senza scopo di lucro per gestire i PFU attraverso

le soluzioni più economiche. I produttori hanno l'obbligo di monitorare e rendicontare alle autorità nazionali, il che rappresenta un buon esempio di trasparenza e tracciabilità. I costi di gestione sono pagati attraverso un contributo indicato chiaramente al momento dell'acquisto dagli utenti, attraverso il principio "chi inquina paga".

L'obiettivo comune di tali sistemi è lo smaltimento dei PFU tramite il recupero di materiali ed energia, da cui si traggono vantaggi ambientali e economici: il riutilizzo di una risorsa che, se non recuperata, sarebbe non biodegradabile ed andrebbe ad occupare depositi e discariche con gravi danni per l'ambiente e la salute; la bonifica di discariche o depositi abusivi; l'impiego al posto di preziose materie prime, spesso d'importazione; la riduzione della quantità di rifiuti e conseguentemente minori costi per la collettività; miglioramento della bilancia commerciale relativamente a importazione di combustibili tradizionali. Il PFU grazie alle caratteristiche chimico-fisiche del materiale, si presta per l'utilizzo in numerose applicazioni sotto forma di granulo di varie dimensioni. Inoltre è caratterizzato da un potere calorifico pari a quello del carbone e ciò lo rende fonte energetica oggi largamente usata per soddisfare la domanda di settori industriali come i cementifici e le centrali di produzione di energia/vapore, che lo utilizzano sotto vari formati (ciabattato, cippato o intero). Nella Figura 5 sono mostrati i principali utilizzi dei PFU in Europa dal 1994 al 2008, mostrando un consistente aumento del recupero di materia, che è passato dal 6% del 1994 a oltre il 40% del 2008.

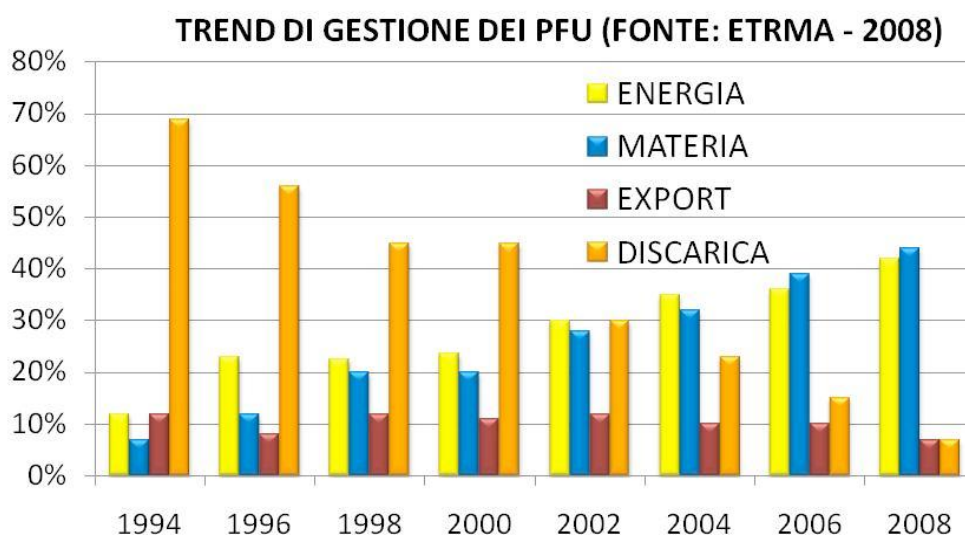


Figura 5: Principali utilizzi del PFU in Europa.

Per quanto attiene l'Italia, l'Ecopneus stima che vengono prodotti 315 mila tonnellate di PFU, anche se non esistono statistiche ufficiali, ma il dato è considerato affidabile come riferimento per dimensionare il fenomeno. Di questo totale circa la metà è destinato al

recupero energetico, il 20% viene recuperato come materia prima seconda; la quota restante viene dispersa in traffici, pratiche illegali o comunque fuori controllo. L'assenza di un sistema integrato di gestione a livello nazionale ha generato una situazione caratterizzata da un mancato controllo sui flussi di questo materiale, insufficiente implementazione di utilizzi di PFU e suoi derivati, assenza di una razionalizzazione tra le parti del sistema di gestione. Queste carenze non permettono di garantire la tutela dell'ambiente, come è evidenziato da numerosi casi di discariche illegali (vedi Figura 6), abbandoni e incendi di PFU ben documentati dal dossier di Legambiente "Copertone selvaggio".



Figura 6: Discarica di pneumatici a cielo aperto.

Oggi sono circa 30.000 i punti in cui viene generato il PFU: gommisti, stazioni di servizio, officine, sedi di flotte su tutto il territorio nazionale. Migliaia sono poi le aziende autorizzate al prelievo e al trasporto, con destinazione agli oltre 50 impianti di trattamento, siti in cui i PFU vengono preparati per il successivo recupero energetico o di materiale. In adempimento al D.lgs 152/2006 in Italia si va verso una razionalizzazione della rete di raccolta, recupero e monitoraggio dei PFU su tutto il territorio nazionale ad opera di Ecopneus, che entro il 31 dicembre del 2011 dovrà assicurare la raccolta e l'invio a recupero del 100% dei PFU prodotti in Italia.

1.4 Gli aspetti legislativi sui PFU

Nel rispetto degli impegni assunti a favore di un utilizzo sostenibile delle risorse, della riduzione al minimo dei danni ambientali, nonché dei principi “chi inquina paga” e “gerarchia dei rifiuti”, l'Unione Europea ha introdotto una vasta gamma di strumenti legislativi volti a promuovere la legislazione nazionale in materia di rifiuti.

Si può fare riferimento alle seguenti normative:

- **Trattato sull'Unione Europea** del 29 luglio 1992:
Art. 174 (ex 130 R)
 2. La politica della Comunità in materia ambientale mira a un elevato livello di tutela, tenendo conto della diversità delle situazioni nelle varie regioni della Comunità. Essa è fondata sui principi della precauzione e dell'azione preventiva, sul principio della correzione, in via prioritaria alla fonte, dei danni causati all'ambiente, nonché sul principio “chi inquina paga”.

- **Direttiva Europea 99/31/CE** del 26 aprile 1999 relativa alle *discariche di rifiuti*. L'Unione Europea, con questa direttiva, ha stabilito che in discarica devono finire solo materiali a basso contenuto di carbonio organico e materiali non riciclabili: in altre parole, dando priorità al recupero di materia, la direttiva prevede il compostaggio ed il riciclo quali strategie primarie per lo smaltimento dei rifiuti.

- **Direttiva Europea 2000/53/CE** del 18 settembre 2000 relativa ai *veicoli fuori uso*.

Art. 1 – Obiettivi

1. La presente direttiva istituisce misure volte, in via prioritaria, a prevenire la produzione di rifiuti derivanti dai veicoli nonché, inoltre, al reimpiego, al riciclaggio e ad altre forme di recupero dei veicoli fuori uso e dei loro componenti, in modo da ridurre il volume dei rifiuti da smaltire e migliorare il funzionamento dal punto di vista ambientale di tutti gli operatori economici coinvolti nel ciclo di utilizzo dei veicoli e specialmente di quelli direttamente collegati al trattamento dei veicoli fuori uso.

A tale scopo essa prevede che i costruttori e i fornitori di materiali e di equipaggiamenti debbano:

- cercare di ridurre l'uso di sostanze pericolose a livello di progettazione dei veicoli;
- progettare e fabbricare veicoli in modo che siano agevoli lo smontaggio, il reimpiego, il recupero e il riciclaggio;
- sviluppare l'impiego di materiale riciclato per la costruzione dei veicoli;
- provvedere affinché i componenti dei veicoli immessi sul mercato dopo il 1. luglio 2003 non contengano mercurio, cromo esavalente, cadmio e piombo [...].

Attualmente si ricicla già il 75% dei veicoli fuori uso (le parti metalliche). L'obiettivo della direttiva è di portare la percentuale di reimpiego e recupero al 95% del peso medio per veicolo e per anno entro il 2015.

- **Direttiva Europea 2006/12/CE** del 5 aprile 2006 relativa ai *rifiuti*. Gli Stati membri devono vietare l'abbandono, lo scarico e lo smaltimento incontrollato dei rifiuti e promuoverne la prevenzione, il riciclo e la trasformazione a fini di riutilizzo. La direttiva prevede una cooperazione tra Stati membri al fine di creare una rete integrata e adeguata di impianti di smaltimento (tenendo conto delle tecnologie più perfezionate) che consenta alla Comunità di raggiungere l'autosufficienza nello smaltimento dei rifiuti e a ciascuno Stato membro di tendere verso questo obiettivo.

- **Direttiva Europea 2008/98/CE** del 19 novembre 2008 relativa ai *rifiuti e che abroga alcune direttive precedenti*. Essa infatti sostituisce la direttiva 2006/12/CE e definisce come “obiettivo principale di qualsiasi politica in materia di rifiuti quello di ridurre al minimo le conseguenze negative della produzione e della gestione dei rifiuti per la salute umana e l’ambiente”. A tale scopo viene definito il principio di gerarchia dei rifiuti che introduce un approccio volto a prevenire la creazione di rifiuti, attraverso sistemi di produzione che tengano conto dell’intero ciclo di vita dei prodotti e dei materiali, per concentrare l’attenzione sulla riduzione degli impatti ambientali connessi alla produzione e alla gestione dei rifiuti, rafforzando in tal modo il valore economico di questi ultimi. Vengono quindi precisati alcuni concetti, in modo da distinguere tra i rifiuti, che vanno avviati allo smaltimento, e i “non rifiuti”, che vanno avviati al recupero.

Art. 6 – *Cessazione della qualifica di rifiuto*

1. Taluni rifiuti specifici cessano di essere tali quando siano sottoposti a un’operazione di recupero, incluso il riciclaggio, e soddisfino criteri specifici da elaborare conformemente alle seguenti condizioni:
 - a) la sostanza o l’oggetto è comunemente utilizzata/o per scopi specifici;
 - b) esiste un mercato o una domanda per tale sostanza od oggetto;
 - c) la sostanza o l’oggetto soddisfa i requisiti tecnici per gli scopi specifici e rispetta la normativa e gli standard esistenti applicabili ai prodotti;
 - d) l’utilizzo della sostanza o dell’oggetto non porterà a impatti complessivi negativi sull’ambiente o sulla salute umana.
2. [...] si applicano tali criteri almeno per gli aggregati, i rifiuti di carta e vetro, i metalli, i pneumatici e i rifiuti tessili.

Art. 40 – *Attuazione*

1. Gli Stati membri mettono in vigore le disposizioni legislative, regolamentari ed amministrative necessarie per conformarsi alla presente direttiva entro il 12 dicembre 2010.

In Italia il quadro legislativo si è gradualmente adeguato alle normative europee, nel corso degli anni, e con il D.lgs. 205/2010 ha recepito in pieno i principi che animano la DE 2008/98/CE. Questo è sicuramente un risultato significativo, ma rappresenta un primo passo per la soluzione delle problematiche poste, poiché molti sforzi devono ancora essere fatti per avvicinarsi a quella che l’Unione Europea definisce una “società

del riciclaggio”. Per una corretta gestione del sistema serve un maggior impegno per limitare la formazione di rifiuti e contrastare i traffici e gli smaltimenti illegali. Qui di seguito vengono riassunti i principali riferimenti normativi riguardanti la gestione dei PFU approvati al fine di regolare e promuovere il riutilizzo, il riciclaggio o ogni altra operazione di recupero secondo quella che viene definita la “gerarchia dei rifiuti”:

- **D.Lgs. n. 36 del 13/01/2003:** attuazione della direttiva 99/31/CE. Esso ha bandito, a partire dal 16 luglio 2003, il conferimento in discarica dei pneumatici tal quali mentre, a partire dal 16 luglio 2006, ne esclude il conferimento anche in forma triturata decretando in questo modo la necessità di attuare concretamente forme idonee di trattamento e recupero dei pneumatici a fine vita.

Art. 6 – Rifiuti non ammessi in discarica

1. Non sono ammessi in discarica i seguenti rifiuti: a)...b)...c).....o) pneumatici interi fuori uso a partire dal 16 luglio 2003, esclusi i pneumatici come materiale di ingegneria, ed i pneumatici triturati a partire da tre anni da tale data, esclusi in entrambi i casi quelli per biciclette e quelli con diametro esterno superiore a 1400 mm.

Art. 17 – Disposizioni transitorie finali

1. Le discariche già autorizzate alla data di entrata in vigore nel presente decreto possono continuare a ricevere, fino al 16 luglio 2005, i rifiuti per cui sono autorizzate.

- **D.M. n. 203 del 08/05/2003:** “Norme affinché gli uffici pubblici e le società a prevalente capitale pubblico coprano il fabbisogno annuale di manufatto e beni con una quota di prodotti ottenuti da materiale riciclato nella misura non inferiore al 30% del fabbisogno medesimo.

- **D.Lgs. n. 209 del 24/06/2003:** attuazione della direttiva 2000/53/CE.

- **Circolare ministeriale del 19 luglio 2005:** “Indicazione relativa ai materiali riciclati e beni manufatti ottenuti con materiale riciclato, provenienti da articoli in gomma, ai sensi del D. M. 08/05/2003 n. 203.

1. Materiale riciclato.

.....

Sono iscrivibili, a titolo di esempio e in maniera non esaustiva, nell'elenco dei materiali riciclati all'interno del repertorio di riciclaggio (RR):
1)...2)...3)...6) conglomerati cementizi modificati con granulo di gomma;
7) malte e premiscelati con polverino e granulo di gomma; 8)...

- **D.Lgs. n. 152 del 3/04/2006** relativa alla *gestione dei rifiuti e bonifica dei siti inquinati*.

Art. 228 – Pneumatici fuori uso

1. [...] al fine di ottimizzare il recupero dei pneumatici fuori uso e per ridurre la formazione anche attraverso la ricostruzione è fatto obbligo ai produttori e importatori di pneumatici di provvedere, singolarmente o in forma associata e con periodicità almeno annuale, alla gestione di quantitativi di pneumatici fuori uso pari a quelli dei medesimi immessi sul mercato e destinati alla vendita sul territorio nazionale.
2. [...] in tutte le fasi della commercializzazione dei pneumatici è indicato in fattura il contributo a carico degli utenti finali necessario, anche in relazione alle diverse tipologie di pneumatici, per far fronte agli oneri derivanti dall'obbligo di cui al comma 1.
3. I produttori e gli importatori di pneumatici inadempienti agli obblighi di cui al comma 1 sono assoggettati ad una sanzione amministrativa pecuniaria proporzionata alla gravità dell'inadempimento, comunque non superiore al doppio del contributo incassato per il periodo considerato.

- **D.Lgs. n.4 del 16/01/2008**

Art. 3 ter – Principio dell'azione ambientale

1. La tutela dell'ambiente e degli ecosistemi naturali e del patrimonio culturale deve essere garantita da tutti gli enti pubblici e privati e dalle persone fisiche e giuridiche pubbliche o private, mediante una adeguata azione che sia informata ai principi della precauzione, dell'azione preventiva, della correzione, in via prioritaria alla fonte, dei danni causati all'ambiente, nonché al principio «chi inquina paga» che, ai sensi dell'articolo 174, comma 2, del Trattato delle unioni europee, regolano la politica della comunità in materia ambientale.

- **D.L. n.208 del 30/12/2008**

Art. 17 – Disposizioni transitorie e finali

1. Le discariche già autorizzate alla data di entrata in vigore del presente decreto possono continuare a ricevere, fino al *31 dicembre 2008*, i rifiuti per cui sono state autorizzate.

- **D.Lgs. n.205 del 3/12/2010**

Art. 1 – Campo di applicazione e finalità

(Modifica dell'articolo 177 del d.lgs. 152/2006)

1. La parte quarta del presente decreto disciplina la gestione dei rifiuti e la bonifica dei siti inquinati, anche in attuazione delle direttive comunitarie, in particolare della direttiva 2008/98/CE, prevedendo misure volte a proteggere l'ambiente e la salute umana, prevenendo o riducendo gli impatti negativi della produzione e della gestione dei rifiuti, riducendo gli impatti complessivi dell'uso delle risorse e migliorandone l'efficacia.

Art. 4 – Criteri di priorità nella gestione dei rifiuti

1. La gestione dei rifiuti avviene nel rispetto della seguente gerarchia:
 - a) prevenzione;
 - b) preparazione per il riutilizzo
 - c) riciclaggio;
 - d) recupero di altro tipo, per esempio il recupero di energia;
 - e) smaltimento.
2. La gerarchia stabilisce, in generale, un ordine di priorità di ciò che costituisce la migliore opzione ambientale. Nel rispetto della gerarchia di cui al comma 1, devono essere adottate le misure volte a incoraggiare le opzioni che garantiscono, ..., il miglior risultato complessivo, tenendo conto degli impatti sanitari, sociali ed economici, ivi compresa la fattibilità tecnica e la praticabilità economica.
.....
5. Le pubbliche amministrazioni perseguono, nell'esercizio delle rispettive competenze, iniziative dirette a favorire il rispetto della gerarchia del trattamento dei rifiuti di cui al comma 1 in particolare mediante:
 - a) la promozione dello sviluppo di tecnologie pulite, che permettano un uso più razionale e un maggiore risparmio di risorse naturali;

- b) la promozione della messa a punto tecnica e dell'immissione sul mercato di prodotti concepiti in modo da non contribuire o da contribuire il meno possibile, per la loro fabbricazione, il loro uso o il loro smaltimento, ad incrementare la quantità o la nocività dei rifiuti e i rischi di inquinamento;
- c) la promozione dello sviluppo di tecniche appropriate per l'eliminazione di sostanze pericolose contenute nei rifiuti al fine di favorirne il recupero;
- d) la determinazione di condizioni di appalto che prevedano l'impiego dei materiali recuperati dai rifiuti e di sostanze e oggetti prodotti, anche solo in parte, con materiali recuperati dai rifiuti al fine di favorire il mercato dei materiali medesimi;
- e) l'impiego dei rifiuti per la produzione di combustibili e il successivo utilizzo e, più in generale, l'impiego dei rifiuti come altro mezzo per produrre energia;
- f) Nel rispetto della gerarchia del trattamento dei rifiuti le misure dirette al recupero dei rifiuti mediante la preparazione per il riutilizzo, il riciclaggio o ogni altra operazione di recupero di materia sono adottate con priorità rispetto all'uso dei rifiuti come fonte di energia.

Art. 16 – Sistema di controllo della tracciabilità dei rifiuti (SISTRI)

(Modifica dell'articolo 188-ter del d.lgs. 152/2006)

1. Sono tenuti ad aderire al sistema di controllo della tracciabilità dei rifiuti (SISTRI):
- a) gli enti e le imprese produttori di rifiuti speciali pericolosi [...];
 - b) i commercianti e gli intermediari di rifiuti;
 - c) i consorzi istituiti per il recupero o il riciclaggio di particolari tipologie di rifiuti che organizzano la gestione di tali rifiuti per conto dei consorziati;
 - d) le imprese e gli enti che effettuano operazioni di recupero o smaltimento di rifiuti;

Art. 36 – Sanzioni

1. I soggetti obbligati che omettono l'iscrizione al sistema di controllo della tracciabilità dei rifiuti (SISTRI) nei termini previsti, sono puniti con una sanzione amministrativa pecuniaria da duemilaseicento euro a quindicimilacinquecento euro. In caso di rifiuti pericolosi, si applica una

sanzione amministrativa pecuniaria da quindicimilacinquecento euro a novantatremila euro.

- **D.M. n.205 del 22/12/2010** apporta modifiche all'istituzione del SISTRI. Considerato che dal 1° ottobre 2010 è stato dato avvio al sistema di controllo della tracciabilità dei rifiuti (SISTRI), il presente decreto proroga la piena attuazione dello stesso al 31 dicembre 2011.

1.5 La valorizzazione e le modalità di recupero

Partendo dalla certezza che il problema degli pneumatici si risolve ribaltando il concetto di rifiuto in sottoprodotto da riutilizzare, si stanno affermando nell'Unione Europea sistemi efficaci di recupero dei PU. Dal 1996 vi è stato un continuo declino dello smaltimento in discarica dal 32% al 4% del 2009, mentre la via del riutilizzo, la ricommercializzazione, il riciclaggio e il recupero di energia e materiale ha raggiunto il 96% degli pneumatici usati. I maggiori mercati nel 2009 sono stati il recupero di energia 45% e il recupero di materiali 41%. (vedi Figura 7). Questi risultati sono del tutto eccezionali se confrontati con i tassi di recupero di altri settori quali la carta (72.2%) e la plastica (54%).

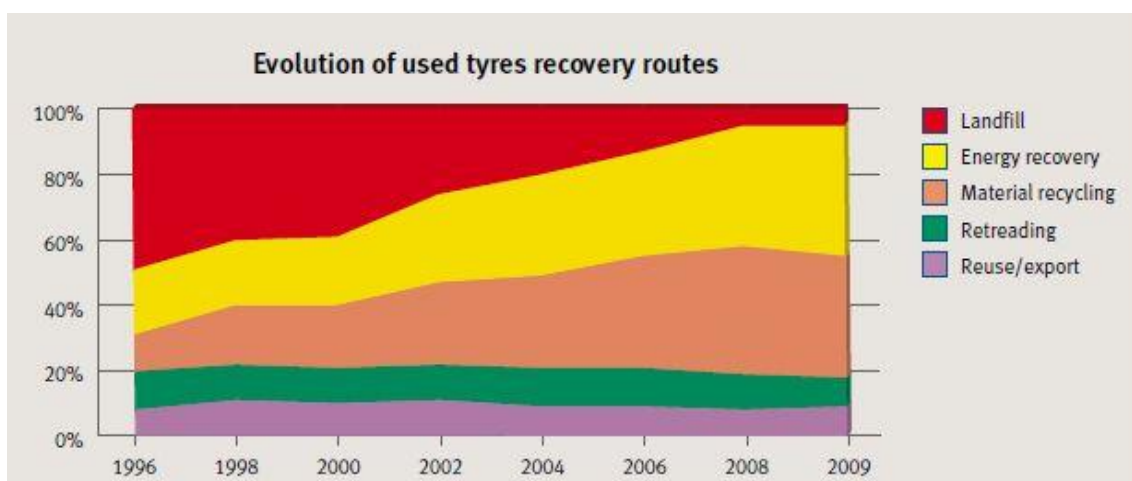


Figura 7: Evoluzione del recupero di PU in Europa (fonte ETRMA 2010).

Secondo il principio della “gerarchia dei rifiuti”, la via del riutilizzo degli pneumatici deve rappresentare una priorità rispetto al riciclaggio e deve essere incoraggiata attraverso apposite normative. In Svizzera, secondo la legge sulla circolazione stradale,

gli pneumatici usati, che hanno un battistrada con profilo di almeno 1,6 mm di profondità, sono in condizioni usabili e vengono reimpiegati per lo scopo originario. A volte prima del riutilizzo è necessaria la ricostruzione degli pneumatici: in pratica, il ricostruttore rimuove con macchinari specifici e tecniche consolidate il battistrada usurato e lo sostituisce con uno nuovo, conservando, se ancora efficiente, la carcassa originale. L'assoluta affidabilità di questo processo è testimoniata da controlli obbligatori molto accurati e dal fatto che gli pneumatici ricostruiti sono molto diffusi proprio su mezzi di trasporto come aerei, autocarri e autobus dove le sollecitazioni meccaniche sono maggiori. In molti paesi si è affermato l'interesse per tale attività che consente un risparmio consistente di gomma e quindi di greggio. Secondo l'Associazione Italiana Ricostruttori Pneumatici per costruire lo pneumatico di una autovettura del peso medio di 8 kg sono necessari 30 litri di petrolio, mentre per un pneumatico da autocarro, del peso medio di 60/70 kg, l'impiego di petrolio è di 90 litri. Questo patrimonio di materie prime, se lo pneumatico non fosse ricostruito dopo il primo impiego, verrebbe disperso attraverso lo smaltimento. Con la ricostruzione invece il 70-80% dello pneumatico usato viene recuperato, aggiungendo soltanto una quantità di materie prime pari al 20-30% per sostituire il battistrada usurato. I costi degli pneumatici rigenerati permettono un risparmio anche del 50% sul prezzo degli pneumatici nuovi. Ma la ricostruzione offre vantaggi notevoli anche su altri fronti, oltre a quello economico. Ricostruire un maggior numero di pneumatici utilizzando le strutture portanti che in seguito ad accurati controlli si rivelano ancora perfettamente integre dopo il primo impiego, permette di allungare il ciclo di vita del prodotto e quindi di rallentare la trasformazione dello pneumatico in rifiuto, contribuendo alla salvaguardia dell'ambiente. Tra l'altro, sul piano della sicurezza, il processo di ricostruzione è rigorosamente regolamentato con le norme ECE ONU 108 e 109. Quando invece gli pneumatici sono troppo usurati per essere riutilizzati per il loro scopo originario, sono considerati pneumatici fuori uso e entrano in un sistema di gestione basato sul riciclo al fine di ottenere energia o altri prodotti altrettanto utili. Il mercato del PFU e dei materiali da esso derivati, negli ultimi anni, ha subito una crescita esponenziale in virtù di una vasta disponibilità di materia e perché concorrenziali con i prodotti tradizionali. I governi e le industrie stanno prendendo consapevolezza dei potenziali benefici che possono derivare dall'utilizzo di questi materiali, al fine di azzerare il quantitativo di pneumatici ancora smaltiti in discarica. Contrariamente ad altri tipi di rifiuti quali ad esempio i contenitori di vetro, gli imballaggi, i metalli e la

carta, gli pneumatici usati sono difficili da riciclare. Il riciclaggio completo, che consisterebbe nel processare gli pneumatici usati per ottenere materie prime, non è attualmente possibile a causa delle difficoltà incontrate nei pretrattamenti di completa devulcanizzazione (rottura dei legami del carbonio con lo zolfo) della gomma. Tra i vari possibili procedimenti di riciclo, le tecnologie di macinazione, trattamento termico, incenerimento, gassificazione e pirolisi, rappresentano soluzioni utili al recupero di materia e energia dagli pneumatici fuori uso. Tra le tecnologie di macinazione più diffuse in Italia abbiamo la granulazione a temperatura ambiente, la granulazione criogenica e il processo elettrotermico, mentre un nuovo metodo per dismettere i PFU, consentendo di separare i componenti attraverso la tecnologia “water jet”, sta cominciando ad affermarsi.

1.5.1 La granulazione a temperatura ambiente

In questa tecnologia tutte le fasi di triturazione e granulazione vengono effettuate a temperatura ambiente. E' un processo di macinazione meccanica che avviene per fasi successive, effettuata per mezzo di lame e coltelli rotanti. Possono essere trattati indifferentemente pneumatici di autocarri, di auto e scarti di articoli in gomma ed il processo è normalmente finalizzato alla produzione di granulato e polverino con un trattamento differenziato, a seconda che si ottengano detti prodotti da pneumatici di auto o di autocarro. Per quest'ultimi si rende necessaria un'operazione preliminare di rimozione del tallone, con la quale vengono separati, senza rottura, i due anelli dallo pneumatico per limitare significativamente l'usura delle macchine di frammentazione.



Figura 8: Mulino tritratore.



Figura 9: Ciabattato di pneumatico.

In una seconda fase, detta triturazione, tutti gli pneumatici di autovetture e mezzi leggeri, nonché gli pneumatici di autocarro privati degli anelli metallici, vengono introdotti nelle diverse macchine trituratrici, le quali provvedono a ridurli in pezzature variabili da 100x100 mm fino a 70x70 mm (vedi Figura 8). Durante questa fase la velocità di triturazione non può essere elevata per evitare il riscaldamento dei mulini. Il materiale proveniente dalla triturazione, detto “ciabattato”, viene avviato alla fase di granulazione in un mulino granulatore (vedi Figura 10) per essere ulteriormente ridotto di dimensioni. In questa fase avviene anche una prima separazione della parte in gomma da quella in acciaio e da quella tessile: dopo essere uscito dal mulino granulatore, l'acciaio viene eliminato per mezzo di magneti, mentre le fibre tessili vengono separate attraverso una serie di filtri a maniche.



Figura 10: Mulino granulatore.



Figura 11: Granulato di gomma.



Figura 12: Mulino polverizzatore.



Figura 13: Polverino di gomma.

Tramite nastri magnetici di diversa natura, la gomma proveniente dalla fase di granulazione viene pulita dalle impurezze presenti e successivamente viene divisa per

granulometria. È possibile ridurre ulteriormente la granulometria aggiungendo all'impianto alcuni mulini polverizzatori (vedi Figura 12) nella fase di micronizzazione. Successivamente il materiale viene stoccato in big-bag differenti a seconda della pezzatura media. A questo punto il prodotto è pronto per essere utilizzato nelle sue più diverse applicazioni. Il polverino di pneumatico ottenuto può essere impiegato per la fabbricazione di articoli in gomma e per la produzione di bitumi modificati per l'asfaltatura di strade. La dimensione media delle particelle di PFU prodotta dalla frammentazione a temperatura ambiente dipende dal tempo e dal numero di volte in cui la gomma viene passata nel mulino, oltre che dal tipo di mulino usato (granulatore o polverizzatore). Molti impianti di frammentazione a temperatura ambiente sono dotati di più stadi consecutivi di triturazione in modo da poter soddisfare le richieste di prodotti di varie pezzature: si può avere la gomma granulata CR (Crumb Rubber) con pezzatura compresa tra 5 e 0,4 mm e il polverino di gomma PR (Powdered Rubber) con pezzatura di 1-0,4 mm. L'assenza di trattamenti chimici o termici, mantiene inalterata la struttura molecolare del materiale polimerico.

1.5.2 La granulazione criogenica

Il materiale in ingresso dalla fase di macinazione viene raffreddato a -80° o più, utilizzando dell'azoto liquido e portando la gomma in fase vetrosa. Questa non è una vera e propria transizione di fase ma con questo termine si indica che la gomma diviene fragile a tal punto da poter essere facilmente rotta. Le particelle di gomma, osservate al microscopio, hanno una superficie più uniforme se confrontate con quelle ottenute con la granulazione a temperatura ambiente. La pezzatura del granulo rispetto alla lavorazione a temperatura ambiente risulta più fine, tendenzialmente più pulito e utilizzabile in applicazioni più sofisticate. Ovviamente lo svantaggio principale di tale trattamento risiede nell'elevato costo dell'azoto liquido. Il processo inizia con una triturazione grossolana preliminare (ed eventuale separazione di anelli metallici dagli pneumatici per autocarro) che è simile a quella dell'impianto di frammentazione a temperatura ambiente. I frammenti di gomma in un secondo momento vengono fatti cadere in un mulino a martelli che opera ad una elevata velocità di rotazione. Qui i frammenti di gomma vengono ulteriormente frantumati in modo che la taglia delle particelle sia compresa in un intervallo di ampie dimensioni. Poiché i granuli di gomma

potrebbero essere umidi, è necessario essicarli prima che lascino il mulino e prima che vengano classificati in particelle di ben definite dimensioni. Al fine di produrre polverino di pneumatico è necessario provvedere ad un secondo stadio di frammentazione criogenica. Con questa tecnologia si ottengono polverini di PFU con dimensioni medie inferiori a 0,4 mm.

1.5.3 I processi elettrotermici

Attraverso i processi elettrotermici lo pneumatico viene ridotto in pezzatura grossolana ed introdotto in un forno verticale ad induzione elettromagnetica. La parte metallica dello pneumatico, sottoposta al campo elettromagnetico, si riscalda rapidamente fino a temperature di circa 700°C. A queste temperature la gomma carbonizza all'interfaccia ed il metallo si distacca dalla gomma. Nella parte bassa del forno vengono raccolti separatamente il materiale metallico, la gomma inalterata e la gomma carbonizzata. Con i processi di devulcanizzazione e rigenerazione, la gomma, preventivamente triturata, viene riportata ad una struttura chimica vicina a quella dell'elastomero di partenza, in maniera tale da permetterne l'aggiunta alle normali mescole. La devulcanizzazione in genere è effettuata in autoclave mediante processi termochimici, sfruttando l'azione congiunta di temperatura, pressione ed additivi chimici.

1.5.4 Il Water-jet

La tecnologia "water jet" sfrutta un getto d'acqua generato ad alta pressione (150-400 Mpa), il quale permette la disgregazione e polverizzazione della gomma, lasciando la carcassa dello pneumatico, costituita da una rete di fili d'acciaio, intatta e perfettamente ripulita. Tale lavorazione ha, infatti, un'azione molto selettiva sui componenti, consentendo di produrre un materiale metallico molto pulito e una frazione di gomma di granulometria fine e un residuo tessile riciclabile. Il granulato di gomma così ottenuto viene sottoposto a processo di essiccazione e vagliatura. Se granulometrie inferiori sono richieste per applicazioni di alto valore, si procede ad eventuale macinazione fine del granulato con i mulini polverizzatori.

1.5.5 Il recupero di materia prima

Gli pneumatici sono da considerare un'ottima risorsa, nell'ottica dello sviluppo sostenibile, poiché hanno una vita media superiore ai 50 anni e delle proprietà intrinseche da non sottovalutare, tra cui lo sviluppo batterico rallentato, la resistenza alla muffa, al caldo e all'umidità, alla luce del sole o ai raggi ultravioletti come pure agli olii, agli acidi e ad altri prodotti chimici; hanno inoltre proprietà elastiche e resistono bene agli urti. Il polverino ed il granulato di gomma sono due consolidati prodotti industriali e più precisamente due materie prime secondarie derivanti dall'attività di recupero degli pneumatici fuori uso. Essi possono essere utilizzati nei processi produttivi volti ad ottenere manufatti in gomma di vario tipo. Più precisamente il polverino viene aggiunto, quale carica inerte, ai vari ingredienti utilizzati nella preparazione delle mescole. I prodotti in gomma più diffusi nei quali esso può trovare impiego sono:

- ruote piene da carrello;
- tappetini in gomma;
- soles da scarpe.

I principali utilizzi del granulato di gomma, soprattutto nei paesi dell'Europa centro-settentrionale, sono la realizzazione di mattonelle in gomma, realizzate per avere una buona resistenza all'usura e agli agenti atmosferici. Esse sono principalmente installate in:

- parchi gioco;
- bordi di piscine;
- aree sportive;
- esterni di asili;
- piste ciclabili.

Lo scopo dell'utilizzo di questi prodotti per l'arredo urbano è quello di eliminare o ridurre le possibilità di scivolamento, attutendo gli shock da caduta dove normalmente si corre, si salta, si gioca (vedi Figura 14). Nel 2009 l'ETRMA ha stimato che circa il 41% degli pneumatici a fine vita in Europa è stato avviato al recupero di materia. Il recupero di PFU, sotto forma di materia prima, rappresenta sicuramente una delle opzioni più interessanti, alla luce dei potenziali campi di applicazione dei materiali derivanti dal trattamento meccanico degli pneumatici fuori uso. Ad oggi, tale soluzione risulta ancora fortemente penalizzata da una serie di fattori, quali la carenza

d'informazioni sulle caratteristiche tecniche dei prodotti in relazione ai diversi campi di applicazione e la prevalenza di un approccio orientato all'attività di ritiro e trattamento piuttosto che alla realizzazione di nuovi manufatti in gomma. Per far fronte alle carenze d'informazioni sui potenziali utilizzatori finali e favorire l'incontro tra domanda e offerta di tali prodotti sul mercato nazionale e internazionale, la GARWER s.r.l, con la collaborazione dell'ENEA di Bologna, ha messo a punto un portale di rete (www.borsarifiuti.com). Il sistema consente di verificare in tempo reale la disponibilità dei materiali a livello nazionale ed internazionale in modo da ottimizzare la gestione dei flussi di comunicazione tra le imprese che operano nella valorizzazione dei rifiuti.



Figura 14: Esterno di un asilo rivestito con materiale in gomma riciclata.

1.5.6 Il recupero energetico

Anche il recupero energetico rappresenta, come il recupero di materia, un importante e valida forma di valorizzazione dello pneumatico. Circa il 45% degli pneumatici fuori uso in UE, e circa il 53% negli USA, sono utilizzati come combustibile alternativo in alcuni processi di recupero energetico, permettendo così un minor consumo di combustibile fossile non rinnovabile (26). Il basso costo di questa fonte di energia, unito all'elevato potere calorifico, evidenziato in Figura 15, rende i PFU una valida alternativa ai combustibili tradizionali, i cui costi di reperimento, estrazione e trasporto sono superiori e in costante crescita. A ciò si aggiungono i vantaggi ambientali offerti dal recupero energetico degli pneumatici:

- non produce aumento di emissioni inquinanti in atmosfera rispetto ai combustibili convenzionali;
- consente lo smaltimento di un rifiuto che è particolarmente resistente ai più tenaci cicli di trattamento;
- consente la riduzione del consumo dei combustibili fossili in via di esaurimento.

Fuel	Energy (Gigajoule/ tonne)	Emissions	
		kgCO ₂ /tonne	kgCO ₂ / Gigajoule
Tires	32.0	2,270	85
Coal	27.0	2,430	90
Pet coke	32.4	3,240	100
Diesel oil	46.0	3,220	70
Natural gas	39.0	1,989	51
Wood	10.2	1,122	110

Figura 15: Potere calorifico e emissioni di CO₂ dei principali combustibili (Greenhouse gas protocol initiative WBCSD).

Si osserva inoltre che il contenuto di carbonio degli pneumatici a fine uso risulta inferiore a quello del carbone e del petrolio e in fase di combustione produce una minore emissione di CO₂ per unità energetica. Le applicazioni più diffuse sono nei forni per la produzione del cemento o negli inceneritori per la produzione di energia elettrica o vapore.

La combustione degli pneumatici fuori uso in forni industriali, quali quelli installati nei cementifici, contribuisce al risparmio energetico, da un lato, e al recupero di materia dall'altro, in quanto i metalli ferrosi presenti negli pneumatici e gli inerti della miscela elastomerica vengono inglobati nei clinker di cemento. L'alimentazione del bruciatore avviene durante il processo produttivo di cottura del clinker dove vengono raggiunte e mantenute per diversi secondi temperature tra 1000 e 2000 °C. Si realizza così un recupero totale dell'energia senza formazione di residui solidi, scorie o liquidi, in quanto le ceneri di combustione vengono inglobate nel clinker, e senza problemi relativi al loro smaltimento con cui i forni convenzionali devono fare i conti. L'utilizzo di combustibile non convenzionale non modifica le caratteristiche chimico-fisiche del clinker prodotto dal processo di cottura. (1)

La combustione di PFU attraverso la termodistruzione permette un recupero di energia termica e materie prime seconde (fili di acciaio, ossido di zinco, solfato di sodio). L'impianto di termodemolizione è composto da un sistema di caricamento automatico dei PFU interi o triturati, che permette la loro introduzione nel combustore, costituito da un cilindro rotante di acciaio rivestito internamente di materiale refrattario. Dal forno i fumi, attraverso un condotto di postcombustione, entrano nella caldaia a recupero e qui avviene la produzione di vapore surriscaldato che è poi inviato alla turbina a condensazione dove, attraverso l'alternatore ad essa collegato, avviene la produzione di energia elettrica. Il vapore, una volta condensato e degasato, è inviato nuovamente in caldaia per ricominciare il ciclo. I fumi, invece, dopo aver ceduto il loro contenuto entalpico all'interno della caldaia, sono inviati al sistema di filtrazione, che effettua la depolverazione e desolforazione, e quindi sono espulsi attraverso il camino. Tale processo permette di produrre 1.8 kWh per ogni kg di pneumatico.

La tecnologia di pirolisi rappresenta una possibile alternativa ai termovalorizzatori: essa consiste in una degradazione termica in atmosfera inerte, ottenuta mediante riscaldamento indiretto, in seguito al quale gli pneumatici subiscono un cracking termico a temperature sui 500/600 °C, scindendosi in una componente solida (char), una parte liquida (oli) ed una gassosa (syngas), in parte condensabile. Le percentuali delle tre frazioni dipendono dalla temperatura, dalla pressione e dal tempo di residenza del rifiuto nel reattore, nonché dalle temperature a cui viene operata la successiva fase di condensazione. La proporzione relativa tra i vari prodotti dipende dal modo in cui si realizza il processo e dai parametri di reazione.

Sottoponendo i gas di pirolisi ad una fase di condensazione è possibile ottenere una frazione liquida (costituita in gran parte da idrocarburi) ed una frazione gassosa incondensabile (costituita essenzialmente da idrogeno, metano e monossido di carbonio) che può essere combusta contribuendo in tal modo all'economia di processo (che risulta maggiore qualora tutta la frazione gassosa uscente dal reattore venga combusta nel bruciatore). Il residuo carbonioso, quando le caratteristiche lo permettono, può essere riutilizzato direttamente come combustibile in luogo del carbone, o sottoposto ad ulteriore processo di gassificazione per la produzione di gas combustibile, ovvero destinato alla produzione di carboni attivi per depurazione acque reflue o fumi.

1.6 Gli effetti dei PFU sulla salute umana

Come si è già detto, l'esigenza di trovare uno sbocco alternativo alla discarica per i PFU, spinge sia la comunità scientifica mondiale che il mondo industriale a cercare nuove strade per lo smaltimento e il trattamento degli stessi. È però necessario non sottovalutare gli effetti che questi materiali, frutto dell'economia moderna, potrebbero avere sull'inquinamento atmosferico e sulla salute umana. A tale proposito, la normativa americana ASTM D 6270-98 (2004) e la bozza di normativa europea prEN 14243:2004 (E) hanno dato importanti risposte in merito a questi quesiti. Viene quindi qui di seguito riportata una sintesi dei punti salienti trattati all'interno delle suddette normative.

Scrap Tire (Whole)

SECTION II		HAZARDOUS INGREDIENTS			
CHEMICAL NAME	CAS NUMBER	%	HEALTH HAZARD	OSHA (PEL) AOGIH (TLV)	PHYSICAL HAZARD
Carbon Black	1333-86-4	16-36	Irritant	3.5 mg/M ³	Non-hazardous
Clay	12141-46-7	<1.0	Irritant	N/D	Non-hazardous
Titanium dioxide	13463-67-7	<1.5	Irritant	10 mg/M ³	Non-hazardous
Zinc oxide	1314-13-2	<2.0	Irritant	5.0 mg/m ³	Non-hazardous
Sulfur	7704-34-9	<1.5	Irritant	N/D	Non-hazardous
Peteroleum hydrocarbons	8002-29-7	5-13	Irritant Carcinogen	5.0 mg/m ³	Non-hazardous

Figura 16: composti chimici presenti nei PFU e loro pericolosità .

- come risultato di *decomposizione termica* o *combustione* di pneumatici di scarto interi, potrebbero essere liberati materiali potenzialmente cancerogeni (comprese nitrosammine), ossido di carbonio (monossido di carbonio e biossido di carbonio), idrocarburi infiammabili e fumi;
- effetti dovuti a *esposizione acuta* (a *breve termine*): non si conoscono effetti sulla salute dovuti a esposizione acuta (a breve termine);
- effetti dovuti a *esposizione cronica* (ripetuta): questi materiali contengono oli diluenti aromatici o naftenici. Questi oli potrebbero essere rilasciati dalla superficie mediante il contatto con la pelle. Il contatto prolungato di questi oli ha mostrato di causare cancro alla pelle in studi di laboratorio effettuati su animali. Gli oli diluenti aromatici e naftenici sono stati classificati come cancerogeni dalla IARC (International

Agency for Research on Cancer). Contatti prolungati o ripetuti potrebbero causare irritazioni e reazioni allergiche della pelle;

- i PFU non sono irritanti per gli occhi e non provocano problemi se ingeriti o inalati: durante le normali condizioni di uso di questi materiali, non è richiesta alcuna protezione per le vie respiratorie;
- coloro che hanno contatti prolungati con questi materiali devono avere una buona igiene personale lavandosi di frequente mani e braccia con acqua e sapone prima di mangiare, fumare e prima di andare in bagno. Inoltre, devono rimuovere i vestiti contaminati e lavarli accuratamente prima di riutilizzarli al termine di ogni giornata di lavoro. È necessario fare uso di guanti.
- le *sostanze che potenzialmente potrebbero percolare dai residui di pneumatici consumati* sono presenti *nelle acque sotterranee* a bassi livelli. I livelli di percolato sono molto al di sotto dei limiti ammissibili e hanno un impatto trascurabile sulle qualità generali dell'acqua. I risultati dei test indicano che i pneumatici non lisciviano componenti organici volatili. Le ricerche sulla sicurezza a lungo termine indicano che la maggior parte dei composti rilevati nei campioni di acqua sono da 10 a 100 volte più bassi rispetto ai limiti ammissibili per l'acqua potabile e quindi non rappresentano una minaccia né per la salute umana né per l'inquinamento;
- sono stati fatti anche dei test per vedere come il livello di *pH influenza il rilascio dei composti di PFU*. I materiali organici rilasciano molto più liberamente sotto condizioni neutre (pH 7) mentre i metalli tendono a rilasciare più liberamente sotto condizioni acide (pH 3,5);
- per quanto riguarda il *trasporto* di PFU interi o triturati, essi non richiedono materiali da imballaggio. Per PFU triturati i veicoli da trasporto devono avere i lati chiusi e la parte inferiore coperta con un materiale che non abbia sporgenze metalliche e che possa contenere il materiale in modo che non fuoriesca.

Tutte queste considerazioni portano ad affermare che per i PFU interi non si siano riscontrati danni permanenti dovuti a contatti prolungati. Per limitare le irritazioni sono sufficienti gli indumenti. Invece per quanto riguarda i PFU triturati è necessario indossare indumenti protettivi quali guanti e protezione per occhi, orecchie e capo. Con questi piccoli accorgimenti è comunque possibile utilizzare granulato di gomma nel campo dell'ingegneria civile.

IL CALCESTRUZZO

2.1 Introduzione

Il calcestruzzo si ottiene miscelando in diverse proporzioni degli aggregati, sabbia e ghiaia o pietrisco, tenuti insieme e saldati tra loro da una malta di cemento ed acqua, con eventuali additivi. I componenti di un calcestruzzo normale possono variare in funzione delle prestazioni che si vogliono ottenere dal conglomerato.

Tra le più importanti proprietà vi sono la lavorabilità dell'impasto e la resistenza meccanica:

- per lavorabilità dell'impasto si intende l'attitudine del calcestruzzo a mantenere la propria consistenza, senza che avvengono variazioni fisiche e tecnologiche e senza che si manifesti il fenomeno della segregazione degli inerti, nel periodo compreso tra la confezione e il getto. Una buona lavorabilità principalmente dipende dalla dimensione e dalla forma degli aggregati, dalla loro distribuzione granulometrica, dalla presenza di additivi, dal rapporto tra acqua e cemento e dalla temperatura. La lavorabilità dell'impasto viene valutata attraverso la sua consistenza, ad esempio controllando la sua maggiore o minore attitudine a conservare una forma impartitagli. La consistenza viene solitamente valutata, secondo la UNI EN 206-1, attraverso una delle seguenti metodologie:
 - valutazione di consistenza con il cono di Abrams (EN 12350-2);
 - prova al consistometro Vébé (EN 12350-3);
 - indice di compattabilità (EN 12350-4);
 - spandimento (EN 12350-5);
- per resistenza meccanica intendiamo la capacità del calcestruzzo di resistere alle sollecitazioni di compressione, trazione, urto e abrasione. Questa varia in funzione della composizione e in particolare è influenzata dalle proprietà e quantità del legante, dalla natura e composizione granulometrica degli inerti, dal rapporto tra acqua e cemento, dalla presenza di additivi e dalla modalità di confezionamento e di stesa.

Il requisito più importante richiesto al calcestruzzo nelle normali applicazioni è la resistenza a compressione che denota una massa compatta, con una bassa presenza dei vuoti o irregolarità, e garantisce buone prestazioni sotto tutti gli aspetti. La resistenza a compressione del calcestruzzo viene determinata con prova a compressione secondo la norma UNI 6132 su provini cubici o cilindrici, maturati per 28 giorni secondo la norma UNI 12390-2:2002.

Possiamo considerare che un buon calcestruzzo debba contenere circa 300 kg di cemento per metro cubo di prodotto finito, a cui si devono aggiungere circa 0,4 metri cubi di sabbia, circa 0,8 metri cubi di ghiaia o pietrisco e una quantità d'acqua compresa tra 0,45 e 0,55 la quantità di cemento, per ottenere un metro cubo di conglomerato. Vediamo come la qualità e la quantità dei componenti influenzino le caratteristiche di un conglomerato cementizio.

2.2 Le componenti del calcestruzzo

2.2.1 Acqua

L'acqua ha la funzione di reagire con il cemento, dando luogo alle reazioni di idratazione del legante, e allo stesso tempo conferisce all'impasto una sufficiente fluidità, tale da renderlo facilmente lavorabile. Se, infatti, un rapporto acqua/cemento pari a 0,25 è capace di garantire il completamento delle reazioni di idratazione dei costituenti del legante, tale quantità non è però sufficiente a rendere lavorabile l'impasto. Per tale ragione il rapporto acqua/cemento viene solitamente aumentato sino a valori compresi tra 0,45 e 0,55. Oltre questi valori, un aumento del rapporto acqua/cemento sfortunatamente produce una rapida diminuzione delle proprietà meccaniche e della durabilità del calcestruzzo. Infatti l'acqua in eccesso, rimasta libera, occupa degli spazi che, durante la maturazione restano vuoti per la fuoruscita dell'acqua, aumentando notevolmente la porosità del materiale. La presenza dei pori riduce la resistenza a compressione del calcestruzzo, ne aumenta la deformabilità e amplifica inoltre alcuni fenomeni di deformazioni ritardate, come il ritiro e la viscosità. Infine, favorendo la permeazione di agenti esterni e la conseguente alterazione del materiale, ne riduce sensibilmente la durabilità. In Figura 17 si osserva

una caduta progressiva delle resistenze a compressione con l'incremento del valore acqua/cemento.

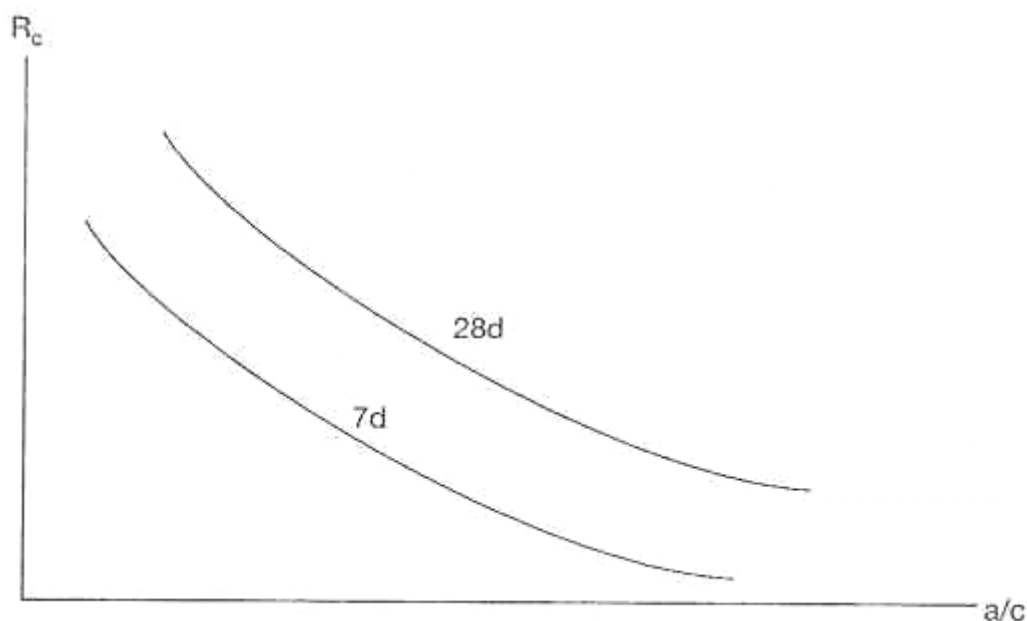


Figura 17: Resistenza a compressione in relazione al rapporto acqua/cemento.

Qualora poi il rapporto acqua/cemento sia molto elevato, superiore a 0,6, si può verificare il fenomeno di segregazione differenziata: gli elementi più grossi e più pesanti dell'aggregato tendono a sedimentare sul fondo mentre i più piccoli e a minor peso specifico, insieme all'acqua, si collocano prevalentemente in superficie. L'acqua raccolta in superficie provoca l'esudazione o bleeding del calcestruzzo. L'eterogeneità degli aggregati nel conglomerato indurito presenta gravi inconvenienti soprattutto perché ne pregiudica le proprietà meccaniche e deve essere evitata curando la composizione degli impasti.

La resistenza meccanica non viene influenzata solo dalla quantità, ma anche dalla qualità dell'acqua: essa non deve contenere materiali in sospensione che possano pregiudicare l'aderenza tra i costituenti o l'indurimento del cemento. Devono essere evitate acque con quantità eccessive di solfati o cloruri disciolti che possano interferire con il meccanismo di presa del cemento.

2.2.2 Cemento

Il cemento è un legante idraulico che miscelato con acqua fornisce notevoli proprietà adesive. Dal punto di vista chimico si tratta in generale di una miscela di silicati di calcio e alluminati di calcio, ottenuti dalla cottura ad alta temperatura di calcare e

argilla. Il materiale ottenuto denominato clinker di Portland, viene finemente macinato e addizionato con gesso nella misura del 4-6% con la funzione di ritardante di presa. Tale miscela è nota con il nome di cemento Portland, che è alla base di tutti i cementi attualmente utilizzati in edilizia. L'aggiunta di altri composti in proporzioni variabili al cemento Portland, secondo la norma UNI EN 197-1, permette di ottenere 5 tipi principali di cemento e tutti gli altri sottotipi. Per esempio il cemento indicato con II A/LL è un cemento Portland del II tipo, che indica una percentuale di clinker superiore al 65%, e sottotipo A/LL, che indica una aggiunta di calcare. Per esempio aggiungendo le scorie di alto forno si ottiene il cemento Portland d'altoforno (III tipo), con l'aggiunta di pozzolana si ottiene il cemento pozzolanico (IV tipo). I calcestruzzi miscelati si possono giustificare sia per ragioni economiche, poiché il minerale aggiunto costa meno del clinker, sia per ottenere delle particolari caratteristiche. È possibile raggruppare i vari cementi in tre soli gruppi, in funzione della classe di resistenza:

- Classe 32.5 per i cementi con resistenza a compressione standard a 28 giorni $R \geq 32,5$ e $R \leq 52,5$;
- Classe 42.5 per i cementi con resistenza a compressione standard a 28 giorni $R \geq 42,5$ e $R \leq 62,5$;
- Classe 52.5 per i cementi con resistenza a compressione standard a 28 giorni $R \geq 52,5$.

Secondo la UNI EN 197-1 si definiscono, per ognuna delle 3 classi di resistenza, due classi di resistenza iniziale a 2-7 giorni:

- La prima con resistenza iniziale ordinaria, contrassegnata con la lettera N;
- La seconda con resistenza iniziale elevata, contrassegnata con la lettera R.

La resistenza a compressione standard si raggiunge solo dopo la posa in opera e la maturazione dei getti: durante queste fasi lo sviluppo della resistenza può subire ritardi, accelerazioni o scostamenti dei valori previsti. Dopo la posa in opera del getto l'impasto diventa più consistente e comincia a perdere la propria deformabilità e questo aumento di consistenza prende il nome di presa. Successivamente, di solito dopo un giorno, la pasta diviene così rigida da assumere l'aspetto e la durezza di una pietra nella fase che prende il nome di indurimento. Sia la presa che l'indurimento sono il risultato di un complesso di reazioni chimiche tra i costituenti del cemento e l'acqua d'impasto. Come detto sopra, il cemento Portland è costituito da una miscela di silicati e alluminati di calcio che, in virtù della finissima macinazione, reagiscono rapidamente a contatto con acqua, dando luogo a complesse reazioni che vengono globalmente indicate come

idratazione. A seguito di queste reazioni si produce una struttura fibrosa, da cui dipende fondamentalmente la capacità collante del cemento. In modo schematico si può pensare di suddividere il fenomeno dell'idratazione in tre stadi: il primo (a) ha inizio subito dopo l'impasto ed ha una durata di qualche decina di minuti, il secondo (b) dura qualche ora e corrisponde alla presa, il terzo (c) inizia dopo circa un giorno e riguarda l'indurimento. Subito dopo l'impasto, durante il primo stadio (Figura 18a), la pasta di cemento è costituita da un insieme di granuli di clinker e di gesso dispersi nell'acqua. La mobilità delle particelle solide, e quindi la lavorabilità della pasta, è tanto maggiore quanto più alto è il contenuto di acqua. Man mano che il cemento si idrata, esso va ad occupare una parte dello spazio originariamente occupato dall'acqua. Questo, insieme alla particolare morfologia a forma di lamina e di fibre degli alluminati idratati, determina durante la presa una minore mobilità delle particelle solide e quindi una maggiore consistenza della pasta cementizia. Le particelle idratate formano inoltre dei ponti tra loro che comportano un'ulteriore perdita di plasticità e determinano il fenomeno della presa già dopo qualche ora dall'impasto del cemento con l'acqua (Figura 18b).

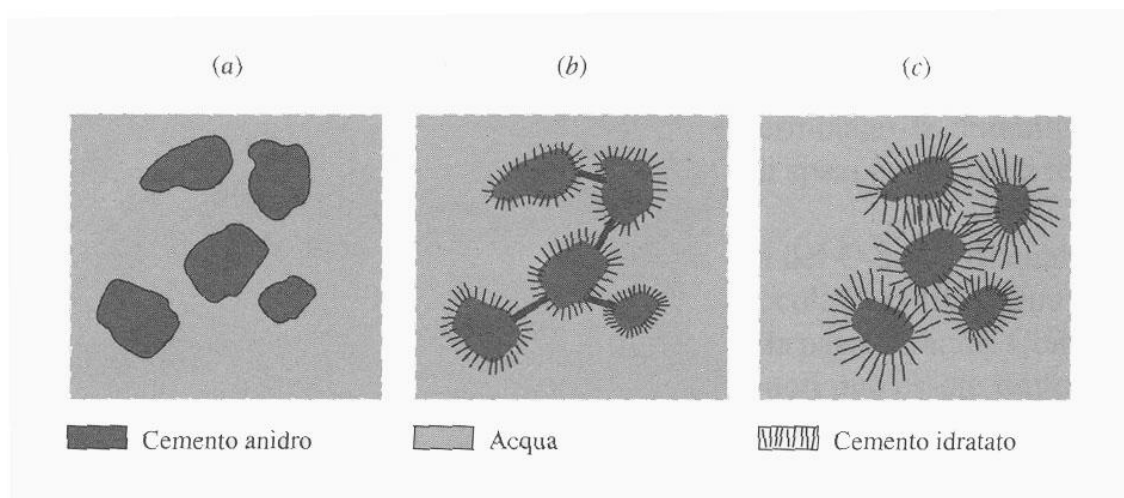


Figura 18: Idratazione schematica del cemento: (a) subito dopo il mescolamento; (b) durante la presa;

Successivamente, per l'idratazione dei silicati, si forma un prodotto che va a riempire ulteriormente il volume inizialmente occupato dall'acqua. La natura prevalentemente fibrosa del prodotto idratato (C-S-H) determina una struttura di fibre intrecciate che, insieme alle forze di adesione e a quelle di Van der Waals, è responsabile dei legami che si stabiliscono tra le particelle solide e quindi dell'indurimento della pasta cementizia (Figura 18c). In tale fase si osserva un aumento delle proprietà tissotropiche dell'impasto dovute a questi legami tra particelle idrate di calcio. "La resistenza

meccanica, oltre che dal grado di idratazione del cemento, dipenderà dal rapporto acqua/cemento dell'impasto: a parità di grado di idratazione, maggiore è il rapporto acqua/cemento, minore è il numero di contatti che si stabiliscono tra le fibre e quindi minore è la resistenza meccanica della pasta indurita.” (6) Da quanto detto fin qui si deduce che per un determinato calcestruzzo esiste un valore del rapporto acqua/cemento in corrispondenza del quale la resistenza meccanica è massima: aumentando il rapporto acqua/cemento oltre il suddetto valore, diminuisce la resistenza meccanica perché non è più possibile una completa compattazione dell'impasto e si genera una alta porosità capillare; se si diminuisce il rapporto acqua/cemento al di sotto del suddetto valore, diminuisce la resistenza meccanica in quanto non è più possibile raggiungere la massima densità del calcestruzzo per la bassa lavorabilità dello stesso. Altri fattori che influenzano il processo di maturazione del calcestruzzo sono la temperatura e l'umidità dell'aria.

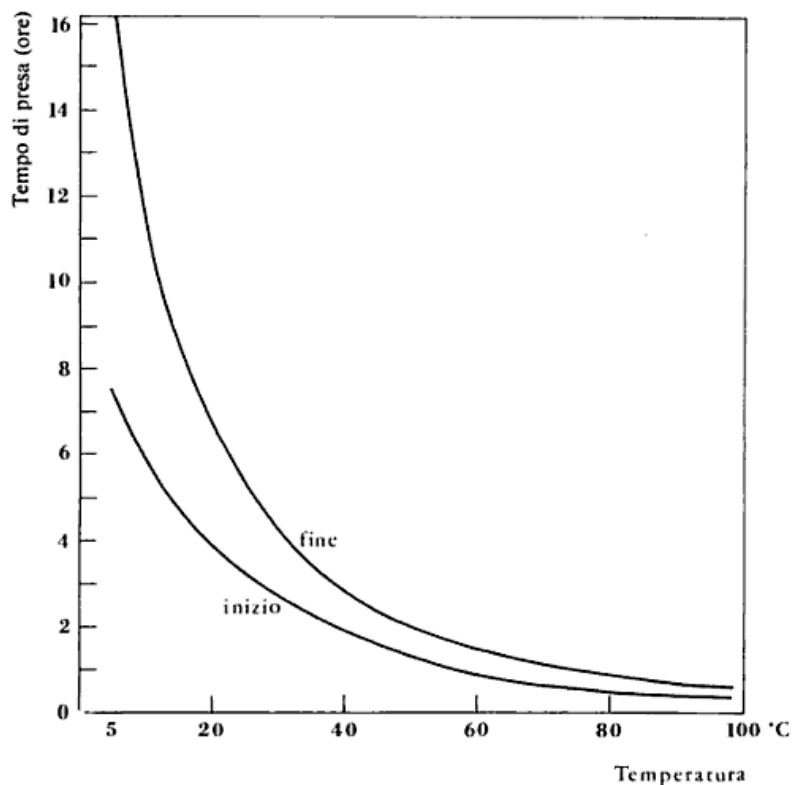


Figura 19: influenza della temperatura sui tempi iniziali e finali di presa per un cemento Portland.

Nella Figura 19 è mostrato schematicamente l'effetto della temperatura sul tempo iniziale e finale di presa. Si può osservare che un aumento della temperatura provoca una sensibile riduzione del tempo di presa, ed in particolare di quello finale di presa. La maturazione del calcestruzzo è fortemente influenzata dalla temperatura, che, se

superiore a 30°C genera eccessiva evaporazione e una rapida idratazione del conglomerato cementizio. Questo produce un aumento della resistenza meccanica a brevi stagionature, ma una diminuzione della resistenza meccanica a lunghe stagionature. Le basse temperature provocano una maturazione più lenta e basse resistenze meccaniche per brevi stagionature, ma permettono al calcestruzzo di raggiungere più alte resistenze a compressione per lunghe stagionature. Si ritiene che l'aumento di resistenza a compressione ottenuto a basse temperature sia dovuto alla migliore qualità dei silicati idrati di calcio, responsabili della resistenza meccanica del conglomerato, prodotti attraverso un processo di idratazione più lento. Per ovviare a questi inconvenienti dovuti alle alte temperature si ricorre spesso ad accorgimenti come l'uso di additivi che ritardino la presa o il "curing" per proteggere il calcestruzzo giovane, impedendo una eccessiva evaporazione dell'acqua dal calcestruzzo e proteggendo il getto dal calore esterno. A basse temperature la velocità di idratazione scende e i tempi di presa si allungano, pregiudicando la produttività del cantiere. Al di sotto dei 5°C si ha un marcato rallentamento dei tempi di presa e si ricorre a particolari accorgimenti come utilizzare cementi a rapido indurimento (42,5R o 52,5R), additivi acceleranti di presa, acqua calda per l'impasto. Se l'acqua per l'impasto gela non può avviarsi il processo d'idratazione.

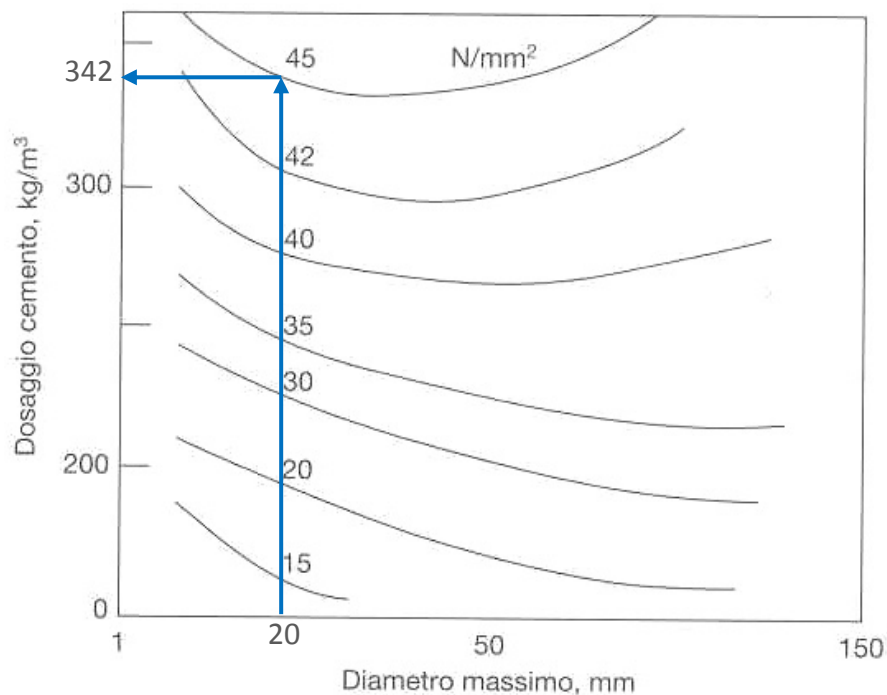


Figura 20: Resistenza a compressione in funzione del diametro massimo dell'aggregato e dei dosaggi di cemento.

2.2.3 Aggregati

Gli aggregati sono materiali lapidei naturali che costituiscono la maggior parte della massa dei conglomerati cementizi, poiché ne occupano mediamente tra il 60% e l'80% del volume complessivo, e ne influenzano il comportamento finale per le loro proprietà fisiche e chimiche. Le caratteristiche meccaniche influiscono sul comportamento del materiale finito poiché gli aggregati costituiscono lo scheletro del calcestruzzo, ma anche le caratteristiche geometriche influiscono poiché i granuli devono essere costipati nella massa del conglomerato in modo da costituire uno scheletro lapideo addensato. I granuli non compatti o i vuoti presenti nella massa sono punti deboli che possono alterare sensibilmente la distribuzione delle sollecitazioni e in corrispondenza dei quali può verificarsi il cedimento che innesca la rottura. Poiché poi i granuli che compongono lo scheletro devono aderire tenacemente alla pasta di cemento che li agglomera, risultano importanti anche la loro omogeneità, la forma, la struttura, la pulizia. Gli aggregati naturali vanno estratti da cave, dal letto dei fiumi o dal mare, in zone prossime al cantiere, quindi vengono frantumati, quando necessario, per ottenere la pezzatura d'uso, vengono selezionati in base alle dimensioni dei granuli tramite setacciatura e infine vengono lavati per eliminare le impurità. La setacciatura o vagliatura degli aggregati permette di suddividerli in due classi: il materiale passante per almeno il 95% attraverso il vaglio avente maglie di apertura 4 mm è denominato "aggregato fine" o sabbia; il materiale trattenuto almeno per il 95% al vaglio suddetto è l'"aggregato grosso"; il materiale passante per almeno il 90% al vaglio da 0,075 , è denominato "filler".

L'aggregato fine, costituito da sabbia naturale o artificiale, deve risultare bene assortito in grossezza e costituito di grani resistenti, non provenienti da rocce decomposte o gessose per essere usato nei calcestruzzi. Sono generalmente preferite le sabbie silicee, specialmente se formate con prevalenza di granuli quarzosi.

L'aggregato grosso è costituito da ghiaia e pietrisco con grani dal diametro superiore a 4 mm, di dimensioni assortite per conferire maggiore compattezza al calcestruzzo. Ghiaia e pietrisco non devono contenere impurità e non devono provenire da materiali friabili: le rocce silicee e il calcare danno vita a ottime ghiaie e ottimi pietrischi; in genere l'aggregato calcareo sviluppa una maggiore adesione con la malta cementizia rispetto all'aggregato siliceo e quindi una maggiore resistenza a compressione. Questo per la

formazione di uno speciale legame chimico, dovuto all'interazione tra calcare e cemento, che accresce l'aderenza tra pasta cementizia e aggregati dovuta al semplice ancoraggio di tipo meccanico, che è influenzato dalla struttura superficiale dei granuli. La natura petrografica degli aggregati deve essere accertata per conoscerne la natura mineralogica e evitare la presenza di minerali capaci di reagire con l'acqua e distruggere la compattezza del calcestruzzo. Per esempio sono da evitare le rocce che contengono miche, le quali, per la loro forma laminare, indeboliscono la struttura del conglomerato. Come detto sopra, la distribuzione granulometrica degli aggregati viene determinata mediante vagliatura, che risulta normalizzata secondo le prescrizioni della UNI EN 933:1999.



Figura 21: Vibrovaglio utilizzato per le operazioni di setacciatura degli aggregati.

Secondo tali norme, l'analisi granulometrica è effettuata attraverso l'uso di vagli, impilati uno sull'altro, consistenti in cilindri di lamiera con un fondo forato: tali fori o "luci" hanno aperture normalizzate e decrescenti da 63 mm del primo vaglio a 0 dell'ultimo. I vagli vengono posti su un apposito apparecchio chiamato vibrovaglio (Figura 21) che mediante vibrazione produce la distribuzione del materiale introdotto sul vaglio più alto nei vagli sottostanti con luci a minore diametro. Ogni vaglio divide l'aggregato in due parti chiamate passante e trattenuto: il peso del materiale trattenuto

ad ogni vaglio, rispetto al peso del materiale inizialmente introdotto, rappresenta il trattenuto parziale sui diversi vagli. Per ottenere un'analisi granulometrica si calcola il trattenuto cumulato su ogni vaglio, che è la somma dei trattenuti parziali del vaglio stesso e di quelli sovrastanti, e il passante cumulativo a ciascun vaglio, che è la differenza tra 100 e il trattenuto cumulato, come indicato in Tabella 1. Il tutto viene posto in un diagramma (Figura 22) riportante in ascissa l'apertura dei vagli in mm e in ordinata la percentuale in peso dell'inerte passante, ottenendo così la curva granulometrica.

Tabella 1: Analisi granulometrica di una sabbia.

Vagli mm	Sabbia		
	Trattenuto al setaccio	Trattenuto cumulato	Passante cumulato
6.3	0	0	100
5.6	0.06	0.06	99.94
4	7.19	7.25	92.75
2	22.93	30.18	69.82
1	20.14	50.32	49.68
0.5	21.44	71.76	28.24
0.25	21.63	93.39	6.61
0.125	5.63	99.02	0.98
0.063	0.58	99.6	0.4
0	0.39	99.99	0.39

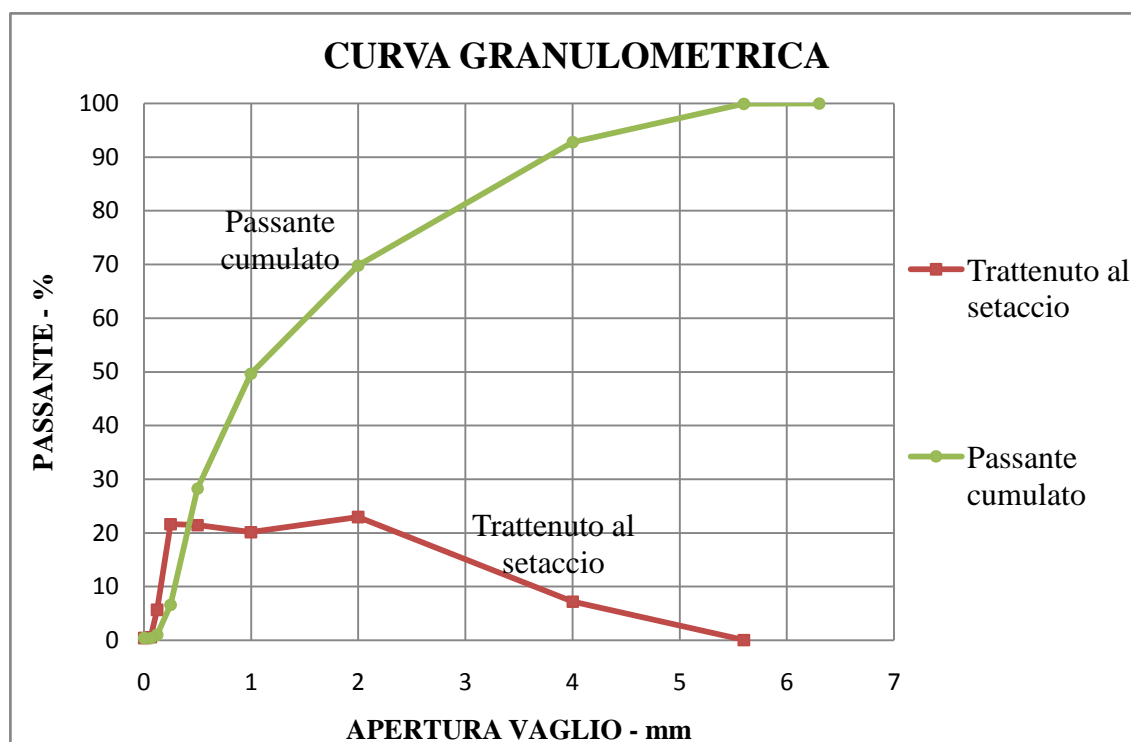


Figura 22: Curva dei passanti e dei trattenuti.

Dalla distribuzione granulometrica dell'aggregato dipendono varie proprietà del calcestruzzo, e in particolare la sua lavorabilità: un impasto composto prevalentemente da aggregato grosso risulta rigido, perché le particelle grosse hanno scarsa scorrevolezza tra loro, e poco lavorabile; per essere lavorato tale impasto richiederebbe molta acqua, determinando un abbassamento della resistenza meccanica finale e un rischio di segregazione dei componenti della miscela. D'altra parte un impasto realizzato con aggregati molto ricchi di granuli fini richiede una quantità d'acqua elevata per l'aumento della superficie specifica delle particelle e per il conseguente aumento del liquido necessario per bagnarle. Una minima richiesta di acqua si avrà con una distribuzione granulometrica ottimale in modo che l'impasto contenga, nella dovuta proporzione, gli aggregati grossi, quelli fini e quelli intermedi (Figura 23).

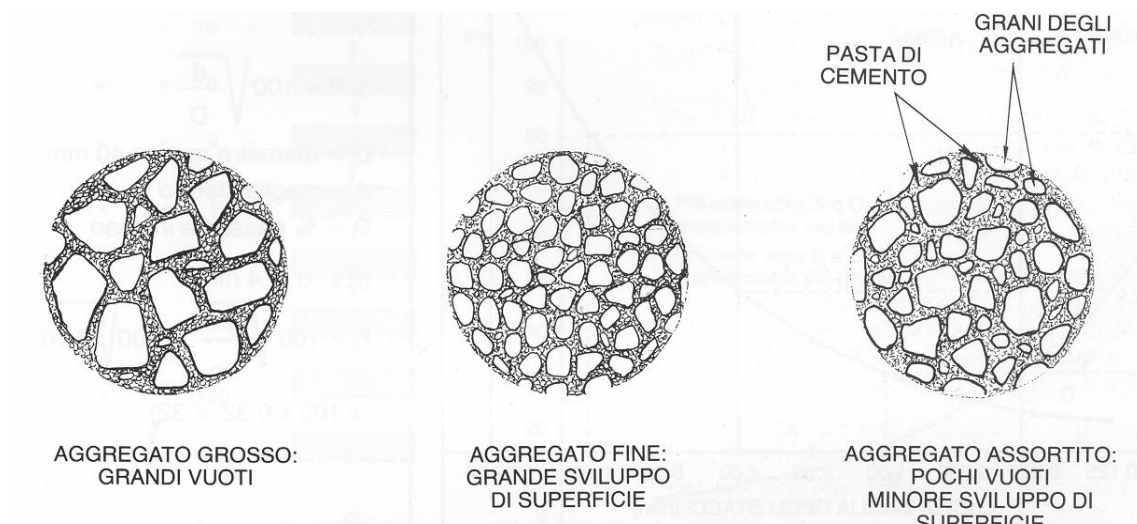


Figura 23: Rappresentazione schematica dell'addensamento degli aggregati.

Quando infatti due o più aggregati differenti vengono mescolati, il volume dei vuoti risulta inferiore a quello di ciascun componente, e quindi servirà minore pasta di cemento per riempire questo volume, producendo un minore calore d'idratazione, minore ritiro e abbassamento dei costi. Il criterio della massima densità è stato a lungo utilizzato per dedurre distribuzioni granulometriche ideali per il confezionamento del calcestruzzo. In seguito sono state elaborate delle curve teoriche che oltre al criterio della massima densità, tengono in considerazione altre proprietà come la non segregabilità dell'aggregato. Oggi in pratica si adottano delle curve continue rappresentate da equazioni che indicano la percentuale ideale p di materiale passante attraverso un setaccio con fori del diametro d del tipo:

$$p = 100 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^a$$

dove D è il diametro massimo dell'aggregato e a è una costante. A questa equazione corrisponde una famiglia di parabole, tra le quali risultano maggiormente usate la *curva di Füller* e la *curva di Bolomey*. Nella pratica la curva granulometrica più diffusa è quella elaborata da Füller:

$$p = 100 \cdot \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Assumendo come diametro massimo D per l'aggregato un valore pari a 20 mm, si otterrà una curva come quella in Figura 24, con in ascissa, in scala logaritmica, l'apertura dei vagli in mm e in ordinata la percentuale in peso del passante ideale.

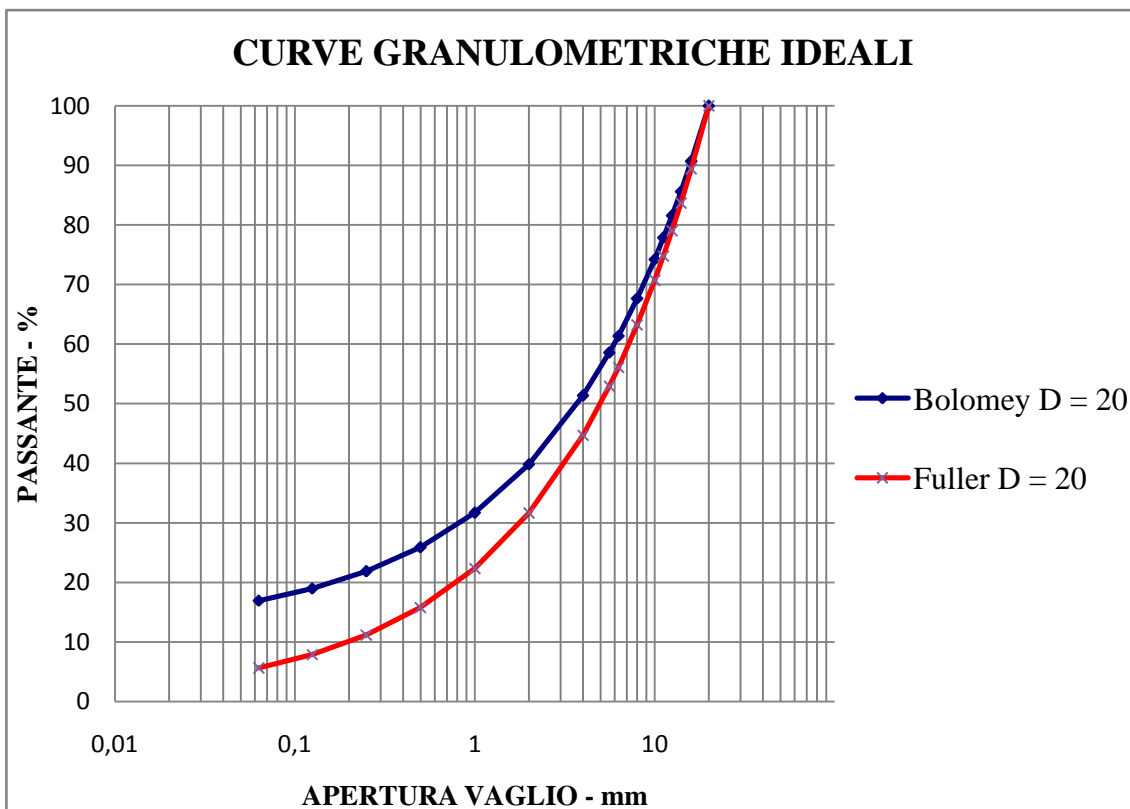


Figura 24: Curve granulometriche di riferimento.

Bolomey propose una modifica a questa formula, con l'introduzione di un parametro funzione della lavorabilità richiesta e del tipo di aggregato disponibile. La formula di Bolomey si presenta così:

$$p = A + (100 - A) \cdot \sqrt{\frac{d}{D}}$$

dove A varia in funzione dell'aggregato tra 8 e 14. Se l'aggregato è di origine alluvionale, di forma arrotondata, e la consistenza del calcestruzzo è superfluida si assume il valore 12 per A come nella curva di Bolomey rappresentata in Figura 24. Nella pratica non esistono aggregati che soddisfano completamente uno di questi due criteri, ma è necessario mischiare inerti di diverse granulometrie come detto sopra. Infatti negli impianti di produzione degli aggregati il materiale prodotto viene diviso in frazioni: sabbia, pietrischetto, pietrisco, ghiaietto, ghiaia in base alle dimensioni e all'origine. Gli aggregati divisi in frazioni non sono adatti all'impiego nel calcestruzzo, ma le diverse frazioni debbono essere mescolate tra loro. Occorrono quindi dei criteri per poter eseguire la miscelazione in modo da realizzare curve prossime a quelle ideali. Non si potrà ovviamente pretendere la coincidenza della distribuzione granulometrica della miscela di aggregati con una delle curve teoriche, ma si fisserà piuttosto un criterio, per stabilire se la curva granulometrica di un determinato aggregato sia o meno accettabile, consistente nel fissare per i diversi setacci un margine in più e in meno rispetto al valore della curva teorica: si ottengono così una curva teorica inferiore e una superiore a quella teorica, le quali determinano il cosiddetto fuso granulometrico.

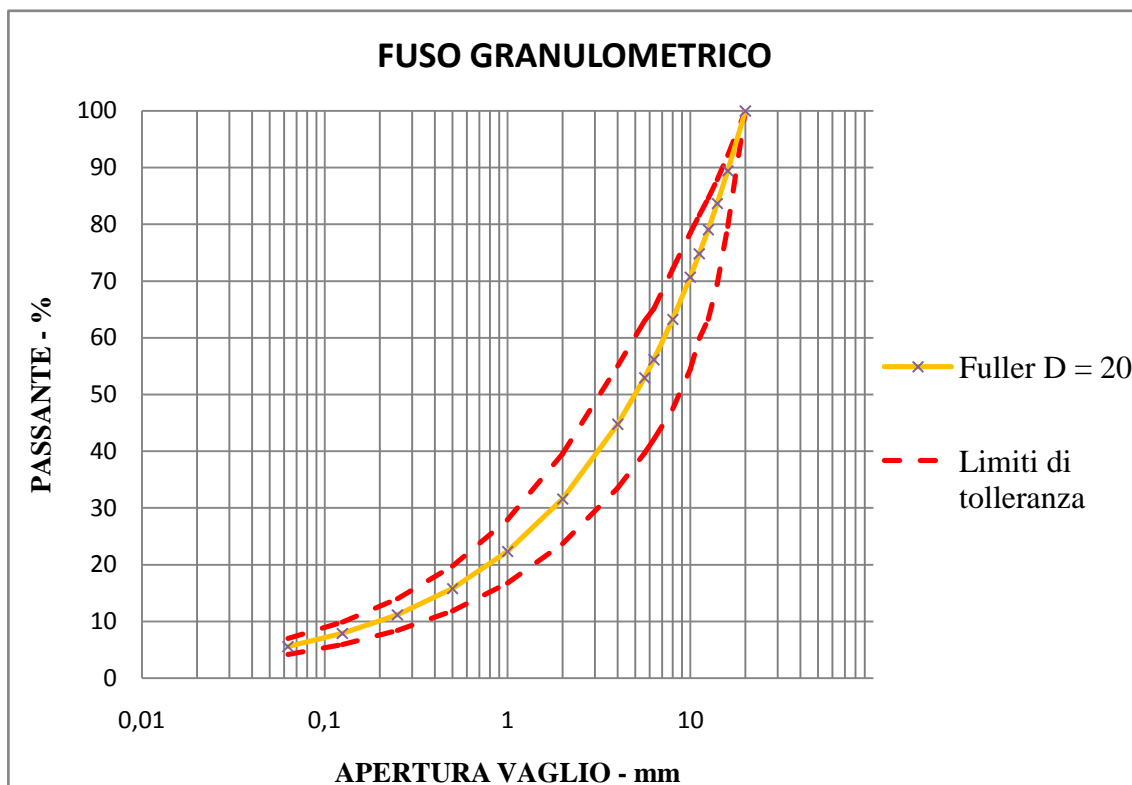


Figura 25: Fuso granulometrico costruito sulla curva di Fuller.

Stabiliti i criteri di tolleranza, un aggregato è considerato accettabile se la sua curva granulometrica è compresa nel fuso rappresentato in Figura 25. I fusi, e quindi le

tolleranze, varieranno in funzione del tipo di uso che si farà del calcestruzzo. Esistono altri criteri per determinare quale miscela di aggregati abbia una curva granulometrica prossima a una delle curve teoriche. Il criterio dei minimi quadrati permette di elaborare una miscela di aggregati noti con la minima distanza rispetto alle curve ideali. Partendo da tre aggregati con curva granulometrica nota, sabbia, sabbia po' e ghiaietto rappresentati in Figura 26, si elaborano tutte le possibili combinazioni delle tre classi, moltiplicando per le varie percentuali le tre granulometrie di base.

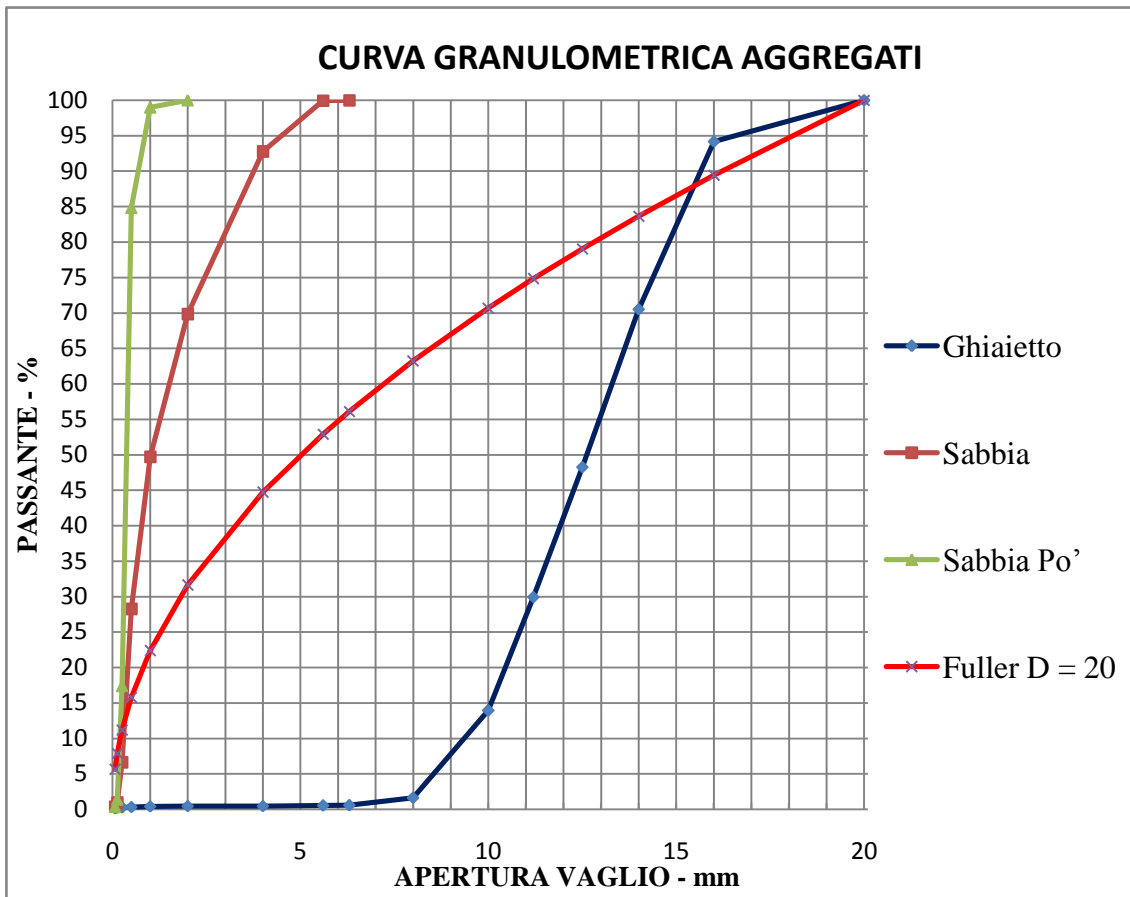


Figura 26: Curve granulometriche degli aggregati.

In seguito, prendendo a riferimento la curva di Füller, si è potuto valutare tra tutte le possibili combinazioni quella che presentava la minore distanza dalla curva ideale. Per calcolare questo errore si fa ricorso alla formula dei minimi quadrati:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - p_{iFüller})^2}{n - 1}$$

dove E è l'errore, ossia la distanza della curva granulometrica considerata da quella teorica, p_i è il passante al setaccio i per quella combinazione delle tre classi, $p_{iFüller}$ è il passante al setaccio i secondo la curva granulometrica di Füller, n è il numero di setacci

utilizzati. Da questa analisi è risultato che la composizione delle tre classi granulometriche di partenza che più si avvicina alla curva di Fuller è la seguente: 44% di Ghiaietto, 56% di Sabbia e 0% di Sabbia Pò. La distribuzione granulometrica viene scelta in base all'errore quadratico medio più basso tra tutte le combinazioni di miscela possibili, che per i tre aggregati utilizzati vale $EQM=37.08$ per la miscela rappresentata dalla curva granulometrica in verde nella Figura 27.

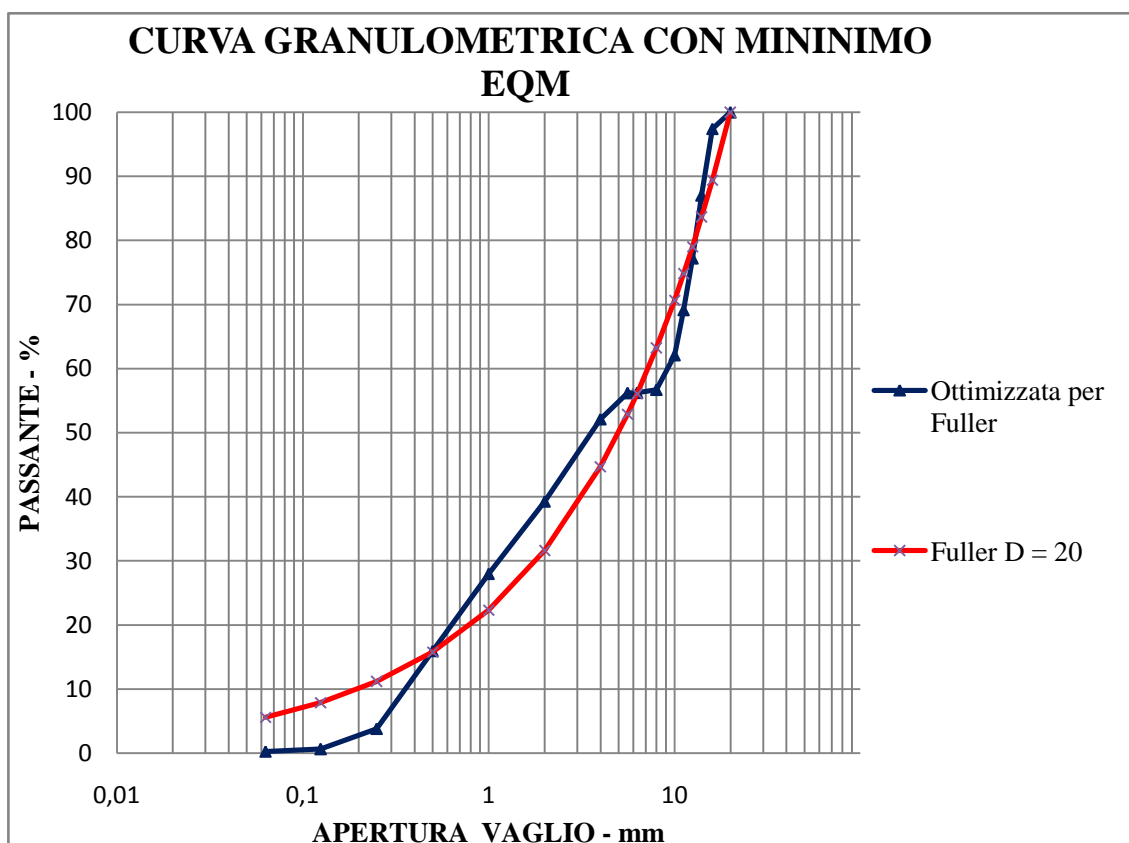


Figura 27: Curva granulometrica della miscela di aggregati ottimizzata per Fuller.

E' evidente quanto la curva di Fuller e quella di Bolomey siano fortemente influenzate dalla scelta del diametro massimo D che deve avere l'aggregato. Innanzi tutto lo spessore del manufatto pone dei limiti al diametro massimo dell'aggregato, poiché quest'ultimo non dovrà essere superiore al 20% dello spessore del getto e nel caso di calcestruzzo armato non dovrà essere superiore a 1,25 volte la distanza tra i ferri e le casseforme. In generale è però conveniente scegliere aggregati con diametro massimo grande: all'aumentare di D diminuisce la quantità di acqua necessaria per ottenere la stessa lavorabilità dell'impasto, in quanto un aggregato grossolano ha minore superficie specifica rispetto all'aggregato fine e richiede una minore quantità d'acqua per bagnare la superficie delle particelle. La richiesta d'acqua influenza la resistenza meccanica e, per fornire la stessa resistenza meccanica, una minore richiesta d'acqua produce una

minore richiesta di tenore di cemento, con minore sviluppo di calore di idratazione, minore ritiro e minore spesa. La Figura 20 mostra la richiesta di tenore di cemento al variare del diametro massimo dell'aggregato in un calcestruzzo con medesima resistenza meccanica. Se tali considerazioni portano a favorire l'impiego degli impasti preparati con aggregati a più elevato diametro massimo, considerazioni di carattere geometrico ci inducono a operare con cautela, perché l'utilizzo di grani a diametro elevato può impartire agli impasti la tendenza alla segregazione, cioè alla separazione degli aggregati grossi, che sedimentano sul fondo, e al bleeding dell'acqua, che si raccoglie in superficie, durante la preparazione, il trasporto, la posa in opera e la compattazione.

Andrà quindi curata la scelta degli aggregati facendo attenzione a non pregiudicare le proprietà di resistenza e lavorabilità fondamentali per l'impiego richiesto, facendo uso, se necessario, di additivi fluidificanti in grado di aumentare la lavorabilità senza modificare il rapporto acqua/cemento, o di ridurre la richiesta d'acqua a parità di resistenza meccanica, senza modificare la curva granulometrica degli aggregati.

2.2.4 Additivi

L'uso di additivi durante il procedimento di miscelazione del calcestruzzo consente di modificare le proprietà della miscela nello stato fresco e indurito. Essi possono modificare la lavorabilità del calcestruzzo sostanzialmente in due modi:

- modificando la cinetica di idratazione del cemento e quindi l'andamento della lavorabilità in funzione del tempo (acceleranti e ritardanti);
- modificando direttamente le proprietà reologiche della pasta cementizia (aeranti, fluidificanti e superfluidificanti);

Gli additivi acceleranti fanno aumentare la velocità di idratazione del cemento e si distinguono a seconda che l'accelerazione avvenga nel periodo di presa o di indurimento. I primi accorciano i tempi di presa mentre i secondi fanno aumentare la resistenza meccanica iniziale.

Gli acceleranti di presa, prevalentemente a base di silicato o carbonato di calcio, provocano una presa da rapida a istantanea, a seconda che l'aggiunta sia di qualche per mille a qualche per cento, e sono impiegati per arrestare in breve tempo fughe di liquidità.

Gli acceleranti di indurimento sono notevolmente più interessanti per l'uso in condizioni climatiche avverse e in particolare alle basse temperature. Tra i più usati, anche per il basso costo, c'è il cloruro di calcio che aumenta le proprietà tissotropiche

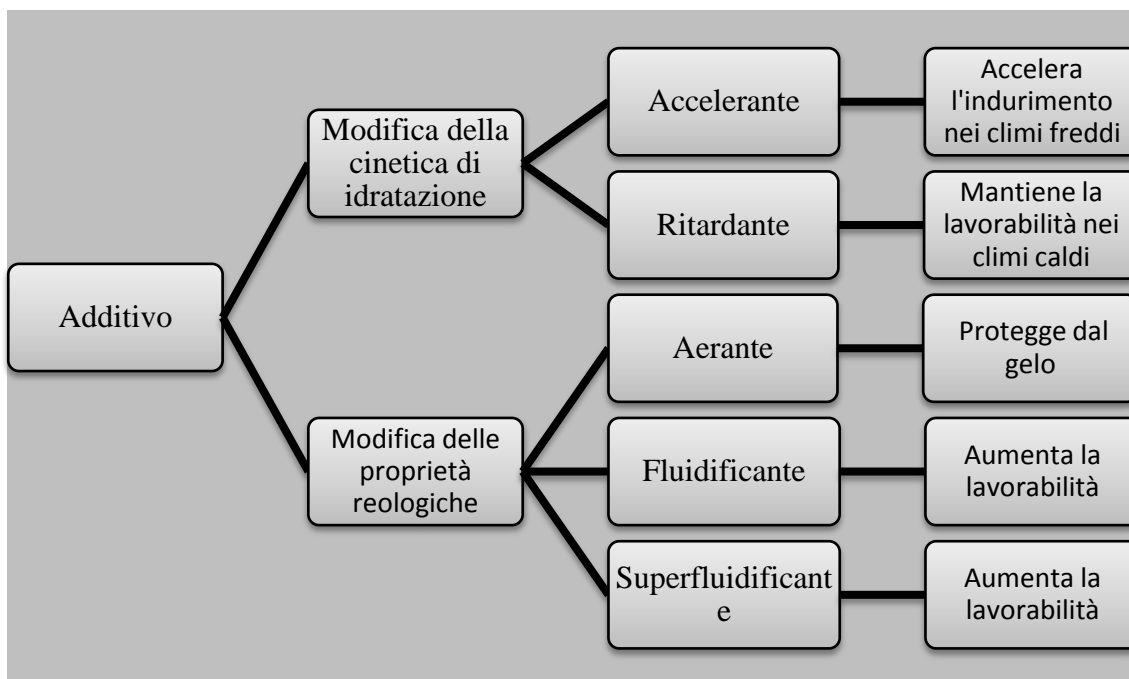


Figura 28: Classificazione degli additivi più comuni.

dell'impasto cementizio, dovute principalmente ai legami che si stabiliscono tra le particelle di silicato idrato di calcio (C-S-H), il limite di scorrimento e la viscosità plastica. Se l'aggiunta di cloruro di calcio, nella misura di qualche per cento rispetto al peso del cemento, conferisce un notevole incremento della resistenza meccanica a brevi stagionature, la percentuale di cloruro non deve superare un certo limite, specialmente per strutture in cemento armato.

Gli additivi ritardanti hanno lo scopo di rallentare la presa del cemento, per conservare più a lungo la lavorabilità nelle fasi di confezionamento, trasporto e messa in opera quando la temperatura è molto elevata. Il ritardo d'idratazione del cemento comporta un abbassamento della resistenza meccanica per basse stagionature, ma un aumento della resistenza meccanica per lunghe stagionature rispetto al calcestruzzo non additivato. Tra i più usati vi sono alcuni carbonati, prodotti organici che provocano il ritardo per il loro adsorbimento sulla superficie dei granuli di cemento, in modo da impedire, per un certo tempo il contatto con acqua (8). L'aggiunta in qualche parte per cento rispetto al peso del cemento non produce una modifica delle proprietà reologiche dell'impasto, ma in realtà rallenta la crescita del limite di scorrimento e della viscosità

plastica, permettendo di conservare nel tempo una più elevata lavorabilità rispetto al calcestruzzo privo di additivo.

Gli additivi aeranti sono aggiunti al calcestruzzo per migliorare la resistenza ai cicli gelo-disgelo attraverso la formazione di un sistema di micro bolle d'aria omogeneamente distribuite nella pasta cementizia presente nel calcestruzzo. Secondariamente inducono un miglioramento della lavorabilità e un aumento di coesione del calcestruzzo fresco. L'aggiunta di aerante nelle quantità di qualche parte per cento conferisce all'impasto una tendenza antitissotropica.

Oggi rivestono sempre maggiore importanza gli additivi fluidificanti e superfluidificanti per gli effetti in termini di resistenza e per i cambiamenti che possono realizzare nella messa in opera del calcestruzzo.

Sono definiti fluidificanti quegli additivi che aggiunti ad un impasto cementizio, a pari lavorabilità, riducono il rapporto acqua/cemento nell'impasto di almeno il 5%, o a parità del rapporto acqua/cemento, aumentano la lavorabilità, con un aumento di slump tra 5 e 8 cm. A pari rapporto acqua/cemento i fluidificanti normali aumentano la fluidità dell'impasto, senza modificare i tempi di presa e la resistenza meccanica, i fluidificanti acceleranti o ritardanti aumentano o diminuiscono la resistenza meccanica per brevi stagionature e sono consigliati per climi freddi o caldi rispettivamente. In letteratura esistono molti studi sui fluidificanti a base di ligninsolfonato, che è un sottoprodotto della cellulosa del legno, e che agisce con lo stesso meccanismo con cui agiscono tutti i fluidificanti: rivestendo le particelle di cemento idratato con una pellicola che modifica il potenziale elettrico, fanno aumentare la repulsione tra particelle e favoriscono la dispersione e la fluidità della miscela di calcestruzzo. Dal punto di vista reologico, i fluidificanti producono una riduzione del limite di scorrimento e della viscosità plastica. Gli additivi superfluidificanti si distinguono dai fluidificanti da un punto di vista quantitativo, riducendo il rapporto acqua/cemento del 25%, a parità di lavorabilità. A pari rapporto acqua cemento, l'aggiunta di un superfluidificante può trasformare un calcestruzzo asciutto, con slump di 1-2 cm, in un calcestruzzo superfluidico con slump superiore a 22 cm. Poi per alti dosaggi di fluidificante, oltre lo 0.02-0.03% rispetto al peso del cemento, si osserva un'azione secondaria con effetto ritardante nell'idratazione del cemento che può risultare sconsigliata, mentre la maggior parte dei superfluidificanti non presenta consistenti effetti ritardanti, ed è quindi possibile aumentare il dosaggio fino a 1-3%. I superfluidificanti sono dei polimeri sintetici che, oltre ad agire inducendo una carica negativa sulle particelle di cemento con conseguente

repulsione e dispersione in fase acquosa, producono un effetto di impedimento sterico, interponendosi tra le particelle di cemento e impedendone la flocculazione. I principali superfluidificanti sono i polisolfonati, policarbossilati e i poliacrilati. Un calcestruzzo altamente fluido e lavorabile presenta il rischio della segregazione, che è accompagnato da un forte bleeding: riducendo l'acqua d'impasto, con l'aggiunta del superfluidificante, si ha una consistente riduzione del bleeding e un minor rischio di segregazione. Utilizzando il superfluidificante è possibile ottenere un calcestruzzo con comportamento definito dal Collepari "reoplastico", che associa ad una consistenza molto fluida un comportamento molto coesivo, con una bassa tendenza alla segregazione (8).

L'effetto deflocculante dei superfluidificanti, nei confronti degli agglomerati formati da numerosi granuli di cemento, può essere utilizzato in tre modi diversi:

- a pari composizione del calcestruzzo per ottenere una migliore lavorabilità, e quindi consistenza più fluida, poiché i granuli di cemento in un sistema non flocculato si muovono più liberamente rispetto ai granuli flocculati di maggiore ingombro;
- a pari lavorabilità, ma riducendo l'acqua, e quindi il rapporto acqua cemento, in modo da ottenere minore porosità, maggiore durabilità e maggiore resistenza meccanica;
- a pari lavorabilità e resistenza meccanica, si riduce la quantità di acqua e di cemento, mantenendo costante il rapporto acqua /cemento, in modo da ridurre lo sviluppo di calore di idratazione e la deformazione viscosa.

La norma UNI EN 934 prevede altri additivi meno utilizzati come gli impermeabilizzanti, i modificatori di viscosità e i riduttori di ritiro. Poi esistono altre sostanze, non classificate come additivi, che possono essere aggiunte all'impasto per conferirgli particolari proprietà.

2.3 Il granulato di gomma

Il granulato di gomma è il prodotto della triturazione di pneumatici a fine uso (PFU), depurati dai filamenti ferrosi e da fibre polimeriche che costituiscono il pneumatico. I grani di gomma possono raggiungere dimensioni che variano da 5 mm a 0.4 mm, a seconda della lavorazione, e nel materiale qui in esame (vedi Figura 31) si osserva una distribuzione granulometrica compresa tra 2 mm e 0.8 mm, quindi affine alle sabbie. La sostituzione parziale di aggregato fine con polverino di gomma nel calcestruzzo è stato

effettuato per studiarne il comportamento a fatica, caso in cui la ripetizione ciclica di applicazione del carico può provocare la rottura anche se lo stato tensionale indotto non supera quello limite di elasticità per il materiale. Quando infatti si applica un carico per un tempo breve il calcestruzzo ha un comportamento elasto-plastico: esso subisce una deformazione che è in parte di tipo elastico, e viene recuperata dopo che il carico è stato rimosso, mentre una quota è di tipo plastico e quindi permanente. La ripetizione di carichi ciclici, di tipo impulsivo, genera deformazioni plastiche crescenti che possono portare a rottura se il numero di cicli è elevato. Sulla base delle osservazioni sperimentali effettuate su calcestruzzi additivati con PFU, in sostituzione del 20% in volume di sabbia, da Letizia Gaetti (13), si nota un miglioramento del comportamento elasto-plastico del calcestruzzo, dovuto alla diminuzione del modulo elastico (Figure 29-30). Le prove di laboratorio hanno messo a confronto calcestruzzi ordinari (CLS-RIF) con calcestruzzi additivati con PFU (CLS-P20), mostrando comportamenti differenti nelle prove a compressione (Tabella 2).

Tabella 2: Risultati delle prove di compressione monotona e ciclica osservate da Gaetti.

Provino	Prova di compressione monoassiale	Carico massimo t	Resistenza a compressione MPa	Modulo elastico dinamico GPa
CLS-RIF-1	Monotona	85,0	37,8	39,1
CLS-RIF-2	Monotona	70,0	31,1	39,5
CLS-P20-1	Monotona	45,9	20,4	27,0
CLS-P20-2	Monotona	46,1	20,5	26,2
CLS-RIF-3	Ciclica	92,3	41,0	30,9
CLS-P20-3	Ciclica	50,5	22,5	22,5

Il calcestruzzo con PFU può essere indicato in quelle applicazioni, come le pavimentazioni industriali e aeroportuali, dove i quadri fessurativi sono innescati non da carichi elevati permanenti, ma dalla ripetizione dei carichi trasmessi alla pavimentazione dal passaggio di veicoli. In particolare nelle pavimentazioni aeroportuali si osserva che il passaggio di un numero elevato di aeromobili (10000/anno), specialmente in alcune zone sensibili della pista in cui il traffico è particolarmente canalizzato, provoca deformazioni cumulate di diversi centimetri, note

come ormaiamento della pista, e crisi per rottura. Il calcestruzzo con PFU presenta maggiore recupero di deformazione elastica allo scarico, e, quindi, in seguito alla sollecitazione prodotte dal passaggio degli aeromobili presenterebbe minore deformazione permanente, causa dell'ormaiamento e dell'ammaloramento della pista. A questi vantaggi, l'uso dell'inserto in gomma aggiunge un vantaggio ambientale legato allo smaltimento ed utile riutilizzo dei pneumatici fuori uso: ogni 100 metri di pavimentazione stradale si possono smaltire 16 tonnellate di granulato di gomma, pari alla lavorazione di 160.000 kg di pneumatico fuori uso altrimenti destinato in discarica.

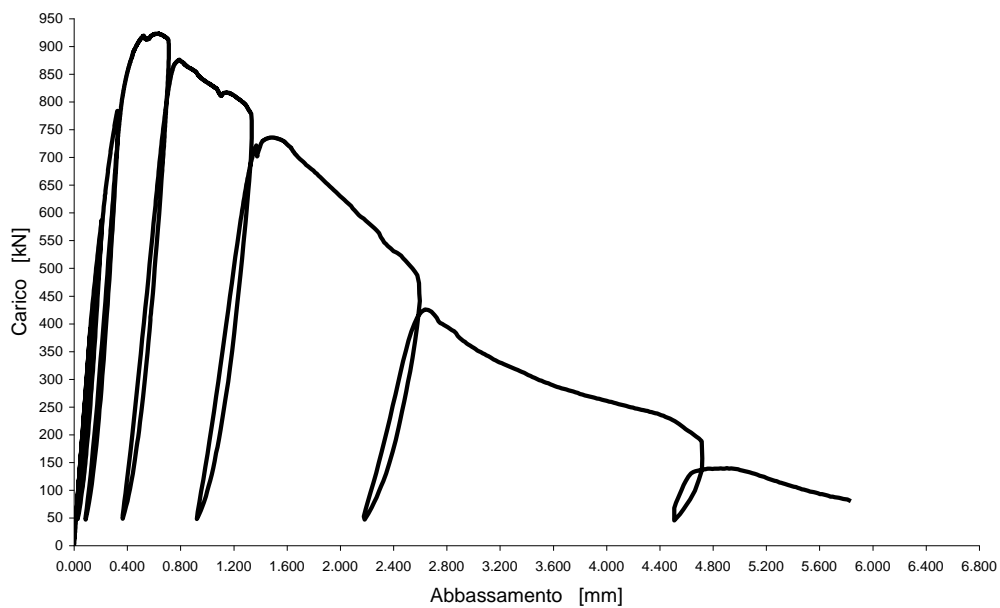


Figura 29: Curva carico-abbassamento del provino CLS-RIF-3.

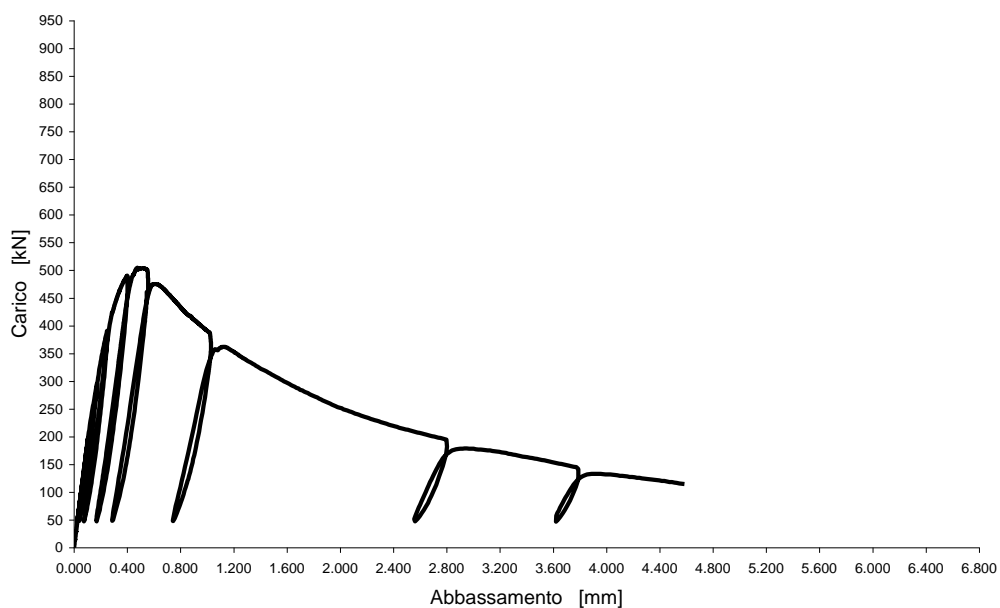


Figura 30: Curva carico-abbassamento del provino CLS-P20-3.



Figura 31: Granulato di gomma con diametro 0.8-2 mm.

LE SOVRASTRUTTURE AEROPORTUALI

3.1 Le pavimentazioni stradali

La soprastruttura o pavimentazione stradale è quella parte della strada specificamente destinata a sopportare il transito dei veicoli; essa differisce da quella aeroportuale solo per lo spessore complessivo derivante dalla diversa entità dei carichi cui è assoggettata. Le caratteristiche essenziali di una pavimentazione sono tre:

- un'adeguata capacità di sopportare i carichi e di distribuirli in modo che non venga superata la portanza del terreno di sottofondo;
- la regolarità del piano viabile che assicura un moto confortevole e privo di resistenze accidentali;
- la scabrezza che fornisce la sicurezza connessa a un elevato coefficiente di aderenza.

Queste caratteristiche della superficie stradale sono soggette a deteriorarsi nel tempo per l'azione combinata del traffico e degli agenti atmosferici; in effetti, il traffico tende a lisciare il manto, a dislocarne gli elementi superficiali e a deformarne la sagoma, mentre gli agenti atmosferici tendono ad alterare le caratteristiche chimico-fisiche degli inerti e dei leganti, compromettendo l'integrità della superficie e la stabilità della massa.

Per rallentare questo processo di degradazione (ovvero per conservare quanto più a lungo possibile la funzionalità della pavimentazione) occorre operare sulla qualità dei componenti, sulla scelta delle miscele e sullo spessore delle diverse parti della struttura.

Sotto l'aspetto funzionale, la pavimentazione o soprastruttura è costituita da:

- manto di usura che è quello direttamente esposto alle azioni del traffico e degli agenti atmosferici;
- struttura portante che ha la esclusiva funzione di mantenere inalterata la configurazione del soprastante manto, col sopportare e distribuire sul sottofondo

(ossia sul terreno d'impianto della soprastruttura) le sollecitazioni dovute al traffico.

L'identificazione di due parti aventi diverse funzioni ha un suo fondamento economico: la struttura portante (non essendo soggetta all'azione diretta delle ruote né a quella degli agenti atmosferici), può essere costituita con materiali, e relative miscele, meno pregiati di quelli occorrenti allo strato di usura che, invece, è direttamente soggetto alle azioni sopraccitate e deve mantenere il più a lungo possibile nel tempo caratteristiche di regolarità, scabrezza, impermeabilità e opacità.

Sotto l'aspetto strutturale, le pavimentazioni stradali sono costituite da materiali lapidei con o senza legante, posti in opera a strati omogenei sovrapposti, di caratteristiche meccaniche decrescenti dall'alto verso il basso, così come le sollecitazioni cui sono soggetti. Il numero, la qualità e lo spessore degli strati variano da caso a caso, a seconda dell'intensità del traffico, del carico massimo per ruota, della portanza del sottofondo (cioè capacità di sopportare i carichi trasmessi dalla pavimentazione), della durata prevista dell'intera pavimentazione o del solo manto di usura.

3.2 Le caratteristiche delle soprastrutture aeroportuali

In una piattaforma aeroportuale la costruzione delle pavimentazioni delle piste e dei piazzali assume una notevole importanza per via delle grandi superfici interessate e delle particolari caratteristiche di resistenza e durabilità richieste dalle esigenze del traffico aereo. Relativamente all'estensione delle superfici da pavimentare basti pensare che una pista di volo per un aeroporto di 4000 m di lunghezza e 45 m di larghezza equivale, dal punto di vista dell'area rivestita, a circa 25 Km di strada ordinaria con carreggiata della larghezza di 7 m e che un'area di stazionamento (circa 500.000 m²) rappresenterebbe un'analogia strada di 70 Km (l'aeroporto G. Marconi di Bologna ha una pista di volo di 2800x45 metri e un'area di stazionamento pari a circa 318.500 m²). È da considerare ancora che le caratteristiche del traffico aereo sono diverse da quelle del traffico stradale per entità dei carichi trasmessi e condizioni di esercizio, per cui la resistenza e la qualità di una sovrastruttura aeroportuale devono risultare nettamente differenti e certamente superiori a quelle richieste ad una strada ordinaria. (19)

Tutte queste circostanze fanno sì che il costo delle sovrastrutture aeroportuali e della loro manutenzione risulti di entità non trascurabile rispetto al costo complessivo per la realizzazione di una base aerea, e ciò ha sollecitato tecnici e studiosi ad approfondire le tecnologie per l'esecuzione delle relative sovrastrutture. Il compito delle pavimentazioni di un aeroporto è quello di costituire una struttura idonea ad una circolazione rapida e sicura, capace perciò di resistere alle sollecitazioni tangenziali nelle fasi di accelerazione e di frenatura degli aeromobili, assicurando nel contempo il trasferimento dei carichi al piano di posa compatibilmente con la portanza di questo ultimo. I principali fattori che contribuiscono a creare le difformità tra pavimentazioni aeroportuali e quelle ordinarie possono individuarsi nei seguenti:

- **entità del carico:** il carico massimo che per regolamento, può transitare su sovrastrutture stradali è rappresentato da un asse singolo da 12 t (il carico complessivo sale però a 19 t quando si tratta di asse unico binato con distanza fra i due assi adiacenti minore di 2 m), per cui ciascuna ruota grava sulla superficie di impronta con un carico massimo di 6 t. nel caso, invece, di pavimentazioni aeroportuali i carichi su ruota sono di un ordine di grandezza ben maggiore. Ad esempio, per un DC-10 Sr 30 il carico massimo su ruota è circa 24 t, cioè quattro volte superiore a quello massimo che si ha su strada ordinaria; (19)
- **geometria del carico:** riguarda la disposizione ed il numero delle ruote in un carrello. I carrelli rappresentano il mezzo con cui un aereo poggia sulla pista. L'elemento attraverso il quale un'aliquota del peso dell'aereo viene trasmessa al carrello si chiama *gamba di forza* (Figura 32).

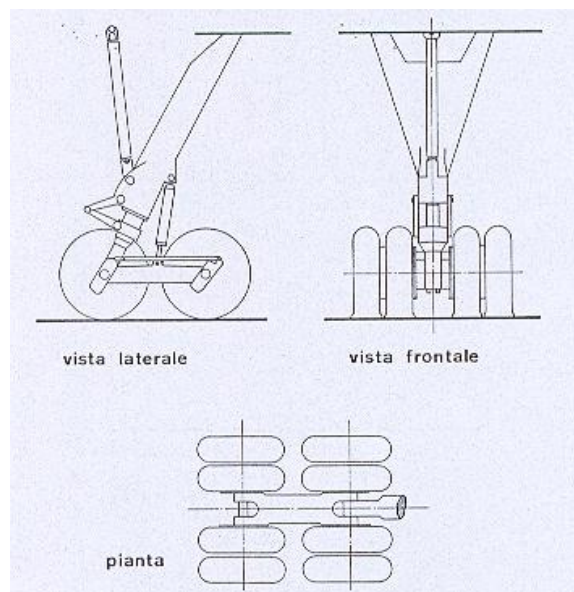
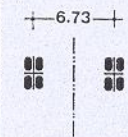
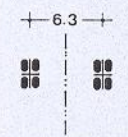
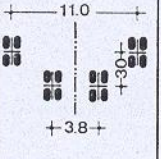
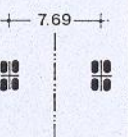
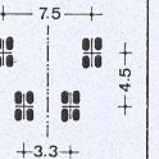
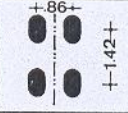
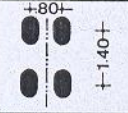
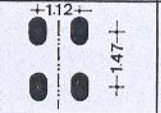
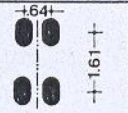
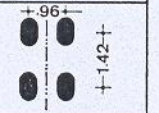


Figura 32: Gamba di forza ad otto ruote.

Le ruote del carrello sono con pneumatico (ad alta pressione) ed, oltre alla funzione di sostenere il peso, trasmesso dalla gamba di forza sulla pavimentazione, hanno

Tabella 3: Pesì massimi e caratteristiche dei carrelli di alcuni aerei.

	BOEING 707 · 320 B	DC · 8 · 63	BOEING 747 (JUMBO)	CONCORDE	BOEING 2707 (SST)
peso massimo al decollo (kg)	150.850	158.760	308.450	159.000	306.200
peso massimo all'atterraggio kg	112.040	115.210	256.000	99.000	195.050
numero dei carrelli portanti	2	2	4	2	4
disposizione geometrica dei carrelli portanti (m)					
dimensioni principali di un carrello (m)					
pneumatici	46 x 16	44 x 16	46 x 16	45 x 15 7	45 x 19 2
pressione di gonfiaggio (kg/cm ²)	12.7	14.1	14.7	14.1	13.0

anche quella di trasformare, al momento dell'impatto (in fase di atterraggio), l'energia cinetica in lavoro di deformazione e di attrito. Le gambe di forza sono retrattili, cioè dopo l'involo vengono ritirate entro speciali alloggiamenti esistenti nella carlinga o nelle ali dell'aereo, in modo da ridurre le resistenze aerodinamiche. Oggi, in tutti i grandi aerei, viene usato il carrello a triciclo con ruotino anteriore in quanto presenta maggiore stabilità direzionale. Esso ha una gamba di forza anteriore munita di ruotino singolo o doppio posto davanti il baricentro del velivolo e due gambe di forza principali poco dietro il baricentro; le ruote di queste possono essere due per ogni gamba (dispositivo tandem), ovvero quattro (dispositivo doppio tandem); la distanza tra le gambe di forza deve essere scelta in modo da assicurare la stabilità al ribaltamento in fase di atterraggio con forte vento trasversale. (18) In esso le gambe di forza principali, ciascuna munita di una o più ruote, sono allineate sotto la fusoliera e la stabilità laterale del velivolo viene assicurata, talvolta, da ruotini situati nei pressi delle estremità delle ali. Quando la gamba forza ha più ruote, ai fini del calcolo per il dimensionamento della sovrastruttura si è riscontrata l'opportunità di considerare concentrati in un solo punto quei carichi le cui zone d'influenza si sovrappongono parzialmente; in tal senso si è introdotto il concetto della ruota singola equivalente considerando il carico (carico su ruota singola

equivalente) trasmesso da una ipotetica ruota singola che, gonfiata alla stessa pressione delle ruote effettive, induce nella sovrastruttura e nel relativo piano di posa l'identica sollecitazione massima delle ruote multiple nel loro complesso. In effetti, passando dalle sollecitazioni alle deformazioni, si verifica che la deformazione elastica di ciascun punto ricadente nella zona d'influenza di più carichi è pari alla somma delle deflessioni dovute ai corrispondenti carichi. I dati di tale carico su ruota equivalente, con altri elementi distintivi, in relazione ad alcuni tipi di aereo, scelti fra quelli più in uso, sono riportati nella Tabella 3.

- **ripetizione dei carichi:** il numero che si suole assumere nei calcoli delle piste di volo è sempre molto più basso che per le strade ordinarie; infatti, anche nel caso di aeroporti importanti, la massima intensità di traffico ammissibile per ogni pista è di circa 400 movimenti al giorno. Inoltre, se si tiene conto della larghezza di una moderna pista di volo, si può facilmente dedurre che una striscia di questa sarà interessata giornalmente una volta o al massimo una volta e mezzo. Pertanto in 10 anni si dovranno considerare da 3500 a 5000 ripetizioni. Molto più elevato, per la loro minore larghezza e per il fatto che il traffico risulta fortemente canalizzato, è il numero di ripetizioni da assumere per le piste di circolazione (da 10 a 100 volte in più). (18)
- **pressione di gonfiaggio:** dalla pressione di gonfiaggio dei pneumatici dipende il carico specifico agente sull'area di contatto fra ruota e pavimentazione. Per gli autoveicoli pesanti che transitano su strada ordinaria il valore massimo della pressione di gonfiaggio è di 0,8 MPa mentre nel caso dei mezzi aerei si arriva fino a 1,5 MPa.

In base a quanto esposto circa i quattro fattori sopra esaminati, si intuisce facilmente come ad una sovrastruttura aeroportuale si richiedano doti di resistenza ben maggiori di quelle delle normali pavimentazioni stradali. Tali esigenze vengono soddisfatte tramite un dimensionamento specifico, una idonea scelta dei materiali ed una perfetta messa in opera, in modo che ciascuno strato della pavimentazione possa collaborare il più efficacemente possibile alla resistenza dell'insieme. (19)

3.3 Le sovrastrutture rigide e flessibili

Le piste di un aeroporto si dividono in:

- **piste di volo**, adibite all'involo ed atterraggio degli aerei;
- **piste di rullaggio**, adibite alle manovre a terra, collegate con le precedenti e con i piazzali di sosta mediante bretelle.

Gli aerei, nei loro movimenti a terra, percorrono, quindi, le piste di rullaggio e si predispongono per il decollo in una delle due testate della pista di volo (la scelta dell'una o dell'altra dipende dal verso del vento). (18)

Il traffico aereo su di una pista di volo è distribuito su una larghezza di 45 m in maniera non uniforme, a differenza di quello sulle piste di rullaggio che si svolge, in certo senso, identicamente al traffico autoveicolare su una carreggiata stradale. È proprio a causa di questa non omogeneità delle sollecitazioni che l'area aeroportuale si differenzia per:

- **zone critiche**: zone nelle quali gli aerei stazionano o si muovono come normali veicoli stradali (piazzali, testate di piste di volo, vie di circolazione);
- **zone non critiche**: parte centrale della pista di volo. Infatti, nella fase di involo o di atterraggio, il carico trasmesso dagli aerei alla sovrastruttura tramite i carrelli è inferiore, a causa della portanza alare, a quello statico. (19)

In base alla distinzione fra zone critiche e zone non critiche anche le pavimentazioni vengono ad assumere caratteristiche tecnologiche diverse. Infatti per le zone critiche si preferisce adottare sovrastrutture di tipo rigido (lastre in conglomerato cementizio semplice od armato e talvolta in cemento armato precompresso), mentre per le zone non critiche sogliono usarsi sovrastrutture di tipo flessibile. (18) I due tipi si differenziano in particolare per il loro diverso comportamento sotto l'azione dei carichi: le pavimentazioni in calcestruzzo manifestano un'elevata rigidità mentre le sovrastrutture flessibili presentano una maggiore deformabilità in relazione ai carichi ed alla portanza del piano di posa. La resistenza di una sovrastruttura, sia essa rigida o flessibile, risulta condizionata dalla possibilità del terreno di sottofondo di esplicare le reazioni necessarie alla sua funzione di uniforme sostegno, senza subire deformazioni o cedimenti che superino determinati limiti. L'esigenza di disporre di un piano di posa idoneo per la sovrastruttura rappresenta un problema che nel campo delle costruzioni

aeroportuali assume dimensioni piuttosto rilevanti, sia per la vastità delle zone interessate dalla piattaforma che per la particolare ubicazione della stessa. Il principale ostacolo al mantenimento di una idonea portanza del sottofondo è individuabile nella presenza dell'acqua nell'ammasso; infatti, nei terreni a matrice limo-argillosa le variazioni di umidità sono accompagnate da fenomeni di ritiro e di rigonfiamento, ovvero da cedimenti, che, senza opportuni provvedimenti che ne limitino l'entità, risultano la causa principale di dissesti delle sovrastrutture. Tutti questi motivi impongono di accertare la stabilità del piano di posa della sovrastruttura con uno studio completo delle condizioni dell'ammasso servendosi di sondaggi e di ricerche geotecniche. Inoltre, non deve sottovalutarsi il fenomeno del gelo (sia che esso provenga da acque superficiali, sia che si manifesti per effetto della risalita capillare delle acque di falda) che, regolato da un complesso meccanismo di fattori dipendenti dalle condizioni climatiche e dalle caratteristiche intrinseche dell'ammasso, è capace di determinare sensibile riduzione della portanza. (19)

Le **pavimentazioni rigide** (Figura 33) per piste e piazzali sono costituite essenzialmente da:

- a) uno strato di fondazione a diretto contatto con il sottofondo. L'inserimento di uno strato di fondazione fra il sottofondo e la sovrastante struttura rigida risponde alla esigenza di disporre sotto quest'ultima un sostegno di sufficiente capacità portante che assicuri la possibilità di un contatto continuo ed uniforme, facilitando nel contempo il procedimento di stesa del calcestruzzo con le macchine finitrici.

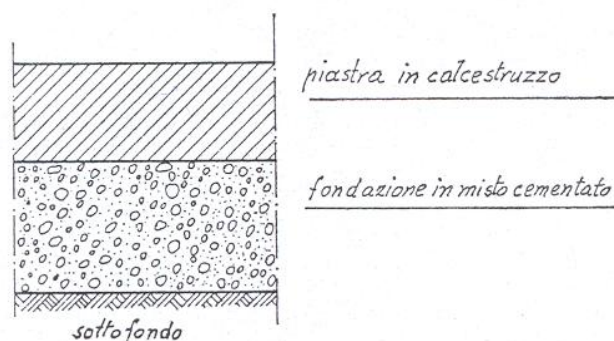


Figura 33: Pavimentazione rigida.

Idonei strati di fondazione possono realizzarsi in terra-cemento o terra-calce ovvero semplicemente con un misto granulometrico stabilizzato. A volte si è anche fatto ricorso ad una fondazione in doppio strato, uno inferiore in terreno granulare

stabilizzato ed uno superiore in misto legato a cemento o a calce. L'esperienza acquisita nel campo delle costruzioni aeroportuali ha comunque ormai confermato che i migliori risultati si ottengono con l'inserimento di uno strato in misto cementato, il quale rappresenta, per le proprie caratteristiche meccaniche, un ottimo collegamento fra la soprastante struttura rigida ed il terreno di sottofondo, limitando il fenomeno del pumping in corrispondenza dei giunti. Tale effetto insorge allorché, al passaggio dei carichi in corrispondenza del giunto, il bordo della piastra subisce degli spostamenti verticali (abbassamenti e sollevamenti) che causano la degradazione del sottostante piano di appoggio. Una fondazione semi-rigida, quale quella in misto cementato, risulta particolarmente resistente a tale fenomeno.

- b) un sovrastante rivestimento in calcestruzzo realizzato con una serie di piastre accostate (generalmente non armate) con lato di 5 o 7 m, separate fra loro da giunti che consentono la riduzione delle fessurazioni provocate dal ritiro e dalle variazioni di temperatura. In funzione della loro posizione, nel senso dell'avanzamento della macchina stenditrice, i giunti possono distinguersi in trasversali e longitudinali; in relazione invece alla loro funzione si hanno giunti di ritiro (o di contrazione), di costruzione e di dilatazione. I giunti di contrazione sono quelli di maggiore importanza, consentendo di ridurre od, in ogni caso, di regolare la fessurazione del calcestruzzo provocata dal ritiro; i giunti di costruzione, invece, si rendono necessari tra una ripresa e la precedente stesa, mentre quelli di dilatazione hanno la funzione di ridurre gli effetti delle variazioni termiche, ma ad essi si conferisce un'importanza sempre più limitata. Una soluzione alternativa all'utilizzo dei giunti tra una piastra e l'altra è rappresentata dalla piastra armata; un calcestruzzo armato è infatti in condizioni di offrire una maggiore resistenza alle tensioni indotte dalle variazioni di lunghezza della struttura consentendo in tal modo di adottare maggiori spaziature fra i giunti. La tecnica della precompressione consente un'ulteriore riduzione del numero di giunti e consiste nell'assoggettare la piastra ad uno stato di compressione, così da contenere le tensioni di trazione indotte dai carichi, dal ritiro, e da variazioni termiche.

Nella miscela di calcestruzzo, il dosaggio in cemento varia da 280 a 320 Kg per metro cubo di impasto e la quantità d'acqua da 150 a 180 l, con rapporto acqua/cemento compreso fra 0,48 e 0,55. In ogni caso il proporzionamento della miscela va preventivamente studiato in laboratorio in funzione anche della natura degli inerti e della loro distribuzione granulometrica, del tipo di cemento e dei limiti

fissati per le caratteristiche finali del prodotto (resistenza a compressione, a flessione, modulo di elasticità, ritiro, contenuto d'acqua, densità, lavorabilità, ecc.). La stesa del calcestruzzo si esegue con macchine a casseforme scorrevoli, per cui la lavorazione diviene più rapida ed economica rispetto a quella ottenibile con equipaggiamento a casseforme metalliche da spostare continuamente con il progredire dell'avanzamento nella stesa. Queste macchine hanno raggiunto prestazioni notevoli: larghezza di stesa da 6,00 a 10,50 m e spessori da 20 a 40 cm. Subito dopo la stesa si spruzza la superficie con particolari prodotti (curing), che sono leggermente colorati per controllarne lo spandimento; questi hanno lo scopo principale di limitare gli effetti del ritiro, riducendo l'evaporazione dell'acqua di impasto e quindi consentendo una maturazione ritardata. Gli spessori comunemente adottati variano fra i 30 e 40 cm.

Le sovrastrutture rigide aeroportuali in molti casi sono limitate alle zone critiche; si va però manifestando la tendenza ad impiegare il calcestruzzo anche per la parte centrale delle piste di volo. Le pavimentazioni in calcestruzzo per piste aeroportuali hanno cominciato a trovare una certa diffusione in Europa soltanto dopo il 1960, allorché si riconobbe che l'affinamento dei procedimenti tecnologici e l'acquisizione di nuove tecniche nella scelta degli inerti, nella manipolazione e nel controllo degli impianti, erano capaci di fornire risultati apprezzabili dal punto di vista sia della qualità che della economicità.

Fra le proprietà che si richiedono ad un calcestruzzo per garantire la buona riuscita di una pavimentazione aeroportuale si ritengono di fondamentale importanza:

- **la resistenza meccanica:** influenzata da molteplici fattori quali tipo e quantità del legante, natura e composizione granulometrica degli aggregati, rapporto acqua/cemento, presenza di additivi, modalità di confezionamento e di stesa;
- **la lavorabilità:** viene convenzionalmente misurata attraverso la consistenza, che rappresenta l'attitudine dell'impasto a conservare una determinata forma pur sottoposto a particolari tipi di sollecitazione (la prova tecnologica maggiormente in uso è lo slump-test o prova del cono). Il termine lavorabilità, però, nel campo dei calcestruzzi per pavimentazioni viene adoperato con un significato un po' diverso rispetto a quello usato per le strutture, e cioè come idoneità dell'impasto ad essere steso e compattato dopo un certo tempo dalla confezione. La lavorabilità dell'impasto è così una proprietà tecnologica, legata al tempo di presa, molto

importante, soprattutto se posta in relazione alla produzione oraria delle macchine finitrici ed alla facilità di esecuzione degli strati.

- **tissotropia:** è la proprietà caratteristica di quelle soluzioni colloidali ad alto peso molecolare, che passano spontaneamente dallo stato di sol in cui si trovano a quello di gel, cioè ad uno stato solido molto plastico. La trasformazione inversa avviene per semplice azione meccanica, per esempio per sbattimento del gel. Queste soluzioni colloidali, fra le quali è da annoverare l'impasto di calcestruzzo appena messo in opera, lasciate in quiete, a temperatura e pressione costanti, in breve tempo assumono lo stato di gel presentando caratteristiche elastiche limitatamente a modesti valori di sollecitazione. Durante la stesa delle piastre in calcestruzzo, la formazione del gel non permette alle labbra dei giunti di richiudersi e garantisce una notevole tenuta verticale dei bordi evitando gli abbassamenti ai lati della piastra. Sulle proprietà tissotropiche influisce in larga misura la presenza degli elementi fini ed il loro dosaggio.
- **resistenza all'usura:** può essere migliorata usando aggregati provenienti da rocce compatte e con elevato coefficiente di qualità. Gli aggregati (pietrisco, pietrischetto, graniglia, sabbia), provenienti dalla frantumazione di rocce compatte, preferibilmente basaltiche o calcaree, devono essere privi di materie terrose per cui a volte si rende necessaria una preventiva pulizia delle pezzature tramite annaffiatura e successivo asciugamento.
- **resistenza alle fessurazioni:** l'inconveniente più diffuso che si riscontra nelle sovrastrutture rigide aeroportuali è rappresentato dalle fessurazioni, più o meno diffuse, più o meno capillari. Questo problema è fra i più temuti, in quanto si manifesta dopo la messa in opera e richiede il rifacimento delle piastre non accettabili o la ripresa delle lesioni, provvedimenti ambedue piuttosto onerosi. Per ottenere un sensibile miglioramento di resistenza alla fessurazione sono state studiate e applicate varie tecniche, che sostanzialmente consistono nell'impiego di particolari additivi antievaporanti che evitino una essiccazione troppo rapida dell'impasto e nell'aprire i giunti 12÷16 ore dopo il getto, nel momento, cioè, in cui il calcestruzzo, pur sufficientemente indurito, non ha raggiunto una rigidità tale da essere soggetto a microfessurazioni.
- **resistenza al gelo:** gli additivi aeranti migliorano la lavorabilità dell'impasto ed aumentano la resistenza del calcestruzzo all'azione del gelo però diminuiscono la

resistenza a flessione per cui insieme al loro impiego si adottano altri additivi riduttori dell'acqua potenzialmente congelabile.

- **rugosità superficiale:** è conferita da una scopa a fili di acciaio di 1,5 mm di diametro con solchi di 1,2 mm di profondità massima. Questo trattamento superficiale evita il fenomeno dell'aquaplaning.
 - **resistenza a fatica:** l'applicazione ripetuta di carichi può provocare la rottura anche se lo stato tensionale indotto non supera quello limite per elasticità del materiale.
- (19)

Le **pavimentazioni flessibili** aeroportuali (Figura 34), dal punto di vista tipologico, sono sostanzialmente simili a quelle adottate per le costruzioni stradali. (19) Anche in questo caso infatti la sovrastruttura è costituita dalla sovrapposizione di strati di materiali di diversa natura e di caratteristiche meccaniche differenti:

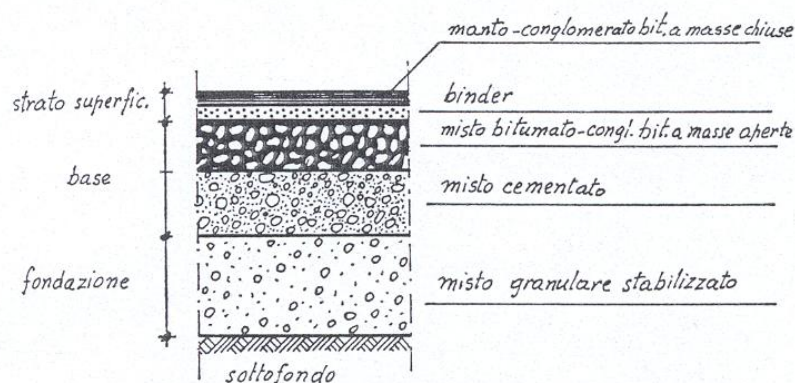


Figura 34: Pavimentazione flessibile.

- a) strato di fondazione: per le fondazioni delle sovrastrutture flessibili si adottano strati di 30÷40 cm di spessore di terreno stabilizzato. La posa in opera del materiale richiede una corretta umidificazione ed un adeguato costipamento, preceduto, se necessario, da opportuno mescolamento per evitare la segregazione del fine. In zone in cui gli strati devono sottostare a lungo all'azione del gelo, sarà necessario accertare che la percentuale di elementi di dimensioni minori di 0,02 mm non superi il 6% del peso totale e che l'aggregato grosso non contenga elementi teneri derivanti da rocce gelive in quantità maggiori del 7% in peso del totale. Il terreno da impiegarsi per la costituzione di uno strato di fondazione può essere trattato, per migliorare le sue caratteristiche, con l'aggiunta di sostanze chimiche o di leganti.

Le varie tecniche della stabilizzazione dei terreni (stabilizzazione con cloruro di calcio, con bitume, cemento, calce), possono consentire l'utilizzazione, per la formazione di tale strato, di terreni reperibili sul luogo piuttosto che di terreni provenienti da cave distanti dal cantiere.

- b) strato di base: la base, di solito, è costituita da un unico strato in misto bitumato ovvero da due strati, di cui quello inferiore in misto cementato e quello superiore in misto bitumato. Il misto bitumato sostanzialmente è un conglomerato bituminoso a masse aperte, cioè nel quale la porosità conserva, dopo costipamento, valori più elevati rispetto a quelli dello strato superficiale. Gli aggregati, sabbia, graniglia e pietrisco, devono essere il più possibile privi di materie eterogenee e la loro curva granulometrica deve rientrare in determinati fusi. Il bitume impiegato nella miscela è il 4÷4,5% in peso degli aggregati. Per la preparazione dell'impasto si utilizzano impianti speciali che assicurano l'essiccamento e la depolverizzazione degli aggregati, nonché il riscaldamento degli stessi e del bitume e la loro miscelazione nelle prestabilite proporzioni. La percentuale di bitume da impiegare, il cui valore va scelto in relazione alle caratteristiche granulometriche degli aggregati, viene generalmente determinata preventivamente in laboratorio con la prova Marshall. Per la stesa si adoperano spanditrici finitrici; la temperatura del conglomerato durante tale operazione dovrà essere non inferiore a 100°C; gli spessori del materiale sciolto per ogni singola passata dovranno essere di 5÷8 cm di spessore finito. Per il costipamento sono sufficienti alcuni passaggi di rullo compressore statico o dinamico a ruote metalliche lisce, purché tale operazione segua immediatamente quella della stesa, cioè prima che il conglomerato raffreddi. Il controllo del costipamento si esegue determinando in laboratorio, su tasselli estratti dallo strato già steso e compattato, la porosità, che deve risultare non superiore a 8÷10%.
- c) strati superficiali: gli strati superficiali sono costituiti dal binder o strato di collegamento, steso sopra la base, e dal manto, o strato di usura, steso sopra il precedente. I due strati superficiali differiscono sostanzialmente per la scelta granulometrica degli aggregati e di conseguenza per il contenuto di bitume. Nel binder la percentuale del filler non supera il 3÷6%, mentre nello strato di usura si ottengono valori dell'8÷10%, il che rende quest'ultimo molto più chiuso, cioè con valori molto bassi di porosità (<4%). La percentuale di bitume viene, anche in questo caso, determinata in laboratorio con la prova Marshall; oltre a questa prova è

importante il controllo dello scorrimento: un'elevata deformazione indica una percentuale di bitume eccessiva od un'errata scelta granulometrica. Fondamentale importanza, poi, ha la natura del filler (calcareo, basaltico, asphaltico ovvero calce idrata, ecc.), per cui è sempre consigliabile studiare preventivamente la composizione del conglomerato attraverso una serie di prove sperimentali che mettano in evidenza le variazioni della rigidità e della massa volumica o del peso di volume in funzione della percentuale di bitume. (19)

3.4 I problemi legati alle pavimentazioni aeroportuali

Il dimensionamento delle sovrastrutture aeroportuali si presenta come un problema abbastanza complesso ed a renderlo meno agevole si aggiungono le particolari condizioni con cui si svolge il traffico nell'ambito della piattaforma aeroportuale. Alla variabilità dell'entità della sollecitazione cui è sottoposta una pista contribuisce prevalentemente la non omogeneità delle caratteristiche dei mezzi aerei (diversità nel peso, nella disposizione delle ruote e nella pressione di gonfiaggio) nonché, per uno stesso aereo, la diversità del carico agente in relazione alle condizioni operative. Infatti un aereo può decollare a pieno carico o a carico ridotto, ed ha all'atterraggio un peso inferiore a quello dell'involo. Anche nella corsa per il decollo il mezzo aereo, acquistando velocità, grava sulla pavimentazione con un peso sempre minore a causa dell'aumento della portanza alare; ciò significa che la resistenza di una pista può non essere uniforme per tutta la sua lunghezza. Un altro fattore che risulta determinante al fine del dimensionamento è rappresentato dalla diversa canalizzazione del traffico e quindi dalla ripartizione delle sollecitazioni nella sezione trasversale delle piste. (19) Dal punto di vista tecnologico le pavimentazioni aeroportuali impongono altri specifici problemi determinati da particolari condizioni in cui si svolge il movimento degli aeromobili sulle piste. Il transito degli aeromobili sulla superficie stradale determina nella sovrastruttura sollecitazioni dipendenti dalle caratteristiche del carico viaggiante, alle quali la pavimentazione reagisce in funzione delle sue caratteristiche fisico-meccaniche. Tale interazione si manifesta sotto forma di cedimenti della superficie stradale in parte reversibili (visco-elastici) e in parte irreversibili (plastici) che con il

trascorrere del tempo compromettono la funzionalità del piano viabile (fessurazioni lineari o a reticolo, ondulazioni, ormaie, ecc.). Infine, la prolungata ripetizione dei carichi, sia pure di entità ammissibile sotto l'aspetto statico, costituisce la cosiddetta sollecitazione a fatica che determina un limite alla vita utile della pavimentazione; pertanto la composizione e gli spessori degli strati della sovrastruttura vanno verificati anche sotto questo aspetto. Il transito degli aeromobili influenza l'integrità degli strati componenti la pavimentazione e altera la configurazione della sezione trasversale del piano viabile in quanto impone alla sovrastruttura e al sottofondo deformazioni che, ripetute, indeboliscono progressivamente la resistenza delle strutture con un'intensità che è decisamente esaltata dalla disuniformità del numero di passaggi nei vari punti della sezione trasversale. Le deformazioni della sovrastruttura sono di tipo a semionda (Figura 35) che comportano un'alternanza di trazione (+) e compressione (-), e quindi una sollecitazione di fatica vera e propria; le deformazioni del sottofondo possono, invece, considerarsi di sola compressione verticale.

In sostanza le sollecitazioni e le deformazioni ripetute sulle pavimentazioni agiscono in doppio modo e precisamente:

- creazione di assestamenti differenziali del sottofondo, e quindi di uno stato tensionale nella sovrastruttura anche in assenza di carichi viaggianti;
- rottura per fatica degli strati dotati di resistenza flessionale; questo fenomeno è già noto da tempo per il calcestruzzo cementizio (il cui carico limite minimo per rottura a fatica si aggira intorno al 60% del carico di rottura con una sola applicazione).

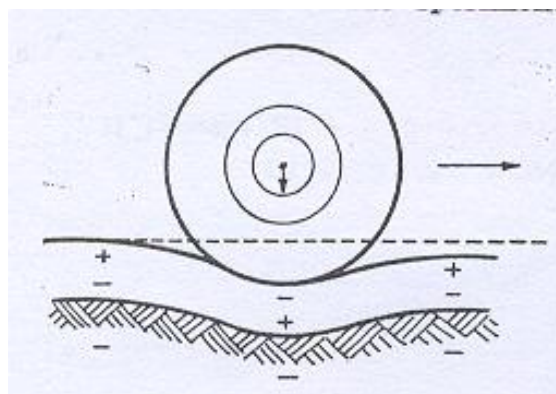


Figura 35: deformazione della sovrastruttura e del sottofondo al passaggio di un carico.

Le principali **cause di ammaloramento delle pavimentazioni flessibili** sono:

- perdite di carburante: durante la circolazione e lo stazionamento dei velivoli si verificano spesso perdite di carburante, che venendo a contatto con il conglomerato ne indebolisce la struttura a causa delle proprietà diluenti del kerosene nei confronti del bitume. Nelle zone adibite alla circolazione degli aerei, ad eccezione di grosse perdite occasionali e localizzate, la quantità di carburante che raggiunge la sovrastruttura è modesta ed è distribuita su superfici estese, per cui le conseguenze sono limitate a leggeri ammaloramenti senza veri e propri effetti nocivi. Nelle zone di sosta, invece (testate di piste di volo, zone di stazionamento) le perdite di kerosene possono risultare più rilevanti e ripetute, divenendo causa di degradazione del manto: il legante viene parzialmente disciolto e perde buona parte della sua coesione, divenendo facilmente deteriorabile per azione dei carichi e dell'acqua superficiale. In queste zone, quindi, l'adozione di rivestimenti di tipo flessibile comporta l'impiego di prodotti anti-kerosene, come il catrame, che rispetto al bitume presenta una maggiore stabilità all'azione del carburante, eventualmente miscelato con prodotti di sintesi (stirene-butadiene, cloruro di polivinile) che ne esaltano la resistenza all'ossidazione;
- influenza delle variazioni termiche: esse sono dovute sia al getto dei reattori sia al calore che si sviluppa nelle fasi di frenatura sulle superfici di contatto con le ruote del carrello. Nelle zone maggiormente interessate, è necessario ricorrere a miscele particolarmente stabili alle variazioni termiche, e con buona resistenza alla fatica e all'usura;
- azione di carichi statici o dinamici: questi carichi prolungati, ripetuti e non uniformemente ripartiti lungo il profilo trasversale della pavimentazione possono indurre deformazioni permanenti per via del comportamento visco-elastico del conglomerato bituminoso. Queste deformazioni si traducono in una alterazione del profilo trasversale del manto, con conseguenze non trascurabili per il confort di marcia ma soprattutto per la possibilità di ristagni d'acqua che causano l'insorgere del fenomeno dell'aquaplaning;
- azioni climatiche: variazioni di temperatura fra giorno e notte e fra le diverse stagioni;
- azione degli agenti atmosferici: riducono la resistenza all'usura del conglomerato bituminoso; (19)
- sollecitazioni e deformazioni ripetute: esse determinano la rottura per fatica degli strati dotati di resistenza flessionale. Per i conglomerati bituminosi il meccanismo

della rottura può spiegarsi con la creazione di microdeformazioni irreversibili che determinano uno stato tensionale sempre più acuto, fino a quando la somma della tensione interna e di quella esterna porta al distacco visibile delle particelle costituenti il solido sollecitato.

Tutti questi fattori conducono il manto superficiale ad un rapido deterioramento. Se si considerano ancora le azioni dovute al traffico si può stabilire che la vita media di un manto superficiale di tipo flessibile, in condizioni cosiddette normali, dovrebbe essere di 6÷10 anni. Per ottenere ciò è però necessario effettuare una continua ed accurata manutenzione dello strato di usura, intervenendo tempestivamente laddove si manifesti qualche sconnessura o cedimento (lesioni superficiali, asportazione a zone per imperfetta adesione del legante agli aggregati, ondulazione od ingobbamenti a causa di abbassamenti degli strati sottostanti, ecc.). Questi necessari interventi manutentivi, però, nel caso di piste e piazzali aeroportuali, costituiscono sempre un grosso problema per l'inagibilità delle zone da ripristinare. (18)

Le principali **cause di ammaloramento delle pavimentazioni rigide** sono:

- sollecitazioni e deformazioni ripetute: esse creano assestamenti differenziali del sottofondo nonché la cosiddetta rottura a fatica. Sono sufficienti, infatti, cedimenti localizzati dell'ordine dei decimi di mm per creare nel calcestruzzo cementizio tensioni dello stesso ordine di quello determinato dai carichi di progetto nell'intero periodo di vita utile;
- variazioni termiche giornaliere: data la rapidità con la quale queste si manifestano, le superfici superiore ed inferiore della piastra vengono portate a diversi livelli termici, restando così soggette ad ingobbamento. Durante il giorno, per effetto dell'irraggiamento solare, la superficie inferiore della sovrastruttura si trova ad una temperatura minore a quella dal piano medio, mentre il contrario si verifica per la superficie superiore; la piastra tende quindi ad incurvarsi con convessità verso l'alto. Durante la notte, poiché il raffreddamento della superficie superiore avviene più rapidamente, l'ingobbamento si manifesta con convessità verso il basso; (19)
- non perfetta esecuzione dei giunti: può risultare causa di continui martellamenti al passaggio delle ruote del carrello sui bordi e conduce a lesioni e degradazioni tali da interessare buona parte delle piastre stesse.

In conclusione, tenuto presente che le sovrastrutture di un aeroporto occupano enormi superfici, non si può prescindere, nella scelta del rivestimento, dal considerare i risvolti

economici che ne conseguono nonché la assoluta necessità di garantire nel tempo la massima utilizzabilità della pavimentazione, ricorrendo solo eccezionalmente ad opere di manutenzione straordinaria. Operazioni di questo genere, infatti, specialmente sulle piste di volo, obbligano interruzioni di traffico più o meno prolungate per l'inagibilità totale o parziale delle piste stesse, con conseguenze di carattere economico che non possono essere sottovalutate. Al riguardo è opportuno notare che, se da un lato riparazioni ed incrementi di spessore possono essere effettuati con maggiore rapidità nelle pavimentazioni di tipo flessibile, dall'altro, nell'arco della vita utile di una struttura aeroportuale (15÷20 anni), la necessità di interventi di manutenzione si appalesa meno frequentemente nelle pavimentazioni cementizie. Quindi, tenuto conto dell'onerosità della manutenzione e del continuo aumento dei prezzi dei derivati del petrolio, sembra assumere maggiore validità la soluzione delle piste in calcestruzzo.

3.5 Il caso dell'Aeroporto "Guglielmo Marconi" di Bologna

Esteso su di un'area di 2.5 km², l'Aeroporto di Bologna è costituito da un'unica pista di volo lunga 2800 metri e larga 45 metri. Essa è stata recentemente ampliata, in modo da permettere lo sviluppo di traffico a lungo raggio, con collegamenti intercontinentali fino a 5000 miglia nautiche, tale da raggiungere la costa del Nord America, il Sud Africa e l'Oceano Indiano, incrementando nel contempo l'agilità e la sicurezza operativa dello scalo. Il numero di passeggeri in transito ha raggiunto i 5 milioni all'anno, in costante crescita negli ultimi anni. Successivi lavori di ampliamento hanno riguardato anche le vie di raccordo e i piazzali di sosta. La via di rullaggio rappresenta il raccordo tra i piazzali di sosta e la pista di decollo e viene attraversata dagli aeromobili durante le manovre a terra prima del decollo o dopo l'atterraggio. Essa è stata ampliata durante i lavori di riqualifica, raggiungendo oggi una larghezza di 23 metri portanti, con due fasce antipolvere laterali da 7.5 metri ciascuna. In questo modo sono state raggiunte le dimensioni minime per permettere il transito di velivoli di grandi dimensioni (classe E). Le sovrastrutture stradali sono in pavimentazioni di tipo flessibile, ad eccezione dei piazzali di sosta, realizzati prevalentemente in pavimentazione rigida. I criteri che hanno portato alla scelta di questo

tipo di pavimentazione, anche in zone critiche quali la via di rullaggio e la testata della pista di volo, sono di natura tecnica ed economica:

- **Terreno di sottofondo:** la resistenza di una sovrastruttura risulta condizionata dalla possibilità del terreno di sottofondo di esplicitare le reazioni necessarie alla sua funzione di uniforme sostegno, senza peraltro subire deformazioni o cedimenti che superino determinati limiti. L'aeroporto di Bologna è costruito su di un terreno a matrice limo-argillosa, caratterizzato da fenomeni di ritiro e di rigonfiamento di natura igrometrica. Questo produce cedimenti differenziali dello strato di fondazione più o meno cospicui, causa principale dei dissesti delle sovrastrutture. Le pavimentazioni di tipo flessibile sembrano adattarsi meglio ai cedimenti del piano di posa dell'ordine di millimetri rispetto alle pavimentazioni rigide, che invece tendono a fessurarsi per l'insorgere di stati tensionali causati dalla non perfetta uniformità del piano di posa.
- **Tecniche di esecuzione:** la costruzione di una pavimentazione rigida si è sempre presentata meno semplice rispetto a quella flessibile, sia per via della particolare tecnologia del calcestruzzo per la stesa delle piastre sia per le difficoltà spesso create dai giunti, la cui non perfetta esecuzione può condurre a lesioni e degradazioni tali da interessare buona parte delle piastre stesse.
- **Utilizzabilità della pavimentazione:** le pavimentazioni flessibili possono essere riparate con maggiore facilità e rapidità, riducendo al minimo le interruzioni di traffico e garantendo la massima utilizzabilità della pista di volo.

D'altra parte l'onerosità dei costi di manutenzione e la necessità di interventi frequenti rappresenta un aggravio economico rispetto alla soluzione delle piste in calcestruzzo. In particolare la via di rullaggio e la testata della pista di volo sono particolarmente soggette al deterioramento della superficie stradale per il passaggio di un traffico canalizzato e a velocità ridotta, che grava con tutto il peso degli aeromobili sulla pavimentazione. Sollecitazioni di questo tipo possono indurre nel piano viabile cedimenti permanenti che ne possono compromettere la viabilità. L'alterazione del profilo trasversale del manto porta all'insorgere di ondulazioni, con conseguenze sul confort di marcia, a cui si aggiunge il rischio di acquaplaning causato dal ristagno dell'acqua. Nel corso degli anni la ripetizione dei carichi può portare a deformazioni permanenti denominate ormaie che compromettono il piano viabile stradale. Per questi motivi le pavimentazioni flessibili

richiedono interventi manutentivi frequenti al fine di garantire la durabilità della pista per un vita utile di 15-20 anni.

Infine la scelta di un tipo di pavimentazione è legata anche a fattori di scala e di mercato: aeroporti di dimensioni medie spesso adottano pavimentazioni di tipo flessibile anche per zone critiche; ne sono un esempio l'aeroporto di Bologna, ma anche l'aeroporto di Copenaghen. Questo orientamento è strettamente connesso ad analoghi orientamenti nel campo delle costruzioni stradali, e ciò dipende dal fatto che la realizzazione di piste di volo o di piazzali non sono così frequenti da giustificare l'impiego di attrezzature speciali e tecnologie che non siano utilizzabili anche per sovrastrutture stradali. (19)

LA PREPARAZIONE DELLA MISCELA

4.1 Introduzione

Il controllo delle proprietà del calcestruzzo fresco o indurito è fondamentale per ottenere il comportamento desiderato, in fase di stesa del getto o in fase operativa, del conglomerato cementizio e per garantire le caratteristiche richieste in sede di progetto. La definizione di tali proprietà avviene attraverso la progettazione della miscela o mix-design, in cui si selezionano i componenti in maniera da ottenere le prestazioni necessarie all'uso richiesto. Fra le proprietà che si richiedono ad un calcestruzzo per garantire la buona riuscita di una pavimentazione aeroportuale si ritengono di fondamentale importanza la resistenza meccanica, la lavorabilità, la tixotropia, la resistenza all'usura e al gelo. Vediamo come il mix-design permette di valutare il dosaggio dei singoli componenti del conglomerato cementizio indicati nel *Capitolo 3* per esaltare le prestazioni richieste dal progetto.

4.2 Mix-Design

Il Mix Design è un metodo per calcolare il proporzionamento dei vari componenti del calcestruzzo a partire dai dati progettuali e dalle caratteristiche del materiale disponibile. I principi su cui si basa sono la regola di Lyse e la legge di Abrams:

- la regola di Lyse serve a stabilire la quantità d'acqua necessaria al confezionamento di calcestruzzi con differente consistenza;
- la legge di Abrams lega il rapporto acqua/cemento con la resistenza meccanica.

Per ottenere una lavorabilità adatta al nostro scopo ci serviremo della regola di Lyse per determinare, una volta scelto il tipo di aggregato da utilizzare, e quindi il suo diametro

massimo, la quantità d'acqua nell'impasto. La lavorabilità viene convenzionalmente misurata attraverso la consistenza, che rappresenta l'attitudine dell'impasto a conservare una determinata forma pur sottoposto a particolari tipi di sollecitazione. La prova tecnologica maggiormente in uso è lo slump-test o prova del cono, che consiste nel misurare l'abbassamento che subisce il calcestruzzo appena confezionato e posto all'interno di un tronco di cono metallico cavo una volta che il cono sia stato rimosso, come illustrato in Figura 36.

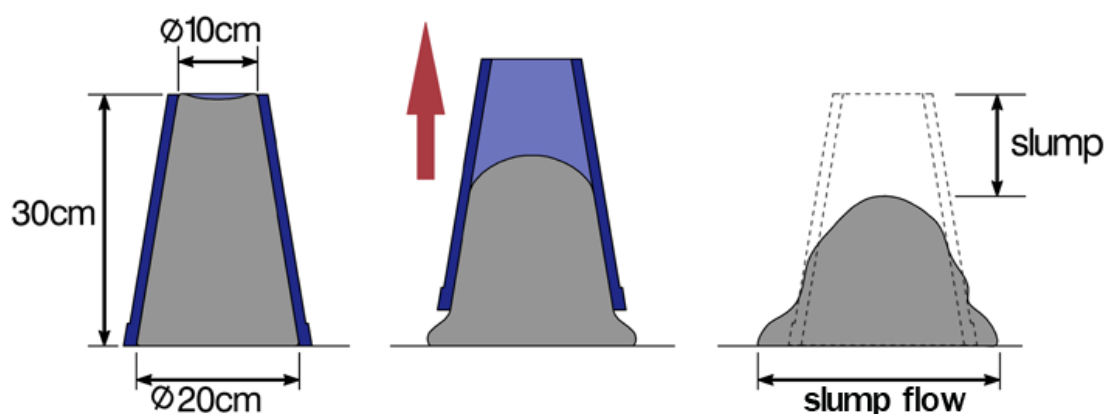


Figura 36: Misurazione dello slump.

Dalla misura dell'abbassamento si deduce la classe di consistenza dell'impasto: per garantire una ottima lavorabilità, in modo ad ottenere una stesa agevole del calcestruzzo e garantire uniformi caratteristiche meccaniche nella pavimentazione aeroportuale, si è scelto una classe di consistenza S5 superfluida, che corrisponde ad uno slump uguale o superiore a 210 mm (Tabella 4).

Tabella 4: Dosaggio d'acqua d'impasto in base allo slump desiderato.

Consistenza	Slump (mm)	Dosaggio d'acqua d'impasto (l/m^3) in funzione del D_{max} dell'aggregato (mm)			
		< 10 mm	< 16 mm	< 25 mm	< 40 mm
Umida S1	10-40	195	180	170	160
Plastica S2	50-90	215	200	190	180
Semifluida S3	100-150	230	215	205	195
Fluida S4	160-200	240	225	215	205
Superfluida S5	> 210	250	235	225	215

Per ottenere un impasto di questo tipo dovremo aggiungere una certa quantità di acqua in base al tipo di aggregato e in particolare al suo D_{max} . L'uso di quantità elevate di acqua, come richiesto per una consistenza superfluida, se da un lato migliora la lavorabilità, dall'altro riduce, come è noto, le caratteristiche di resistenza meccanica e rende opportuno l'impiego di superfluidificante, nella percentuale dell'1% rispetto al peso del calcestruzzo, per ridurre la quantità d'acqua del 20% a vantaggio di resistenza meccanica e lavorabilità dell'impasto. Il secondo elemento che definisce il nostro impasto è la resistenza meccanica, che è legata al rapporto acqua/cemento tramite la legge di Abrams. Secondo questa legge, infatti, la resistenza meccanica ad una determinata stagionatura e ad una determinata temperatura aumenta al diminuire del rapporto acqua/cemento, secondo la seguente equazione:

$$R = \frac{K_1}{\frac{a}{K_2^c}}$$

dove R è la resistenza meccanica a compressione, K_1 e K_2 sono due costanti che dipendono dal tipo di cemento, dal tempo e dalla temperatura di stagionatura, a/c è il rapporto acqua/cemento. Il dimensionamento di piste aeroportuali in relazioni ai carichi che interessano il rivestimento richiede la prescrizione di elevati valori di resistenza a compressione, tra i 45 e i 55 N/mm^2 , rendendo così necessario un rapporto acqua cemento tra 0.48 e 0.55 come indicato in Figura 37.

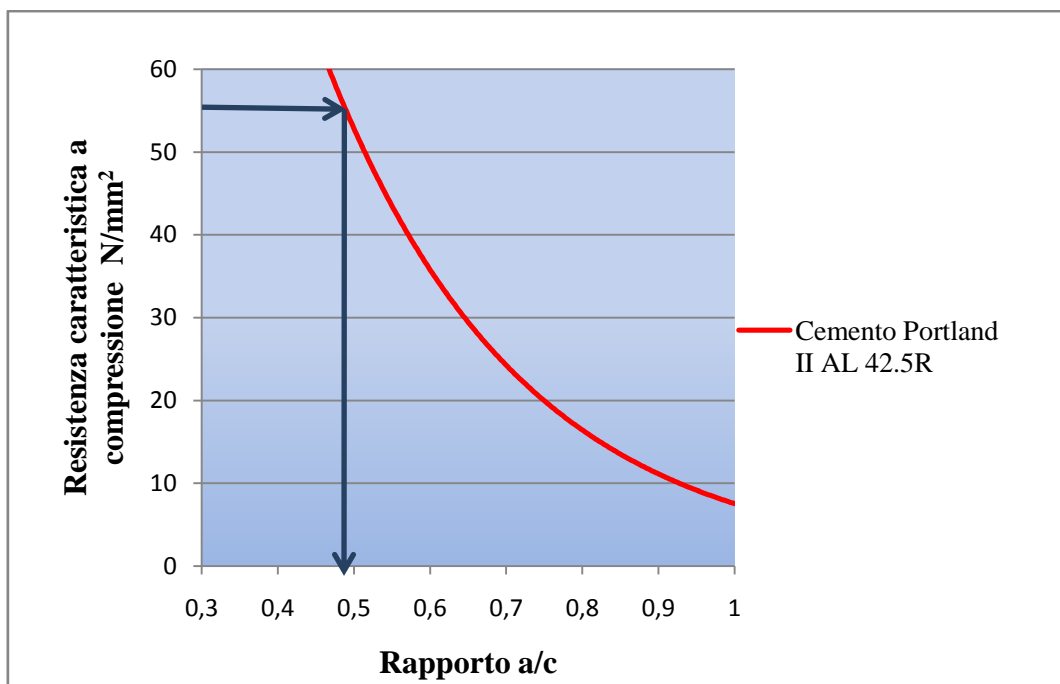


Figura 37: Resistenza a compressione in funzione del rapporto acqua/cemento.

Il cemento utilizzato è il Cemento Portland tipo II AL 42.5R che presenta nel composto una percentuale di circa il 15% di calcare. Utilizzato in genere nei lavori di sottostruttura come le pavimentazioni, è adatto per l'esecuzione di calcestruzzi impermeabili, resistenti al gelo e ai sali di disgelo. Nella scelta della miscela dovremo infine tener conto della durabilità e delle proprietà tissotropiche del calcestruzzo. E' importante infatti considerare anche la durabilità del calcestruzzo, che dipende dall'aggressività dell'ambiente in cui avviene la maturazione adottando un rapporto acqua/cemento più basso tanto maggiore è il livello di aggressione ambientale, in modo da ottenere un calcestruzzo impermeabile agli agenti aggressivi. In alternativa si può proteggere il getto di calcestruzzo durante la maturazione adottando agenti di "curing", a base di paraffina o resine, che vengono applicati sul calcestruzzo subito dopo il suo disarmo e che una volta essiccati formano una membrana impermeabile e antievaporante, che garantisce anche una adeguata stagionatura umida e migliora quindi la resistenza alla fessurazione. Come detto sopra, il calcestruzzo fresco dovrà possedere elevata tissotropia, in maniera che appena messo in opera assuma lo stato di gel con caratteristiche elastiche limitatamente a modesti valori di sollecitazione. Sulle proprietà tissotropiche influisce in larga misura la presenza degli aggregati fini e il loro dosaggio verrà curato con particolare attenzione. I dati di progetto del calcestruzzo sono quindi il tipo di aggregato e il suo D_{max} , il tipo di cemento e la resistenza caratteristica R, la classe di lavorabilità e l'utilizzo di additivi. Una volta determinati il rapporto tra acqua e cemento a/c e la quantità d'acqua a come indicato sopra, si può procedere al calcolo della quantità di cemento necessaria a garantire la resistenza di progetto:

$$c = \frac{a}{a/c}$$

Per determinare il volume degli inerti da inserire nella miscela si determina infine la quantità d'aria che verrà inglobata nell'impasto in base al D_{max} secondo la seguente Tabella 5.

Tabella 5: Percentuale di aria inglobata nel calcestruzzo in base al D_{max} .

D_{max}	< 10 mm	< 16 mm	< 25 mm	< 40 mm
Aria intrappolata (l/m ³)	3%	2.5%	2%	1.5%

Avendo determinato la quantità di acqua, aria, cemento in termini di volume, possiamo determinare il volume di inerti necessario per ottenere 1 metro cubo di calcestruzzo:

$$V_{inerte} = 1 - V_{acqua} - V_{cemento} - V_{aria}$$

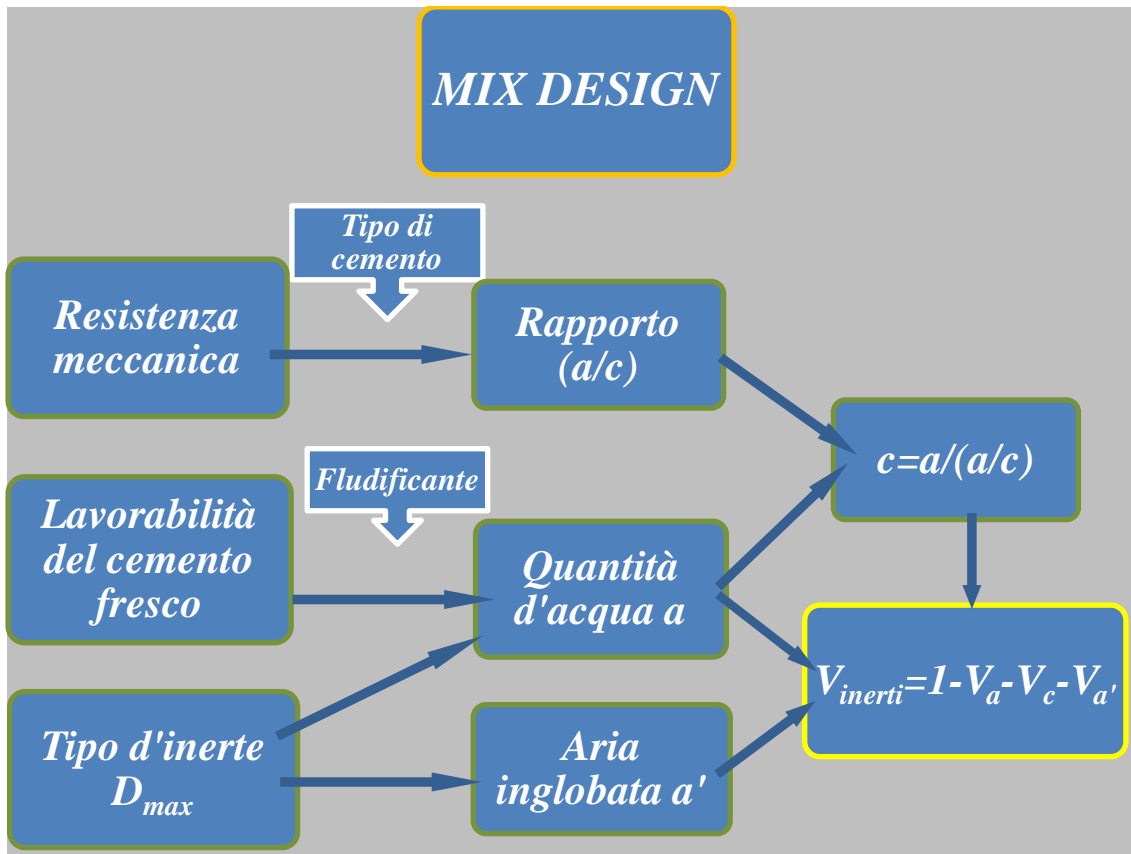


Figura 38: Schematizzazione del processo di mix-design.

Il volume totale degli inerti V_{inerte} viene poi suddiviso in quello dei singoli aggregati, sabbia, ghiaietto e ghiaia, sulla base delle curve granulometriche di queste classi rispetto alle curve ideali di Füller o Bolomay.

4.3 Le miscele

Le sovrastrutture aeroportuali necessitano di calcestruzzi con prestazioni elevate e quindi il progetto della miscela richiede particolare cura nello studio della composizione granulometrica. Sono stati confezionati tre impasti con diversa distribuzione granulometrica al fine di ottenere le prestazioni richieste nel mix-design: i primi due sono impasti additivati con PFU, in parziale sostituzione degli aggregati fini, di cui è

stata fatta una valutazione per scegliere la miscela con prestazioni adeguate all'impiego nella pavimentazione aeroportuale; il terzo è un calcestruzzo di riferimento con la funzione di confronto rispetto ai precedenti. Tra le due miscele additivate con PFU, che differiscono principalmente per quantità d'inerte utilizzato, è stato scelto quella con le migliori caratteristiche principalmente in merito alla lavorabilità e alla resistenza. Il granulato di gomma è stato aggiunto in parziale sostituzione alla sabbia per l'affinità tra le rispettive distribuzioni granulometriche, come illustrato in Figura 39. Gli aggregati a disposizione sono di tipo alluvionale, provenienti da cava, a composizione prevalentemente silicatica e subordinatamente calcarea. Vediamo in dettaglio gli aggregati utilizzati:

- La Sabbia Pò 0/2 mm è un aggregato molto fine, monogranulare, con l'85% della granulometria compresa tra 0.1 e 1 mm, come mostrato in Figura 39;
- La Sabbia è un aggregato fine con 85% di passante al setaccio da 4 mm;
- Il Ghiaietto è un aggregato grosso con 85% del trattenuto compreso tra il setaccio da 16 mm e il setaccio da 8 mm;
- La Ghiaia è un aggregato grosso con granulometria compresa tra 16 mm e 32 mm.

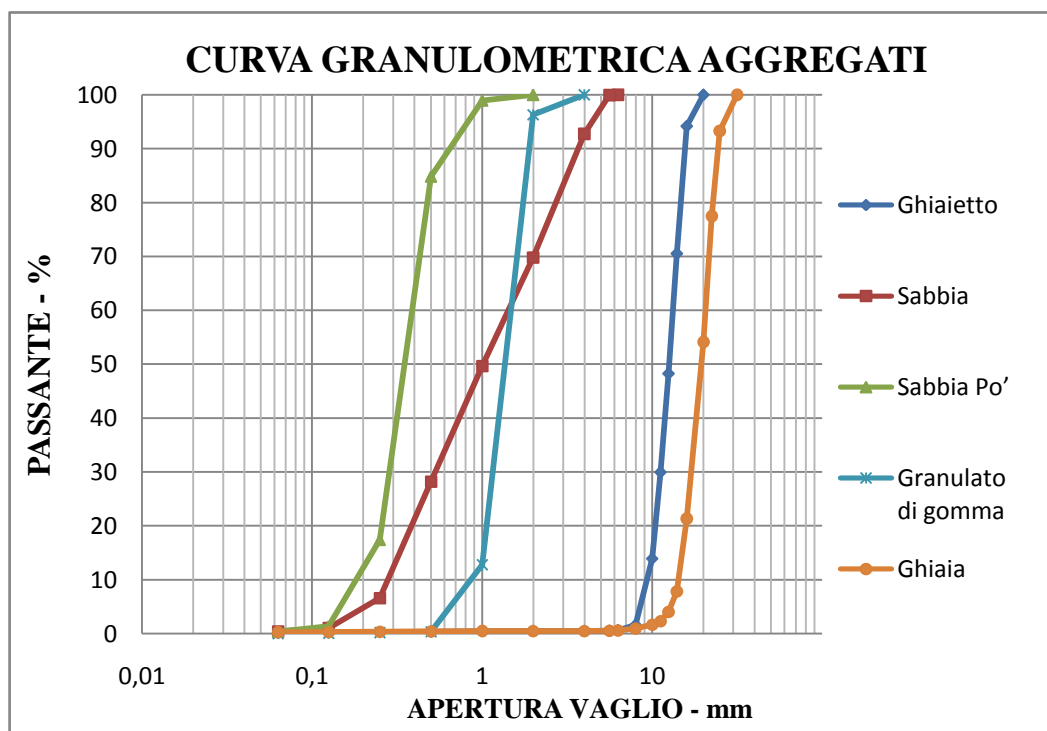


Figura 39 Distribuzioni granulometriche degli aggregati utilizzati nelle miscele.

La distribuzione granulometrica degli aggregati è stata determinata per vagliatura, come indicato nel *paragrafo 1.2.3*. La granulometria del PFU è stata scelta tra varie pezzature ottenute da lavorazioni diverse, sulla base delle esperienze svolte da diversi ricercatori. Il Granulato di gomma utilizzato ha l'85% del trattenuto compreso tra 0.8 mm e 2 mm. La scelta delle frazioni di volume dei singoli aggregati è stata effettuata confrontando le distribuzioni granulometriche degli aggregati con le curve ideali di Füller e di Bolomey. E' stato utilizzato un programma di calcolo in ambiente Matlab che valuta l'errore quadratico medio delle miscele di aggregati, al variare dei singoli componenti, rispetto alle curve di riferimento (Figura 40). Il criterio dei minimi quadrati ha permesso di evidenziare le miscele che forniscono maggiori garanzie per il confezionamento del calcestruzzo.

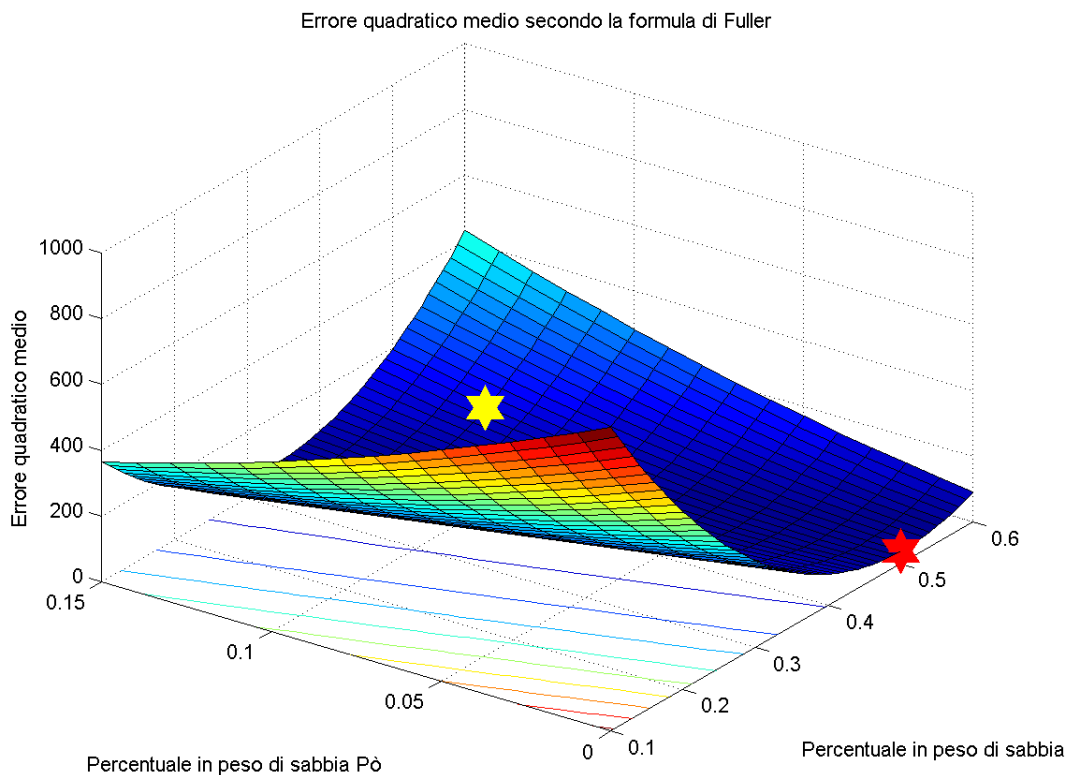


Figura 40: Calcolo dell'errore quadratico medio della curva granulometrica in Matlab.

4.3.1 Miscela 1

La prima miscela è realizzato utilizzando come inerti Ghiaia, Ghiaietto, Sabbia e Sabbia P0, la cui curva granulometrica è indicata in Figura 39, con percentuali degli aggregati

tali da fornire la migliore corrispondenza possibile alle curve ideali. Attraverso il programma di calcolo Matlab sono state elaborate tutte le possibili combinazioni delle classi granulometriche, variandone le percentuali. Tra tutte le possibili combinazioni granulometriche è stata scelta quella che presentava la minore distanza dalla curva ideale. Il criterio dei minimi quadrati è stato adottato per valutare la distribuzione granulometrica che presenta una curva granulometrica con minore errore quadratico medio. Nella Tabella 6 sono riportate le percentuali in peso di inerte e di granulato di gomma che secondo il criterio dei minimi quadrati fornisce una distribuzione granulometrica più vicina a quella ideale secondo le leggi di Füller e Bolomey con $D_{max} = 31.5$ mm.

Tabella 6: Composizione delle distribuzioni granulometriche degli aggregati secondo Bolomey e Füller.

Componenti	Miscela ideale secondo Bolomey %	Miscela ideale secondo Füller %
Ghiaia	23.4	32.4
Ghiaietto	29.8	22
Sabbia	33.0	41
Sabbia Pò	8.6	0
PFU	5.3	4.6
EQM	81	33
MF	5.38	5.66

Per la curva granulometrica con eqm minimo secondo il criterio di Bolomey si è adottato un coefficiente $A = 12$ per inerti di tipo alluvionale e per un calcestruzzo di consistenza superfluida (Figura 41). Tale distribuzione granulometrica presenta garanzie di buona densità degli aggregati, dando ottimi risultati dal punto di vista della resistenza e allo stesso tempo garantendo una migliore lavorabilità del calcestruzzo rispetto alla distribuzione granulometrica ottenuta secondo il criterio di Füller (Figura 42). Se quest'ultimo infatti garantisce il massimo addensamento dell'impasto, non fornisce garanzie per quanto riguarda la percentuale di filler, passante al setaccio con fori del diametro di 0.075 cm, risultando in un calcestruzzo poco lavorabile ed aspro. Si è quindi adottato la curva granulometrica con eqm minimo secondo Bolomey e, stabilita quindi

la percentuale degli inerti, si è proceduto al calcolo del volume complessivo degli inerti come indicato nel *paragrafo 3.2*.

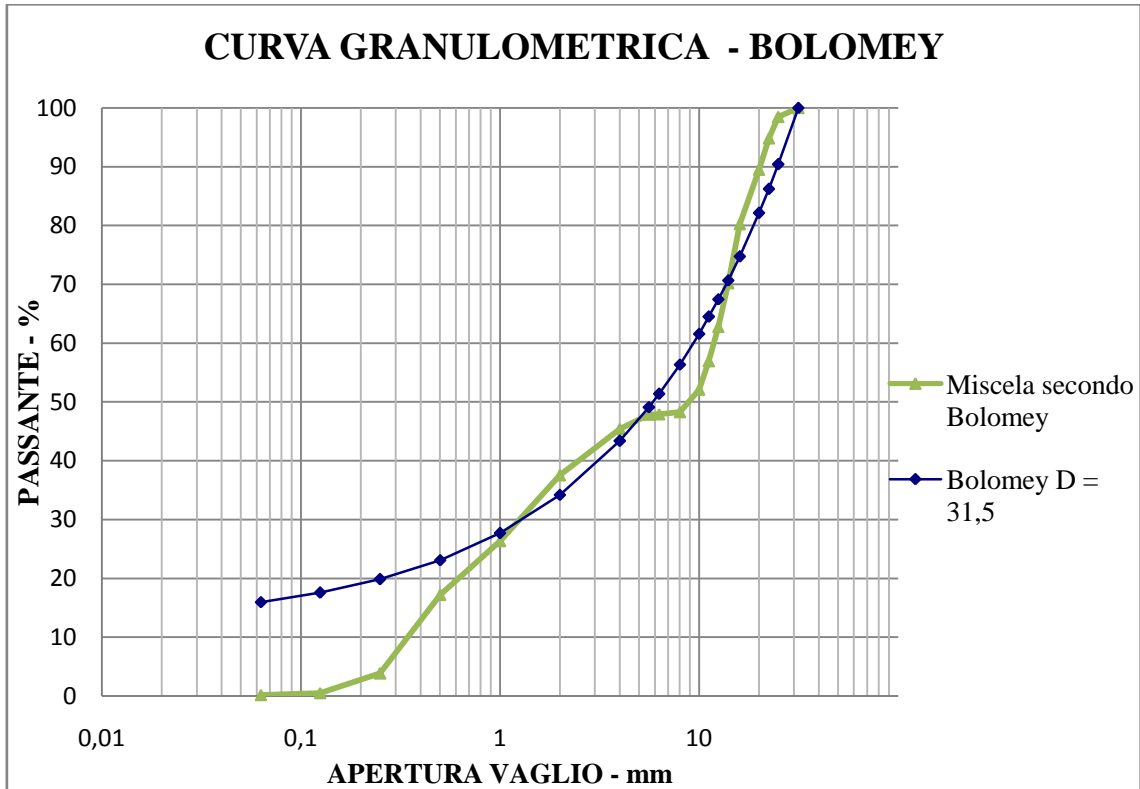


Figura 41: Curva granulometrica con eqm minimo secondo Bolomey.

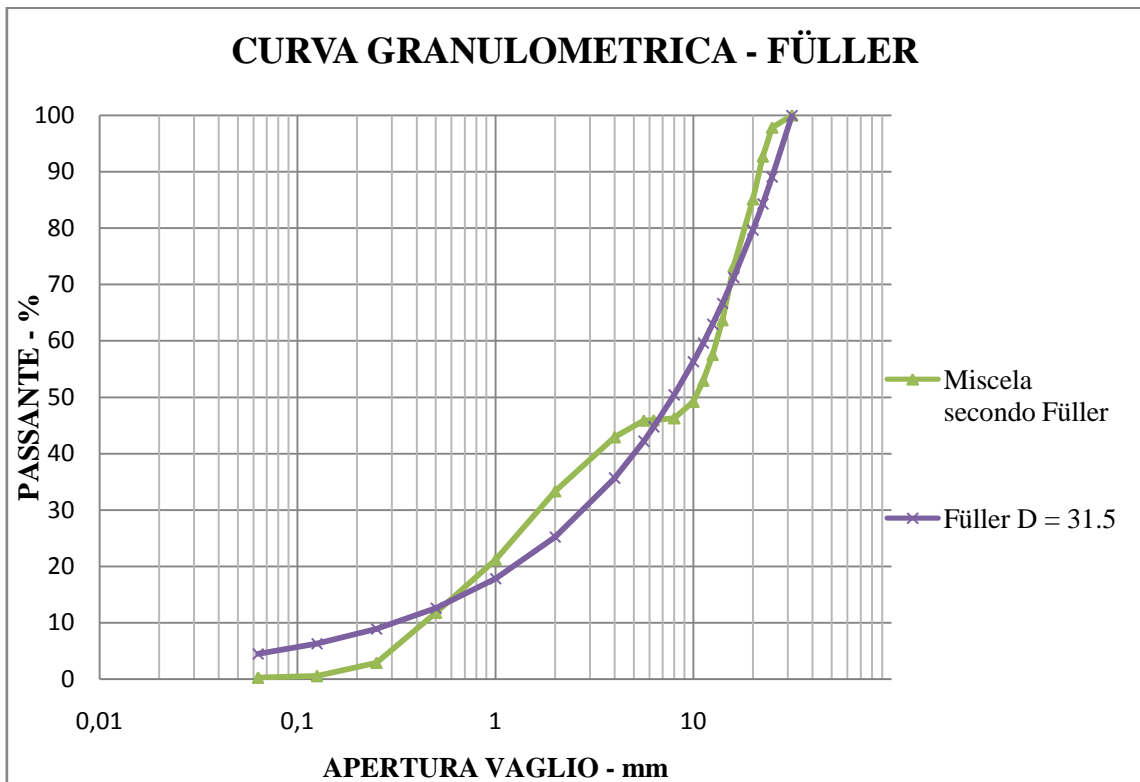


Figura 42: Curva granulometrica con eqm minimo secondo Füller.

Avendo scelto una resistenza caratteristica a compressione di 55 N/mm^2 si ricava dalla Figura 37 che il rapporto acqua cemento deve essere pari a 0.486 per il cemento Portland tipo II AL 45.5R. In base poi al diametro massimo dell'aggregato $D_{\max}=31.5 \text{ mm}$ è necessario utilizzare una quantità d'acqua per m^3 d'impasto pari 215 litri per ottenere una consistenza del calcestruzzo di tipo superfluido (Tabella 4). Per ottenere caratteristiche superiori in termini di resistenza meccanica ed evitare fenomeni indesiderati, quali il bleeding e la segregazione, è stato utilizzato un additivo superfluidificante poliacrilico, tipo Axim Creative LX, nella quantità dello 0.8% rispetto al peso di cemento, che ha permesso la riduzione della quantità di acqua del 21% e il mantenimento di una consistenza superfluida con caratteristiche di resistenza elevate.

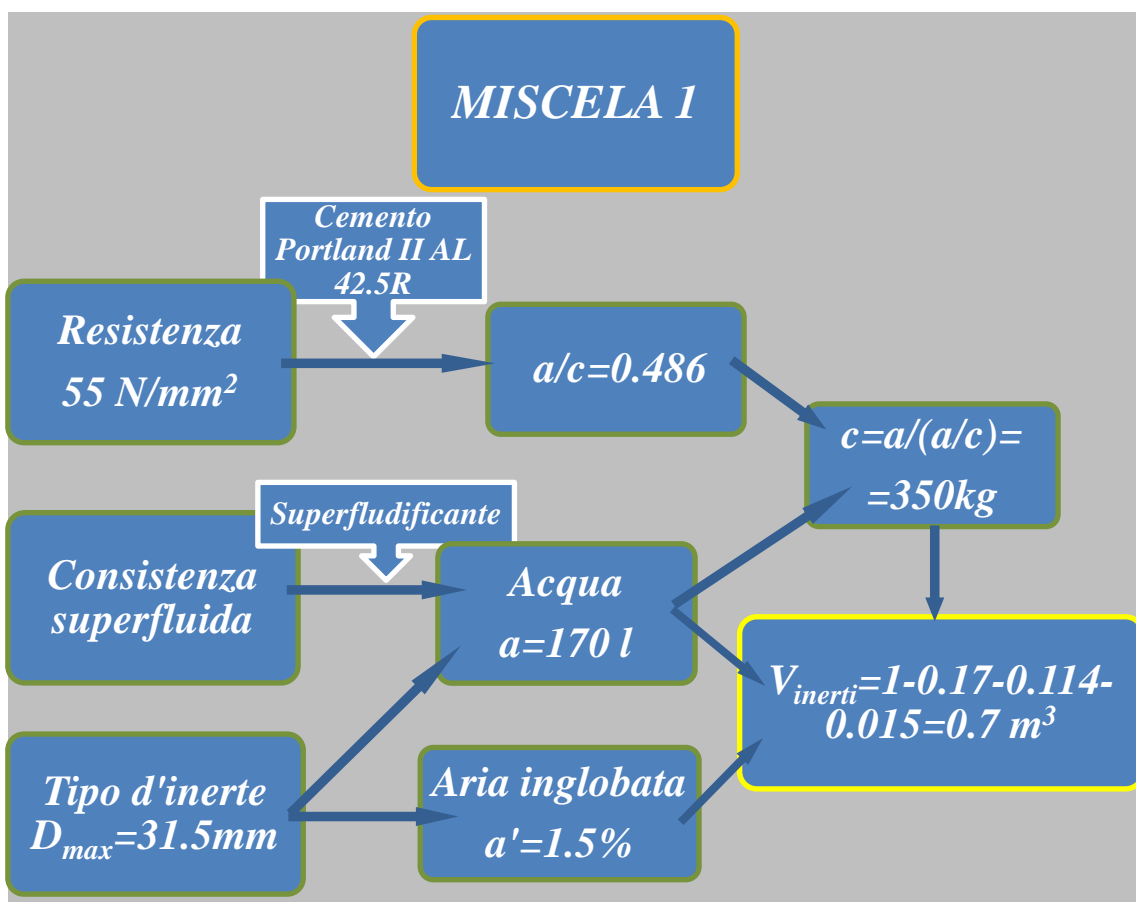


Figura 43: Mix-design della Miscela 1.

La quantità di acqua per m^3 utilizzata è quindi 170 litri. Da questi dati è possibile ricavare la quantità di cemento per m^3 di impasto, pari a 350.5 kg. La Tabella 5 ci fornisce la percentuale di aria inglobata, che nel nostro caso è pari a 1.5% per un aggregato con D_{\max} di 31.5 mm. Quindi otteniamo il volume degli inerti necessari per confezionare un metro cubo d'impasto:

$$V_{inerte} = 1 - V_{acqua} - V_{cemento} - V_{aria} = 1 - 0.17m^3 - \frac{350.5kg}{3080 \frac{kg}{m^3}} - 0.015m^3$$

$$= 0.7 m^3$$

Il volume ricavato sarà composto dai diversi aggregati secondo le percentuali individuate dalla curva di Bolomey e riassunte nella Tabella 7. L'umidità degli inerti è stata valutata prima di procedere alla miscelazione dell'impasto per verificare se l'acqua assorbita dai granuli vada a modificare la quantità d'acqua della miscela. Quando, infatti, i granuli hanno tutti i pori pieni d'acqua, mentre la superficie esterna è asciutta, si dice che l'inerte è saturo ed ha superficie satura asciutta. Si assume che all'interno del calcestruzzo l'inerte venga a trovarsi nella condizione di superficie satura asciutta.

Tabella 7: Calcolo delle frazioni d'inerte per confezionare il calcestruzzo.

Componenti (s.s.a.)	% in peso	% in volume	Volume d'inerte per m³ d'impasto	kg d'inerte per m³ d'impasto
Ghiaia	23.4	22.0	0.1515	396.89
Ghiaietto	29.8	28.0	0.1928	505.13
Sabbia	33.0	31.0	0.2135	559.25
Sabbia Pò	8.6	8.0	0.0551	145.97
PFU	5.2	11.0	0.0757	89.38

Se l'inerte è insaturo o asciutto, parte dell'acqua dell'impasto sarà assorbito dai grani fino a portarsi nella condizione di s.s.a. e quindi la quantità di acqua necessaria all'impasto sarà maggiore di quella determinata con il mix-design, includendo quella necessaria alla saturazione degli inerti. Al contrario, se l'inerte è umido, cederà l'acqua in eccesso all'impasto, cosicché la quantità di acqua deve essere calcolato tenendo conto dell'umidità dell'inerte. Da quanto detto si evince l'importanza di controllare l'umidità reale dell'inerte e il valore di s.s.a. perché l'acqua dell'impasto sia adeguata a fornire le proprietà richieste nel mix-design al calcestruzzo fresco ed indurito. Per stabilire la percentuale di acqua che corrisponde all'inerte con s.s.a. si scalda l'inerte a 110°C finché non raggiunge un peso costante, e la perdita percentuale rispetto al peso secco di inerte prende il nome di assorbimento, il cui valore caratterizza lo stato di s.s.a.. Stabilito quale è il valore dell'assorbimento, è necessario conoscere l'umidità assoluta dell'inerte attraverso uno dei metodi di misura dell'umidità. Nella Tabella 8 viene indicata l'umidità reale degli aggregati, ottenuta come differenza tra l'umidità assoluta e l'assorbimento degli aggregati, da cui si ricava che l'acqua in eccesso nel nostro caso è 37 litri per metro cubo d'impasto.

Tabella 8: Calcolo dell'acqua in eccesso per l'umidità dell'inerte.

Componenti	Peso per m³ d'impasto s.s.a.	Assorbim. aggregati %	Umidità assoluta %	Umidità reale %	Eccesso d'acqua litri
Ghiaia	396.89	1.4	1.4	0	0
Ghiaietto	505.13	1.3	2.3	1.0	5.05
Sabbia	559.25	1.5	5.3	3.8	21.25
Sabbia Pò	145.97	1.6	8.0	6.4	9.34
PFU	89.38	0	0	0	0
Tot					37.005

Nel confezionamento della miscela si dovrà tenere conto dell'umidità degli inerti durante il dosaggio, aggiungendo al peso degli aggregati a s.s.a., il peso dell'acqua in eccesso contenuta dai singoli aggregati, come indicato nella prima colonna della Tabella 9. Qui sono elencati i componenti effettivamente introdotti nella betoniera, con i pesi corretti in considerazione dell'eccesso d'acqua, per la miscelazione dell'impasto. E' stata seguita una precisa sequenza di introduzione degli elementi allo scopo di ottenere un calcestruzzo di qualità, con consistenza omogenea. Dopo aver introdotto gli aggregati fini, gli aggregati grossi e il granulato di gomma e averli miscelati per 5 minuti si è proceduto all'aggiunta di cemento e ad una nuova miscelazione per disperderne le particelle e favorire le reazioni al momento dell'introduzione dell'acqua.



Figura 44: Miscelazione dei componenti nella Betoniera.

Tabella 9: Proporzionamento dei componenti per la Miscela 1.

MISCELA 1		
Componenti	kg/m³	Pesata di laboratorio - kg
Ghiaia	396.89	19.72
Ghiaietto	510.18	25.40
Sabbia	580.50	28.89
Sabbia Pò	155.32	7.79
PFU	89.38	4.50
Cemento	350	17.5
Additivo	2.8	0.14
Acqua	133	6.65

Dopo l'introduzione dell'acqua, la miscelazione è proceduta per 10 minuti per amalgamare l'impasto e avvolgere la superficie degli inerti di pasta cementizia. In questa ultima fase è stato anche introdotto l'additivo, che non può essere aggiunto sull'impasto prima che sia già bagnato. La durata della miscelazione è volta a garantire che l'impasto sia uniforme evitando la formazione di incrostazioni e grumi di cemento o la segregazione dei componenti. Terminata questa fase si è subito proceduto alla valutazione della lavorabilità attraverso la prova di consistenza al cono di Abrams o Slump Test.



Figura 45: Riempimento del cono di Abrams.



Figura 46: Costipamento del calcestruzzo.



Figura 47: Riempimento del cono completato.



Figura 48: Sollevamento del cono.



Figura 49: Misura dello Slump del calcestruzzo. Figura 50: Aspetto dell'impasto dopo lo Slump.

Il cono di Abrams è stato appoggiato su di una base metallica non assorbente e riempito dall'alto con il calcestruzzo in tre strati secondo modalità standardizzata (Figura 45). Ogni strato di calcestruzzo è stato costipato assestando 25 colpi con un pestello dal diametro di 1.6 cm e lungo 60 cm (Figura 46). Ultimato il riempimento del cono si è provveduto a livellare la superficie del calcestruzzo ed a sollevare verticalmente il cono tramite le apposite maniglie come raffigurato in Figura 47. Venuto meno il supporto del cono, l'impasto tende a spandersi sulla base di appoggio per effetto della forza di gravità finché non si raggiunge l'equilibrio tra forze interne di coesione e forze esterne (Figura 50). La misura dell'abbassamento attraverso un'asta graduata ha permesso di valutare che il calcestruzzo in esame ha subito uno slump di 220 mm ed appartiene quindi ad una classe di consistenza di tipo superfluido.



Figura 51: Provini di forma cubica e cilindrica compattati con vibratrice meccanica.

Dopo aver terminato la prova sul calcestruzzo fresco sono stati confezionati i provini per effettuare le prove su calcestruzzo indurito. Appositi stampi di forma cubica e cilindrica, lubrificati internamente per agevolare la rimozione dei provini, sono stati riempiti di calcestruzzo fino all'orlo, rasando poi la superficie per rimuovere quello in eccesso. Il calcestruzzo è stato compattato con il vibratore meccanico applicato per 6 secondi. Sono stati realizzati 11 provini cubici, con lato 15 cm, e 2 provini cilindrici, con diametro 15 cm e altezza 30 cm (Figura 51). I provini sono stati lasciati per 24 ore negli stampi e quindi sono stati sformati e portati in camera di maturazione dove hanno stagionato per 28 giorni alla temperatura di 20°C e con UR>95%.

4.3.2 Miscela 2

La seconda miscela è stata realizzata utilizzando come aggregati Ghiaietto, Sabbia e Sabbia Pò, ma senza Ghiaia per ridurre il diametro massimo dell'aggregato. In questo modo si vuole confezionare un impasto che presenti minore rischio di segregazione dei costituenti più grossi durante il trasporto e la messa in opera, anche in considerazione del fatto che lo spessore della lastra di calcestruzzo è di 16 cm e si vuole avere un diametro massimo dell'aggregato inferiore al 20% dello spessore. Anche per questa miscela è stato utilizzato il programma di calcolo Matlab per elaborare, tra tutte le possibili combinazioni delle classi granulometriche, quella che presentava la minore distanza dalla curva ideale attraverso il criterio dei minimi quadrati. Nella Tabella 6 sono riportate le percentuali in peso di inerte e di gomma che secondo il criterio dei minimi quadrati fornisce una distribuzione granulometrica più vicina a quella ideale secondo le leggi di Füller e Bolomey con $D_{max} = 20$ mm.

Tabella 10: Distribuzioni granulometriche degli aggregati secondo Bolomey e Füller.

Componenti	Miscela ideale secondo Bolomey %	Miscela ideale secondo Füller %
Ghiaietto	38.5	44.5
Sabbia	44.2	50.3
Sabbia Pò	11.1	0
PFU	6.2	5.2
EQM	87	38
MF	4.94	5.06

Per questa miscela si è scelto di adottare la distribuzione granulometrica che fornisce l'errore quadratico medio più basso tra il criterio di Bolomey (Figura 53) e quello di Füller (Figura 52).

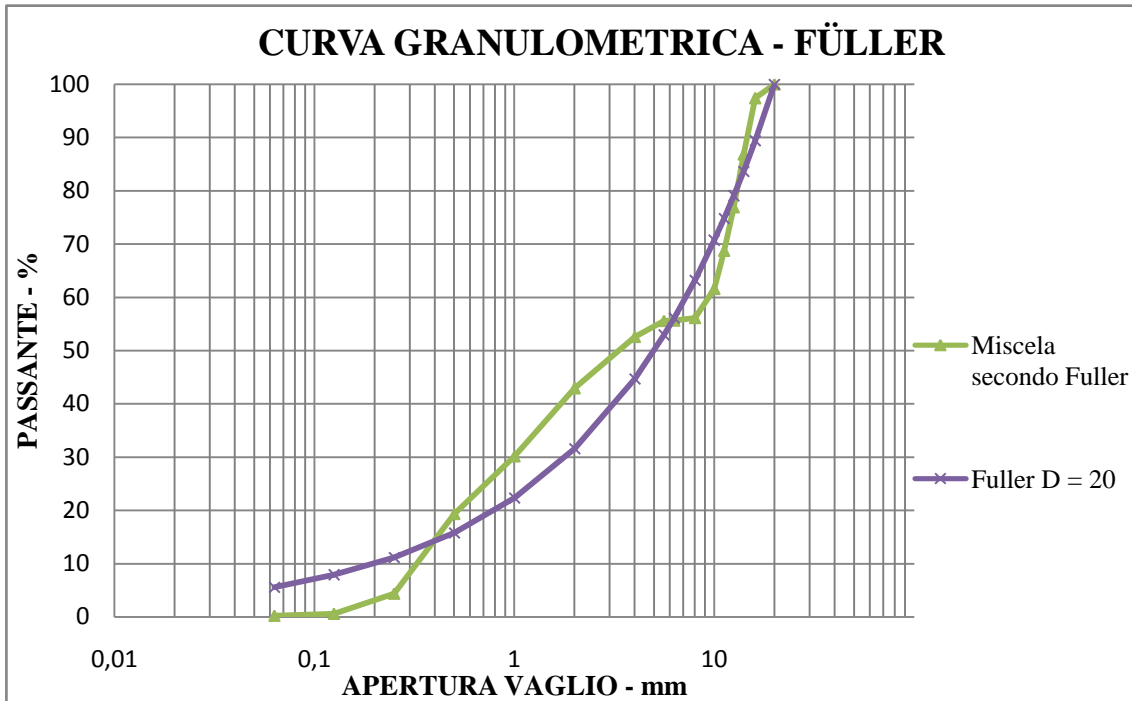


Figura 52: Curva granulometrica con eqm minimo secondo Füller.

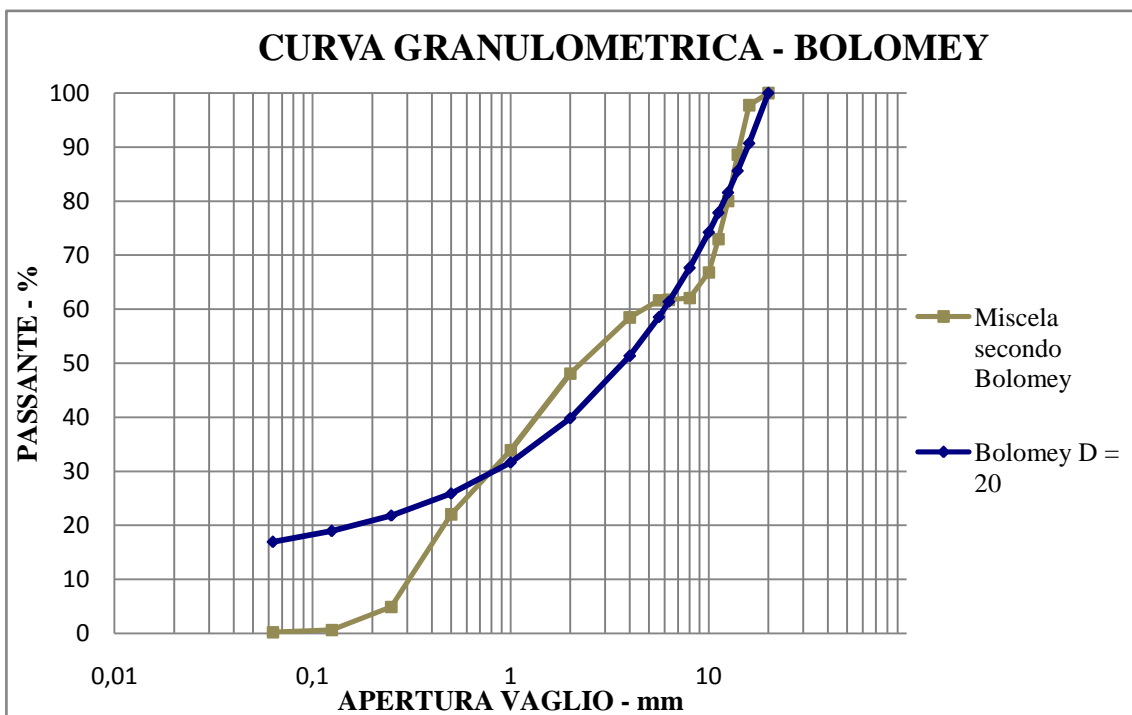


Figura 53: Curva granulometrica con eqm minimo secondo Bolomey.

Quest'ultimo ci fornisce l'eqm più piccolo, pari a 38, come rappresentato in Figura 40: l'elaborazione in Matlab ha individuato, al variare di Ghiaietto, Sabbia e Sabbia Pò ,

l'errore quadratico medio minimo secondo il criterio di Fuller; la combinazione delle frazioni che ci fornisce l'eqm minimo è rappresentata dalla stella rossa. Questa distribuzione ha l'effetto di portare al volume minimo dei vuoti fra le particelle, quindi alla massima densità, rendendo minima la richiesta di pasta cementizia. Purtroppo la condizione di massima densità non corrisponde a quella di massima scorrevolezza delle particelle, quindi non garantisce la massima lavorabilità del calcestruzzo fresco. Per ottenere un compromesso ottimale fra le varie esigenze si è provveduto a modificare la distribuzione granulometrica ottenuta con il criterio di Fuller per favorire una migliore lavorabilità. A questo scopo è stato necessario modificare la frazione di aggregato fine e di aggregato grosso. La Sabbia utilizzata presenta un Modulo di finezza pari a 3.52 che risulta essere molto alto e denota una carenza di frazione fini ed in particolare di passante ai setacci con aperture di 0.3 mm e 0.15 mm. Le normative americane (A.S.T.M.) suggeriscono per la sabbia un passante dal 10 al 30% al setaccio da 0.3 mm e un passante dal 2 al 10% al setaccio da 0.15 mm. E' stato quindi integrato l'aggregato fine con la Sabbia Pò, che presenta un Modulo di finezza pari 1.97 e ha quindi un maggior contenuto di fini.

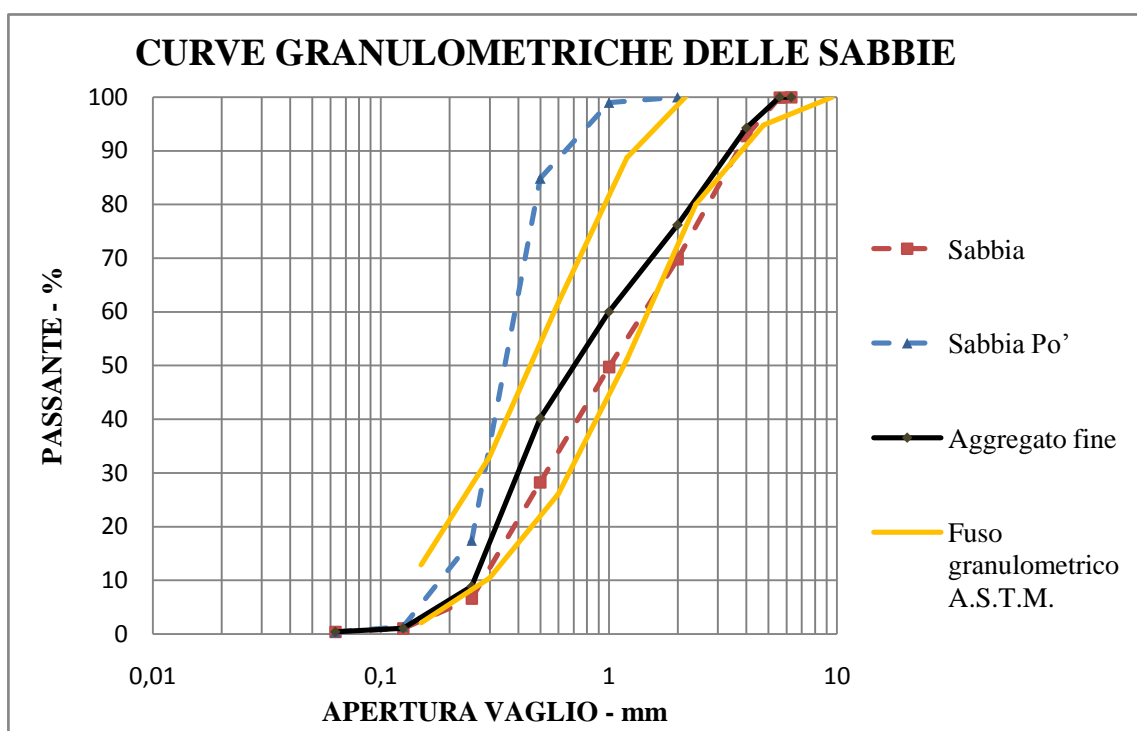


Figura 54: Distribuzione granulometrica della sabbia secondo l'A.S.T.M.

Nella Figura 54 sono mostrate le curve granulometriche degli aggregati fini e in giallo le distribuzioni granulometriche che delimitano il fuso all'interno del quale deve trovarsi la curva della sabbia secondo l'A.S.T.M. (C 33-71 a). La sabbia utilizzata nella miscela

2, rappresentata dalla curva nera, è costituita per il 79% di Sabbia e per il 21% di Sabbia Pò, con una distribuzione granulometrica che presenta un passante del 18% al setaccio da 0.3 mm e un passante del 5% al setaccio da 0.15 mm che permette di rientrare nel fuso granulometrico di riferimento. Questa distribuzione granulometrica, che è più ricca di particelle con diametro inferiore a 0.3 mm, comporta un leggero miglioramento della lavorabilità senza un necessario incremento dell'acqua d'impasto. Infatti, secondo i risultati sperimentali di Murdock (22), questa frazione d'inerte influenza la lavorabilità poiché agisce da lubrificante per gli inerti più grossi ed è indispensabile all'ottenimento di un impasto lavorabile. La frazione di aggregato grosso è stata modificata rispetto a quella ottenuta con il criterio di Füller per ridurre la superficie specifica degli aggregati, l'area superficiale riferita all'unità di volume. Con l'aumento del rapporto aggregato grosso/aggregato fine diminuisce la superficie specifica dell'aggregato, e di conseguenza si riduce il fabbisogno di acqua per bagnare la superficie degli inerti. A parità di acqua impiegata, la diminuzione di richiesta d'acqua risulta in una maggiore lavorabilità dell'impasto. Come illustrato in Tabella 11 la frazione di Ghiaietto è stata incrementata dell'8.7% rispetto alla distribuzione ideale secondo Füller, mentre la frazione fine è stata ridotta da 55.5% a 46.8%: di cui il 42.3% è sabbia e il 5.2% è Granulato di gomma. Come detto sopra, la sabbia utilizzata è composta per il 79% di Sabbia e per 21% di Sabbia Pò, per cui le frazioni rispetto al totale degli aggregati sono: 33.4% di Sabbia e 8.9% di Sabbia Pò. Questa distribuzione granulometrica è stata utilizzata per confezionare la Miscela 2 perché rappresenta un buon compromesso tra la condizione di massima densità dell'aggregato, dato che l'eqm pari a 58 è molto vicino a quello ideale, e la condizione di massima scorrevolezza delle particelle, necessaria per una buona lavorabilità del calcestruzzo.

Tabella 11: Distribuzione granulometrica degli aggregati della Miscela 2.

Componenti (s.s.a.)	% in peso
Ghiaietto	53.2
Sabbia	32.9
Sabbia Pò	8.6
PFU	5.3
EQM	75
MF	5.22

L'eqm della Miscela 2 è evidenziato in Figura 40 con una stella gialla, mentre quello ideale secondo Füller è indicato con la stella rossa. Una volta stabilita la percentuale delle frazioni di Ghiaietto, Sabbia e Sabbia Pò, si è proceduto al calcolo del volume

complessivo degli inerti come fatto per la miscela 1. Per una resistenza caratteristica a compressione di 55 N/mm^2 si ricava che il rapporto acqua cemento deve essere pari a 0.486 per il cemento Portland II AL 45.5R. In base poi al diametro massimo dell'aggregato $D_{\max}=20 \text{ mm}$ è necessario utilizzare una quantità d'acqua per m^3 d'impasto pari 225 litri per ottenere una consistenza del calcestruzzo di tipo superfluido. Anche per la miscela 2 è stato utilizzato un additivo superfluidificante poliacrilico, tipo Axim Creative LX, nella quantità dello 0.8% rispetto al peso di cemento, che ha permesso la riduzione della quantità di acqua del 21%, e quindi migliori caratteristiche di resistenza, mantenendo una consistenza superfluida.

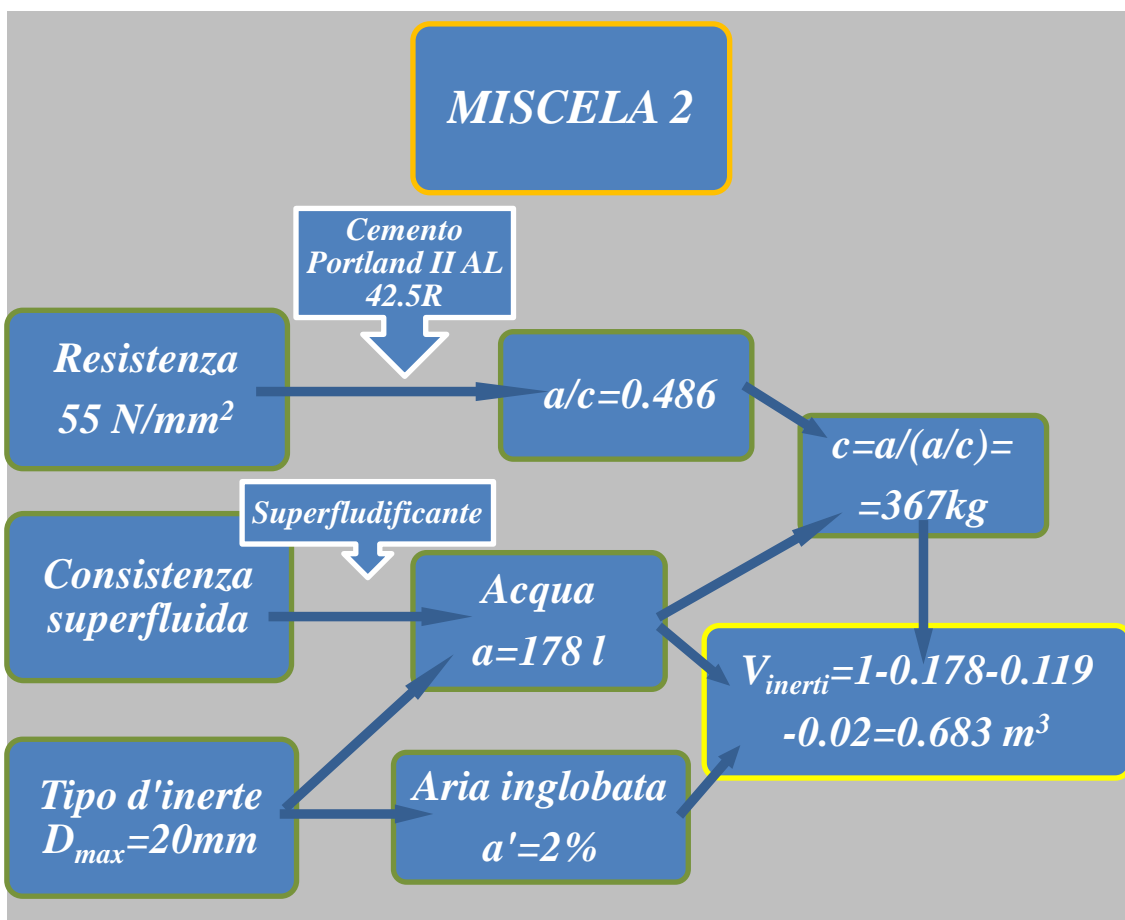


Figura 55: Mix-design della Miscela 2.

La quantità di acqua per m^3 necessaria per ottenere una consistenza superfluida è 178 litri. Da questi dati è possibile ricavare la quantità di cemento per m^3 di impasto, pari a 367 kg. La percentuale di aria inglobata è pari al 2% per un aggregato con D_{\max} di 20 mm. Quindi otteniamo il volume degli inerti necessari per confezionare un metro cubo d'impasto:

$$V_{inerte} = 1 - V_{acqua} - V_{cemento} - V_{aria} =$$

$$= 1 - 0.178m^3 - \frac{367kg}{3080 \frac{kg}{m^3}} - 0.02m^3 = 0.683m^3$$

Anche per la Miscela 2, una volta noto il volume d'inerte necessario per confezionare un metro cubo di calcestruzzo, è stata calcolata la quantità dei singoli inerti per metro cubo (Tabella 12).

Tabella 12: Calcolo delle frazioni d'inerte per confezionare il calcestruzzo.

Componenti (s.s.a.)	% in peso	% in volume	Volume (m³) d'inerte per m³ d'impasto	kg d'inerte per m³ d'impasto
Ghiaietto	53.2	50.0	0.338	885.00
Sabbia	32.9	31.0	0.209	548.70
Sabbia Pò	8.6	9.0	0.054	143.22
PFU	5.3	11.0	0.074	87.69

L'umidità degli inerti è stata valutata prima di procedere alla miscelazione dell'impasto per verificare se l'acqua assorbita dai granuli vada a modificare la quantità d'acqua della miscela. Nella Tabella 13 viene indicata l'umidità reale degli aggregati, da cui si ricava che l'acqua in eccesso in questo caso è 40 litri per metro cubo d'impasto.

Tabella 13: Calcolo dell'acqua in eccesso per l'umidità dell'inerte.

Componenti (s.s.a.)	Peso per m³ d'impasto	Assorbimento aggregati %	Umidità assoluta %	Umidità reale %	Acqua in eccesso litri
Ghiaietto	885.00	1.3	2.3	1.0	8.85
Sabbia	548.70	1.5	5.3	3.8	20.85
Sabbia Pò	143.22	1.6	8.0	6.4	9.17
PFU	87.69	0	0	0	0
Tot					40.335

Nel confezionamento della Miscela 2 si tiene conto dell'umidità degli inerti durante il dosaggio, aggiungendo al peso degli aggregati a s.s.a., il peso dell'acqua in eccesso contenuta dai singoli aggregati: il dosaggio del ghiaietto sarà 893.85 kg/m³, ottenuto dalla somma del peso a superficie satura asciutta 885.00 kg/m³ e dell'acqua in eccesso contenuta dallo stesso ghiaietto 8.85 kg/m³. Allo stesso modo si procede per le sabbie, i cui dosaggi corretti sono elencati nella Tabella 14 insieme alle quantità dei restanti componenti effettivamente introdotti nella betoniera per la miscelazione dell'impasto.

Tabella 14: Proporzionamento dei componenti per la Miscela 2.

MISCELA 2		
Componenti	kg/m³	Pesata di laboratorio - kg
Ghiaietto	893.85	44.69
Sabbia	569.55	28.48
Sabbia Pò	152.39	7.62
PFU	87.69	4.38
Cemento	367	18.25
Additivo	2.9	0.146
Acqua	138	6.96

Nella Figura 56 si può osservare il calcestruzzo subito dopo la prova al cono di Abrams, che ha evidenziato un abbassamento di 215 mm, caratteristico di un calcestruzzo superfluido. Quindi sono stati confezionati i provini per effettuare le prove su calcestruzzo indurito: 11 cubetti, con lato 15 cm, e 2 cilindri, con diametro 15 cm e altezza 30 cm.



Figura 56: Prova di abbassamento al cono di Abrams per la Miscela 2.

4.3.3 Le prove in laboratorio

Dopo 28 giorni di maturazione i provini possono essere sottoposti alla prova di assorbimento d'acqua: sono stati testati 2 provini per miscela per valutare la porosità dei diversi conglomerati. I provini cubici sono stati messi in una bacinella e immersi in acqua in modo da non bagnare la faccia superiore del cubo (Figura 57). Dopo tre ore i cubetti sono stati immersi completamente in acqua e mantenuti in tale condizione per tre giorni fino ad ottenere una completa saturazione. Trascorso questo tempo i provini sono stati pesati in modo da misurare la massa umida m_u . Per determinare l'assorbimento d'acqua dobbiamo conoscere la massa secca dei provini: a tale scopo sono stati sottoposti a un trattamento di essiccamento. I cubetti sono stati inseriti all'interno di una stufa a 110°C per un tempo sufficiente a stabilizzarne il peso. Una volta raggiunto un peso costante, poiché tutta l'acqua è evaporata, i provini sono stati pesati per l'ultima volta in modo da ottenere la massa secca m_s .

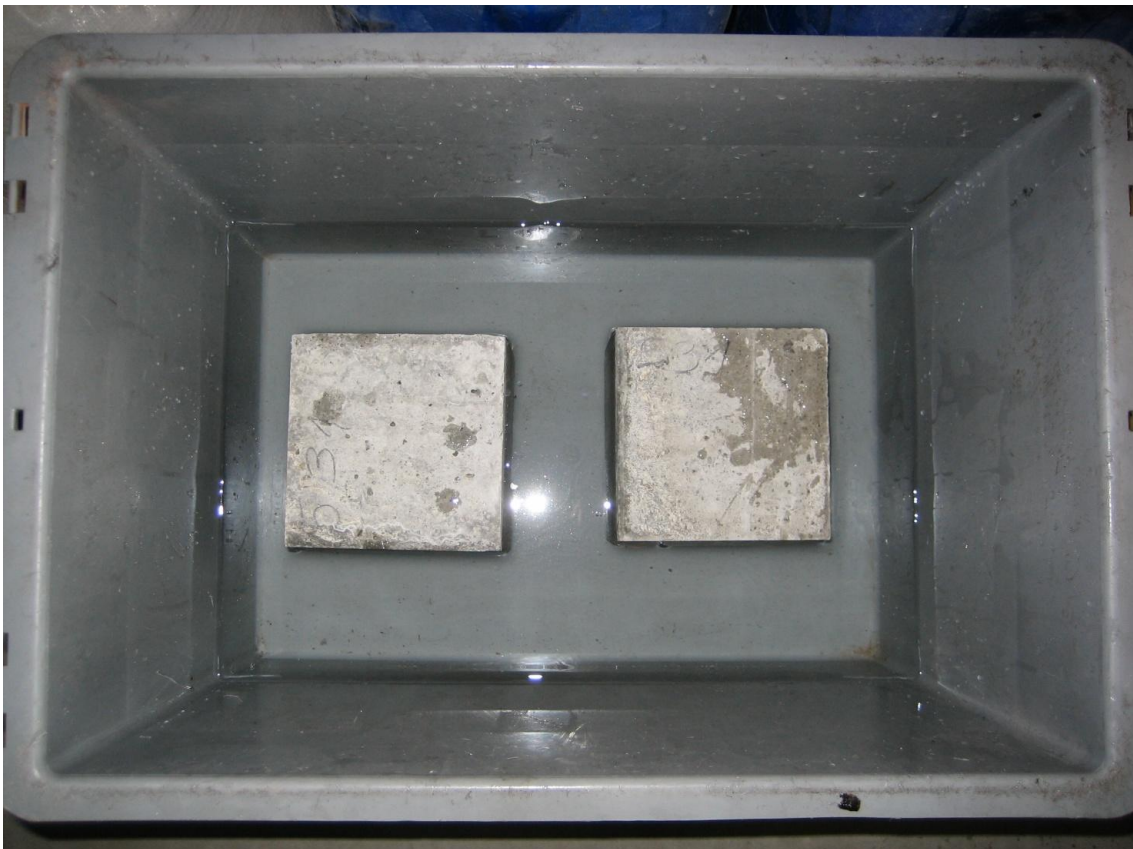


Figura 57: Immersione dei provini in acqua per ottenerne la saturazione.

I dati sono stati inseriti nella Tabella 15 sottostante insieme all'assorbimento d'acqua calcolato secondo la formula:

$$AA\% = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100$$

Tabella 15: Risultati della prova di assorbimento d'acqua.

PROVA DI ASSORBIMENTO D'ACQUA				
	m_u	m_s	AA	P
	grammi	grammi	%	kg/m ³
Miscela 1-a	7229	6735	7.334818	1995.6
Miscela 1-b	7306	6817	7.173243	2019.9
Miscela 2-a	7269	6765	7.450111	2004.4
Miscela 2-b	7083	6571	7.791813	1947.0

Secondo la classificazione UNI EN 206-1:2006 il calcestruzzo indurito può essere definito come: calcestruzzo leggero quando ha una massa volumica ρ , dopo l'essiccamento in stufa, compresa tra 300 kg/m³ e 2000 kg/m³, calcestruzzo ordinario se ha una massa volumica compresa tra 2000 kg/m³ e 2600 kg/m³ o calcestruzzo pesante se la sua massa volumica è superiore a 2600 kg/m³. Le due miscele presentano una densità intermedia tra quella di un calcestruzzo leggero e quella di un calcestruzzo ordinario. I provini cubici confezionati con le due miscele sono stati sottoposti alla prova di resistenza a compressione monoassiale a 3, 7 e 28 giorni. I valori di resistenza sono riportati in Tabella 16:

Tabella 16: Resistenza a compressione monoassiale dei provini confezionati con le due miscele.

Giorni	Miscela 1		Miscela 2	
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
3	15.11	15.19	14.44	14.97
7	18.57	19.68	19.46	19.02
28	20.88	20.48	21.37	22.97

Dai valori di resistenza si osserva che la Miscela 1 ha inizialmente un miglior comportamento meccanico, ma già dopo 7 giorni di maturazione la Miscela 2 sviluppa un comportamento meccanico leggermente superiore. La prova a 28 giorni conferma che la resistenza meccanica risulta maggiore nella seconda miscela rispetto alla prima. Dai dati raccolti finora è possibile operare una scelta per stabilire quale delle due miscele sopra descritte sia idonea ad essere gettata in opera. Oltre che dal punto di vista meccanico, le miscele sono state valutate dal punto di vista della lavorabilità ed entrambe hanno fornito un comportamento soddisfacente, corrispondente ad una

consistenza superfluida. Ma accanto alla fluidità si è osservato, nel caso della Miscela 1, una scarsa coesione e plasticità, come si nota nello Slump test di Figura 49, che denota un impasto eterogeneo con leggera segregazione degli aggregati. Occorre considerare che per i calcestruzzi additivati con superfluidificante risulta elevato il rischio di segregazione e di bleeding, con conseguente sedimentazione degli aggregati grossi. Ciò provoca una variazione delle proprietà, dalla resistenza meccanica al modulo elastico, passando dalle zone inferiori a quelle superiori di una struttura a causa dell'eterogeneità del conglomerato. La Miscela 2 presenta, invece, una buona coesione e plasticità, proprietà che indicano buona resistenza alla segregazione (Figura 56). Infine tale miscela è da preferirsi alla prima, oltre che per la resistenza e l'omogeneità, anche per evitare che aggregati con $D_{max} = 32$ mm possano andare a disturbare i sensori estensimetrici annegati nel getto di calcestruzzo. La Miscela 2 risulta la più adatta per realizzare la sovrastruttura stradale, ed essere quindi confrontata con una miscela di riferimento in calcestruzzo ordinario, costituito con le stesse quantità e tipi di componenti, ma senza Granulato di gomma in sostituzione della sabbia. Eseguiamo nel paragrafo seguente il mix-design della Miscela 3 per il calcestruzzo di riferimento.

4.3.4 Miscela 3

La Miscela 3 è un calcestruzzo ordinario che ha la funzione di confronto con il calcestruzzo additivato con Granulato di gomma: la distribuzione granulometrica degli aggregati è circa la stessa di quella utilizzata per la Miscela 2, senza Granulato di gomma. La distribuzione granulometrica utilizzata è quella raffigurata in Figura 58 secondo le percentuali indicate in Tabella 17.

Tabella 17: Distribuzione granulometrica degli aggregati della Miscela 3.

Componenti (s.s.a.)	% in peso
Ghiaietto	51.9
Sabbia	40.9
Sabbia Pò	7.1
EQM (Füller)	66
MF	5.19

Anche in questo caso si è proceduto al mix-design della miscela, ma considerando che il calcestruzzo ordinario presenta resistenza a compressione molto superiore al

calcestruzzo con PFU, si è preferito ridurre sensibilmente la quantità di cemento in modo da evitare il sovradimensionamento e ridurre i costi. Per una resistenza caratteristica a compressione di 45 N/mm^2 , si ricava dalla Figura 37 che il rapporto acqua cemento deve essere pari a 0.525 per il cemento Portland tipo II AL 45.5R. In base poi al diametro massimo dell'aggregato $D_{\max}=20 \text{ mm}$ è necessario utilizzare una quantità d'acqua per m^3 d'impasto pari 225 litri per ottenere una consistenza del calcestruzzo di tipo superfluido (Tabella 4). Anche qui è stato usato un superfluidificante per garantire una buona resistenza meccanica ed evitare fenomeni di bleeding o segregazione, utilizzando l'additivo superfluidificante poliacrilico, in quantità dello 0.65% rispetto al peso di cemento, che fornisce al calcestruzzo una consistenza superfluida con una riduzione di acqua del 16%. La quantità di acqua per metro cubo utilizzata è quindi 189 litri.

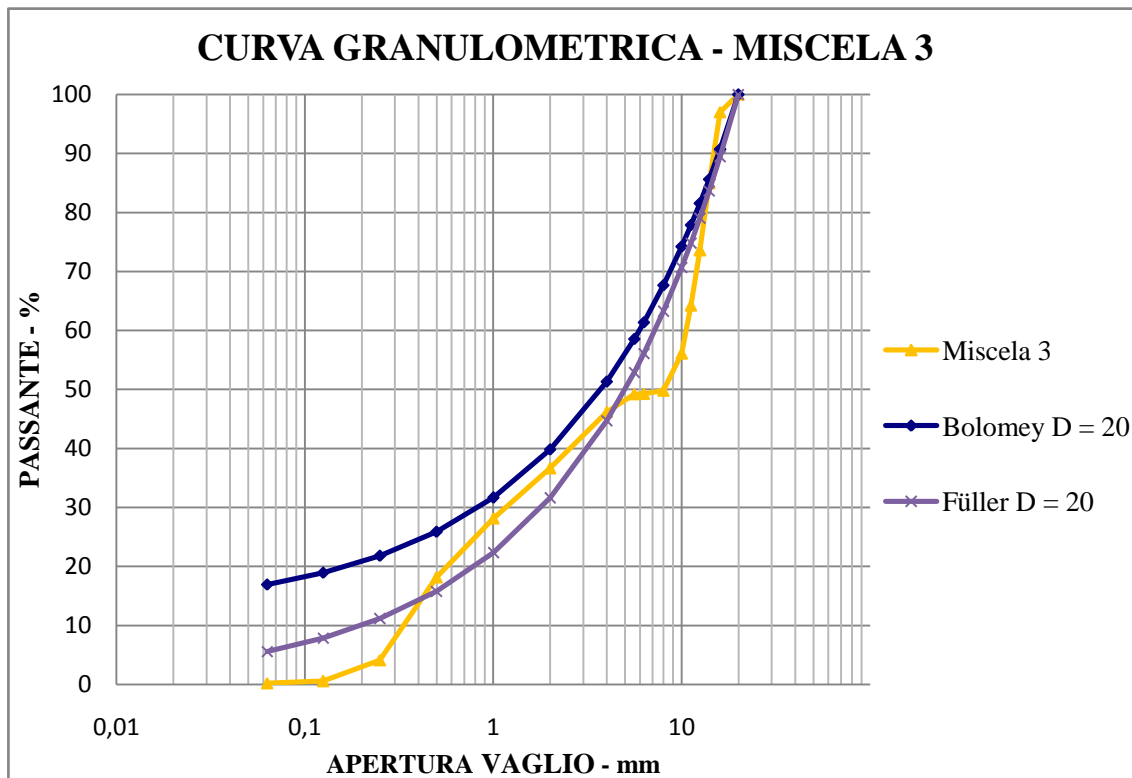


Figura 58: Curva granulometrica della Miscela 3.

Da questi dati è possibile ricavare la quantità di cemento per metro cubo d'impasto, pari a 360 kg. La Tabella 5 ci fornisce la percentuale di aria inglobata, che nel nostro caso è pari a 2% per un aggregato con D_{\max} di 20 mm.

Quindi otteniamo il volume degli inerti necessari per confezionare un metro cubo d'impasto:

$$V_{inerte} = 1 - V_{acqua} - V_{cemento} - V_{aria} =$$

$$= 1 - 0.189m^3 - \frac{360kg}{3080 \frac{kg}{m^3}} - 0.02m^3 = 0.674m^3$$

Nella Figura 59 è schematizzato il procedimento di mix-design per la Miscela 3.

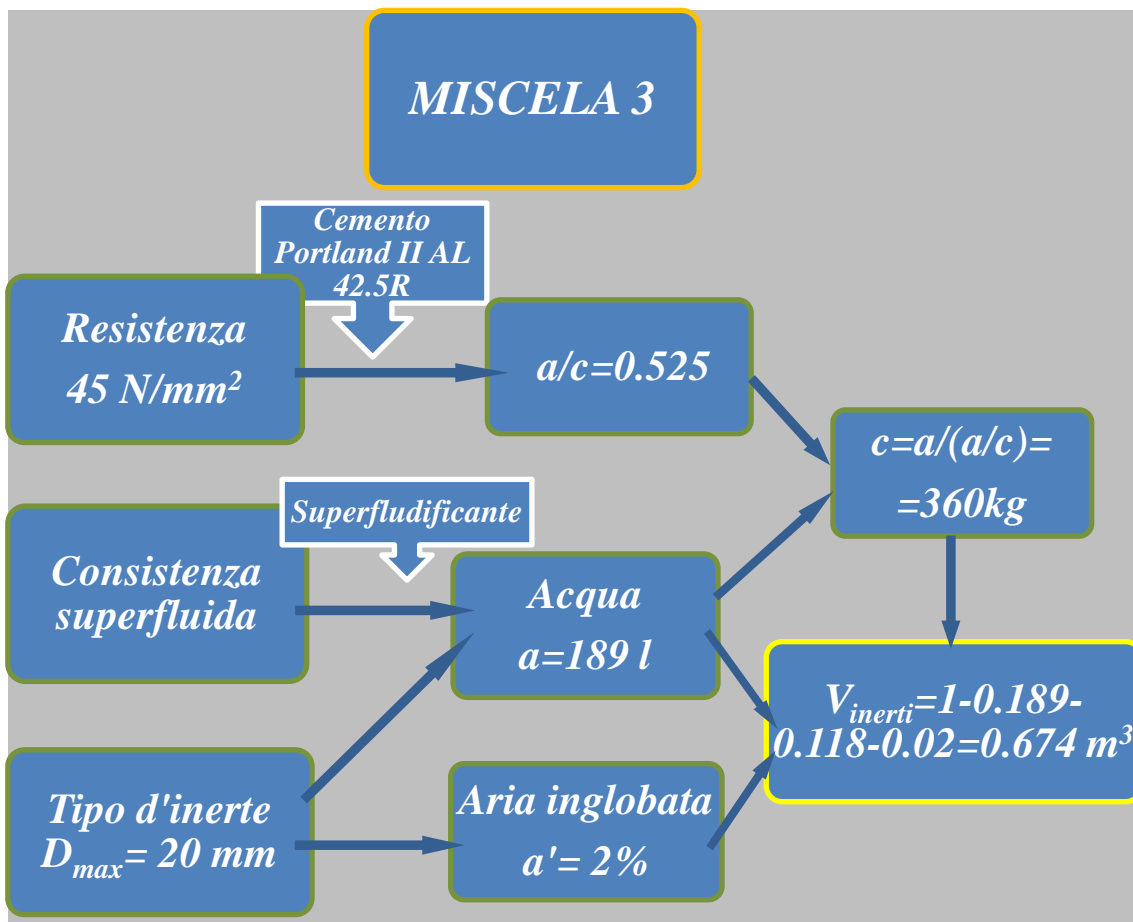


Figura 59: Mix-design della Miscela 3.

Dal volume d'inerte necessario per confezionare un metro cubo di calcestruzzo è stato calcolato la quantità dei singoli inerti per metro cubo (**Errore. L'autoriferimento non è valido per un segnalibro.**). Nel confezionamento della miscela si dovrà tenere conto dell'umidità degli inerti durante il dosaggio, aggiungendo al peso degli aggregati a s.s.a., il peso dell'acqua in eccesso contenuta nei singoli aggregati. L'acqua in eccesso

in questo caso è 59.3 litri per metro cubo d'impasto, quindi durante la miscelazione si aggiungerà nell'impasto solo 129.7 litri.

Tabella 18: Calcolo dell'acqua in eccesso per metro cubo d'impasto.

Componenti	Peso per m³ d'impasto	Assorbimento aggregati %	Umidità assoluta %	Umidità reale %	Acqua in eccesso litri
Ghiaietto	919.00	0	4.9	4.9	35.52
Sabbia	725.00	0	1.5	1.5	13.78
Sabbia Pò	125.00	0	8.0	8.0	10
Tot					59.3

In Tabella 19 sono indicate le quantità delle componenti utilizzate per confezionare il calcestruzzo. La prova al cono di Abrams ha evidenziato un abbassamento di 220 mm, corrispondente ad una consistenza superfluida.

Tabella 19: Proporzionamento dei componenti per la Miscela 3.

MISCELA 3		
Componenti	kg/m³	Pesata di laboratorio - kg
Ghiaietto	932.78	46.64
Sabbia	760.52	38.03
Sabbia Pò	135.00	6.75
Cemento	360	18
Additivo	2.34	0.117
Acqua	129.7	6.48

4.4 Il confronto tra le miscele

La miscela 2 si differenzia dalla miscela 3 praticamente solo per la sostituzione del 20% di sabbia con PFU. Vediamo quanto la variazione di aggregato fine influisce sulla resistenza meccanica del calcestruzzo. Le miscele che saranno utilizzate nella pavimentazione sono state sottoposte a prove di compressione per definire la resistenza meccanica. La Miscela 2 testata ha evidenziato una tensione a rottura $\sigma_{\max}=20.10$ MPa, mentre la Miscela 3 mostra tensione a rottura $\sigma_{\max}=46.65$ MPa. Dalla prova di compressione monoassiale ciclica si è potuto valutare il comportamento deformativo delle miscele sottoposte a diversi cicli di carico-scarico. Il diagramma sforzo-deformazione ricavato da tale prova è stato rappresentato in Figura 60. Si osserva una

maggior pendenza dei rami di scarico nel calcestruzzo ordinario (miscela 3) rispetto a quello additivato con PFU (Miscela 2). Dalla pendenza dei rami di scarico si ricava il modulo elastico tangente, che risulta maggiore nel calcestruzzo ordinario ($E_t=18070$ MPa) rispetto al calcestruzzo additivato con PFU ($E_t=5001$ MPa). Questi valori sono in linea con le sperimentazioni svolte da Gaetti (13).

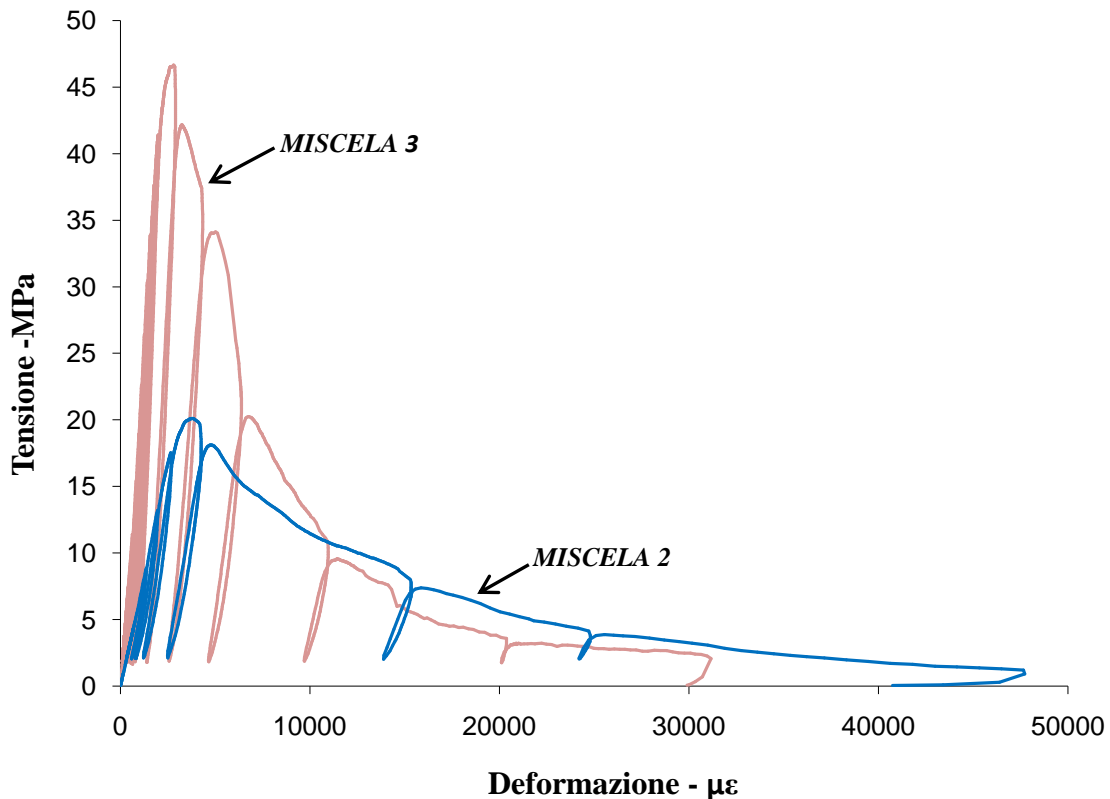


Figura 60: Andamento sforzo-deformazione della prova di compressione monoassiale.

Come detto nel *paragrafo 2.6*, la parziale sostituzione della sabbia con PFU nella Miscela 2 da un lato provoca una marcata riduzione della resistenza a compressione, dall'altro produce un aumento delle deformazioni elastiche, che vengono recuperate allo scarico. Questo conferisce al calcestruzzo un migliore comportamento rispetto alle sollecitazioni a fatica.

Si vuole ora confrontare il comportamento delle due miscele a trazione. Per fare questo è stato scelto di stimare la trazione σ_t dalla resistenza a compressione σ_c secondo il metodo empirico di Price. Egli ha ricostruito sperimentalmente l'andamento del rapporto σ_t / σ_c in funzione della σ_c del calcestruzzo (vedi Figura 61). Dalla resistenza a compressione della Miscela 2, $\sigma_{max}=20.10$ MPa=168.6 kg/cm², si ricava che il rapporto σ_t / σ_c vale 0.098, da cui si stima una tensione a rottura $\sigma_t=1.97$ MPa. Allo stesso modo per la Miscela 3 dalla $\sigma_{max}=46.65$ MPa=475.4 kg/cm² si ricava un rapporto σ_t / σ_c

=0.077 come indicato in figura (freccia rossa) e quindi si stima la trazione di rottura $\sigma_t=3.59\text{MPa}$.

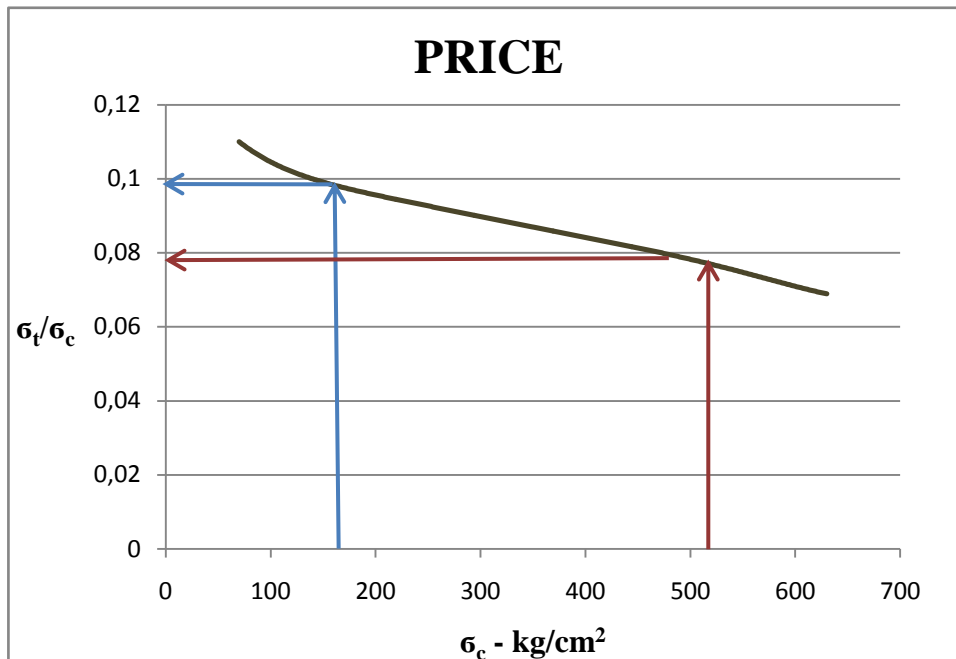


Figura 61: Metodo empirico di Price per la stima della trazione dalla resistenza a compressione.

Utilizzando il rapporto empirico σ_t / σ_c si è ricostruito anche l'andamento sforzo-deformazione per trazione dai grafici ottenuti dalle prove cicliche di compressione (Figura 62).

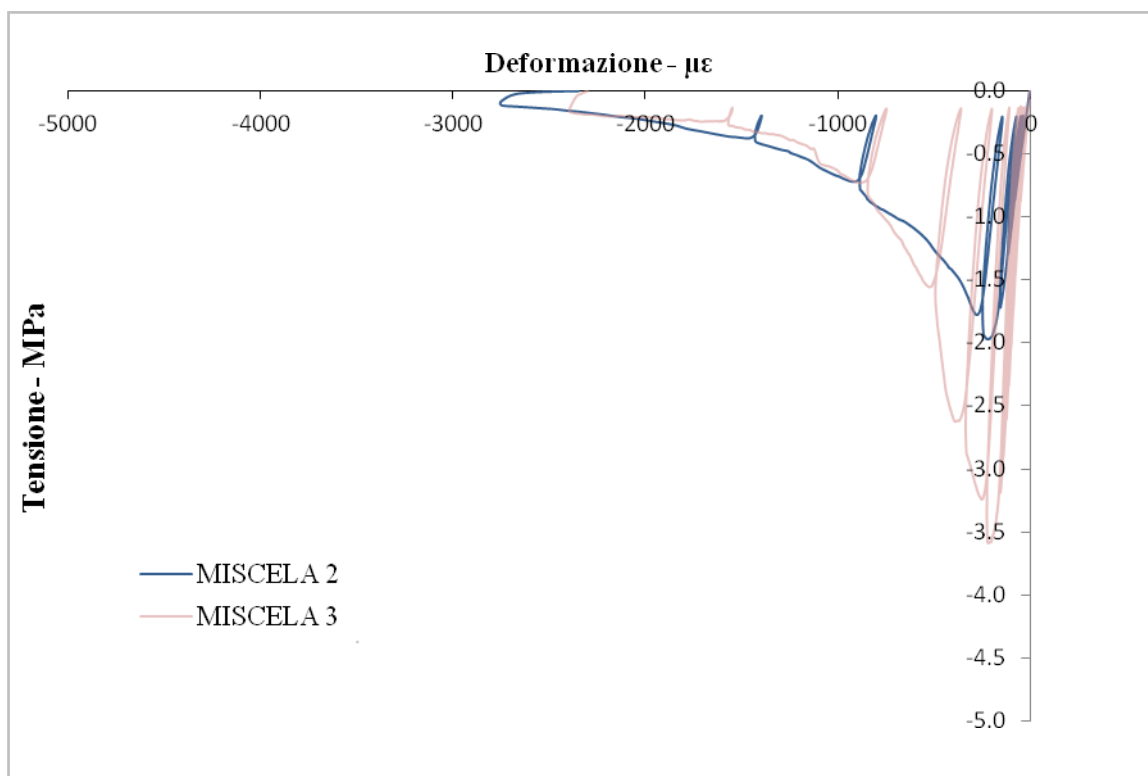


Figura 62: Andamento sforzo-deformazione per trazione.

4.4.1 I costi delle miscele

Oltre a condizionare il comportamento meccanico del calcestruzzo, la composizione della miscela ha delle conseguenze anche sul prezzo del calcestruzzo. In particolare si sottolinea che il granulato di gomma incide non poco sul costo finale della miscela, anche se è presumibile che il prezzo potrà scendere in futuro con la crescita del mercato di PFU dovuta alla maggiore quantità di materia prima inviata al riciclo e ad un abbattimento dei costi nella lavorazione dello stesso con l'introduzione di nuove tecnologie quali il water-jet. Nella Tabella 20 sono indicati i prezzi delle materie prime e i costi finali delle miscele:

- il granulato di gomma PowerFill ECO è stato acquistato dalla ditta Gommamica al prezzo di 150 €/ton, a cui si sommano 50 €/ton per il trasporto;
- gli aggregati utilizzati dalla Livabeton hanno un costo di 14 €/ton;
- il Cemento Portland tipo II AL 42.5R ha un costo di 70 €/ton;
- l'additivo superfluidificante poliacrilico Axim Creative LX ha un costo di 1€/kg.

Nelle ultime due colonne della tabella sono riassunti i costi dei componenti per m³ di calcestruzzo e i costi delle due miscele. Il costo della Miscela 2 è di 68.75 €/m³, leggermente superiore ai 52.30 €/m³ spesi per la Miscela 3.

Tabella 20: Costi dei componenti e delle miscele.

COSTI DELLE MISCELE				
	Materia prima		Miscela 2	Miscela 3
Componenti	€/ton	€/m³	€/m³	€/m³
Ghiaietto	14	36.68	12.51	12.63
Sabbia	14	36.68	7.97	10.30
Sabbia Pò	14	37.10	2.14	1.83
Cemento	70	215.60	25.69	25.20
PFU	200	236	17.54	0
Additivo (€/kg)	1	\	2.90	2.34
TOT	\	\	68.75	52.30

Riteniamo utile fornire un pò di conti sui costi necessari per la realizzazione di una sovrastruttura stradale nella via di rullaggio dell'aeroporto "Guglielmo Marconi". La realizzazione di un tratto di pavimentazione della via di rullaggio lungo 7 m, largo 22.95 m, con uno spessore di 16 cm, richiede 25.7 m³ di calcestruzzo. Utilizzando la Miscela

2 e considerando anche i costi per la preparazione della miscela e il trasporto dalla cementeria al cantiere, si ha un costo per metro cubo di 98.75 € e un costo della sovrastruttura stradale di 2538.27 €, come si legge in Tabella 21. La realizzazione della sovrastruttura stradale con la Miscela 3, ad un costo per metro cubo di 82.30 €, comporta la spesa di 2115.84 €. Se in aggiunta consideriamo uno strato di usura di 4 cm si ottengono i costi finali della pavimentazione indicati nella tabella sottostante. Si osserva che il costo della pavimentazione flessibile per la restante parte della via di rullaggio, considerando per confronto le stesse dimensioni (7m x22.95m x 0.6m), è 2694.58 €, 3637.86 € includendo il costo dello strato di usura (vedi Tabella 22).

Tabella 21: Costo delle pavimentazioni in calcestruzzo.

COSTO DELLE PAVIMENTAZIONI RIGIDE		
	Miscela 2	Miscela 3
	€/m³	€/m³
Costo calcestruzzo	68.75	52.30
Spese generali	15	15
Trasporto	15	15
TOT	98.75	82.30
Sovrastruttura	2538.27	2115.44
Strato usura	943.28	943.28
TOT	3481.55	3058.72

Tabella 22: Costo della pavimentazione flessibile.

COSTO DELLA PAVIMENTAZIONE FLESSIBILE		
Componenti	Materie prime	Pavimentazione
	€/m³	€
Base	108	1607.30
Binder	100	1041.01
Spese generali	1.8	46.27
Sovrastruttura	\	2694.58
Strato usura	145	943.28
TOT	\	3637.86

LA PROGETTAZIONE DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO

5.1 Introduzione

La realizzazione di un tratto di sovrastruttura stradale aeroportuale in calcestruzzo, nell'ambito del piano di riqualifica della via di rullaggio presso l'Aeroporto "Guglielmo Marconi", ha permesso di sperimentare in situ il comportamento delle miscele selezionate in laboratorio. E' stato quindi preparato un sistema di monitoraggio in grado di fornire una caratterizzazione meccanica della sovrastruttura rigida. E', infatti, possibile osservare le differenze di comportamento tra un conglomerato cementizio additivato con PFU e quello di riferimento attraverso un sistema di rilevazione del comportamento deformativo associato allo stato tensionale indotto nel calcestruzzo dal passaggio degli aeromobili, o di veicoli su gomma in generale. Il sistema di monitoraggio si basa sull'osservazione di sensori estensimetrici, in grado di descrivere il comportamento elasto-plastico del calcestruzzo nel quale sono immersi, collegati ad un sistema centrale di acquisizione e monitoraggio, in grado di rilevare e elaborare i dati forniti dagli estensimetri.

5.2 Gli estensimetri

Il passaggio degli aeromobili sulle pavimentazioni stradali produce una deformazione elasto-plastica dipendente dal tipo di carico e dal comportamento meccanico del calcestruzzo. Per studiare tale stato deformativo sono stati utilizzati degli estensimetri da immergere nel getto di calcestruzzo: si tratta di sensori in grado di trasformare una grandezza meccanica, come la deformazione, in un segnale elettrico e di inviarlo ad un sistema di rilevamento. Una volta che il calcestruzzo è indurito, gli estensimetri annegati in esso risultano solidali alla struttura, deformandosi con essa al passaggio

degli aeromobili. La struttura dell'estensimetro è molto semplice: esso è costituito da un supporto in materiale plastico lungo 60 mm in cui sono inseriti tre sottili fili metallici, di cui, uno realizzato in costantana è il filo estensimetrico che serve a misurare la deformazione, mentre gli altri due sono per l'alimentazione o eccitazione dell'estensimetro; la deformazione indotta nel supporto del sensore genera una variazione della lunghezza e della sezione del filo e, di conseguenza, una variazione della resistenza elettrica. Gli estensimetri utilizzati sono prodotti dalla Luchsinger con resistenza elettrica iniziale di 120 Ω.

3-wire system

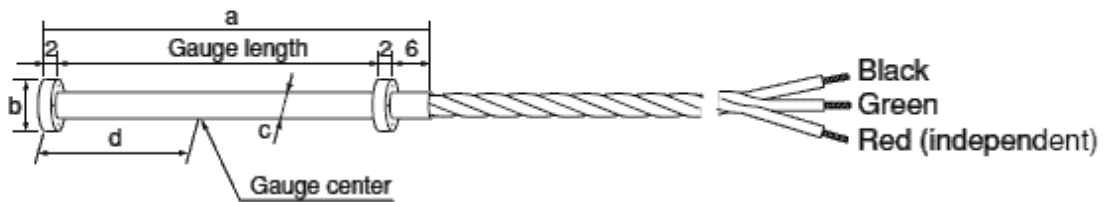


Figura 63: Estensimetro Luchsinger speciale per annegamento nel calcestruzzo.

Tabella 23: Caratteristiche tecniche dell'estensimetro.

Type	Gauge length mm	Gauge width mm	a mm	b mm	c mm	d mm	Resistance (Ω)
PMFL-50-2LT	50	1	60	∅8	∅4	27	120

La sensibilità dell'estensimetro è espressa dal fattore di trasduzione o gauge factor G_f che mette in relazione la deformazione e la variazione di resistenza da essa indotta:

$$G_f = \frac{dR}{R_e \varepsilon}$$

dove dR è la variazione di resistenza, R_e è la resistenza iniziale dell'estensimetro e ε è la deformazione. Nel nostro caso il gauge factor vale 2. Poiché la deformazione da

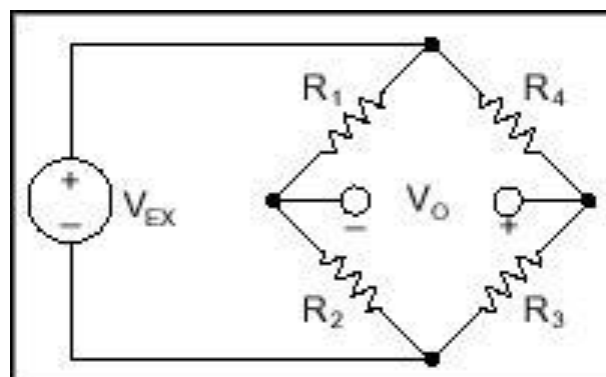


Figura 64: Schema elettrico di un ponte di Wheatstone.

osservare è legata a sforzi che non superano 2 N/mm^2 , è necessario considerare anche le minime variazioni di resistenza, utilizzando gli estensimetri nella configurazione cosiddetta “a ponte” con una sorgente di tensione di eccitazione. In questa configurazione gli estensimetri vengono inseriti all’interno di un ponte di Wheatstone che misura la variazione di resistenza attraverso la tensione di output del ponte V_O . Il dispositivo elettrico rappresentato in Figura 64 si compone di un generatore di tensione che alimenta due rami resistivi posti in parallelo: il primo è composto dai due resistori campione R_1 e R_2 , posti in serie, di resistenza nota; il secondo ramo è invece composto da un resistore campione R_3 in serie alla resistenza incognita R_4 . Alimentando quindi il circuito con una tensione di eccitazione V_{EX} , si osserva una tensione in uscita V_O che vale:

$$V_O = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] \times V_{EX}$$

In questo modo la variazione della resistenza incognita R_4 risulta in una variazione di tensione che può essere misurata. Se l’estensimetro è inserito all’interno del ponte di Whetastone al posto di R_4 possiamo misurarne la variazione di resistenza dalla variazione della tensione di output secondo l’equazione qui sopra. Se inoltre la resistenza nominale dell’estensimetro è impostata come R_G , la resistenza misurata R_4 sarà data dalla somma di R_G e di dR indotto dalla deformazione. Questa configurazione viene definita “a quarto di ponte”. L’equazione della tensione qui sopra può essere riscritta per esprimere V_O/V_{EX} in funzione della deformazione, come si vede in Figura 65, dove in aggiunta compare il termine $1/(1+GF \cdot \epsilon/2)$ che indica l’assenza di linearità dell’output a quarto di ponte rispetto alla deformazione.

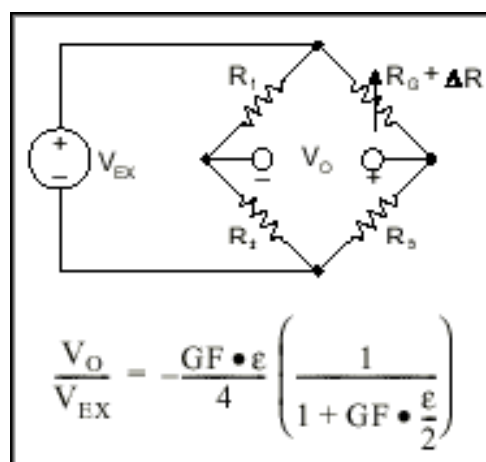


Figura 65: Configurazione a quarto di ponte.

Di conseguenza si ricava la deformazione:

$$\varepsilon = - \frac{4 \times \frac{V_0}{V_{EX}}}{G_f \times \left(2 \times \frac{V_0}{V_{EX}} + 1 \right)}$$

grandezza che ci permette di studiare il comportamento meccanico del calcestruzzo a partire dalla misura della tensione di output.

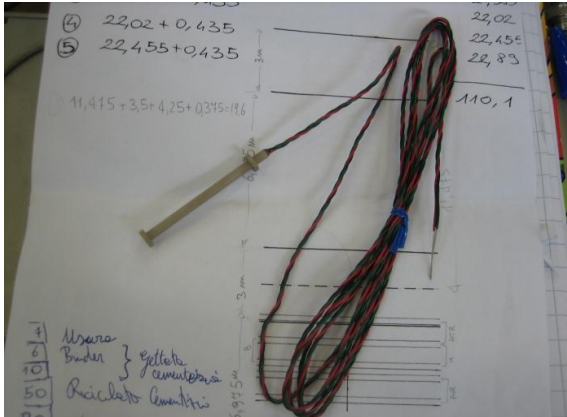


Figura 66: Estensimetro Luchsinger.



Figura 67: Dettaglio dell'estensimetro.

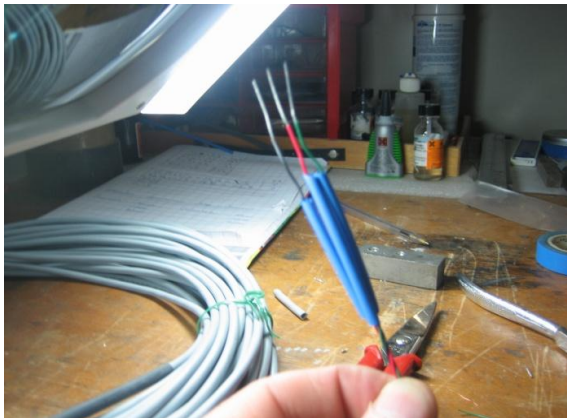


Figura 68: Rivestimento dei fili con guaina.



Figura 69: Rivestimento del cavo con guaina.

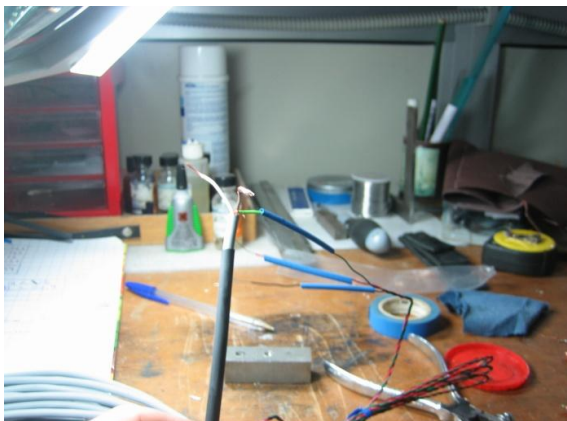


Figura 70: Collegamento dei cavi tramite saldatura.



Figura 71: Estensimetro con prolunga.

Il segnale elettrico degli estensimetri viene inviato ad un sistema di acquisizioni dati posizionato a bordo pista tramite una prolunga costituita da cavo schermato a tre fili della lunghezza di 25 m. Gli estensimetri infatti sono dotati di un cavo lungo 1 metro (Figura 66), che non è sufficiente a raggiungere la stazione di acquisizione, e pertanto è stato utilizzato un cavo di collegamento tramite saldatura. I collegamenti sono stati protetti da una prima guaina termoindurente su ogni filo (Figura 68) e da una seconda guaina termoindurente sul cavo stesso (Figura 69-71) in modo da realizzare una tenuta stagna.

5.3 Il sistema di monitoraggio

Il sistema di monitoraggio è costituito da una centralina della National Instruments del tipo cRIO-9022 che utilizza un processore industriale da 533MHz, con 256 MB di RAM e 2 GB di memoria nel disco rigido per l'installazione di programmi e la memorizzazione dei dati.

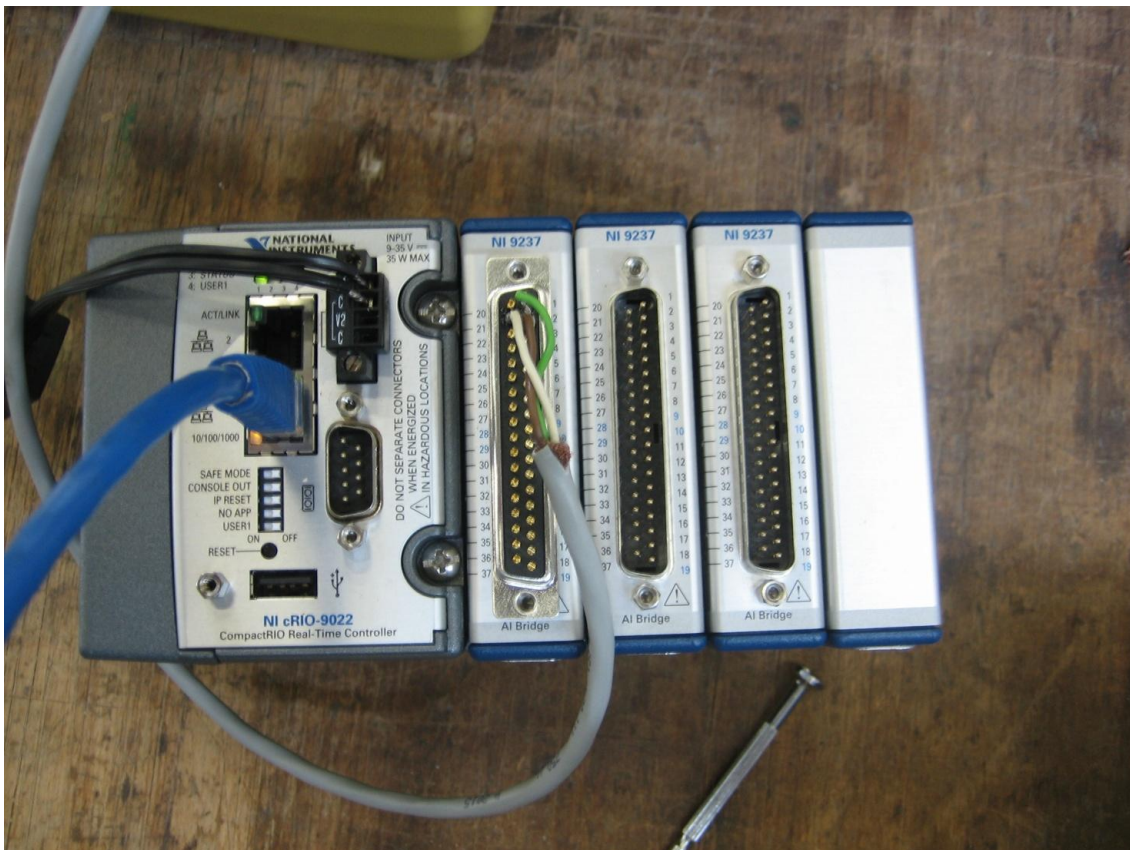


Figura 72: Centralina di acquisizione cRIO-9022.

Poiché essa funziona con un basso consumo energetico, avendo bisogno di una tensione compresa tra 9 e 35 VDC, è stato possibile alimentarla con una comune batteria da 12 V. Il cRIO-9022 permette di collegarsi ad un computer tramite la porta USB o tramite la porta Ethernet. Quest'ultima è stata utilizzata per installare il software LabVIEW Real-Time sulla centralina per il controllo, il data logging e l'analisi dei dati. In questo ambiente di programmazione è possibile gestire i 12 canali di acquisizione dei dati a monitor e salvare i dati raccolti in fogli di calcolo.

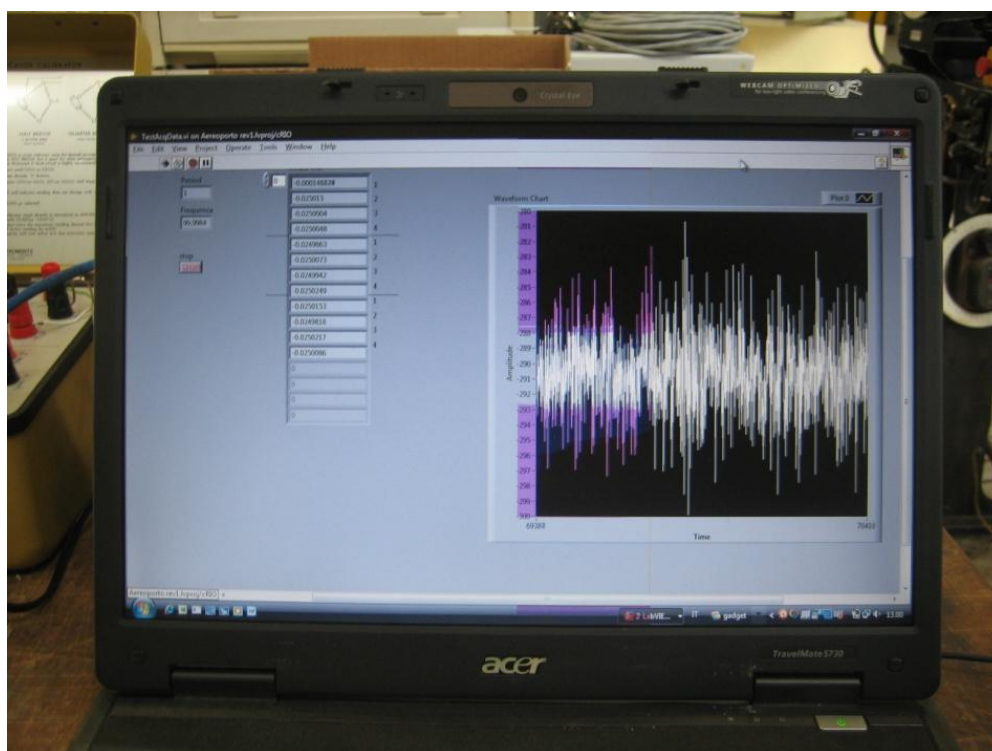


Figura 73: Gestione dei canali di acquisizione in ambiente LabVIEW tramite l'Interfaccia grafico.

La configurazione della centralina a disposizione del Lisg fornisce le opzioni per misurare in configurazione “a mezzo ponte” o “a ponte intero”. Come detto sopra, gli estensimetri possono essere utilizzati solo in un dispositivo elettrico con una configurazione a quarto di ponte. Per ovviare a tale inconveniente è stato necessario realizzare un mezzo ponte esterno con l'introduzione di una resistenza costituita da uno Shunt: questo viene collegato in serie con l'estensimetro in modo da realizzare il secondo ramo del ponte di Wheatstone. Il circuito esterno viene collegato ai canali di acquisizione della centralina tramite il connettore rappresentato in Figura 74: ogni connettore collega 4 estensimetri alla centralina. Per ogni estensimetro si realizzano quindi tre connessioni: due fili (marrone e verde) sono di eccitazione a 2.5 V per l'estensimetro e il terzo è il filo estensimetrico (bianco).

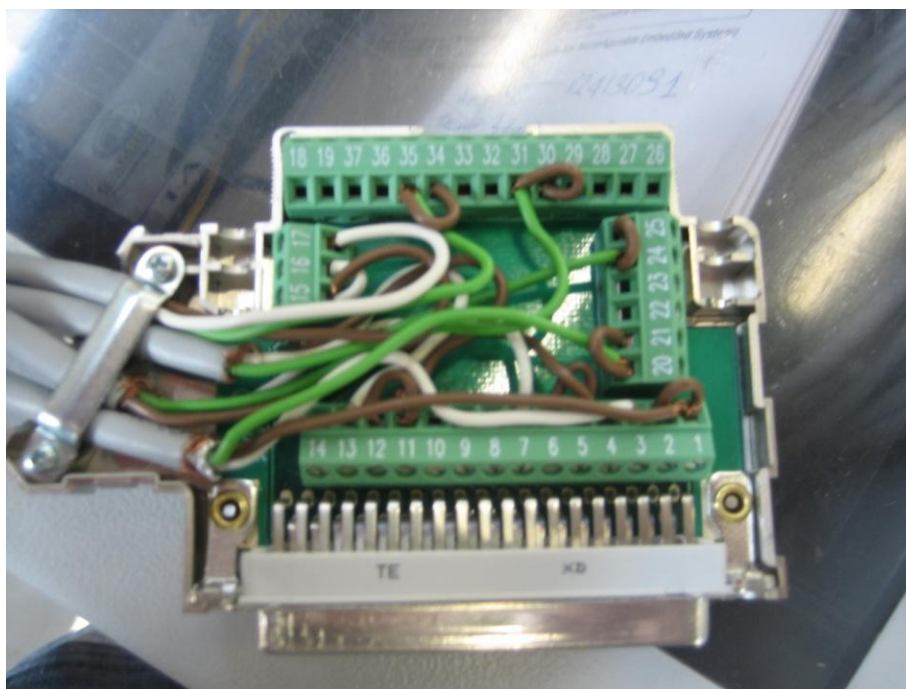


Figura 74: Collegamento degli estensimetri nel connettore: i fili verdi e marroni sono di alimentazione, i fili estensimetrici sono di colore bianco.

5.4 Il posizionamento degli estensimetri

Gli estensimetri devono essere posizionati nei tratti di pavimentazione maggiormente interessati dalle sollecitazioni trasmesse dal traffico aereo. Escludendo i piazzali di sosta, dove i carichi sono applicati praticamente nello stesso punto perché gli aerei vengono accuratamente posizionati per le operazioni di carico e scarico dei passeggeri e delle merci, nelle vie di circolazione e nelle testate delle piste di volo il traffico risulta molto canalizzato e si può ritenere concentrato in una fascia trasversale larga 12 metri. Queste aree sono sollecitate con maggiore frequenza rispetto alla pista di volo, dove il traffico è distribuito su una fascia più ampia, larga circa 20 metri. Nella Figura 75 sono rappresentate le curve di distribuzione delle frequenze con cui varia la posizione dell'aereo rispetto all'asse della pista elaborate negli USA. Si note come nella pista di rullaggio un traffico canalizzato si concentra per il 75% in una striscia centrale di 2.5 metri, mentre nella pista di volo il traffico non è canalizzato e il 75% dei movimenti copre una fascia di 12 metri. Secondo il Tesoriere le leggi di distribuzione delle frequenze possono approssimarsi a distribuzioni normali con scarto quadratico medio $\delta=0.5-1$ metri per traffico canalizzato e $\delta=3.5-5$ metri per un traffico non canalizzato. La

via di rullaggio rappresenta quindi una zona idonea alla sperimentazione, perché è una zona critica della pavimentazione, in cui il passaggio altamente canalizzato dei veicoli pesanti produce deformazioni significative per compressione.

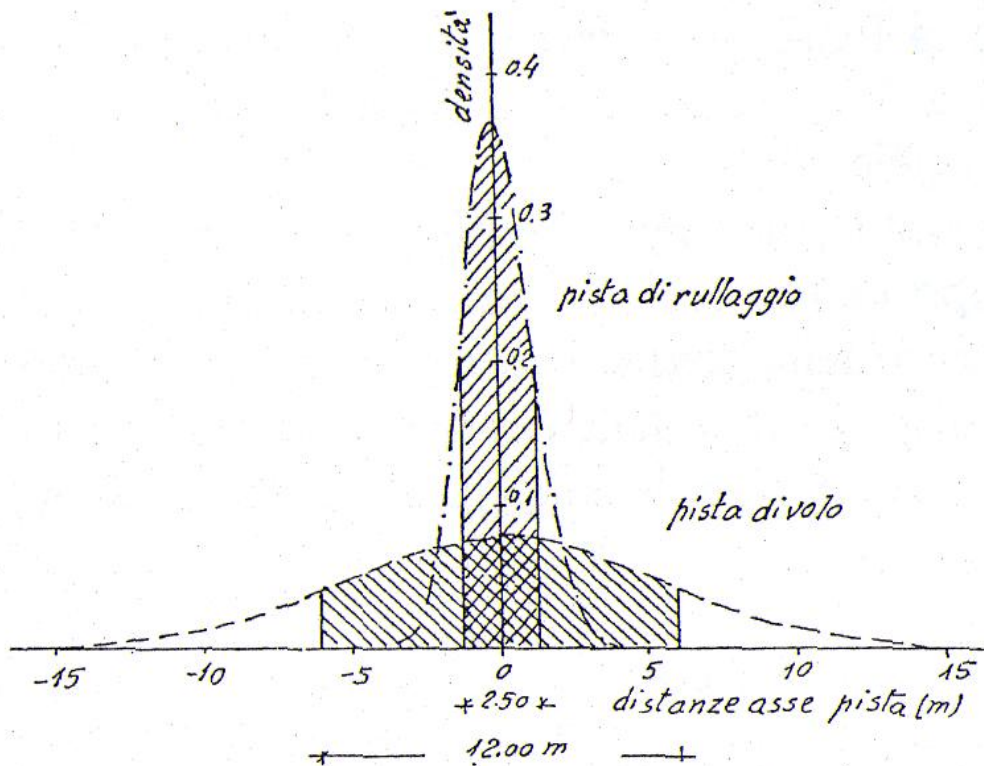


Figura 75: Distribuzione della distanza dell'asse dell'aereo dall'asse della pista.

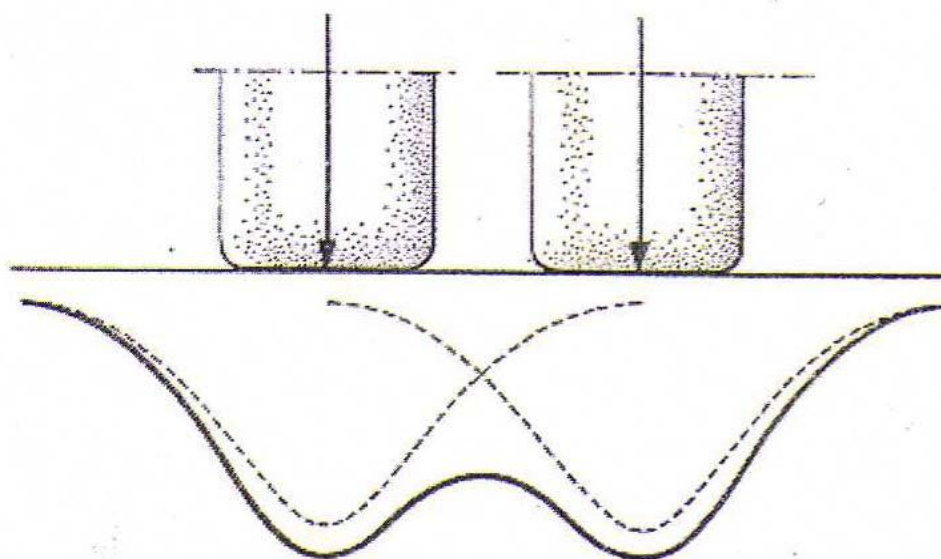


Figura 76: Schema deformativo della pavimentazione per effetto di ruote gemellate (18).

In corrispondenza del passaggio delle ruote il Tesoriere delinea un comportamento deformativo rappresentato in Figura 76: la deformazione ha un massimo in corrispondenza del centro delle ruote e decresce allontanandosi da esso; nel caso di ruote gemellate il comportamento deformativo complessivo, rappresentato dalla linea continua, è il risultato della somma dei contributi delle singole ruote, rappresentati dalle linee tratteggiate. A ciascun tipo di aereo corrisponde poi una diversa geometria dei carrelli e delle gambe di forza che interessano punti della sovrastruttura diversi. Da numerose osservazioni effettuate su piste di volo e di circolazione in diversi aeroporti, che evidenziano la frequenza delle deformazioni o lesioni nella sezione trasversale della sovrastruttura, il Tesoriere ha individuato quali zone sono maggiormente sollecitate dai carichi. Nella via di rullaggio, dove la posizione dell'aereo si discosta poco dalla center line, le zone più sollecitate della pavimentazione sono le fasce percorse dalle gambe di forza che distano dall'asse della pista da 2 a 5 metri. Gli estensimetri vengono pertanto posizionati in tale fascia, dove più presumibilmente avverrà il passaggio delle ruote del carrello. La distanza più probabile alla quale le ruote dei carrelli passano dalla center line della via di rullaggio dipende dal tipo di aeromobile. Si deve, quindi, considerare quali aerei compongono il traffico dell'Aeroporto "Guglielmo Marconi" per stimare con maggiore precisione a quale distanza dalla center line posizionare gli estensimetri in modo da misurare la deformazione massima in corrispondenza del centro della ruota. Inoltre per studiare il contributo deformativo dovuto all'azione combinata delle ruote gemelle si vuole individuare la posizione dell'asse del carrello dei principali aeromobili che operano sullo scalo. La Tabella 24 illustra la composizione del traffico al 2009: si osserva che 5 modelli di aeromobile coprono il 74% del traffico annuale.

Tabella 24: Composizione del traffico anno 2009.

AEREO	CASISTICA	d_{max} - cm	d_{min} - cm
	%	(Max track width)	(Min track width)
BOEING 737	28.9	641	399
AIRBUS 320	18.3	902	678
CRJ	10	400	176
ATR 42	8.5	467	243
MD 80	8.3	621	397

Dalla geometria dei carrelli posteriori degli aerei indicati in Tabella 24 possiamo desumere la distanza delle ruote dalla center line e quindi individuare il punto di passaggio più probabile delle ruote, come si vede nella Tabella 25.

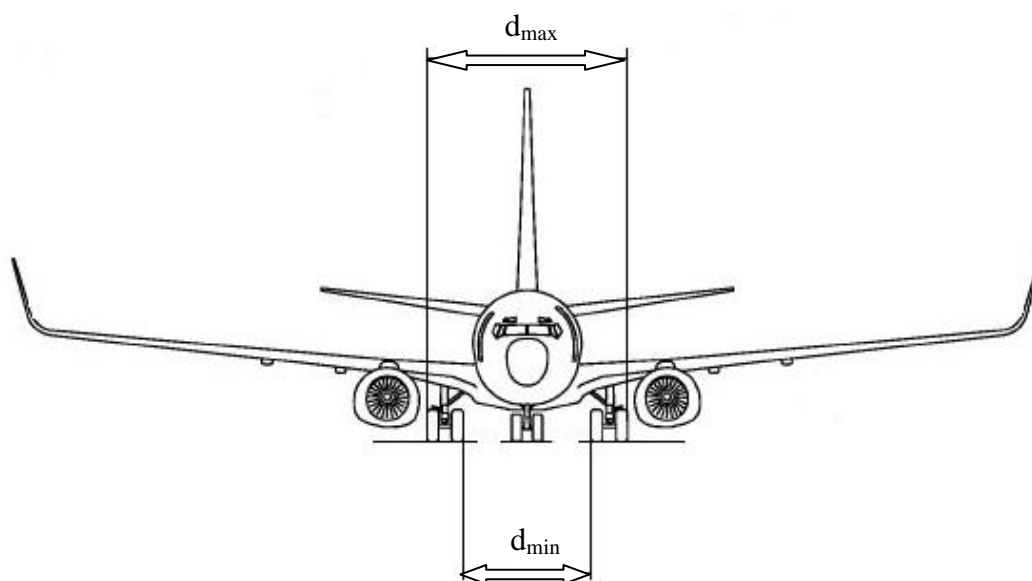


Figura 77: Massima e minima distanza tra i carrelli.

Tabella 25: Distanza del carrello dalla center line.

AEREO	Distanza ruota interna da center line - cm	Distanza asse da center line - cm	Distanza ruota esterna da center line - cm
BOEING 737	212	260	308
AIRBUS 320	351.5	395	438.5
CRJ	100.5	144	187.5
ATR 42	134	177.5	221
MD 80	211	254.5	298

Allo scopo di intercettare la maggior parte di traffico possibile si posizionano 5 estensimetri, lungo una linea ortogonale alla pista e lunga 174 cm, distanziati tra loro di 43.5 cm, con l'estensimetro più lontano posto a 395 cm dalla center line, in corrispondenza dell'interasse del carrello del AIRBUS 320, e l'estensimetro più vicino distante 221 cm dalla center line, in corrispondenza delle ruote di ATR 42, BOEING 737 e MD 80. Suddividendo in questo modo il traffico si riesce a coprire diverse condizioni di carico utili a definire il comportamento della sovrastruttura stradale.

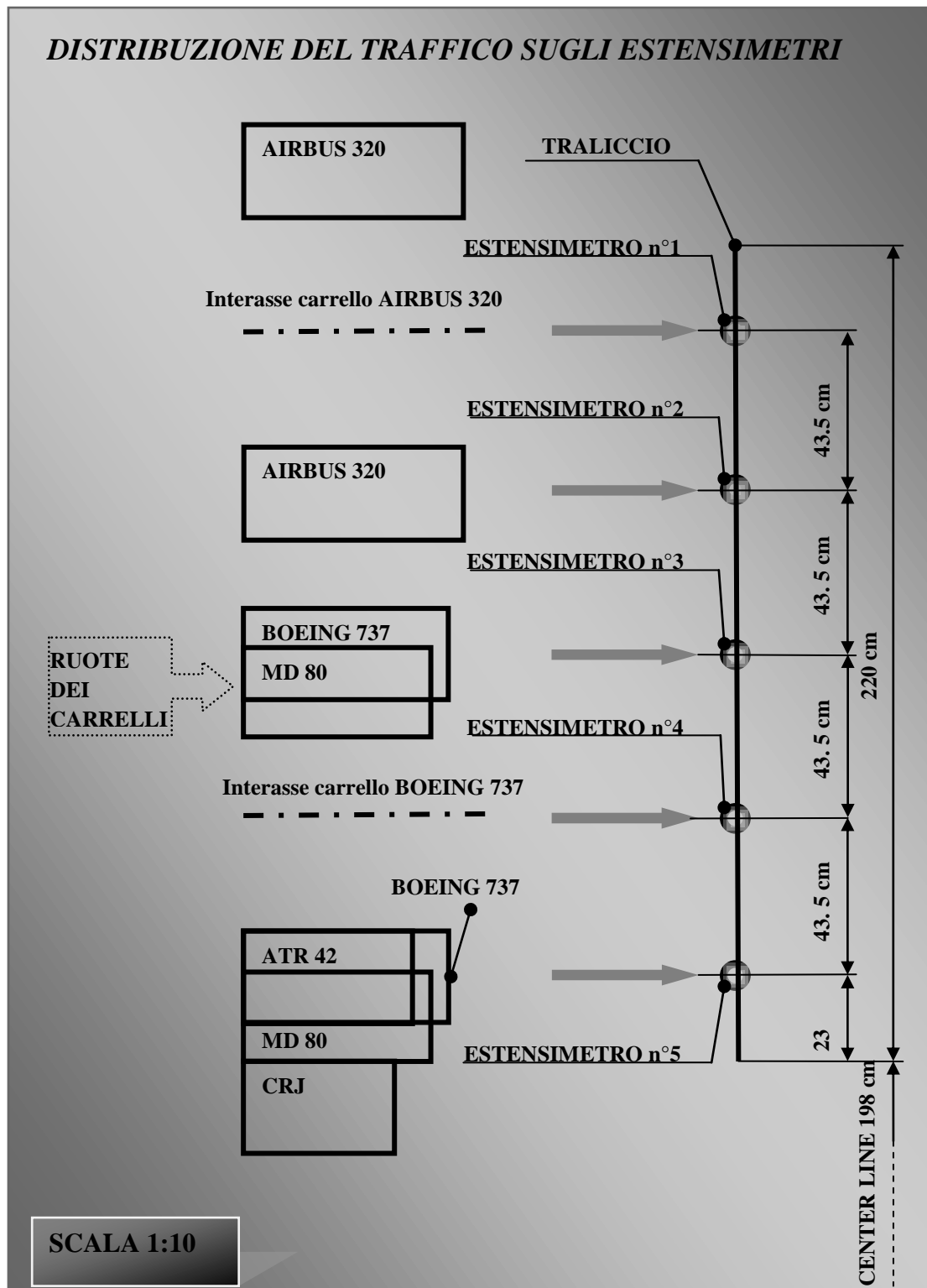


Figura 78: Distribuzione del traffico aereo sugli estensimetri.

La posizione dei 5 estensimetri suddivide il traffico aereo in questo modo:

- **estensimetro n°1:** posizionato a 395 cm dalla center line, in posizione mediana rispetto agli pneumatici del carrello dell'aeromobile AIRBUS 320. Tale estensimetro non è interessato dal traffico aereo diretto ma ha il compito di monitorare la deformazione nello

spazio compreso tra le ruote dei carrelli, per una percentuale complessiva di traffico aereo pari al 18,3%;

- **estensimetro n°2:** posizionato a 351.5 cm dalla center line, in corrispondenza del punto centrale dello pneumatico interno del carrello dell'aeromobile AIRBUS 320. La percentuale complessiva di traffico aereo che interessa tale estensimetro è pari al 18,3%;
- **estensimetro n°3:** posizionato a 308 cm dalla center line, in corrispondenza del punto centrale dello pneumatico esterno del carrello dell'aeromobile BOEING 737. Tale estensimetro si trova anche al di sotto del bordo esterno dello pneumatico esterno del carrello dell'aeromobile MD 80. La percentuale complessiva di traffico aereo che interessa l'estensimetro 3 è pari 37,2%;
- **estensimetro n°4:** posizionato a 264.5 cm dalla center line, in corrispondenza dell'interasse tra gli pneumatici del carrello dell'aeromobile BOEING 737 e in posizione intermedia rispetto agli pneumatici del carrello dell'aeromobile MD 80. Tale estensimetro non è interessato dal traffico aereo diretto, come l'estensimetro 4, ma ha il compito di monitorare la deformazione nello spazio compreso tra le ruote dei carrelli, per una percentuale complessiva di traffico aereo pari al 37,2%;
- **estensimetro n°5:** posizionato a 221 cm dalla center line, in corrispondenza del punto centrale dello pneumatico esterno del carrello dell'aeromobile ATR 42. Tale posizione coincide con il punto centrale dello pneumatico interno del carrello dell'aeromobile BOEING 737. Inoltre, l'estensimetro 5 viene a trovarsi al di sotto del bordo esterno dello pneumatico interno del carrello dell'aeromobile MD 80. La percentuale complessiva di traffico aereo che interessa tale estensimetro è pari al 45,7%.

Oltre a rispondere alla necessità di ricoprire un'ampia percentuale di traffico aereo, la disposizione degli estensimetri è tale da collocare i due sensori n°2 e n°5 in posizioni altamente interessanti dal punto di vista delle sollecitazioni trasmesse alla pavimentazione. Infatti, mentre l'estensimetro n°5 risulta essere quello maggiormente interessato dal traffico aereo, ma il traffico che registra è relativamente leggero per le dimensioni degli aeromobili coinvolti, l'estensimetro n°2 è interessato da una percentuale di traffico aereo bassa ma pesante, in quanto tale estensimetro si trova nella posizione maggiormente sollecitata dai carichi trasmessi dagli aeromobili. Dalla comparazione tra i dati forniti dai due estensimetri sarà pertanto possibile valutare se sia più critica una situazione con alta percentuale di traffico, ma leggero, o una con bassa

percentuale di traffico, ma pesante. Gli estensimetri permettono inoltre di confrontare il comportamento meccanico delle due miscele, dato che vengono introdotti sia nella pavimentazione in calcestruzzo additivato con PFU che in calcestruzzo ordinario.



Figura 79: Rete elettrosaldata Ø 6 a passo 20 cm.

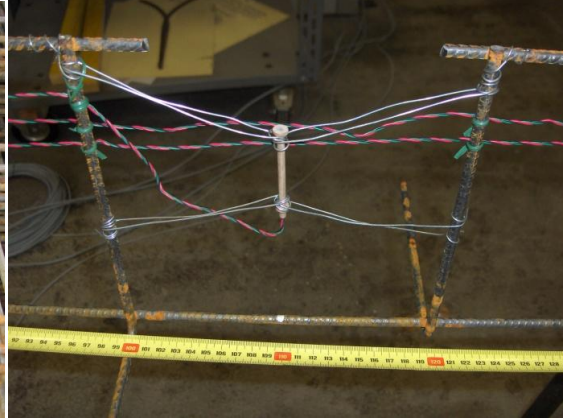


Figura 80: Un estensimetro fissato al traliccio.



Figura 81: Dettaglio del traliccio.



Figura 82: Traliccio con i 5 estensimetri.

Per mettere gli estensimetri in posa nelle lastre di calcestruzzo nella posizione prestabilita è necessario fissarli a dei supporti realizzati utilizzando una rete elettrosaldata Ø 6 a passo 20 cm (Figura 79). La rete è stata tagliata per una lunghezza di 220 cm e un'altezza di 20 cm, mentre i ferri sporgenti sono stati piegati per ottenere una base d'appoggio stabile. Gli estensimetri sono stati fissati con filo di ferro sui due tralicci da immergere nelle due lastre di cemento, ciascuno con 5 estensimetri distanziati tra loro di 43.5 cm (Figure 80-82). I tralicci vengono posti in opera nella metà lato-piazzale della via di rullaggio, ortogonalmente alla direzione di percorrenza, con l'estensimetro più vicino al centro pista posto ad una distanza di 221 cm da essa.

5.5 La messa in opera

Il sistema di monitoraggio, costituito da centralina di acquisizione collegata ai sensori estensimetrici fissati sui tralicci, è stato messo in opera contestualmente ai lavori di ampliamento del piazzale II lotto, riqualificazione della via di rullaggio e costruzione del gate di collegamento presso l'Aeroporto "Guglielmo Marconi", così come da progetto esecutivo approvato da ENAC (Ente Nazionale Aviazione Civile) a settembre del 2006. La messa in opera del sistema avviene in un tratto sperimentale lungo 14 m nella via di rullaggio, posto alla fine dell'intervento di riqualificazione, cerchiato in rosso nella Figura 83. Nel paragrafo successivo vengono descritti brevemente i lavori nella via di rullaggio contestuali alla messa in posa del sistema di monitoraggio. Nella Figura 84 un aereo della compagnia di bandiera attraversa la via di rullaggio adiacente al cantiere durante la fase di manovra prima del decollo.

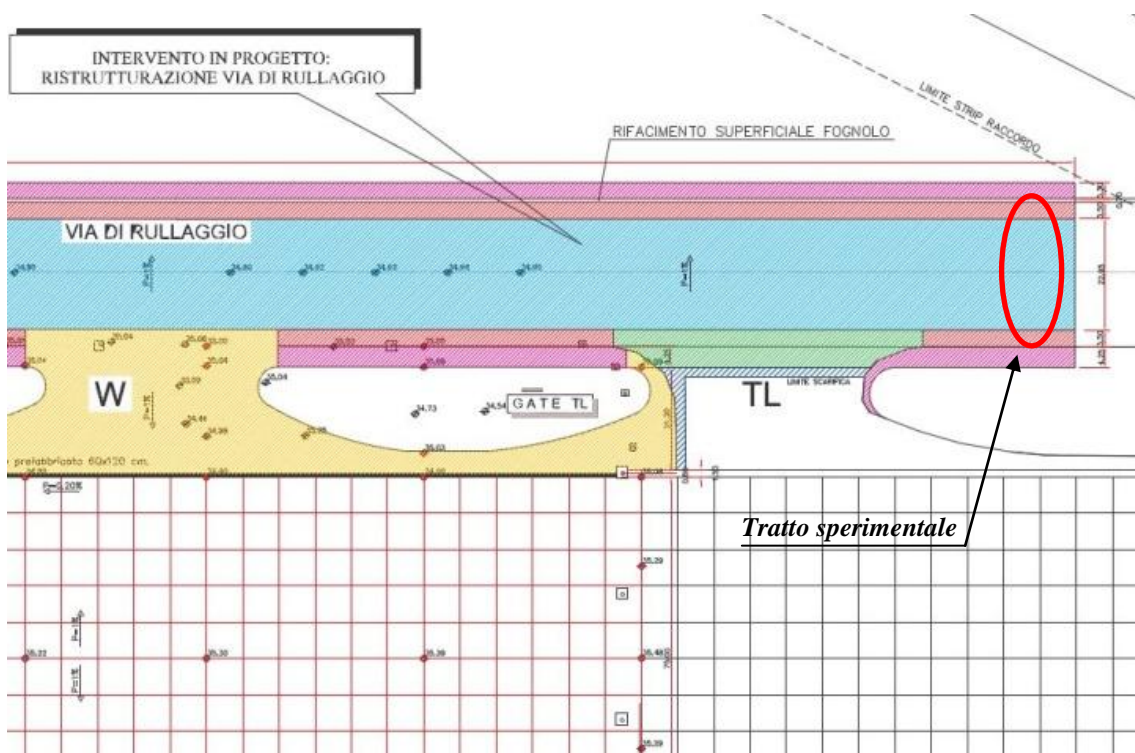


Figura 83: Pianta dell'intervento nella via di rullaggio.



Figura 84: Cantiere nella via di rullaggio.

5.5.1 La via di rullaggio

La via di rullaggio è una zona di raccordo tra i piazzali di sosta e la pista di volo e serve al movimento a terra dei velivoli in partenza per raggiungere la testata della pista di volo o dei velivoli in arrivo per raggiungere il piazzale di sosta. La via di rullaggio dell'Aeroporto "Guglielmo Marconi" è lunga 2400 metri e larga 23 metri, realizzata in pavimentazione flessibile. Il lavoro di riqualificazione ha lo scopo di sostituire la vecchia pavimentazione, che presenta gravi problemi di fessurazione e ormaimento (vedi Figura 85), con una nuova pavimentazione flessibile. L'intervento permetterà, inoltre, di ampliare la via di rullaggio in larghezza con due fasce laterali o shoulder da 7.5 metri per permettere il transito di aerei di grandi dimensioni nello scalo.



Figura 85: Fessurazione superficiale dello strato bitumoso nella vecchia pavimentazione.



Figura 86: Sezione della pavimentazione flessibile.

L'intervento comincia dalla demolizione della vecchia pavimentazione: dopo aver fresato il conglomerato bituminoso, l'escavatore ha asportato la fondazione costituita da misto granulare e l'ha depositato ai lati della via di rullaggio. Quindi è stata realizzata la nuova pavimentazione stradale (vedi Figura 86): la fondazione è stata realizzata con un primo strato di 30 cm costituito da terreno in situ argilloso stabilizzato a calce; su questo è stato posto un secondo strato di 50 cm costituito dal misto granulare che faceva parte della vecchia fondazione, dopo averlo stabilizzato con cemento per aumentarne la rigidità; sopra la fondazione è stata posta la base di 10 cm, costituita da conglomerato bituminoso, quindi il binder dello spessore di 6 cm e, infine, lo strato di usura spesso 4 cm. Un tratto lungo 14 metri della pavimentazione della via di rullaggio è stato invece realizzato con sovrastruttura rigida sperimentale (vedi Figura 87): gli strati di binder e base sono stati sostituiti con una lastra di calcestruzzo spessa 16 cm e ricoperta da uno strato di usura bituminoso di 4 cm, al fine di dare continuità al piano viabile superficiale. La lastra in calcestruzzo, realizzata per metà con conglomerato cementizio additivato con PFU (Miscela 2) e per metà con conglomerato cementizio ordinario (Miscela 3), viene dotata dei sensori estensimetrici del sistema di monitoraggio.



Figura 87: Sezione della pavimentazione rigida.

5.5.2 La strumentazione della pista

La messa in posa dei sensori nel tratto sperimentale di pavimentazione stradale è avvenuta in due fasi:

- in un primo momento si è provveduto a fissare il traliccio con i sensori alla fondazione e a realizzare i cavidotti;
- successivamente sono state preparate le casseformi ed è stato effettuato il getto di calcestruzzo.

I tralicci sono stati posizionati sulla fondazione della pavimentazione stradale, trasversalmente al suo asse, alla distanza di 198 cm dalla center line (Figura 90), verificandone la posizione attraverso rilevazione topografica con sonda GPS. Prima di sistemare gli estensimetri, è stata realizzata una base di spessore 1.4 cm in magrone nello strato di fondazione, su cui è stato murato il traliccio in modo da garantirne la stabilità al ribaltamento al momento del getto. I cavi degli estensimetri sono stati portati a bordo via di rullaggio attraverso tubi Ø 110 che corrono lungo i cavidotti scavati nello strato di fondazione (Figura 88-89). Al termine dei quali è stato scavato l'alloggiamento per il pozzetto, realizzato in cemento, con una copertura in acciaio tipo D900, in cui sono alloggiati gli estremi dei cavi dotati di connettori per il collegamento con la centralina cRIO e di cui è stato verificato il corretto funzionamento. Infine si è provveduto a proteggere i tubi con un rivestimento cartaceo all'imboccatura, per impedire che il calcestruzzo vi penetri all'interno e, indurendo, possa danneggiare i cavi degli estensimetri (vedi Figura 91).



Figura 88: Escavatore all'opera.



Figura 89: Posizionamento dei tubi con Ø 110.



Figura 90: Posizionamento del traliccio.



Figura 91: Protezione dei tubi da infiltrazioni di cls.



Figura 92: Getto del calcestruzzo con PFU.



Figura 93: Dettaglio del traliccio.

Terminata la prima fase si è provveduto a posizionare dei picchetti in tondino metallico, visibili in Figura 91, contrassegnati in sommità da spray giallo, sporgenti 16 cm e distanziati 3 metri l'uno dall'altro, come riferimento per la stesa di uno strato di calcestruzzo uniforme, dello spessore costante di 16 cm. Successivamente si è proceduto alla realizzazione delle casseformi e alla messa in opera di 26 m³ di calcestruzzo additivato con PFU nella prima fascia lunga 7 metri, immergendo i due tralicci con i sensori estensimetrici (Figure 92-93). Il getto di calcestruzzo è stato eseguito con particolare accuratezza affinché gli estensimetri non venissero danneggiati, né spostati dalla posizione prestabilita: la stesa in prossimità del traliccio è stata effettuata con badili e rifinita con cazzuole (Figura 94). Infine l'estradosso del calcestruzzo è stato rasato e tirato con il rigone in modo da renderne la superficie uniforme e prevenire fenomeni di fessurazione (Figura 95). La stesa deve ottenere un buon grado di costipamento del calcestruzzo perché raggiunga una buona resistenza meccanica. Dopo aver rifilato lateralmente la prima lastra di calcestruzzo, per togliere il materiale in eccesso (Figura 96), si è proceduto al getto di 25.7 m³ di calcestruzzo ordinario nella seconda fascia (Figura 97).



Figura 94: Rifinitura con cazzuola.



Figura 95: Stesa del calcestruzzo con il rigone.



Figura 96: Prima lastra di calcestruzzo con PFU.



Figura 97: Stesa del calcestruzzo ordinario.

Per ogni getto sono stati prelevati 11 campioni: 8 provini di forma cubica (15x15x15 cm) e 3 provini di forma cilindrica (altezza 30 cm e diametro 15 cm). Nelle prime ore dopo il getto il calcestruzzo è umido e aumenta la sua temperatura in seguito alla produzione del calore d'idratazione; i successivi processi di asciugamento e quindi di raffreddamento, che portano il materiale in condizioni di equilibrio con l'ambiente circostante, danno luogo a fenomeni di ritiro. Questo causa l'insorgere nel calcestruzzo di sforzi interni di trazione che possono causarne la fessurazione se il fenomeno si sviluppa troppo rapidamente. Quindi si è provveduto a mantenere sulla faccia superiore della piastra un velo d'acqua per alcuni giorni dopo la stesa in modo da rallentare l'asciugamento e evitare gli effetti negativi del ritiro. (9)

A calcestruzzo indurito è stato possibile tagliare con un flessibile i ferri del traliccio sporgenti per 2.6 cm dal conglomerato cementizio. A tre giorni dal getto l'estradosso del calcestruzzo appare perfettamente integro e privo di fessure (Figura 99). Prima di stendere lo strato di usura, la faccia superiore del calcestruzzo è stata ricoperta con la



Figura 98: Provini cubici e cilindrici.



Figura 99: Calcestruzzo additivato con PFU.



Figura 100: Catramina stesa sul calcestruzzo.



Figura 101: Stesa del conglomerato bituminoso.

catramina stesa a caldo, per impedire la formazione di microfessure e per aumentare l'aderenza con lo strato di bitume. Si è quindi realizzata la stesa del conglomerato bituminoso sopra lo strato cementizio (Figura 101). Il manto è stato costipato con numerosi passaggi del rullo compressore fino a raggiungere uno strato spesso 4 cm che ha completamente ricoperto gli alloggiamenti per i segnali luminosi predisposti lungo la center line. Successivamente, per installare i segnali luminosi AVL (Aiuti Visivi Luminosi) all'interno degli alloggiamenti lungo la center line, sono stati effettuati dei carotaggi del diametro di 150 mm nel manto stradale. Le luci sono state posizionate all'interno degli alloggiamenti nella pavimentazione e sono state collegate alla rete elettrica AVL. Le posizioni degli alloggiamenti, in corrispondenza delle quali effettuare i carotaggi sono state ricercate tramite rilevazione GPS, essendo state precedentemente rilevate topograficamente tutte le posizioni dei segnali luminosi.

L'ACQUISIZIONE E L'ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI

6.1 La calibrazione del sistema di monitoraggio

Una volta terminati i lavori di riqualificazione e sgomberato il relativo cantiere, il tratto di via di rullaggio interessato è stato riaperto al traffico aereo in data 1° aprile 2010 ed è stato possibile acquisire i primi dati. Il pozzetto predisposto per il collegamento degli estensimetri alla centralina d'acquisizione è posizionato all'interno di un'area riservata al movimento a terra dei velivoli (area di manovra) ed è stato quindi necessario richiedere un'autorizzazione all'ENAV (Ente Nazionale di Assistenza al Volo) per accedervi. Per effettuare il rilevamento, la centralina viene collegata agli estensimetri, tramite i cavi posti nel pozzetto a bordo via di rullaggio, e avviata tramite il pannello di controllo del computer collegato direttamente alla centralina con cavo ethernet. La centralina acquisisce il segnale elettrico dagli estensimetri e lo riconverte in una grandezza fisica quale è la deformazione. Il segnale è la differenza di potenziale tra i due rami del ponte di Wheatstone che la centralina forma con gli estensimetri, come detto nel capitolo 5: esso viene convertito tramite il fattore di trasduzione nella deformazione ϵ . La conversione viene impostata nell'interfaccia del pannello di controllo realizzato dal Lisg in ambiente LabVIEW: è stato predisposto un Virtual Instrument che permette di decodificare il segnale degli estensimetri, visualizzando i dieci canali di acquisizione in via grafica e puntuale, scegliere la frequenza di acquisizione dei dati e programmare la durata di acquisizione. Per procedere al rilevamento dei dati è stato necessario effettuare un test di acquisizione per calibrare il segnale e valutare l'errore strumentale. Il primo rilievo è stato effettuato in data 23 settembre 2010: dopo aver aperto il pozzetto e collegato la centralina, è stata programmata un'acquisizione di due ore, dalle 6.00 alle 8.00, quindi si è riposto la centralina nel pozzetto ed è stata sgombrata l'area. Al termine del rilievo si è acceduto al pozzetto per rimuovere la centralina con i dati salvati.

6.1.1 L'errore strumentale e la distorsione termica

Dalla sessione di calibrazione è possibile valutare la qualità del segnale e la sensibilità del sistema di monitoraggio. In Figura 102 è rappresentata la deformazione misurata dall'estensimetro al passaggio di un aeromobile AIRBUS 320. In questo caso la centralina ha acquisito 9 punti al secondo, ma la frequenza di acquisizione non è sufficiente a descrivere l'andamento deformativo. Il picco compressivo corrispondente al passaggio della ruota del velivolo sull'estensimetro viene rilevato con un solo punto, che non può essere indicativo dell'andamento deformativo. Sarà quindi necessario aumentare la frequenza di acquisizione per ottenere più punti che descrivono la deformazione indotta nella sovrastruttura stradale.

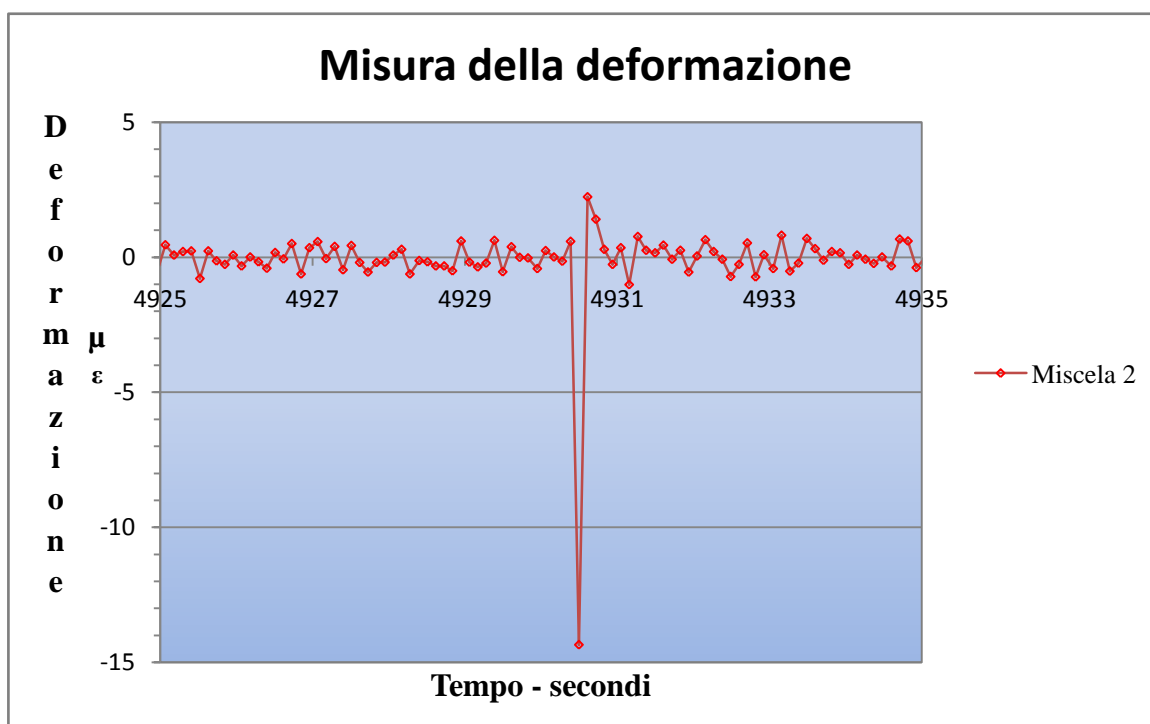


Figura 102: Deformazione registrata dall'estensimetro al passaggio dell'AIRBUS 320.

Dai dati acquisiti è stata valutata l'incidenza dell'errore strumentale sulla misura della deformazione, per determinare il valore limite al di sotto del quale la misura viene influenzata dall'errore dello strumento. La sensibilità del sistema di monitoraggio è stata valutata dai dati acquisiti in un intervallo di tempo della durata di 31'22'', durante il quale i sensori non risultano sollecitati dal traffico aereo. E' stato quindi calcolato il valore medio $\bar{\mu}$ della deformazione dei sensori a riposo come media della popolazione y_1, y_2, \dots, y_n dei dati misurati:

$$\bar{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} = 0.3381\mu\epsilon$$

L'oscillazione media s della deformazione attorno al valore medio della deformazione misurata rappresenta il limite di sensibilità dello strumento di acquisizione:

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{\mu} - y_i|}{n} = 0.3648\mu\epsilon$$

Questo significa che misure di deformazione inferiori a $0.3648 \mu\epsilon$ non sono attendibili poiché al di sotto della sensibilità della strumentazione a disposizione. Cautelativamente assumiamo $0.4 \mu\epsilon$ come limite al di sotto del quale non possiamo considerare la misurazione attendibile. L'osservazione dei dati ha permesso inoltre di evidenziare l'influenza sulla deformazione delle condizioni al contorno come la temperatura. E' ben noto come le variazioni termiche naturali provochino delle deformazioni all'interno di una struttura in calcestruzzo e influenzino quindi la misura della deformazione. Questo non permette un confronto tra i dati registrati in condizioni di temperatura differenti. Nell'arco delle due ore di rilevamento si è infatti osservato una deformazione, non imputabile ad una sollecitazione esterna, di entità non trascurabile.

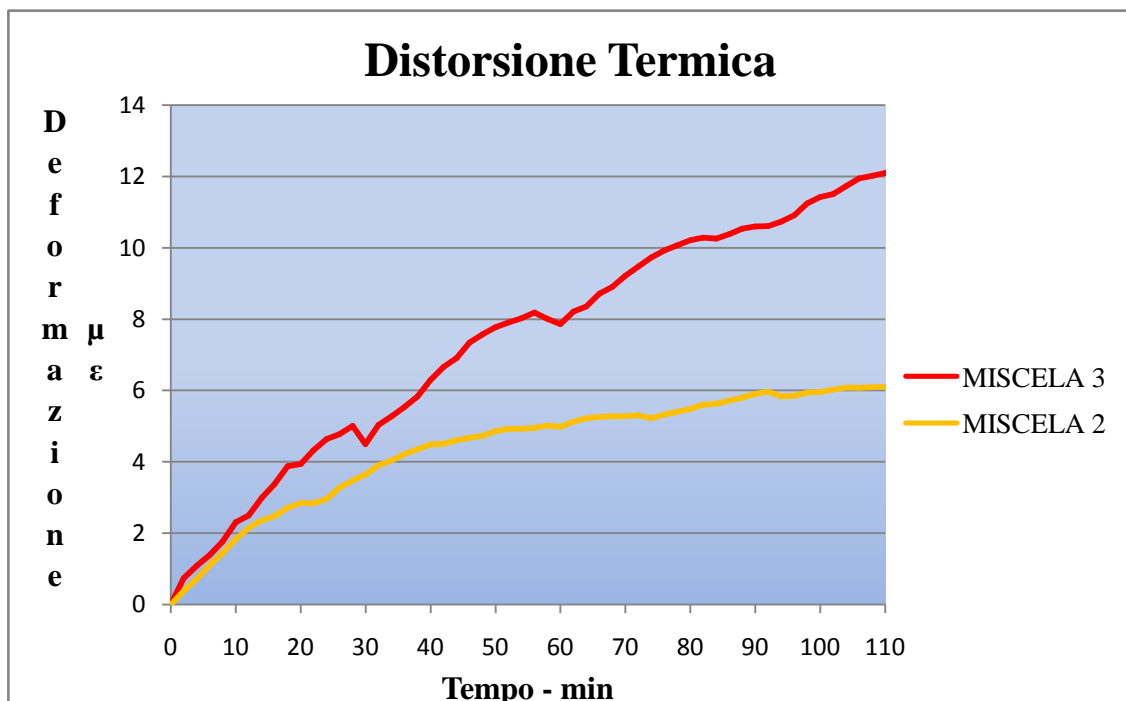


Figura 103: Distorsione termica nelle sovrastrutture in calcestruzzo.

L'osservazione dei dati in Figura 103 mostra che la sovrastruttura realizzata in calcestruzzo ordinario (Miscela 3) subisce una deformazione di $12 \mu\epsilon$ nell'arco di 110 minuti, con un andamento espansivo legato all'aumento della temperatura ambientale di circa 15°C . Sembra essere meno sensibile la sovrastruttura in calcestruzzo additivato con PFU (Miscela 2), con una deformazione di circa $6 \mu\epsilon$ nello stesso intervallo di tempo. L'influenza della temperatura sulla deformazione risulta essere un fattore di cui tenere conto nella valutazione dei dati, specialmente in condizioni di escursione termica elevata. Per eliminare l'effetto della temperatura si procede a correggere il valore di deformazione misurato determinando ogni 2 minuti il valore medio di deformazione corrispondente agli estensimetri indisturbati, non sottoposti cioè a sollecitazioni, e si determina la variazione di deformazione rispetto a tale valore medio. In questa maniera il contributo della distorsione termica sulla misura corretta della deformazione risulta trascurabile. Inoltre si effettua il rilevamento dei dati nelle ore notturne, in condizioni di temperatura pressoché costanti.



Figura 104: Camion del Laboratorio di Strade e Geotecnica utilizzato per il rilievo.

6.2 Il rilevamento dei dati

Il rilevamento dei dati è stato effettuato in data 9 novembre 2010 utilizzando come mezzo per indurre sollecitazioni sulla sovrastruttura stradale il camion per rilievi geotecnici di Figura 104, di proprietà del Lisg. Tale mezzo ha un peso di 19 tonnellate distribuito su due ruote anteriori e quattro ruote posteriori: il peso è ripartito per 7 tonnellate sull'asse anteriore e 11 tonnellate su quello posteriore, con un carico di 3.5 ton per ruota anteriore e 2.75 ton per ruota posteriore. Gli pneumatici per effetto del carico si deformano dando luogo ad un'area d'impronta di forma approssimativamente circolare sulla quale viene distribuito il carico. Si può valutare la pressione trasmessa sulla pavimentazione stradale ipotizzando che il carico della ruota agisca uniformemente sulla superficie circolare, di diametro 22 cm pari alla larghezza del battistrada delle ruote del camion. Si stima che le ruote anteriori trasmettano su di un'area d'impronta di 38013 mm^2 una pressione di 0.90 N/mm^2 (vedi Tabella 26) che risulta essere molto vicina ai valori di pressione indotti dagli aerei commerciali, che variano tra 0.90 e 1.40 N/mm^2 . (20) Nel caso in cui si ipotizzi invece un'area d'impronta ellittica, che vale 56482 mm^2 , si ottengono i valori di pressione indicati nell'ultima colonna della tabella.

Tabella 26: Carichi trasmessi sulla sovrastruttura stradale dalle ruote del camion.

	Carico su ruota	Pressione su area di contatto circolare	Pressione su area di contatto ellittica
	kN	N/mm^2	N/mm^2
Ruota anteriore	34.33	0.90	0.61
Ruota posteriore	26.98	0.71	0.48

Il veicolo fornisce alla sovrastruttura stradale una sollecitazione paragonabile a quella trasmessa dal passaggio degli aeromobili e quindi viene utilizzato per misurare il comportamento deformativo della sovrastruttura in calcestruzzo tramite il sistema di monitoraggio. Il rilievo è stato gestito attraverso una postazione approntata a bordo pista in prossimità del pozzetto: i dati registrati dal sistema di monitoraggio sono stati

controllati in tempo reale per via grafica attraverso il pannello di controllo in ambiente LabVIEW (Figura 105). La frequenza di acquisizione dei dati è stata impostata a 15 registrazioni al secondo, per definire meglio i picchi rispetto a quanto osservato in Figura 102. I punti della pavimentazione stradale in corrispondenza degli estensimetri sono stati individuati precisamente e marcati con gesso, in modo da essere ben visibili e venire quindi centrati dai passaggi delle ruote del veicolo. Vengono effettuati 5 passaggi sulla sovrastruttura stradale in calcestruzzo, in modo da transitare su ognuno dei 5 estensimetri posti nelle lastre di calcestruzzo a cominciare dagli estensimetri più vicini alla center line.



Figura 105: Postazione di monitoraggio a bordo pista di rullaggio.

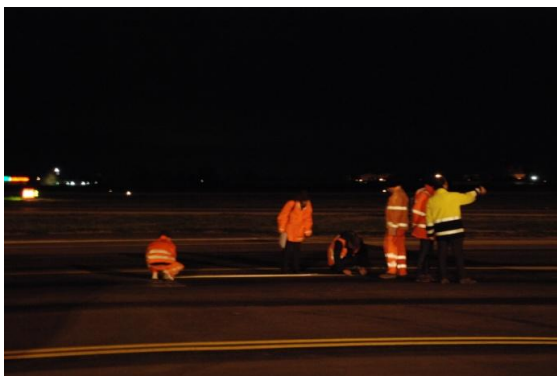


Figura 106: Rilievo degli estensimetri.



Figura 107: Passaggio sugli estensimetri.

Il veicolo ha compiuto il primo passaggio alla velocità media di 2.736 km/h (0.76 m/s), transitando con le ruote alla distanza di 221 cm dalla center line, in corrispondenza dell'estensimetro n°5, sia sul tratto di sovrastruttura stradale in calcestruzzo ordinario, sia su quello in calcestruzzo con PFU. Quindi ha ripetuto l'operazione in corrispondenza dell'estensimetro n°4, transitando con le ruote poste sul lato destro del veicolo alla distanza di 264.5 cm dalla center line e mantenendo circa la stessa velocità. Allo stesso modo si è proceduto per i restanti tre estensimetri. Il passaggio delle ruote gemelle posteriori del veicolo fornisce misure utili a stimare anche il comportamento deformativo del calcestruzzo causato dalle ruote gemelle dei carrelli degli aeromobili. Il sistema di rilevamento ha registrato le deformazioni misurate dagli estensimetri durante i cinque passaggi in un intervallo di tempo di 10 minuti. Nella figura qui sotto viene schematizzata l'operazione di rilievo delle deformazioni prodotte dal passaggio del veicolo sulla sovrastruttura stradale.

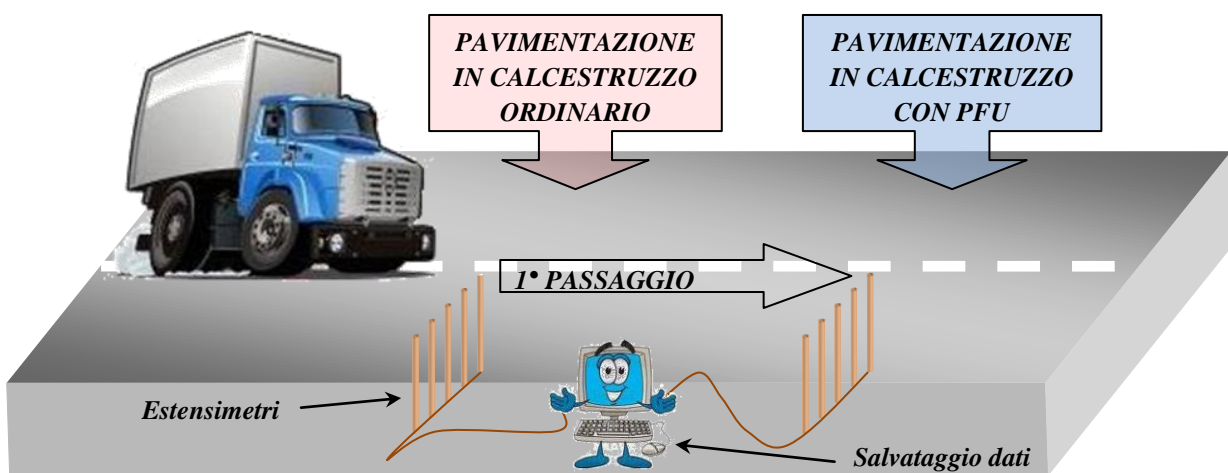


Figura 108: Schema del rilievo della deformazione.

6.3 L'analisi dei dati

I dati acquisiti sono le misure della deformazione subita dagli estensimetri durante il rilevamento. Inizialmente è stato necessario trattare i dati poiché al momento del rilevamento i valori di deformazione misurata in condizioni indisturbate, senza alcuna sollecitazione sulla sovrastruttura stradale, si discostano dallo zero: tale scostamento “storico” è imputabile in parte a motivi costruttivi e in parte alla deformazione permanente subita dal calcestruzzo dalla installazione degli estensimetri al momento del

rilievo. E' stato, quindi, sottratto alla misura della deformazione la quota di deformazione storica, in modo da valutare solo la deformazione dovuta alla sollecitazione trasmessa dal veicolo sulla sovrastruttura durante il passaggio. In questa maniera si riesce a "depurare" il dato anche dall'influenza della distorsione termica sulla misura della deformazione, come detto nel *paragrafo 6.1.1*. Nella Figura 109 sono rappresentate le misure corrette della deformazione rilevata dagli estensimetri n°5, posizionati alla distanza di 221 cm dalla center line, nelle sezioni realizzate in calcestruzzo ordinario (rosso) e calcestruzzo additivato con PFU (azzurro). Si osserva che i cinque passaggi determinano nella pavimentazione deformazioni differenti, secondo la distanza del passaggio delle ruote dagli estensimetri. Ad ogni passaggio il veicolo è transitato due volte sugli estensimetri: il primo passaggio con marcia in avanti è contrassegnato dalla lettera A, mentre la lettera R indica la deformazione indotta a marcia in dietro.

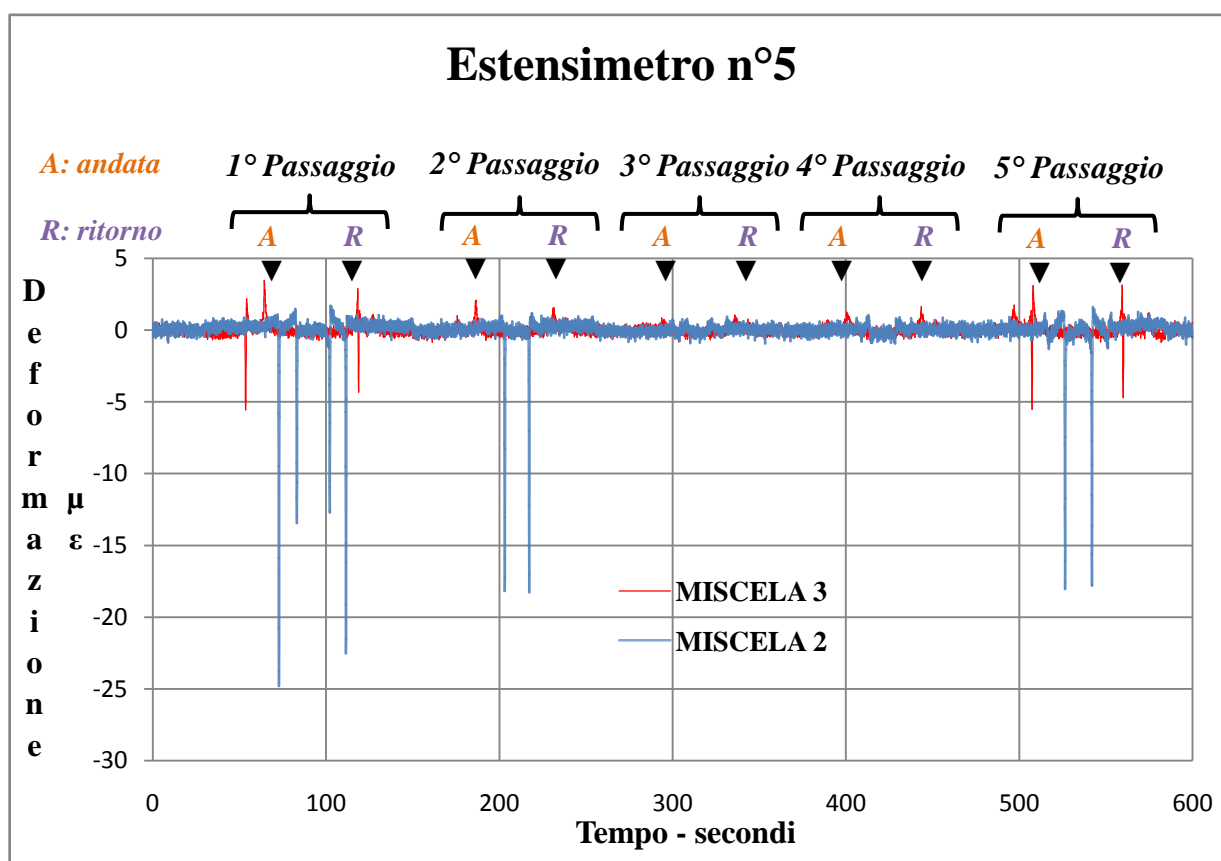


Figura 109: Deformazione registrata dagli estensimetri più vicini alla center line (n°5) durante il rilievo.

Il primo passaggio, effettuato in corrispondenza degli estensimetri in esame, fornisce appunto i valori di deformazione massima. Il secondo passaggio invece fornisce una deformazione attenuata dalla distanza di 43.5 cm, con una misura però non completa,

poiché le deformazioni prodotte dalle ruote singole anteriori non sono state rilevate. Questo è presumibilmente dovuto alle condizioni al contorno, quali l'eccessiva velocità di transito delle ruote anteriori che non ha permesso alla deformazione di propagarsi nello strato di calcestruzzo. Il terzo passaggio, effettuato a 87 cm dagli estensimetri, è ancora più attenuato. Nel quarto passaggio si osserva un aumento della deformazione dovuto all'avvicinarsi delle ruote poste sul lato sinistro del veicolo, che al quinto passaggio transitano in corrispondenza degli estensimetri n°5.

Analizziamo l'andamento deformativo degli estensimetri al transito del veicolo sulle due sovrastrutture stradali:

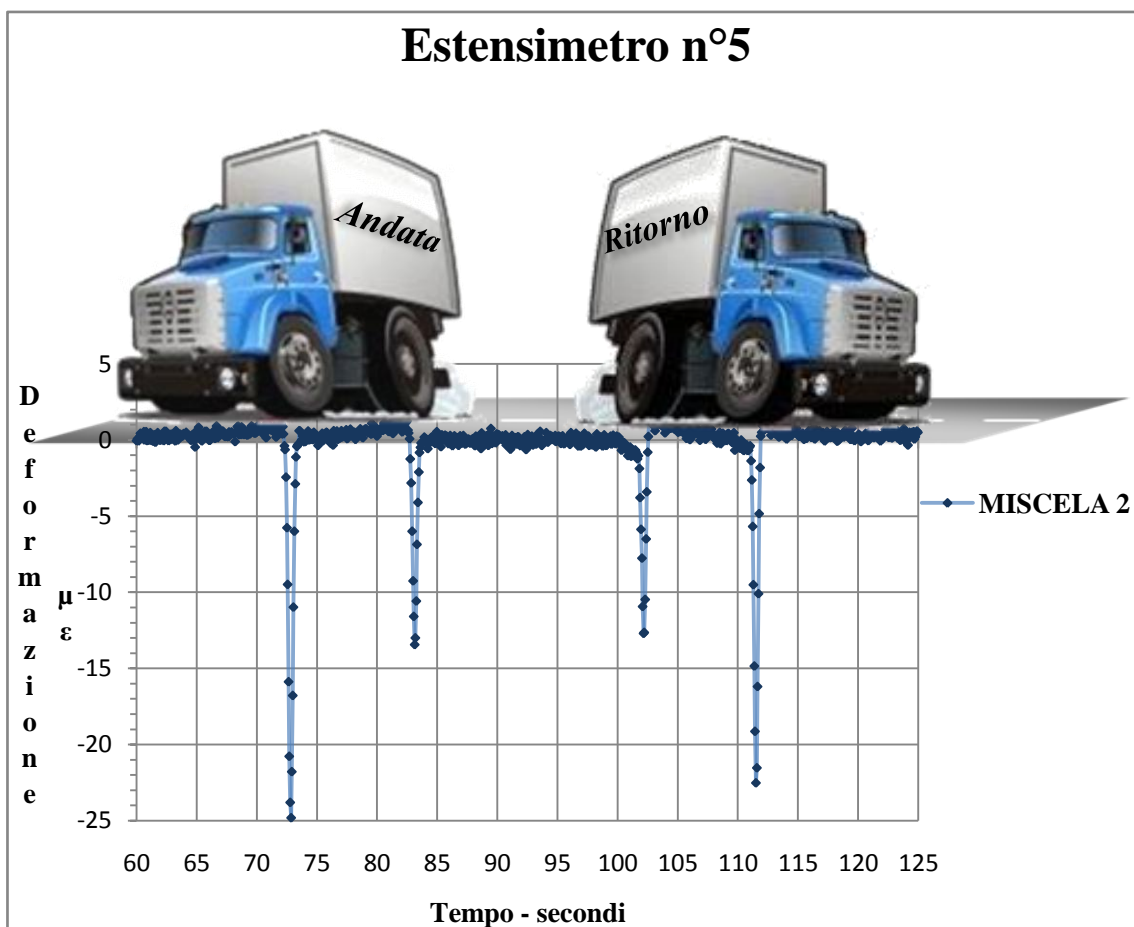


Figura 110: Andamento deformativo registrato dall'estensimetro n°5 al primo passaggio.

- **pavimentazione in calcestruzzo con PFU:** il primo passaggio delle ruote destre del veicolo proprio in corrispondenza dell'estensimetro n°5 ne provocano la deformazione massima. In Figura 110 è mostrato l'andamento deformativo all'estensimetro con i picchi compressivi corrispondenti ai passaggi delle ruote anteriori e posteriori del veicolo. I due picchi sulla sinistra corrispondono all'andata del 1° passaggio, mentre quelli sulla destra corrispondono al ritorno. Per la miscela 2

(additivata con PFU) si osserva che il picco di deformazione raggiunge $-24.82 \mu\epsilon$ al passaggio della ruota singola anteriore, mentre al passaggio della ruota gemella posteriore raggiunge $-13.47 \mu\epsilon$. Si osserva inoltre che la deformazione di segno negativo indica convenzionalmente un accorciamento dell'estensimetro ed è quindi legata alla compressione esercitata dalle ruote sulla sovrastruttura stradale, mentre la deformazione positiva rappresenta un allungamento dell'estensimetro dovuto a condizioni di trazione che si instaurano nella pavimentazione a causa dello stato tensionale indotto dalla ruota stessa ad una certa distanza da essa. La deformazione indotta dalla ruota anteriore risulta essere maggiore rispetto a quella indotta dalla ruota posteriore, a causa del maggiore carico su ruota. In Figura 111 si osserva in dettaglio il passaggio (andata) della ruota posteriore: l'avvicinarsi della ruota induce una deformazione positiva qualche istante prima che questa raggiunga l'estensimetro, mentre la deformazione diventa negativa quando la ruota si trova in corrispondenza dell'estensimetro.

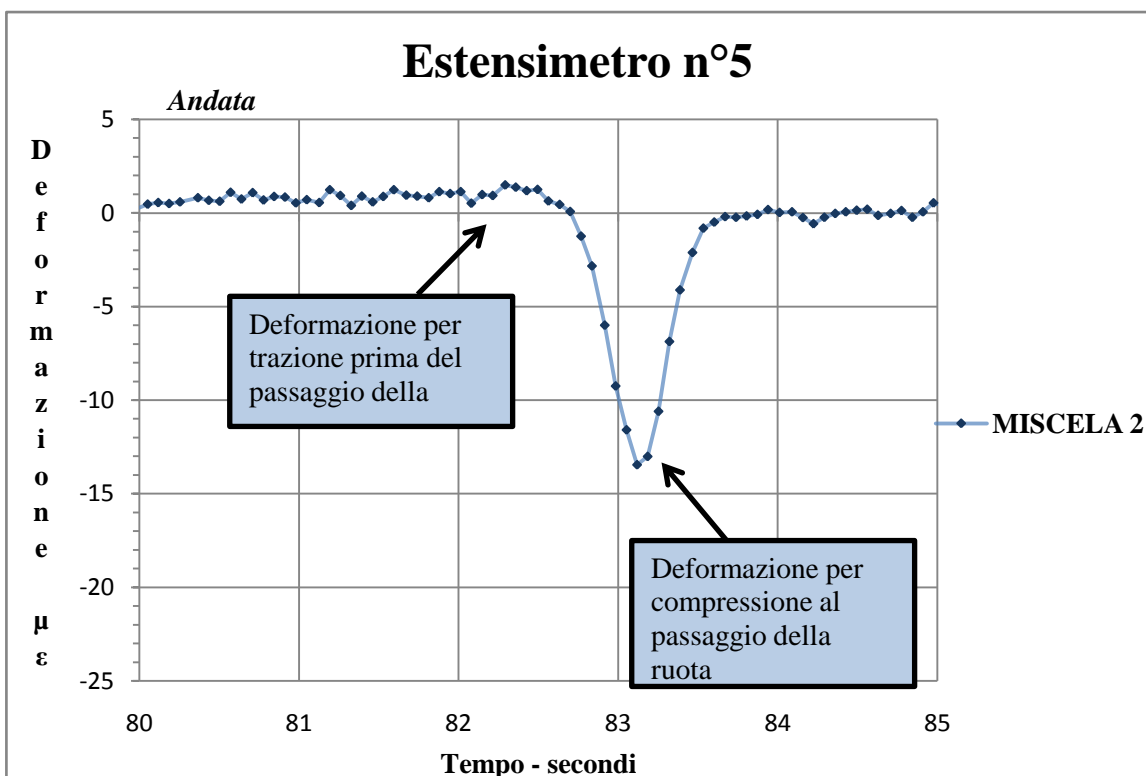


Figura 111: Dettaglio della deformazione indotta dalla ruota posteriore sull'estensimetro (andata).

L'andamento deformativo inizialmente è crescente col tempo, quando la ruota si trova ad una certa distanza dall'estensimetro, per la trazione trasmessa dalla ruota alla pavimentazione stradale per attrito; dopo aver raggiunto il picco positivo di deformazione si osserva un andamento decrescente, dovuto all'effetto

compressivo della ruota giunta in corrispondenza dell'estensimetro fino al raggiungimento del picco compressivo negativo; successivamente al passaggio della ruota la deformazione compressiva comincia a diminuire, in valore assoluto, per effetto dell'allontanamento della ruota, fino all'annullarsi della deformazione, con l'estensimetro che torna gradualmente in condizione indisturbata.

I picchi deformativi positivi, dovuti a sollecitazione per trazione, hanno valori differenti al passaggio della ruota anteriore e di quella posteriore: quest'ultima induce una deformazione positiva di $1.71 \mu\epsilon$, mentre la ruota singola anteriore induce una deformazione di $1.00 \mu\epsilon$. Osservando il ritorno delle ruote posteriori sull'estensimetro n°5 durante il 1° passaggio, l'andamento deformativo è invertito. Come si vede nel grafico di Figura 112, l'estensimetro rimane in condizione praticamente indisturbata prima di iniziare a deformarsi per compressione, indotta dalla ruota in avvicinamento. Il raggiungimento del picco compressivo avviene in corrispondenza della ruota sull'estensimetro. Subito dopo il passaggio della ruota la deformazione comincia a diminuire in valore assoluto. Quindi si osserva la formazione del picco per trazione, a cui segue un andamento decrescente della deformazione, dovuto all'aumentare della distanza della ruota, che riporta la pavimentazione in condizioni indisturbate.

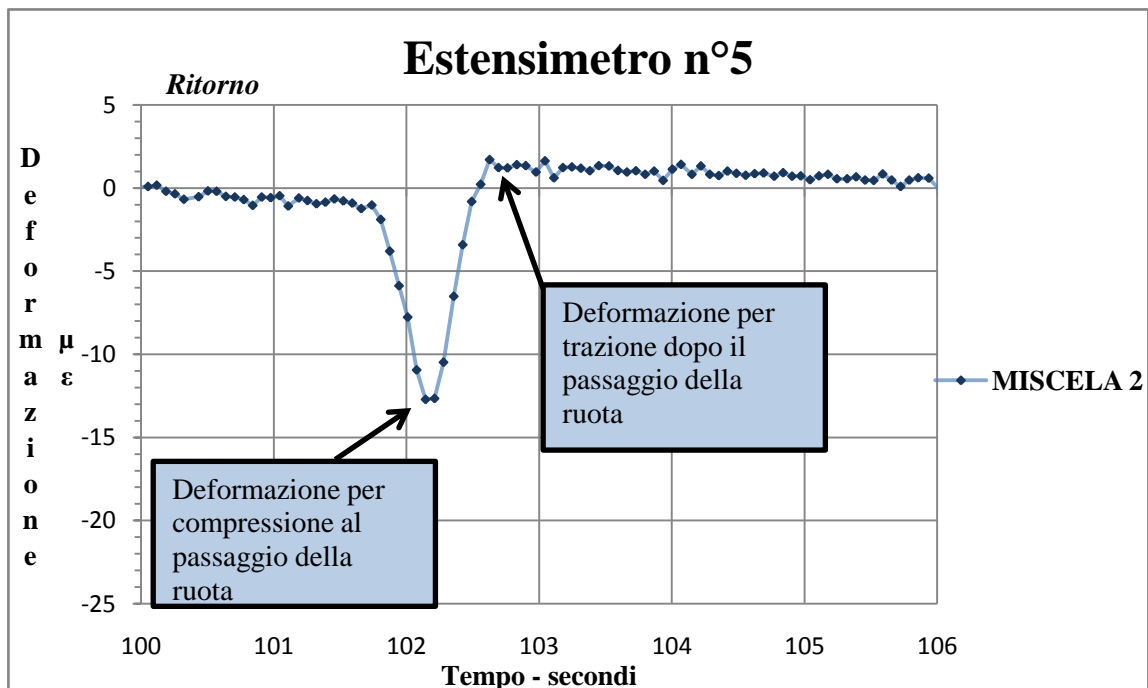


Figura 112: Dettaglio della deformazione indotta dalla ruota posteriore sull'estensimetro (ritorno).

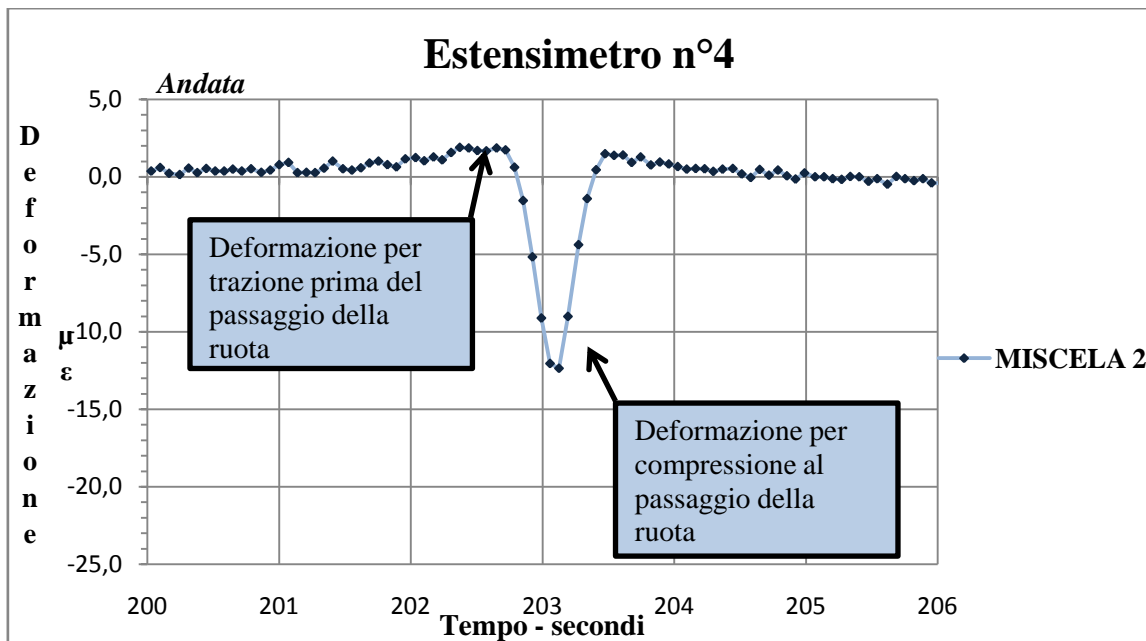


Figura 113: Andamento deformativo dell'estensimetro n°4 a distanza 43.5 cm dalla ruota del veicolo (andata).

Quando le ruote del veicolo transitano a 43.5 cm dall'estensimetro si osserva un andamento deformativo simile al passaggio centrato descritto precedentemente, ma con una riduzione dell'intensità della deformazione dovuto alla distanza della sollecitazione che causa le deformazioni. In Figura 113 si osserva la deformazione del 4° estensimetro, posto a 264.5 cm dalla center line, durante l'andata del terzo passaggio del veicolo a distanza 308 cm dalla stessa. Il grafico mostra il passaggio della ruota singola anteriore, che induce una deformazione massima per compressione di $-12.06 \mu\epsilon$ e una deformazione massima per trazione di $1.68 \mu\epsilon$. La deformazione diminuisce ancora quando il veicolo transita ad una distanza di 87 cm dall'estensimetro. Nel grafico di Figura 114 è rappresentato l'andamento deformativo dell'estensimetro n°4 distante 87 cm dal transito delle ruote (quarto passaggio): la ruota singola induce una deformazione negativa di $-1.15 \mu\epsilon$ e una deformazione positiva massima di $0.68 \mu\epsilon$; il passaggio della ruota gemella produce valori inferiori di deformazione, con picchi di $-1.49 \mu\epsilon$ per compressione e $1.19 \mu\epsilon$ per trazione. Le misure di deformazione effettuate dagli estensimetri posti alle distanze di 130.5 cm e 174 cm dalle ruote mostrano valori che si avvicinano al limite strumentale di $0.4 \mu\epsilon$ e, come detto nel *paragrafo 6.1.1*, non sono ritenuti attendibili. Nella Tabella 27 sono riportati i valori medi di deformazione massima misurata dai cinque estensimetri per le diverse distanze dalla ruota.

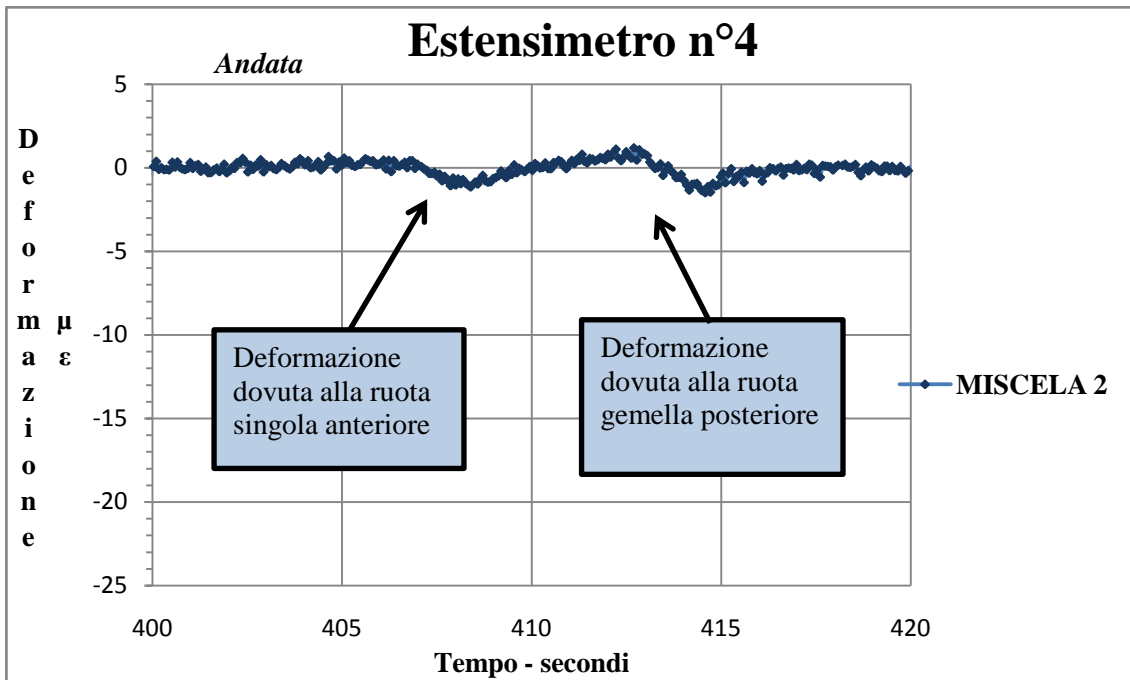


Figura 114: Andamento deformativo dell'estensimetro n°4 a distanza 87 cm dalla ruota del veicolo.

Tabella 27: Valori medi di deformazione misurata dagli estensimetri al variare della distanza dalle ruote.

Distanza		cm	0	43.5	87
RUOTA SINGOLA	Deformazione compressiva ($\mu\epsilon$)		23.67	12.38	1.16
	Deformazione per trazione ($\mu\epsilon$)		1.29	0.95	0.69
RUOTA GEMELLA	Deformazione compressiva ($\mu\epsilon$)		14.45	14.44	1.21
	Deformazione per trazione ($\mu\epsilon$)		1.41	1.19	0.81

- pavimentazione in calcestruzzo ordinario:** la misura della deformazione ha evidenziato anche in questo caso un andamento deformativo con valori positivi quando la ruota si trova ad una certa distanza dall'estensimetro e con un picco negativo quando la ruota passa sopra l'estensimetro. Analizziamo per prima cosa il

passaggio (andata) di Figura 115, con le ruote del veicolo in corrispondenza dell'estensimetro che forniscono la deformazione massima. Il transito delle ruote alla distanza di 351.5 cm dalla center line centra l'estensimetro n°2, che misura un primo picco negativo di deformazione compressiva di $-8.27 \mu\epsilon$ per la ruota singola e un secondo picco negativo di $-5.56 \mu\epsilon$ per la ruota gemella. La deformazione positiva massima vale $1.17 \mu\epsilon$ quando transita la ruota singola e $1.20 \mu\epsilon$ al passaggio della ruota gemella. Al terzo passaggio del veicolo, quando la ruota transita a 43.5 cm dall'estensimetro n°2, questo misura una deformazione massima di $1.17 \mu\epsilon$ e una deformazione minima di $-1.91 \mu\epsilon$ per la ruota gemella. La ruota singola invece produce una deformazione massima di $1.04 \mu\epsilon$ e una minima di $-3.45 \mu\epsilon$. Infine la misura della deformazione per l'estensimetro n°5 situato a 87 cm dal transito delle ruote (terzo passaggio) è compresa tra gli estremi $0.99 \mu\epsilon$ e $-0.47 \mu\epsilon$ nel caso di ruota gemella, $0.70 \mu\epsilon$ e $-0.57 \mu\epsilon$ nel caso di ruota singola. Anche in questo caso i valori di deformazione massima alle diverse distanze dalle ruote sono indicati in Tabella 28.

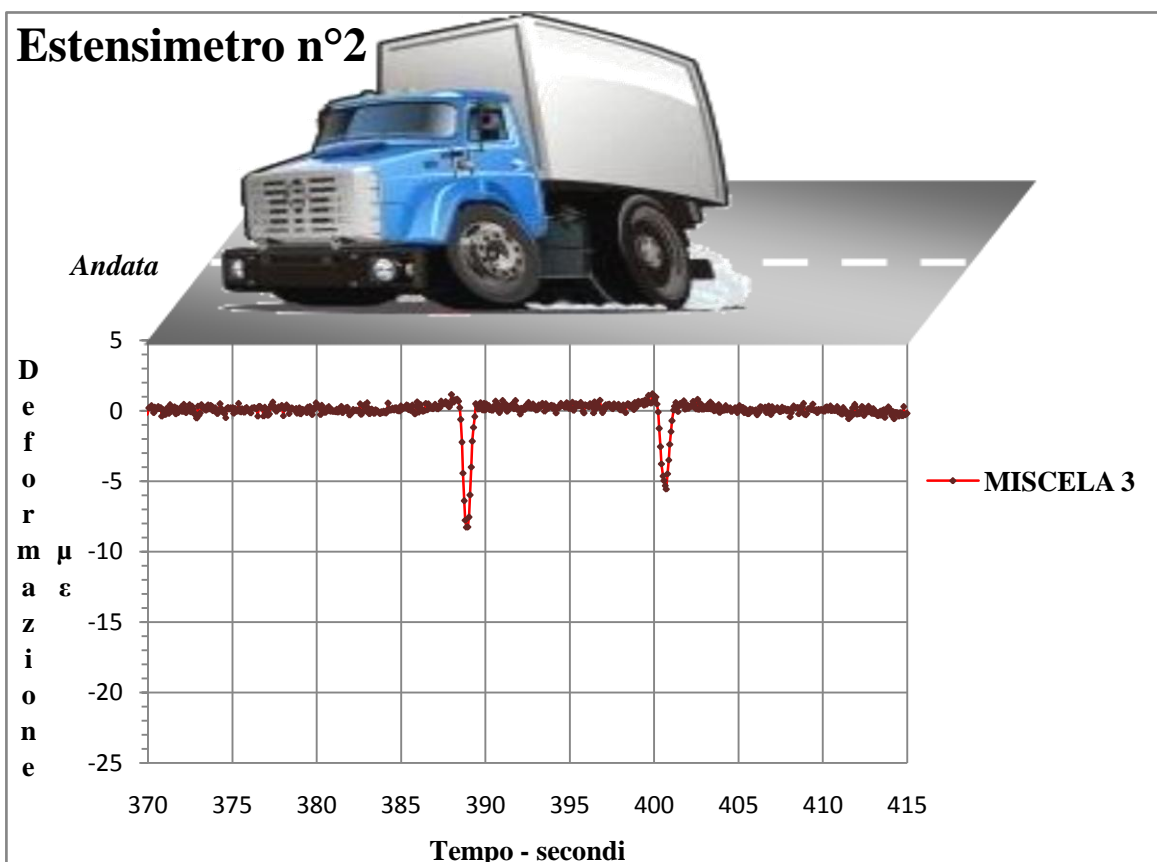


Figura 115: Andamento deformativo registrato dall'estensimetro n°2 nella Miscela 3 .

Tabella 28: Valori medi di deformazione misurata agli estensimetri al variare della distanza dalle ruote.

Distanza	cm	0	43.5	87
RUOTA SINGOLA	Deformazione compressiva ($\mu\epsilon$)	8.44	3.45	0.57
	Deformazione per trazione ($\mu\epsilon$)	2.20	1.04	0.70
RUOTA GEMELLA	Deformazione compressiva ($\mu\epsilon$)	4.54	1.91	0.47
	Deformazione per trazione ($\mu\epsilon$)	3.47	1.17	0.99

6.4 La distribuzione delle deformazioni nella sezione trasversale

La disposizione degli estensimetri ortogonale alla direzione del moto permette di delineare la distribuzione delle deformazioni nella pavimentazione in questa direzione. Come detto nel paragrafo precedente, l'andamento deformativo in questo caso è diverso da quello nella direzione del moto. Per ricostruirlo si utilizzano i valori di deformazione che gli estensimetri posti a 87 cm e 43.5 cm dalla ruota del veicolo hanno rilevato in corrispondenza dei picchi deformativi rilevati dall'estensimetro centrale, sia per trazione che per compressione. In questo modo si evidenziano gli stati deformativi più sfavorevoli alla resistenza della sovrastruttura stradale. I valori di deformazione utilizzati sono quelli indicati nella Tabella 27 per la Miscela 2 e nella Tabella 28 per la Miscela 3. Tali valori sono stati interpolati in modo da ricostruire la distribuzione delle deformazioni su una sezione trasversale della pavimentazione lunga 174 cm. Nella Figura 116 è mostrato l'andamento deformativo nella sezione trasversale della sovrastruttura stradale nel momento in cui si osserva la massima deformazione per compressione sull'estensimetro centrato dalla ruota. In ascissa è indicata la distanza dal

punto di passaggio e in ordinata la corrispondente deformazione. Le curve sono state ottenute interpolando i valori di deformazione indicati nelle suddette tabelle. La curva rossa rappresenta l'andamento deformativo indotto dalla ruota singola nel calcestruzzo ordinario e la curva blu rappresenta quello nel calcestruzzo additivato con PFU. L'interpolazione della deformazione è stata realizzata con l'ausilio della funzione *Spline* in ambiente Matlab. L'errore quadratico medio delle interpolanti rispetto ai valori misurati di deformazione è: 3.37 per la Miscela 2 e 1.72 per la Miscela 3.

DISTRIBUZIONE DELLE DEFORMAZIONI NELLA SEZIONE TRASVERSALE

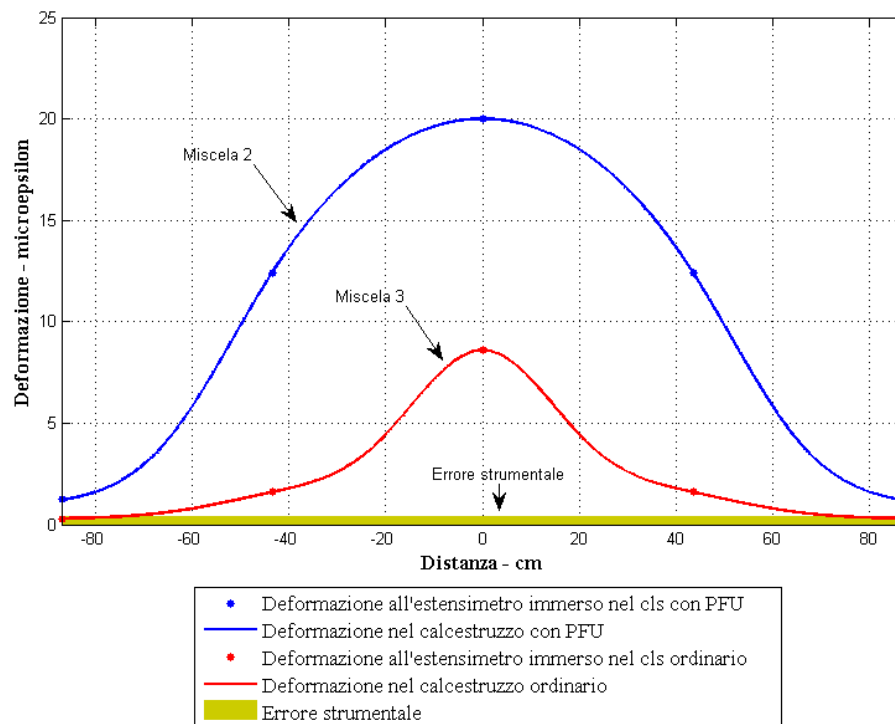


Figura 116: Interpolazione delle deformazioni compressive nella sezione trasversale al moto per ruota singola.

Dal grafico è possibile osservare che:

- l'andamento deformativo risulta essere compressivo in tutta la sezione trasversale, a differenza dell'andamento nella direzione del moto, dove si osservava l'alternarsi di deformazioni per compressione e trazione;
- le entità delle deformazioni sono tali da rientrare nel campo elastico del calcestruzzo per entrambe le miscele;
- la deformazione compressiva è molto maggiore nella Miscela 2, il che dipende da un modulo elastico inferiore, come detto nel *paragrafo 4.3.4*;
- la pendenza della curva deformativa è maggiore nella Miscela 3, con un brusco passaggio dai valori massimi ai valori più bassi; nella Miscela 2 il gradiente della

curva risulta minore, con una diminuzione della deformazione con la distanza più graduale e quindi causa di minore stress nella sovrastruttura in calcestruzzo;

DISTRIBUZIONE DELLE DEFORMAZIONI NELLA SEZIONE TRASVERSALE

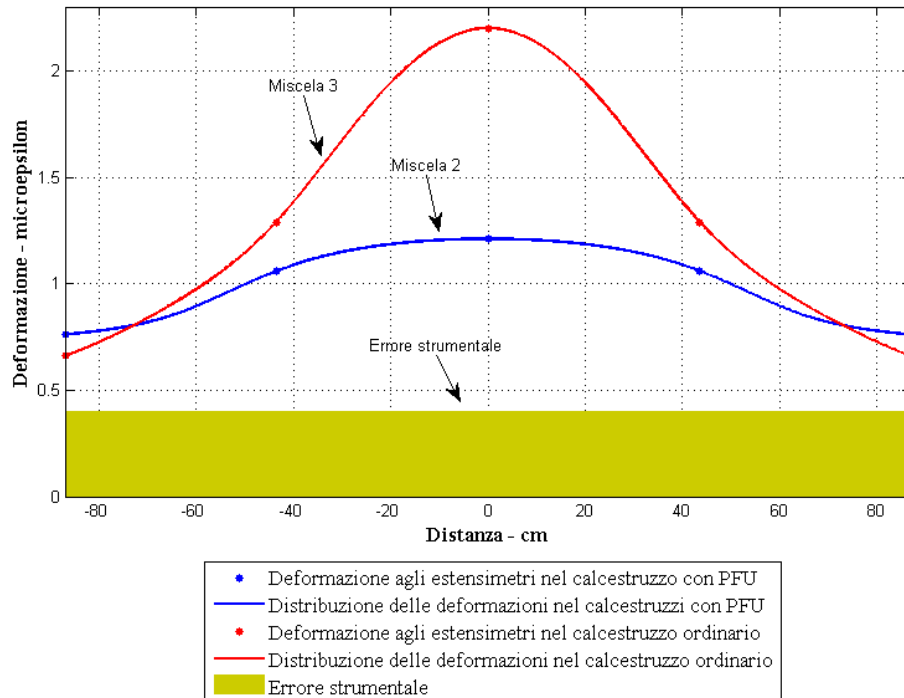


Figura 117: Interpolazione delle deformazioni per trazione nella sezione trasversale al moto per ruota singola.

Nella Figura 117 è mostrato l'andamento deformativo nella sezione trasversale della sovrastruttura stradale nell'istante in cui si osserva la massima deformazione per trazione sull'estensimetro centrato dalla ruota. Anche in questo caso in ascissa è rappresentata la distanza dal punto di passaggio della ruota e in ordinata la deformazione corrispondente. Le interpolanti hanno un errore quadratico medio dai valori misurati di deformazione pari a 0.01 per la Miscela 2 e 0.21 per la Miscela 3.

Dal grafico è possibile osservare che:

- negli istanti in cui l'estensimetro allineato con il passaggio della ruota ($x=0$) misura la massima deformazione per trazione, tutta la sezione trasversale attraversa uno stato deformativo per trazione;
- anche in questo caso le entità delle deformazioni rientrano nel campo elastico del calcestruzzo per entrambe le miscele secondo la stima effettuata nel *paragrafo 4.4*;
- la deformazione massima nella Miscela 3 risulta doppia rispetto alla Miscela 2, che sopporta meglio la sollecitazione per trazione. Questo comportamento riveste

grande importanza in considerazione del fatto che gli sforzi per trazione sono spesso causa di ammaloramento delle pavimentazioni in calcestruzzo, poiché questo materiale ha scarsa resistenza a trazione. In aggiunta si deve considerare che tali deformazioni, applicate ripetutamente, possono provocare rottura per fatica o comunque ammaloramento della superficie stradale anche se il materiale rimane in stato elastico. Il calcestruzzo additivato con PFU si deforma meno del calcestruzzo ordinario e quindi è minore il danno subito dalla pavimentazione realizzata con la Miscela 2;

- l'andamento deformativo con la distanza nella Miscela 3 presenta un gradiente elevato, con rapida diminuzione della deformazione all'aumentare della distanza che è causa di maggiore stress nella sezione trasversale della pavimentazione; nella Miscela 2 l'andamento deformativo varia molto lentamente con la distanza riducendo lo stress nella sovrastruttura in calcestruzzo.

DISTRIBUZIONE DELLE DEFORMAZIONI NELLA SEZIONE TRASVERSALE

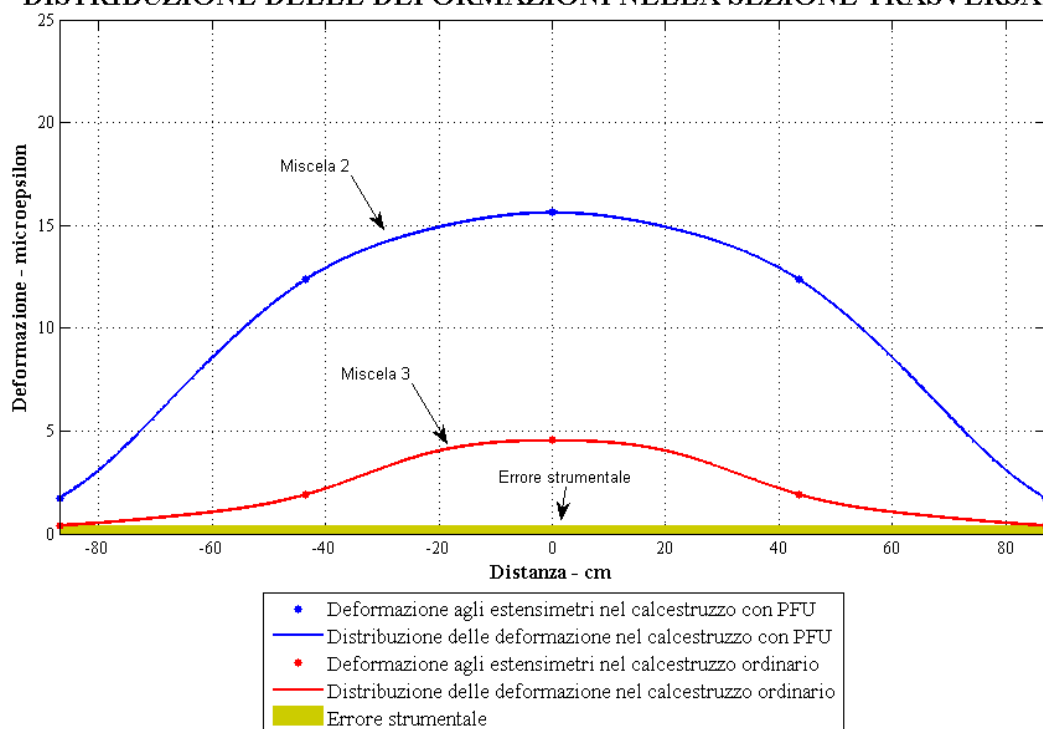


Figura 118: Interpolazione delle deformazioni compressive nella sezione trasversale al moto per ruota gemella.

Nella Figura 118 è mostrato l'andamento deformativo indotto dalle ruote gemelle posteriori nella sezione trasversale della sovrastruttura stradale nell'istante in cui si osserva la massima deformazione compressiva sull'estensimetro centrato dalla ruota. Le interpolanti hanno un errore quadratico medio dai valori misurati di deformazione pari a 2 per la Miscela 2 e 0.44 per la Miscela 3.

Dal grafico è possibile osservare che:

- l'andamento deformativo mostra una zona deformata molto più ampia rispetto alla deformazione generata dalla ruota singola, a causa dell'aumento dell'area di contatto delle ruote gemellate con la pavimentazione;
- sempre per l'aumento dell'area di contatto la deformazione massima risulta inferiore rispetto alla ruota singola;
- non è stato possibile valutare il comportamento deformativo tra le ruote a causa dell'interasse ridotto tra le ruote posteriori;
- lo stato deformativo sembra meno sfavorevole rispetto a quello indotto dalla ruota singola per la minore deformazione massima e per il minore gradiente della deformazione con la distanza dalle ruote.

Nella Figura 119 è mostrato l'andamento deformativo indotto dalle ruote gemelle posteriori nella sezione trasversale della sovrastruttura stradale nell'istante in cui si osserva la massima deformazione per trazione sull'estensimetro centrato dalla ruota. Le interpolanti hanno un errore quadratico medio dai valori misurati di deformazione pari a 0.08 per la Miscela 2 e 0.05 per la Miscela 3.

DISTRIBUZIONE DELLE DEFORMAZIONI NELLA SEZIONE TRASVERSALE

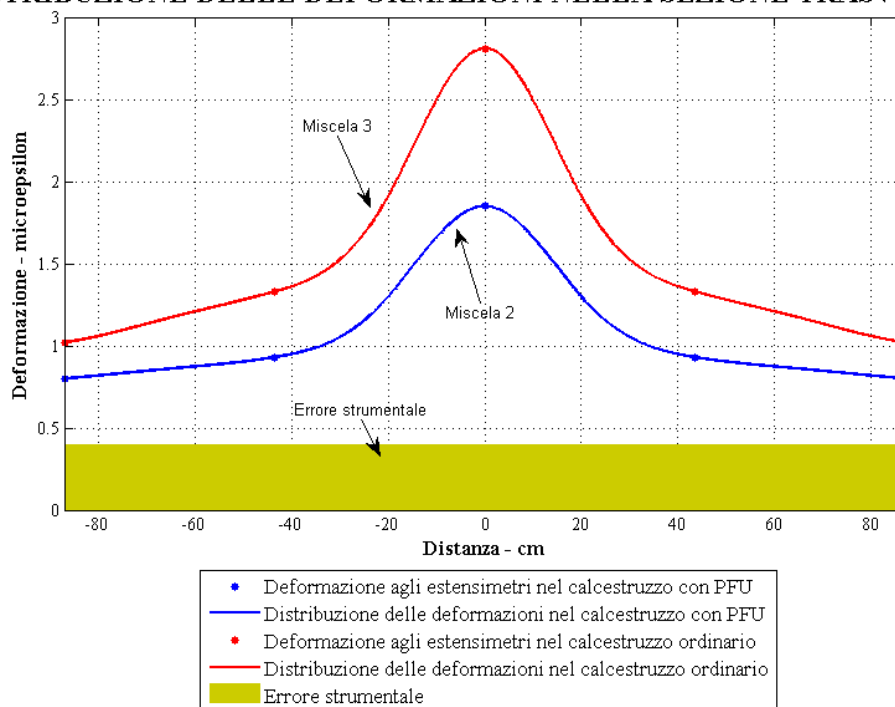


Figura 119: Interpolazione delle deformazioni per trazione nella sezione trasversale al moto per ruota gemella.

Dal grafico è possibile osservare che:

- l'andamento deformativo mostra una zona deformata molto più ampia rispetto alla deformazione generata dalla ruota singola, a causa dell'aumento dell'area di contatto delle ruote gemellate con la pavimentazione;
- la deformazione massima per trazione aumenta notevolmente;
- lo stato deformativo risulta peggiorato rispetto a quello indotto dalla ruota singola per l'aumento della deformazione massima e del gradiente della deformazione con la distanza dalle ruote, in misura maggiore per la Miscela 3.

6.5 Lo stato tensionale nella sezione trasversale

Il comportamento del calcestruzzo, almeno per bassi valori di sollecitazione, può considerarsi elastico, per cui è ammissibile considerare una proporzionalità tra tensione e deformazione secondo la Legge di Hooke $\sigma=E*\epsilon$. Le deformazioni misurate dagli estensimetri nel calcestruzzo sono molto basse, per cui possiamo considerare che esista una proporzionalità tra esse e le sollecitazioni che le hanno prodotte. Il modulo elastico o modulo di Young E è il coefficiente di proporzionalità che lega queste grandezze. Esso ci permette di stimare le sollecitazioni associate alle deformazioni misurate nella sovrastruttura stradale.

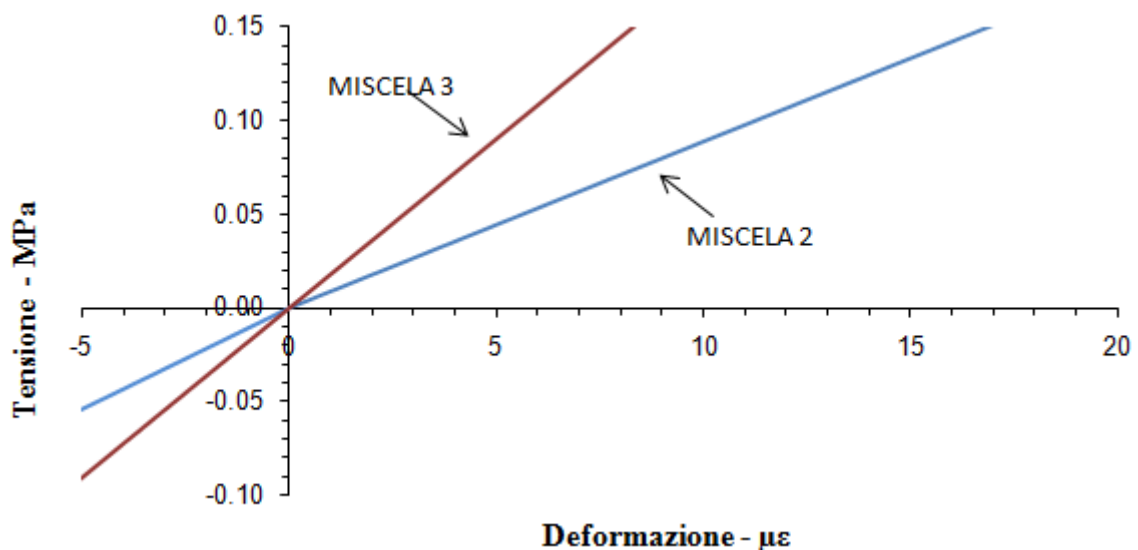


Figura 120: Andamento sforzo-deformazione delle miscele.

In Figura 120 è rappresentato il grafico sforzo-deformazione delle due miscele. Qui di seguito verrà ricostruito lo stato tensionale della sezione trasversale della pavimentazione al passaggio delle ruote. In Figura 121 è mostrato il primo tratto del ramo di carico dell'andamento sforzo-deformativo risultato dalla prova di compressione monoassiale illustrata nel *paragrafo 4.4*, da cui sono stati ricavati i moduli elastici tangenti per le due miscele. Si sottolinea come la medesima sollecitazione (0.04 MPa) provochi nelle due miscele diverse deformazioni, indicate dalle frecce, per il diverso modulo elastico delle due miscele. Ovvero valori diversi di deformazione nelle due pavimentazioni corrispondono alla medesima sollecitazione indotta dalla ruota del veicolo.

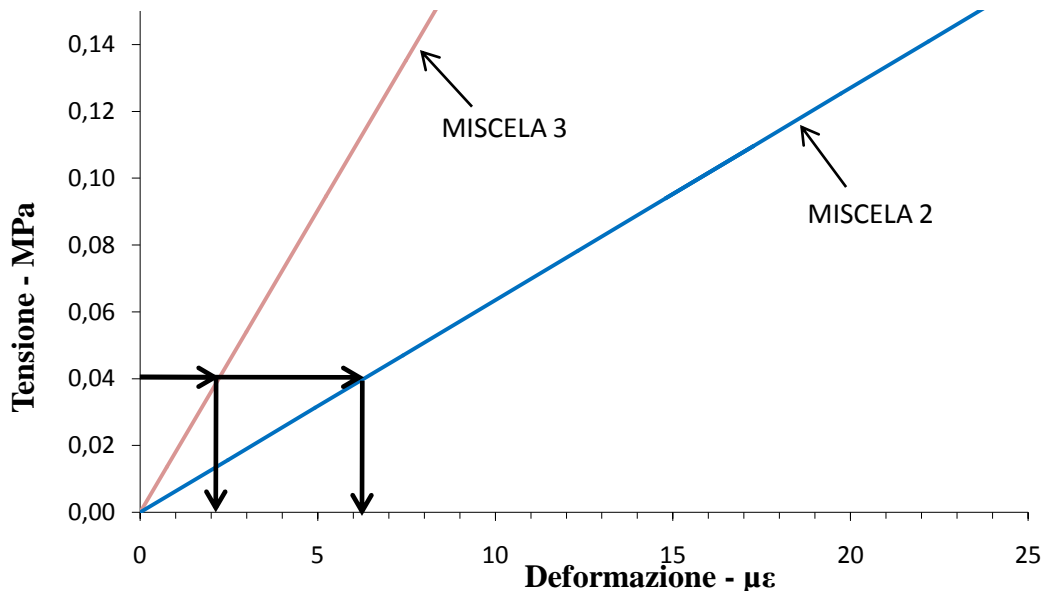


Figura 121: Grafico sforzo-deformazione da prova di compressione monoassiale.

In Figura 122 è rappresentato l'andamento sforzo-deformativo stimato per trazione nel *paragrafo 4.4*. Anche in questo caso si osserva che alla medesima sollecitazione corrispondono diverse deformazioni. Si vuole quindi ricostruire la sollecitazione corrispondente alle deformazioni misurate nel calcestruzzo nella sezione trasversale della pavimentazione. Dall'andamento trasversale della deformazione descritto nel *paragrafo precedente*, si ottiene lo stato tensionale trasversale al moto attraverso il coefficiente di proporzionalità E_t ricavato dalla prova di compressione monoassiale per le due miscele. Dalle prove di laboratorio la Miscela 2 ha evidenziato un modulo

elastico $E_t=5001\text{MPa}$, che risulta essere molto basso per il calcestruzzo e ci indica che esso ha un maggiore deformazione elastica rispetto al calcestruzzo ordinario.

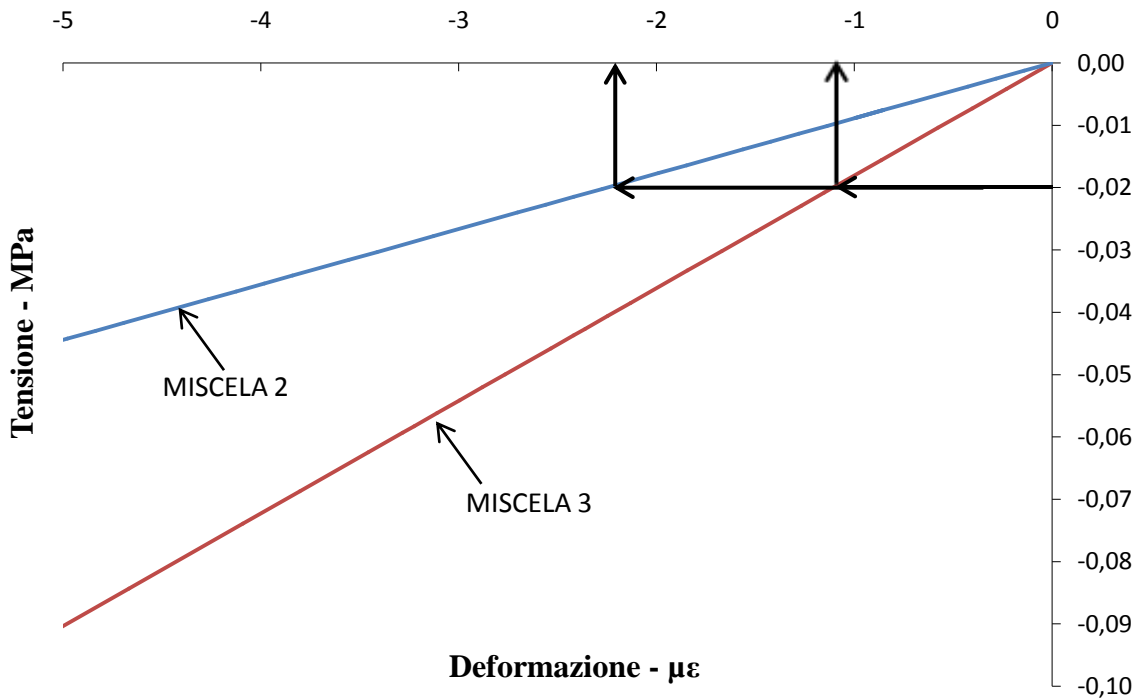


Figura 122: Andamento sforzo-deformativo stimato per la trazione.

Applicando la Legge di Hooke ai valori deformativi della sezione trasversale, si ricavano i valori di tensione in corrispondenza degli estensimetri. In Tabella 29 sono riassunti i valori di tensione alle distanze 0 , 43.5 e 87 cm dal punto di passaggio della ruota.

Tabella 29: Tensioni nella sezione trasversale per il calcestruzzo additivato con PFU (Miscela 2).

Distanza	cm	0	43.5	87
RUOTA SINGOLA	Compressione (N/mm²)	0.1000	0.0620	0.0060
	Trazione (N/mm²)	0.0061	0.0053	0.0038
RUOTA GEMELLA	Compressione (N/mm²)	0.0781	0.0618	0.0088
	Trazione (N/mm²)	0.0093	0.0047	0.0040

Dalle prove di laboratorio la Miscela 3 ha evidenziato un modulo elastico $E_t=18070\text{MPa}$, che è un valore tipico per il calcestruzzo. Applicando quindi la Legge di Hooke ai valori deformativi della sezione trasversale si ricavano i valori di tensione in corrispondenza degli estensimetri. In Tabella 30 sono riassunti i valori di tensione alle distanze 43.5 cm e 87 cm dal punto di passaggio della ruota. Dal confronto tra le tensioni massime si osserva che la Miscela 2 presenta una compressione massima (0.10 N/mm^2) inferiore rispetto alla Miscela 3 (0.16 N/mm^2). Anche la trazione massima è inferiore nella Miscela 2 (0.01 N/mm^2) rispetto alla Miscela 3 (0.05 N/mm^2).

Tabella 30: Tensioni nella sezione trasversale per il calcestruzzo ordinario (Miscela 3).

Distanza		cm	0	43.5	87
RUOTA SINGOLA	Compressione (N/mm^2)		0.1554	0.0289	0.0054
	Trazione (N/mm^2)		0.0398	0.0233	0.0119
RUOTA GEMELLA	Compressione (N/mm^2)		0.0820	0.0345	0.0072
	Trazione (N/mm^2)		0.0508	0.0240	0.0184

Applichiamo il criterio di verifica della sovrastruttura stradale secondo la P.C.A. (Portland Cement Association) per le sollecitazioni provocate dai carichi di traffico. Verifichiamo che i valori di tensione non superino il 20% rispetto alla resistenza a trazione e compressione del calcestruzzo. Nel calcolo sarà considerata solo la sollecitazione derivante dal carico del veicolo, senza considerare quelle dovute ad altri fattori, quali le variazioni termiche. Per cautelarsi in questo senso viene adottato un coefficiente di sicurezza, che per le aree critiche della pavimentazione aeroportuale è compreso nell'intervallo 1.7-2. Agendo in questo modo si ha un sufficiente margine di sicurezza anche nei riguardi del fenomeno di fatica (20). Per la Miscela 2 si ha un valore di compressione massima pari a $\sigma_{c-\max}=20.10\text{ N/mm}^2$ e un valore di trazione stimato di $\sigma_{t-\max}=1.97\text{ N/mm}^2$.

Si osserva che i criteri di verifica sono soddisfatti:

$$\sigma_c = 0.1000 \frac{N}{mm^2} < \frac{0.2 \times \sigma_{c-max}}{2} = 2.01 N/mm^2$$

$$\sigma_t = 0.0093 \frac{N}{mm^2} < \frac{0.2 \times \sigma_{t-max}}{2} = 0.197 /mm^2$$

Per la Miscela 3 si ha un valore di compressione massima pari a $\sigma_{c-max}=46.65 \text{ N/mm}^2$ e un valore di trazione stimato di $\sigma_{t-max}=3.59 \text{ N/mm}^2$.

Allo stesso modo si può osservare che il criterio risulta verificato:

$$\sigma_c = 0.1554 \frac{N}{mm^2} < 0.1 \times \sigma_{c-max} = 4.665 N/mm^2$$

$$\sigma_t = 0.0093 \frac{N}{mm^2} < 0.1 \times \sigma_{t-max} = 0.359 \text{ N/mm}^2$$

I valori di tensione indicati in Tabella 29 e Tabella 30 possono essere interpolati in modo da descrivere l'andamento nella sezione trasversale della pavimentazione. Sono state ricavate le seguenti interpolanti $y(x)$ per la **compressione indotta dalla ruota singola** in una sezione trasversale ($-1740 \text{ mm} < x < 1740 \text{ mm}$) della pavimentazione in calcestruzzo additivato con PFU (Miscela 2) e in calcestruzzo ordinario (Miscela 3):

- Interpolante per Miscela 2:

per $-870 \text{ mm} < x < -599 \text{ mm}$ e $599 \text{ mm} < x < 870 \text{ mm}$

$$y_{iper-retta}(x) = -0.0018 + \frac{0.53 \times 232^3}{|x|^3} - \frac{|x|}{6000000}$$

per $-599 \text{ mm} < x < 599 \text{ mm}$

$$y_{parabola-retta}(x) = 0.1 - \frac{x^2}{5000000} - \frac{|x|}{10^{21}}$$

- Interpolante per Miscela 3:

per $-870 \text{ mm} < x < -199 \text{ mm}$ e $199 \text{ mm} < x < 870 \text{ mm}$

$$y_{iper-retta}(x) = 0.035 + \frac{1919}{x^2} - \frac{|x|}{25000}$$

per $-199 \text{ mm} < x < 199 \text{ mm}$

$$y_{\text{parabola-retta}}(x) = 0.1554 - \frac{x^2}{500000} - \frac{|x|}{10^{21}}$$

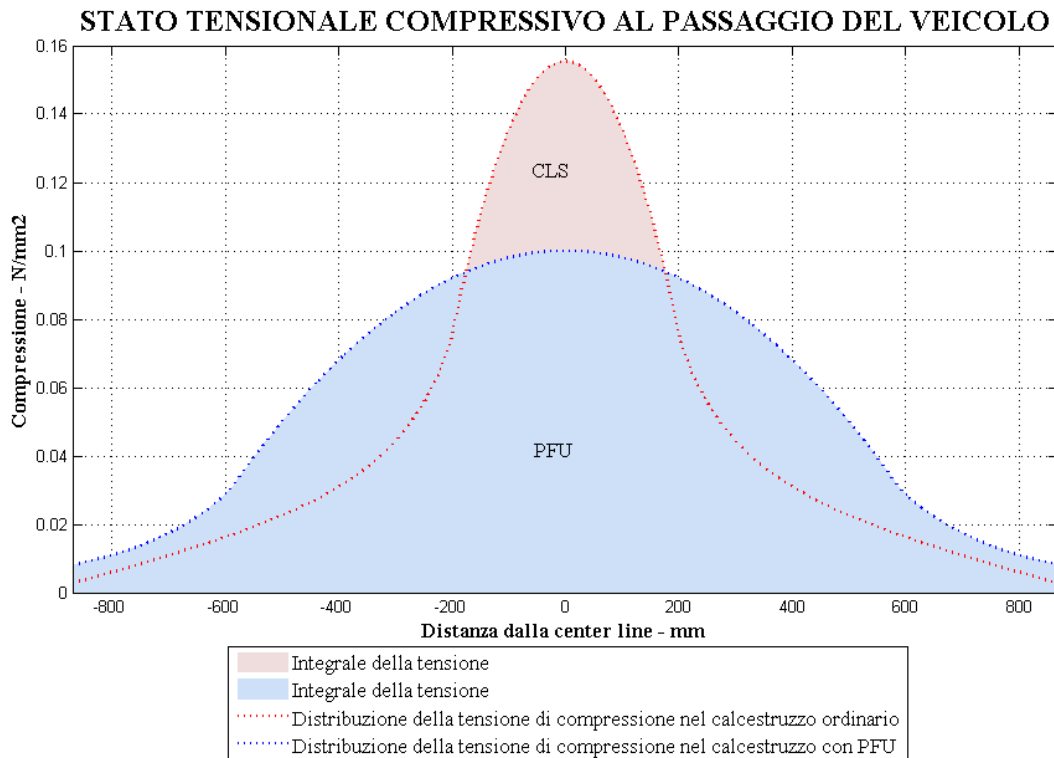


Figura 123: Stato tensionale per compressione nella sezione normale al moto – ruota singola.

In Figura 123 sono rappresentate le interpolanti sopra descritte: in ordinata è indicata la compressione in funzione della distanza dal punto di passaggio della ruota (asse x).

Dal grafico è possibile osservare che:

- lo stato tensionale indotto per compressione rientra nel campo elastico delle miscele di calcestruzzo;
- contrariamente a quanto visto per le deformazioni, la compressione massima è maggiore nella Miscela 3;
- l'andamento tensionale della Miscela 3 è caratterizzato da una forte pendenza della curva, il che vuol dire che il gradiente della compressione con la distanza è molto forte. Allontanandosi di 60 cm dal punto di passaggio della ruota si riscontra una compressione pari al 10% di quella massima. Tale “salto” crea un forte stress nel calcestruzzo;
- la Miscela 2 presenta un andamento tensionale più distribuito rispetto al punto di passaggio della ruota, con differenziale inferiore rispetto alla Miscela 3;

L'area sottesa dalle curve di compressione corrisponde al carico trasmesso dalla ruota singola sul tratto di pavimentazione trasversale di 174 cm e dovrebbe essere lo stesso per entrambe le sezioni della pavimentazione poiché il carico verticale trasmesso dalla ruota è costante.

Verifichiamo quanto valgono gli integrali di tali aree nelle due miscele:

- Integrale d'area per la Miscela 2:

$$\begin{aligned}
 Area_{M2} &= 2 \times \left(\int_0^{599} y_{parabola-retta}(x) dx + \int_{599}^{870} y_{iper-retta}(x) dx \right) \\
 &= 2 \times \left\{ \int_0^{599} \left(0.1 - \frac{x^2}{5000000} - \frac{|x|}{10^{21}} \right) dx \right. \\
 &\quad \left. + \int_{599}^{870} \left(-0.0018 + \frac{0.53 \times 232^3}{|x|^3} - \frac{|x|}{6000000} \right) dx \right\} \\
 &= \frac{100.8N}{mm} = 0.1008N/m
 \end{aligned}$$

- Integrale d'area per la Miscela 3:

$$\begin{aligned}
 Area_{M3} &= 2 \times \left(\int_0^{199} y_{parabola-retta}(x) dx + \int_{199}^{870} y_{iper-retta}(x) dx \right) \\
 &= 2 \times \left\{ \int_0^{199} \left(0.1554 - \frac{x^2}{500000} - \frac{|x|}{10^{21}} \right) dx \right. \\
 &\quad \left. + \int_{199}^{870} \left(0.035 + \frac{1919}{x^2} - \frac{|x|}{25000} \right) dx \right\} \\
 &= \frac{84.46N}{mm} = 0.08446N/m
 \end{aligned}$$

Le aree sottese dalle interpolanti, rappresentanti il carico trasmesso dalla ruota per unità di lunghezza, hanno valori simili, anche se non perfettamente coincidenti. Questa differenza corrisponde a un errore che vale:

$$errore = \frac{Area_{M2} - Area_{M3}}{Area_{M2}} \times 100 = \frac{100.8 - 84.46}{100.8} \times 100 = 16.2\%$$

L'errore è imputabile a diversi fattori, quali le condizioni al contorno durante il rilievo, come la velocità del mezzo e la precisione nel passaggio sugli estensimetri, gli errori di stima legati all'interpolazione dei dati e l'impossibilità di stimare l'andamento delle tensione al di fuori della sezione considerata.

Ricaviamo quindi le interpolanti $y(x)$ per la **trazione indotta dalla ruota singola** nella sezione trasversale della pavimentazione in calcestruzzo additivato con PFU (Miscela 2) e in calcestruzzo ordinario (Miscela 3):

- Interpolante per Miscela 2:

per $-870 \text{ mm} < x < -649 \text{ mm}$ e $649 \text{ mm} < x < 870 \text{ mm}$

$$y_{iper-retta}(x) = 0.00339 + \frac{0.06 \times 170^3}{|x|^3} - \frac{|x|}{11000000}$$

per $-649 \text{ mm} < x < 649 \text{ mm}$

$$y_{parabola-retta}(x) = 0.0062 - \frac{x^2}{235 \times 10^6} - \frac{|x|}{10^{21}}$$

- Interpolante per Miscela 3:

per $-870 \text{ mm} < x < -399 \text{ mm}$ e $399 \text{ mm} < x < 870 \text{ mm}$

$$y_{iper-retta}(x) = 0.0215 + \frac{400000}{|x|^3} - \frac{|x|}{100000}$$

per $-399 \text{ mm} < x < 399 \text{ mm}$

$$y_{parabola-retta}(x) = 0.04 - \frac{x^2}{10^7} - \frac{9 \times |x|}{10^9}$$

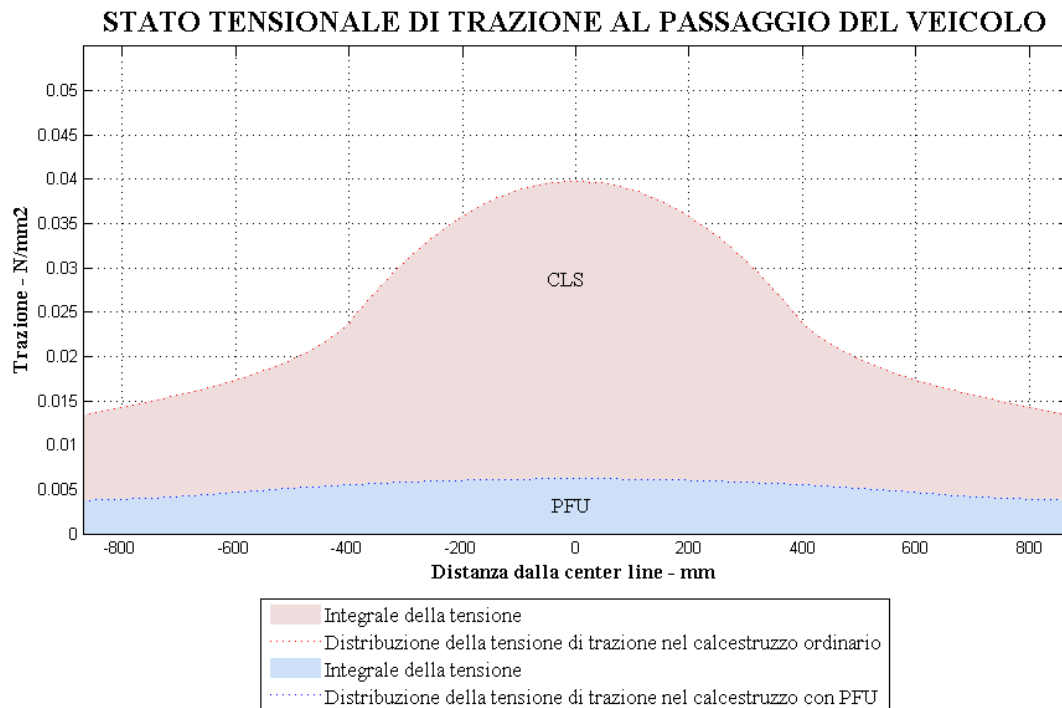


Figura 124: Stato tensionale per trazione nella sezione normale al moto – ruota singola.

Nel grafico di Figura 124 sono rappresentate le interpolanti sopra descritte: in ordinata è indicata la trazione in funzione della distanza dal punto di passaggio della ruota (asse x).

Dal grafico è possibile osservare che:

- lo stato tensionale indotto per trazione rientra nel campo elastico delle miscele di calcestruzzo;
- come visto per le deformazioni, la trazione massima è maggiore nella Miscela 3;
- l'andamento deformativo della Miscela 3 è caratterizzato da una pendenza della curva maggiore rispetto a quello della Miscela 2;
- la Miscela 2 presenta uno stato tensionale di un ordine di grandezza inferiore rispetto alla Miscela 3 e più distribuito con la distanza dal punto di passaggio della ruota;

Ricavate le interpolanti $y(x)$ per la **compressione indotta dalle ruote gemelle**:

- Interpolante per Miscela 2:

per $-870 \text{ mm} < x < -649 \text{ mm}$ e $649 \text{ mm} < x < 870 \text{ mm}$

$$y_{iper-retta}(x) = 0.0092 + \frac{0.5 \times 258^3}{|x|^3} - \frac{|x|}{110000}$$

per $-649 \text{ mm} < x < 649 \text{ mm}$

$$y_{parabola-retta}(x) = 0.079 - \frac{x}{9500000} - \frac{|x|}{10^{21}}$$

- Interpolante per Miscela 3:

per $-870 \text{ mm} < x < -451 \text{ mm}$ e $451 \text{ mm} < x < 870 \text{ mm}$

$$y_{iper-retta}(x) = 0.006 + \frac{2500000}{|x|^3} - \frac{|x|}{450000}$$

per $-451 \text{ mm} < x < 451 \text{ mm}$

$$y_{parabola-retta}(x) = 0.083 - \frac{x^2}{4000000} - \frac{9 \times |x|}{10^7}$$

Rappresentiamo in Figura 125 le interpolanti sopra descritte, con in ordinata la compressione e in ascissa la distanza dal punto di passaggio della ruota.

Dal grafico è possibile osservare che:

- lo stato tensionale compressivo rientra nel campo elastico delle miscele di calcestruzzo;
- la compressione massima è maggiore nella Miscela 3;
- l'andamento della curva nella Miscela 3 è caratterizzato da una pendenza maggiore rispetto a quello della Miscela 2;

- lo stato tensionale indotto dal passaggio delle ruote gemellate è inferiore a quello visto per la ruota singola sia per intensità che per gradiente della curva;

STATO TENSIONALE COMPRESSIVO AL PASSAGGIO DELLE RUOTE GEMELLATE

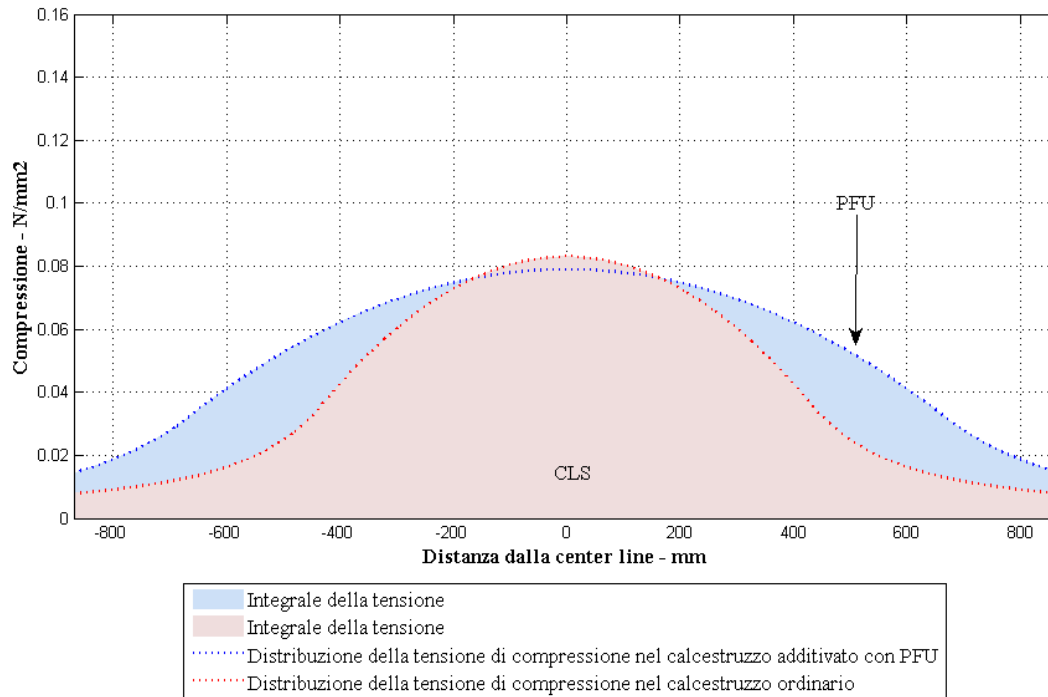


Figura 125: Stato tensionale per compressione nella sezione normale al moto – ruota gemellata.

E infine sono state ricavate le interpolanti $y(x)$ per la **trazione indotta dalle ruote gemelle** nella sezione trasversale dei due tratti della pavimentazione:

- Interpolante per Miscela 2:

per $-870 \text{ mm} < x < -149 \text{ mm}$ e $149 \text{ mm} < x < 870 \text{ mm}$

$$y_{iper-retta}(x) = 0.00555 + \frac{0.038 \times 55^3}{|x|^3} - \frac{|x|}{600000}$$

per $-149 \text{ mm} < x < 149 \text{ mm}$

$$y_{parabola-retta}(x) = 0.0094 - \frac{x^2}{10^7} - \frac{|x|}{10^{25}}$$

- Interpolante per Miscela 3:

per $-870 \text{ mm} < x < -199 \text{ mm}$ e $199 \text{ mm} < x < 870 \text{ mm}$

$$y_{iper-retta}(x) = 0.025 + \frac{70000}{|x|^3} - \frac{|x|}{150000}$$

per $-199 \text{ mm} < x < 199 \text{ mm}$

$$y_{parabola-retta}(x) = 0.051 - \frac{x^2}{2100000} - \frac{9 \times |x|}{10^{11}}$$

Anche in questo caso rappresentiamo le interpolanti sopra descritte con in ordinata la trazione e in ascissa la distanza dal punto di passaggio della ruota.

STATO TENSIONALE DI TRAZIONE AL PASSAGGIO DELLE RUOTE GEMELLATE

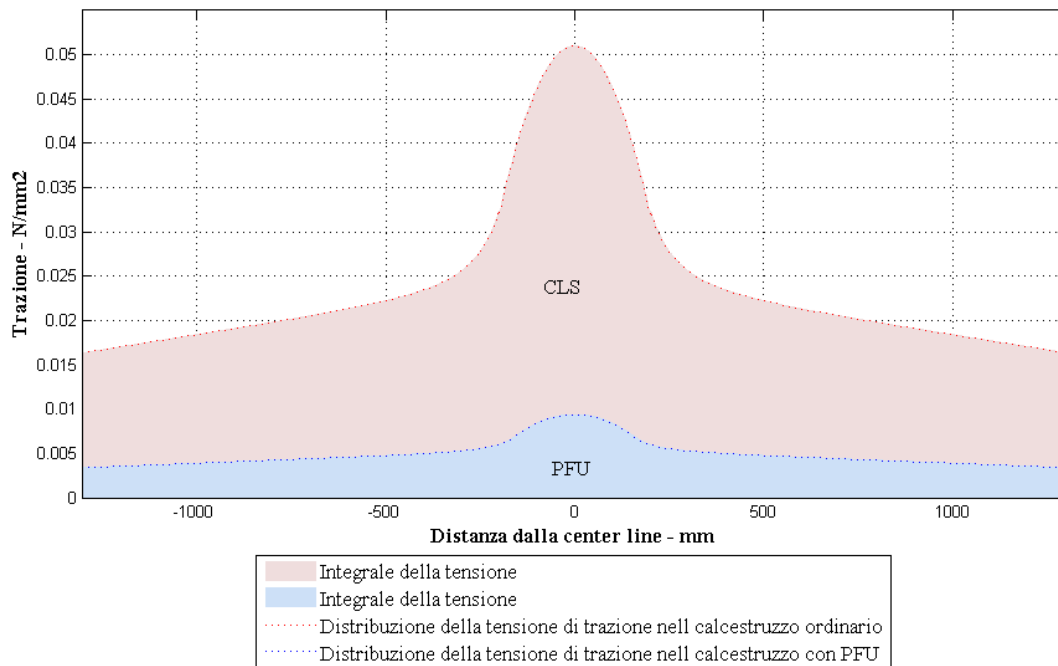


Figura 126: Stato tensionale per trazione nella sezione normale al moto – ruota gemellata.

Dal grafico è possibile osservare che:

- lo stato tensionale per trazione rientra nel campo elastico delle miscele di calcestruzzo;
- la trazione massima è maggiore nella Miscela 3;
- l'andamento tensionale della Miscela 3 è caratterizzato da una pendenza della curva maggiore rispetto a quello della Miscela 2;
- lo stato tensionale indotto dal passaggio delle ruote gemellate nella Miscela 2 è simile a quello visto per la ruota singola, anche se con un gradiente leggermente più sfavorevole;
- lo stato tensionale indotto dal passaggio delle ruote gemellate nella Miscela 3 è leggermente maggiore rispetto a quello visto per la ruota singola, con un gradiente molto più sfavorevole;

6.6 Il comportamento deformativo nelle due dimensioni

Per ricostruire il comportamento deformativo complessivo della pavimentazione si deve considerare l'andamento nella direzione del moto, evidenziato nel *paragrafo 6.3.1*, insieme alla distribuzione trasversale al moto descritta nel *paragrafo 6.4*. L'analisi svolta nella direzione del moto sui dati rilevati dal singolo estensimetro ha mostrato l'alternarsi di deformazioni positive per trazione e deformazioni negative per compressione sotto la ruota.

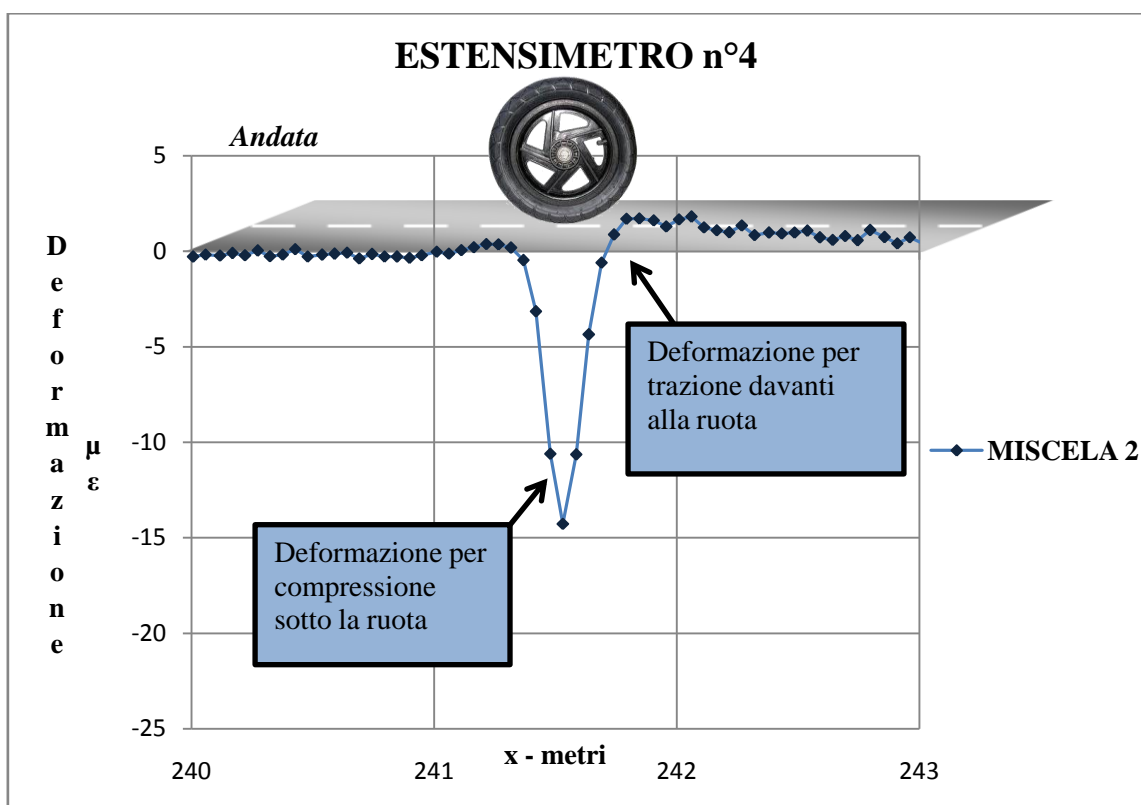


Figura 127: Andamento deformativo nella direzione del moto all'estensimetro n°4.

Come si vede in Figura 127, l'andamento deformativo misurato dall'estensimetro n°4 è caratterizzato da un tratto compressivo, dovuto al carico verticale trasmesso dalla ruota, che mostra deformazione massima in valore assoluto in corrispondenza del centro della ruota, e che decresce allontanandosi da esso fino ad annullarsi alla distanza di 45 cm. A distanza superiore si osserva un'inversione del segno della deformazione, che non è più determinata dal peso del veicolo, ma dalla trazione esercitata sulla pavimentazione dalla forza di attrito che si instaura con lo pneumatico. Dall'osservazione delle misure effettuate dagli estensimetri nella sezione trasversale al moto non si presenta invece inversione di segno nella deformazione: quando l'estensimetro centrale misura una deformazione per compressione, gli estensimetri adiacenti misurano sempre

deformazioni positive, di intensità decrescenti con la distanza dal punto di passaggio della ruota, come rappresentato in Figura 116; quando invece la deformazione centrale è negativa per trazione, nella sezione trasversale si osservano deformazioni sempre positive, decrescenti con la distanza, come si vede in Figura 117. In Figura 128 è rappresentato l'andamento bidimensionale della deformazione intorno al punto di contatto tra ruota e pavimentazione in $(x,y,z)=(0,0,0)$: in ascissa viene indicata la distanza dalla ruota nella direzione del moto, in ordinata la distanza normale al moto e lungo z l'intensità della deformazione. L'alternarsi degli stati deformativi lungo l'asse x determina l'andamento a semionda rappresentato in figura, che provoca quindi una sollecitazione di fatica vera e propria nella pavimentazione: nelle sezioni trasversali antistanti la ruota a distanze superiori a 45 cm si osserva una deformazione per trazione, mentre avvicinandosi alla ruota si osservano sezioni trasversali con distribuzione delle deformazioni per compressione.

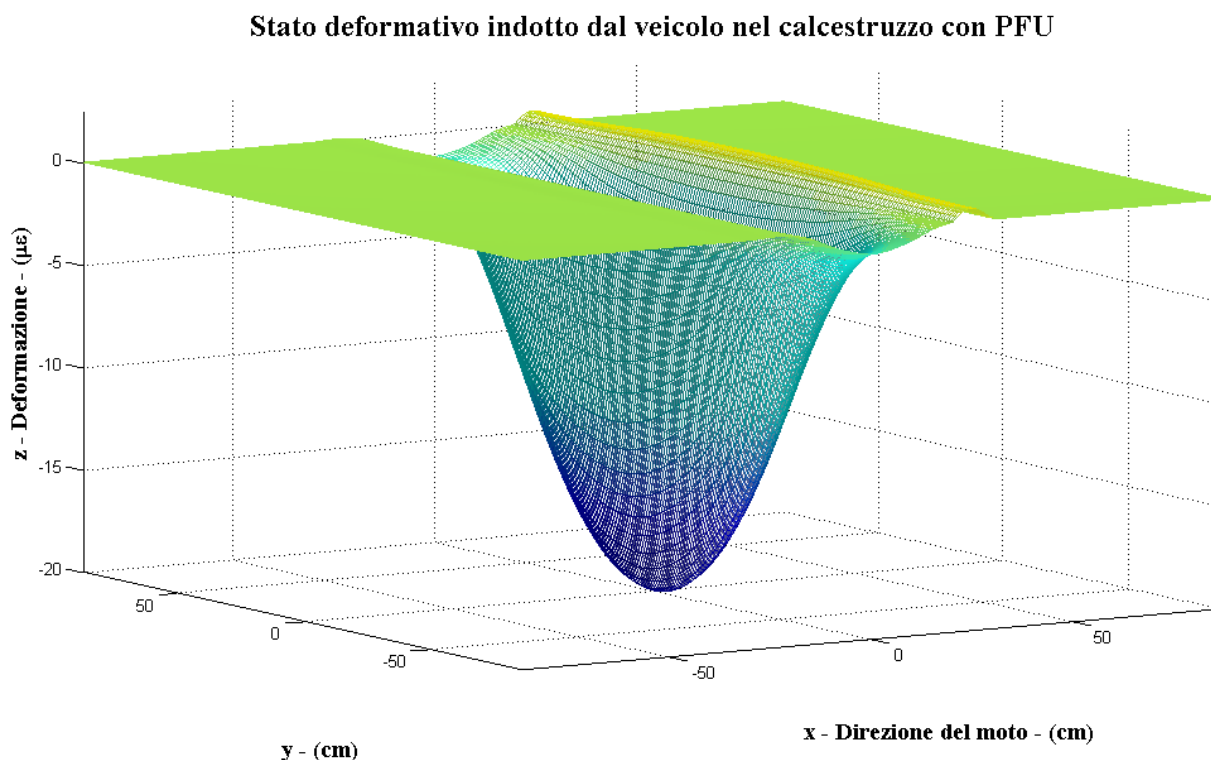


Figura 128: Andamento deformativo complessivo della pavimentazione in calcestruzzo additivato con PFU.

Gli stati deformativi per trazione sono rappresentati nei colori dal giallo al rosso, secondo l'intensità, in verde abbiamo la pavimentazione in condizioni indisturbate, mentre la deformazione per compressione varia dal celeste al blu. L'andamento

deformativo complessivo è riferito all'istante in cui il centro dell'area di contatto tra la ruota e la pavimentazione si trova in $(x,y,z)=(0,0,0)$. Al variare della posizione della ruota lungo x , la deformazione si propaga come un'onda nella pavimentazione, traslando lungo x ma conservando la stessa forma. L'andamento deformativo complessivo della pavimentazione nel tempo è stato ricostruito in una animazione realizzata in ambiente Matlab, tramite un codice di programmazione (M-file) illustrato in APPENDICE. Anche per la sovrastruttura realizzata in calcestruzzo ordinario è stato ricostruito l'andamento deformativo complessivo partendo dal diverso andamento nelle due dimensioni.

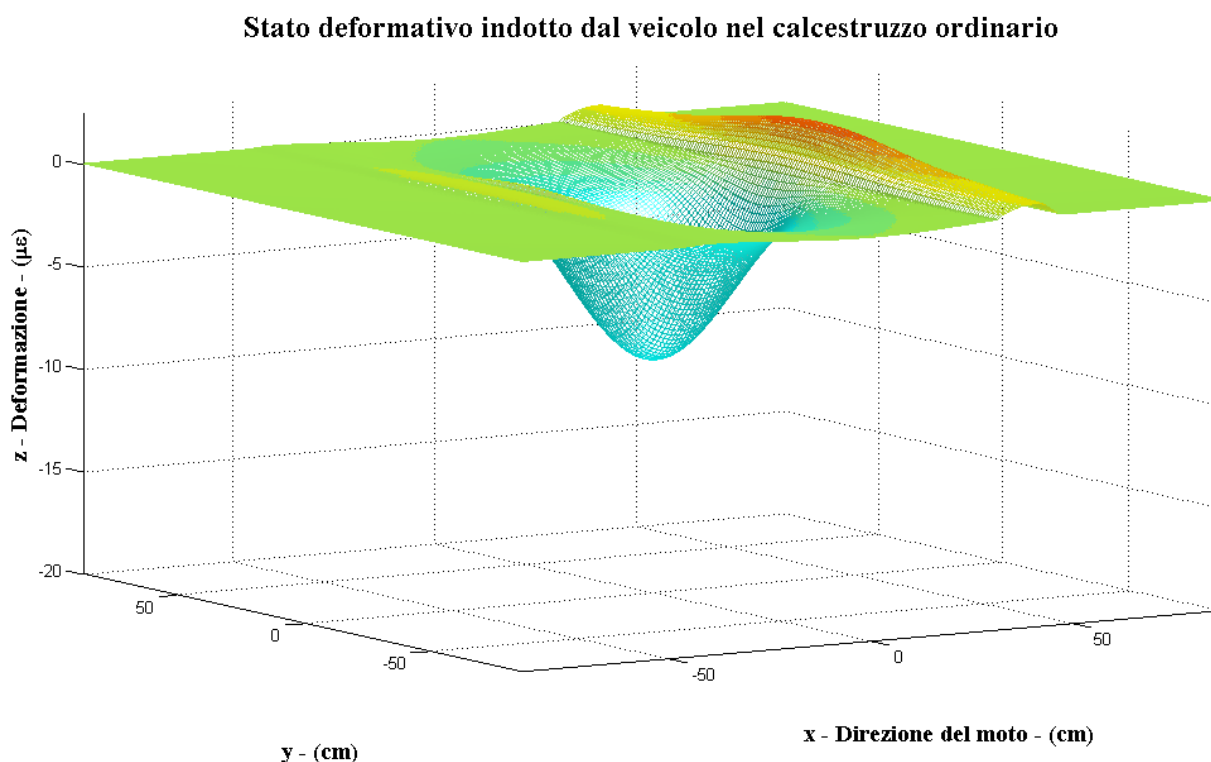


Figura 129: Andamento deformativo complessivo della pavimentazione in calcestruzzo ordinario.

In Figura 129 è rappresentata la deformazione (asse z) nella superficie bidimensionale per il calcestruzzo ordinario: in ascissa abbiamo la distanza dalla ruota nella direzione del moto e in ordinata la sezione trasversale al moto. Anche in questo caso si ha deformazione per trazione nelle sezioni trasversali ($-87 \text{ cm} < y < 87 \text{ cm}$) a distanza $x > 45 \text{ cm}$ dall'origine. Per $x < 45 \text{ cm}$ la deformazione diventa compressiva nella sezione. La pavimentazione indisturbata è indicata in verde, la deformazione per trazione varia tra il giallo e il rosso secondo l'intensità, la deformazione per compressione tra il celeste

e il blu. L'andamento deformativo complessivo nel tempo è stato ricostruito con una animazione il cui M-file è presente in APPENDICE.

Dall'osservazione dei grafici si può affermare che:

- nella direzione del moto si alternano stati deformativi differenti, con una inversione di segno davanti alla ruota, alla distanza di 45 cm dall'origine;
- la pavimentazione in calcestruzzo additivato con PFU presenta deformazione compressiva superiore a quella in calcestruzzo ordinario per il diverso modulo elastico;
- la pavimentazione in calcestruzzo ordinario presenta una deformazione per trazione superiore a quella riscontrata nella pavimentazione in calcestruzzo con PFU;
- il salto da deformazione compressiva a deformazione per trazione crea nella pavimentazione condizioni fortemente stressanti;
- il rapporto tra deformazione massima per trazione e deformazione massima per compressione è molto più alto nella sovrastruttura stradale in calcestruzzo ordinario.

6.7 Lo stato tensionale nella pavimentazione

Come detto nel *paragrafo 6.5*, è ammissibile considerare una proporzionalità tra tensione e deformazione secondo la Legge di Hooke $\sigma = E \cdot \varepsilon$ per basse sollecitazioni. Utilizzando quindi il modulo elastico tangente è stato modellato lo stato tensionale complessivo della pavimentazione a partire da quello deformativo indicato nel paragrafo precedente. In Figura 130 si è ricavato lo stato tensionale complessivo della sovrastruttura stradale in calcestruzzo additivato con PFU utilizzando il modulo elastico tangente $E_t = 5001$ MPa ricavato dalle prove di compressione monoassiale di laboratorio sulla Miscela 2. La figura, che si riferisce al passaggio della ruota singola anteriore del veicolo, presenta in ascissa la distanza dalla ruota nella direzione del moto ($-87 \text{ cm} < x < 87 \text{ cm}$) e in ordinata la distanza lungo la sezione trasversale al moto ($-87 \text{ cm} < y < 87 \text{ cm}$).

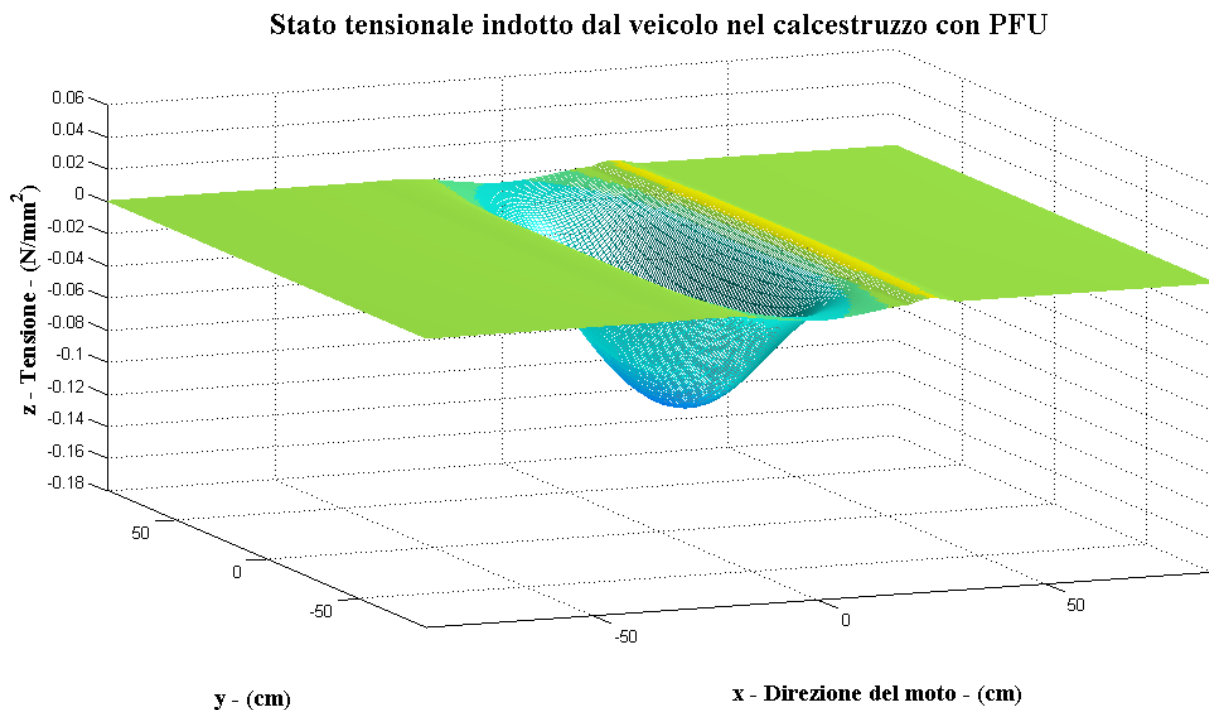


Figura 130: Stato tensionale complessivo della pavimentazione in calcestruzzo con PFU – ruota singola.

Allo stesso modo si è ricavato lo stato tensionale della pavimentazione in calcestruzzo ordinario, utilizzando in questo caso il modulo elastico tangente $E_t=18070$ MPa ricavato sulla Miscela 3. Tale andamento è stato rappresentato in Figura 131 sempre per la ruota singola anteriore.

Dall’osservazione delle figure si può affermare che:

- lo stato tensionale indotto nelle sovrastrutture stradali rientra nel campo elastico delle miscele di calcestruzzo;
- i valori di tensione massima sono riscontrati nella Miscela 3 sia per trazione che per compressione;
- l’andamento tensionale della Miscela 3 è caratterizzato da gradienti maggiori, il che vuol dire che si ha un brusco passaggio da alti valori di trazione a alti valori di compressione. Tale “salto” crea un forte stress nel calcestruzzo;
- la Miscela 2 presenta un andamento tensionale più distribuito nella pavimentazione rispetto alla Miscela 3, con un passaggio meno brusco da stati di trazione a stati di compressione;

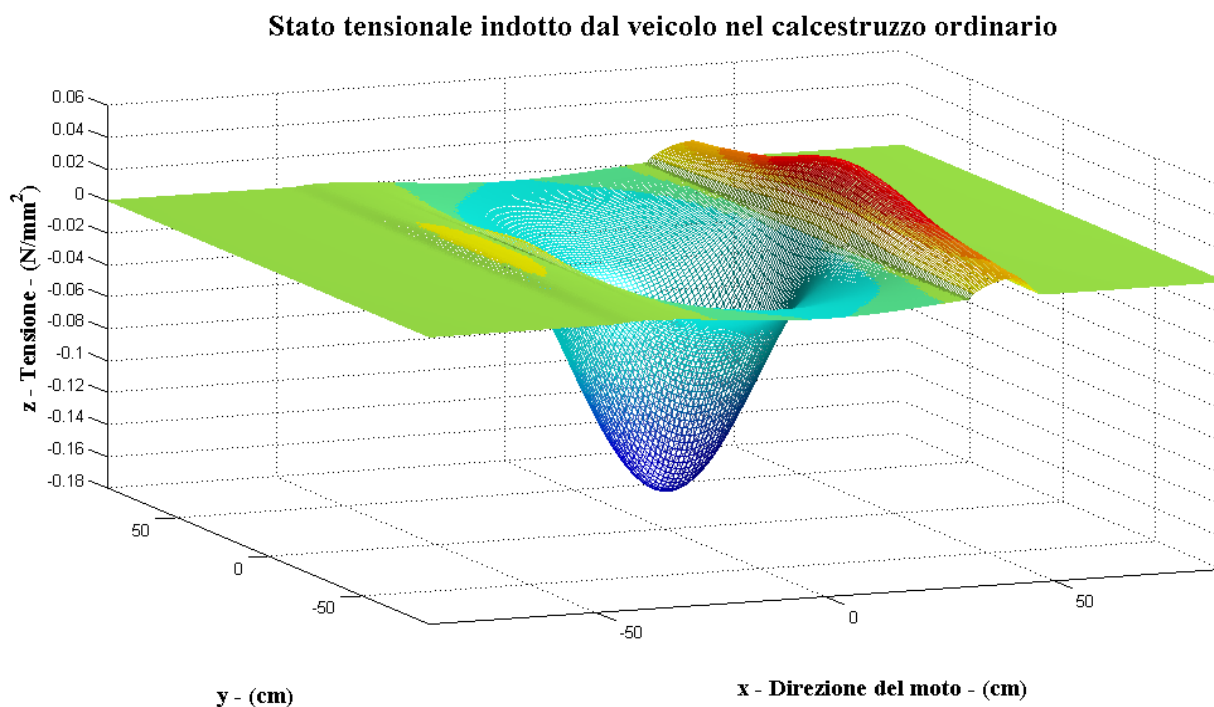


Figura 131: Stato tensionale complessivo della pavimentazione in calcestruzzo ordinario - ruota singola.

Anche in questo caso la distribuzione delle tensioni è riferita all'istante in cui il centro dell'area di contatto tra la ruota e la pavimentazione si trova in $(x,y,z)=(0,0,0)$. Al variare della posizione della ruota lungo x , l'andamento tensionale si propaga come un'onda nella pavimentazione, traslando lungo x ma conservando la stessa forma. Tale andamento complessivo della pavimentazione nel tempo è stato ricostruito in una animazione realizzata in ambiente Matlab, tramite un codice di programmazione (M-file) illustrato in APPENDICE. Infine si rappresenta nelle Figure 132-133 lo stato tensionale complessivo indotto dalle ruote anteriori e posteriori del veicolo nelle due pavimentazioni realizzate in calcestruzzo additivato con PFU e calcestruzzo ordinario.

Stato tensionale indotto dal veicolo nel calcestruzzo con PFU

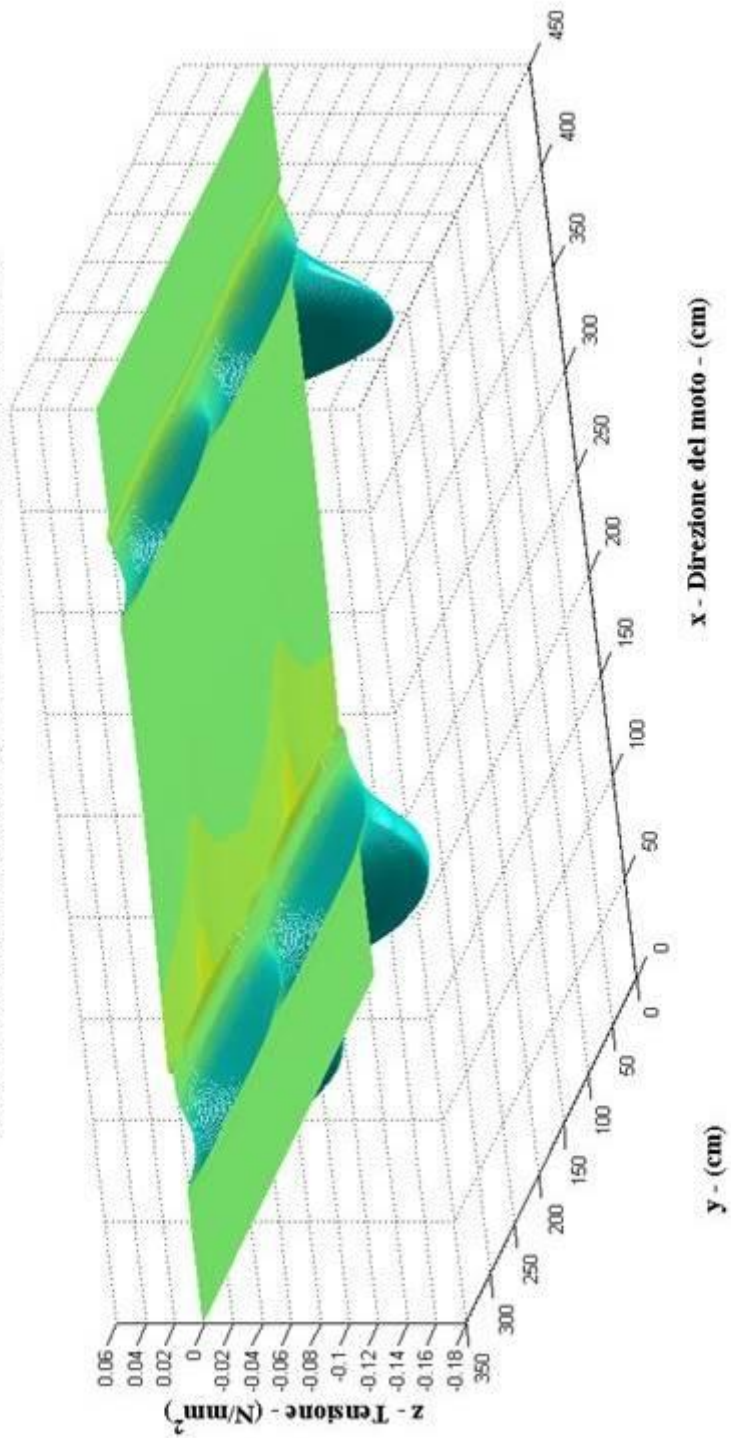


Figura 132: Stato tensionale della pavimentazione in calcestruzzo con PFU sotto il veicolo di prova.

Stato tensionale indotto dal veicolo nel calcestruzzo ordinario

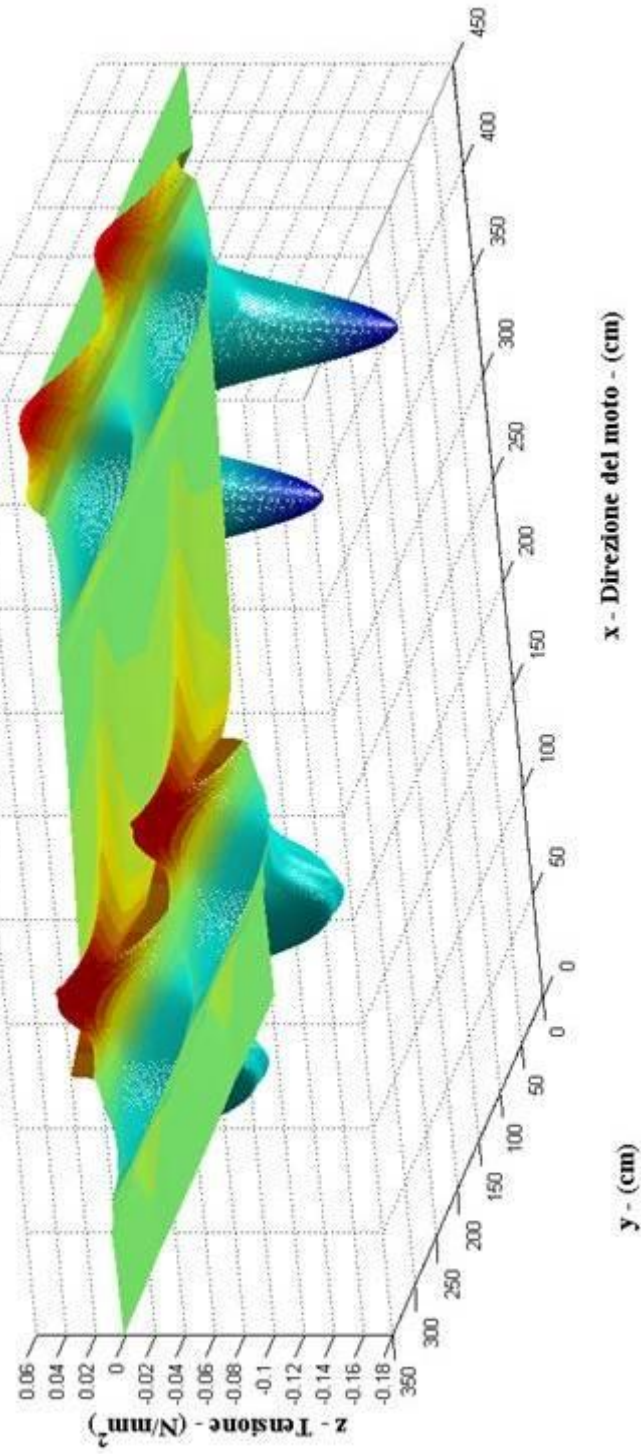


Figura 133: Deformazione della pavimentazione in calcestruzzo ordinario sotto il veicolo di prova.

6.8 Conclusioni

Nel presente capitolo sono state affrontate le operazioni necessarie al rilievo in situ dei dati sperimentali e quindi la loro elaborazione. Le operazioni preliminari al rilievo sono state utili a fornirci la misura della sensibilità del sistema di monitoraggio, da cui si desume un limite di $0.4 \mu\epsilon$ al di sotto del quale non consideriamo le misure di deformazione attendibili. Si è anche considerato l'effetto del gradiente termico giornaliero sulla deformazione, in modo da "depurare" il segnale da tale condizionamento esterno. L'osservazione della distorsione termica nelle due pavimentazioni ha inoltre evidenziato una prima considerevole differenza tra le miscele: il calcestruzzo ordinario (Miscela 3) subisce una deformazione termica di entità doppia rispetto al calcestruzzo additivato con PFU (Miscela 2) per lo stesso gradiente termico. Quest'ultimo presenta quindi minore rischio di fessurazione legata alla variazione di volume di origine termiche. E' stata quindi affrontata la fase del rilievo delle misure di deformazione al passaggio del veicolo di prova. I dati raccolti sono stati riassunti nelle Tabelle 25 e 26. La deformazione misurata per compressione ha raggiunto valori maggiori nella Miscela 2 per il minore modulo elastico di questa. La deformazione per trazione ha mostrato valori più elevati nella Miscela 3. L'interpolazione delle misure negli estensimetri disposti lungo la sezione trasversale al moto ha evidenziato che le deformazioni sono maggiormente distribuite nella Miscela 2, che presenta un gradiente inferiore delle deformazioni con la distanza. La Miscela 3 ha un andamento caratterizzato da forte variazione della deformazione nella sezione trasversale. In particolare la deformazione per trazione presenta per la Miscela 3 una distribuzione trasversale maggiormente gravosa sulla pavimentazione. Infatti, anche se le deformazioni restano nel campo elastico del calcestruzzo ordinario, la ripetizione dei carichi è in grado di provocare l'ammaloramento della pavimentazione o addirittura la rottura per fatica. Quest'aspetto riveste grande importanza in considerazione della scarsa resistenza del calcestruzzo ordinario a trazione. La Miscela 2 si deforma meno per trazione, quindi minore è il danno subito dalla pavimentazione in calcestruzzo additivato con PFU. L'analisi delle deformazioni dovute alle ruote gemelle ha mostrato un peggioramento dello stato deformativo per trazione nel calcestruzzo. Si è quindi

ricostruito lo stato tensionale al passaggio del veicolo nella pavimentazione sfruttando la proporzionalità tra tensione e deformazione per basse sollecitazioni secondo la Legge di Hooke. Nelle Tabelle 27 e 28 sono mostrati i valori di tensione delle miscele da cui è stato ricavato l'andamento nella sezione trasversale al moto. La Miscela 3 presenta valori di trazione e compressione maggiori. I valori massimi di tensione sono stati sottoposti al criterio di verifica della sovrastruttura stradale secondo la P.C.A. (Portland Cement Association) per le sollecitazioni provocate dai carichi di traffico. I criteri di verifica sono stati soddisfatti per entrambe le miscele. L'andamento tensionale ha mostrato una maggiore distribuzione nella sezione trasversale per la Miscela 2, con un gradiente della curva inferiore rispetto alla Miscela 3. La Miscela 2 ha fornito un comportamento meccanico favorevole rispetto alle problematiche connesse con le pavimentazioni aeroportuali. La distribuzione di tensioni modeste su di un'area più vasta infatti espone la sovrastruttura stradale a minore rischio di fessurazione e ormaiamento, principale causa di ammaloramento delle sovrastrutture stradali aeroportuali. Il calcestruzzo additivato con PFU ha mostrato complessivamente un miglior comportamento rispetto al calcestruzzo ordinario sia in relazione ai picchi di tensione osservati, sia in relazione al gradiente della tensione con la distanza. In considerazione di ciò si può ritenere tale applicazione sperimentale una valida alternativa alle pavimentazioni rigide tradizionale in calcestruzzo ordinario.

LE CONCLUSIONI E GLI SVILUPPI FUTURI

In base alle rilevazioni effettuate in situ e all'elaborazione dei dati si possono trarre le seguenti conclusioni:

- La distorsione termica osservata nelle due pavimentazioni produce effetti diversi nelle due miscele: il calcestruzzo ordinario (Miscela 3) subisce una deformazione termica di entità doppia rispetto al calcestruzzo additivato con PFU (Miscela 2) per lo stesso gradiente termico. Quest'ultimo presenta quindi minore rischio di fessurazione legata alla variazione di volume di origine termo-igrometriche;
- La deformazione misurata per compressione ha raggiunto valori maggiori nella Miscela 2, dovuti ad un modulo elastico minore, rispetto alla Miscela 3;
- La deformazione per trazione ha mostrato valori più elevati nella Miscela 3, con una distribuzione trasversale molto gravosa sulla pavimentazione a causa di un elevato gradiente con la distanza. Questo, combinato con l'applicazione ciclica dei carichi, può causare la formazione di fessurazione e l'ammaloramento della pavimentazione stradale, anche in considerazione della scarsa resistenza del calcestruzzo a trazione;
- La Miscela 2 si deforma meno per trazione, e quindi minore è il danno subito dalla pavimentazione;
- L'analisi delle deformazioni dovute alle ruote gemelle ha mostrato un peggioramento delle condizioni indotte nelle pavimentazioni di calcestruzzo;
- Il criterio di verifica della sovrastruttura stradale secondo la P.C.A. (Portland Cement Association) per le sollecitazioni provocate dai carichi di traffico ha mostrato che entrambe le miscele sono adeguate alle sollecitazioni indotte nella pavimentazione dal veicolo di prova. Questa verifica fornisce sufficienti margini di sicurezza anche nei riguardi del fenomeno di fatica;
- L'analisi tensionale delle pavimentazioni ha evidenziato che la Miscela 3 presenta valori di trazione e compressione maggiori;

- L'andamento tensionale ha mostrato una maggiore distribuzione nella sezione trasversale per la Miscela 2, con un gradiente della curva inferiore rispetto alla Miscela 3;
- La Miscela 2 ha fornito un comportamento meccanico favorevole rispetto alle problematiche connesse con le pavimentazioni aeroportuali. La distribuzione di tensioni modeste su di un'area più vasta infatti espone la sovrastruttura stradale a minore rischio di fessurazione e rottura a fatica, principale causa di ammaloramento delle sovrastrutture stradali in calcestruzzo.

Il calcestruzzo additivato con PFU ha mostrato complessivamente un miglior comportamento rispetto al calcestruzzo ordinario sia in relazione ai picchi di tensione osservati, sia in relazione al gradiente della tensione con la distanza. La maggiore deformabilità permette inoltre alla miscela sperimentale oggetto del presente studio di assorbire parte delle vibrazioni indotte dalle irregolarità superficiali sugli aeromobili.

L'analisi dei costi legati alla realizzazione e manutenzione delle pavimentazioni rigida e flessibile presso l'Aeroporto "Guglielmo Marconi" ha mostrato i seguenti risultati:

- il costo delle materie prime e le spese necessarie alla preparazione delle miscele sono inferiori nel caso della pavimentazione rigida considerata;
- la pavimentazione rigida presenta una minore necessità d'interventi di manutenzione con conseguenze di carattere economico che non possono essere trascurate;
- le riparazioni possono essere effettuate con maggiore rapidità nelle pavimentazioni di tipo flessibile, consentendo la massima utilizzabilità nel tempo della sovrastruttura stradale.

In conclusione, il calcestruzzo additivato con PFU si è rivelato idoneo ad essere utilizzato in campo aeroportuale, in quanto, ad elevate resistenze meccaniche tipiche delle pavimentazioni rigide, associa maggiori deformazioni rispetto al calcestruzzo ordinario. La pavimentazione realizzata con questo conglomerato cementizio sembra assorbire su di un'area più estesa le deformazioni indotte dai movimenti dell'aereo, attutendo il colpo meglio delle pavimentazioni in calcestruzzo ordinario. In considerazione di ciò si può ritenere tale applicazione sperimentale una valida alternativa alle pavimentazioni rigide tradizionali.

In considerazione dei risultati forniti dal calcestruzzo additivato con PFU sarebbe opportuno testare in modo più specifico tale miscela con ulteriori prove di laboratorio volte a determinare la resistenza a fatica. Per verificare, inoltre, l'efficacia di tale miscela nelle pavimentazioni aeroportuali sarebbe utile proseguire nella sperimentazione intrapresa all'Aeroporto "Guglielmo Marconi" potenziando il sistema di monitoraggio attraverso un sistema di controllo remoto tipo GPRS, che permetta il rilevamento in via continuativa attraverso un pannello di controllo remoto. L'acquisizione continua garantirebbe una popolazione più ampia di dati e quindi maggiore consistenza nella elaborazione dei risultati.

APPENDICE

- **M-file per animazione dello stato deformativo nella Miscela 2:**

```
load def_anim; % carica in workspace la matrice delle deformazioni
[X,Y]=meshgrid(xcm);
Z2=Z2i;
scrsz = get(0,'ScreenSize');
figure('OuterPosition',[4 scrsz(2)+28 scrsz(3) scrsz(4)-20])
h2=mesh(X,Y,Z2); % costruisce il grafico in 3D
colormap(Jet);
caxis([-20 8]);
axis([-87 87 -87 87 -20 2.5]);
axis ij;
axis vis3d;
axis on;
whitebg('w');
zoom(1.1);
alpha(0.2);
view([-125 20]),camlight (-90,100,'local'),camtarget([0,0,0]);
title('Stato deformativo indotto dal veicolo nel calcestruzzo con
PFU','FontName','Times New
Roman','FontSize',18,'FontWeight','bold');
xlabel('y - (cm)','FontName','Times New
Roman','FontSize',14,'FontWeight','bold');
ylabel('x - Direzione del moto - (cm)','FontName','Times New
Roman','FontSize',14,'FontWeight','bold');
zlabel('z - Deformazione - (µepsilon)','FontName','Times New
Roman','FontSize',14,'FontWeight','bold');
set(h2,'ZDataSource','Z2');
Z21=Z2i;
% Animazione dell'andamento deformativo
for i=0:size(Z21,1)-1
    Z2=[Z21(size(Z21,1)-i:size(Z21,1),:);zeros(size(Z21,1)-
(i+1),size(Z21,2))];
    view([-120+i*0.09 22-i*0.05])
    refreshdata
    drawnow
end
for i=1:size(Z2,1)
    Z2=[zeros(i,size(Z21,2));[Z21(1:size(Z21,1)-i,:)]];
    view([-104.43+i*0.09 13.25-i*0.05])
    refreshdata
    drawnow
end
```

- **M-file per animazione dello stato deformativo nella Miscela 3:**

```
load def_anim; % carica in workspace la matrice delle deformazioni
[X,Y]=meshgrid(xcm);
Z3=Z3i;
scrsz = get(0,'ScreenSize');
```

```

figure('OuterPosition',[4 scrsz(2)+28 scrsz(3) scrsz(4)-20])
h3=mesh(X,Y,Z2); % costruisce il grafico in 3D
colormap(Jet);
caxis([-20 8]);
axis([-87 87 -87 87 -20 2.5]);
set(gca,'ZTick', [-20:5:2.5], 'XTick', [-100:50:100], 'YTick', [-100:50:100]);
axis ij;
daspect([1 1 0.2]);
axis on;
whitebg('w');
zoom(1.25);
alpha(0.2);
view([-120 12]),camlight (-100,90,'local'),camtarget([0,0,0]);
title('Stato deformativo indotto dal veicolo nel calcestruzzo con
PFU','FontName','Times New
Roman','FontSize',18,'FontWeight','bold');
xlabel('y - (cm)','FontName','Times New
Roman','FontSize',14,'FontWeight','bold');
ylabel('x - Direzione del moto - (cm)','FontName','Times New
Roman','FontSize',14,'FontWeight','bold');
zlabel('z - Deformazione - (\mu\epsilon)','FontName','Times New
Roman','FontSize',14,'FontWeight','bold');
set(h2,'ZDataSource','Z2');
Z21=Z2i;
% Animazione dell'andamento deformativo
for i=0:size(Z31,1)-1
    Z3=[Z31(size(Z31,1)-i:size(Z31,1),:);zeros(size(Z31,1)-
(i+1),size(Z31,2))];
    view([-120+i*0.09 22-i*0.05])
    refreshdata
    drawnow
end
for i=1:size(Z3,1)
    Z3=[zeros(i,size(Z31,2));[Z31(1:size(Z31,1)-i,:)]];
    view([-104.43+i*0.09 13.25-i*0.05])
    refreshdata
    drawnow
end
end

```

- ***M-file per animazione dello stato tensionale nella Miscela 2:***

```

load def_anim; % carica in workspace la matrice delle tensioni
[X,Y]=meshgrid(xcm);
T2=T2i;
scrsz = get(0,'ScreenSize');
figure('Position',[4 scrsz(2)+28 scrsz(3) scrsz(4)-20])
whitebg([1 1 1]);
h2=mesh(X,Y,T2); % costruisce il grafico in 3D
colormap(Jet);
caxis([-0.18 0.08]);
axis([-87 87 -87 87 -0.18 0.06]);
set(gca,'ZTick', [-0.18:0.02:0.06], 'XTick', [-100:50:100],
'YTick', [-100:50:100]);
axis ij;
daspect([1 1 0.0015]);
axis on;
whitebg('w');
zoom(1.25);

```



```

alpha(0.2);
view([-118 14]),camlight (-90,110,'local'),camtarget([0,0,0]);
title('Stato tensionale indotto dal veicolo nel calcestruzzo con
PFU','FontName','Times New
Roman','FontSize',18,'FontWeight','bold');
xlabel('y - (cm)','FontName','Times New
Roman','FontSize',14,'FontWeight','bold');
ylabel('x - Direzione del moto - (cm)','FontName','Times New
Roman','FontSize',14,'FontWeight','bold');
zlabel('z - Tensione - (N/mm^2)','FontName','Times New
Roman','FontSize',14,'FontWeight','bold');
set(h2,'ZDataSource','T2');
T21=T2i;
% Animazione dell'andamento tensionale
for i=0:size(T21,1)-1
    T2=[T21(size(T21,1)-i:size(T21,1),:);zeros(size(T21,1)-
(i+1),size(T21,2))];
    view([-120+i*0.09 22-i*0.05])
    refreshdata
    drawnow
end
for i=1:size(T21,1)
    T2=[zeros(i,size(T21,2));[T21(1:size(T21,1)-i,:)]];
    view([-104.43+i*0.09 13.25-i*0.05])
    refreshdata
    drawnow
end
end

```

- ***M-file per animazione dello stato tensionale nella Miscela 3:***

```

load def_anim; % carica in workspace la matrice delle tensioni
[X,Y]=meshgrid(xcm);
T3=T3i;
scrsz = get(0,'ScreenSize');
figure('Position',[4 scrsz(2)+28 scrsz(3) scrsz(4)-20])
whitebg([1 1 1]);
h3=mesh(X,Y,T3); % costruisce il grafico in 3D
colormap(Jet);
caxis([-0.18 0.08]);
axis([-87 87 -87 87 -0.18 0.06]);
set(gca,'ZTick',[-0.18:0.02:0.06],'XTick',[-100:50:100],
'YTick',[-100:50:100]);
axis ij;
daspect([1 1 0.0015]);
axis on;
whitebg('w');
zoom(1.25);
alpha(0.2);
view([-118 14]),camlight (-90,110,'local'),camtarget([0,0,0]);
title('Stato tensionale indotto dal veicolo nel calcestruzzo
ordinario','FontName','Times New
Roman','FontSize',18,'FontWeight','bold');
xlabel('y - (cm)','FontName','Times New
Roman','FontSize',14,'FontWeight','bold');
ylabel('x - Direzione del moto - (cm)','FontName','Times New
Roman','FontSize',14,'FontWeight','bold');
zlabel('z - Tensione - (N/mm^2)','FontName','Times New
Roman','FontSize',14,'FontWeight','bold');

```

```

set(h3,'ZDataSource','T3');
T31=T3i;
% Animazione dell'andamento tensionale
for i=0:size(T31,1)-1
    T3=[T31(size(T31,1)-i:size(T31,1),:);zeros(size(T31,1)-(i+1),size(T31,2))];
    view([-120+i*0.09 22-i*0.05])
    refreshdata
    drawnow
end
for i=1:size(T31,1)
    T3=[zeros(i,size(T31,2));[T31(1:size(T31,1)-i,:)]];
    view([-104.43+i*0.09 13.25-i*0.05])
    refreshdata
    drawnow
end

```

BIBLIOGRAFIA

- (1) FISE Assoambiente, “Indagine sul riciclo dei pneumatici usati”, 2001;
- (2) World Business Council for Sustainable Development, “Managing End-of-life tyres”, 2008;
- (3) Legambiente, “Copertone Selvaggio - I numeri e le storie del traffico e dello smaltimento illegale di Pneumatici Fuori Uso (PFU) in Italia.”, 2010;
- (4) ETRMA, “End of life tyres”, 2010;
- (5) M. Bergonzoni, “Valorizzazione dei pneumatici fuori uso (PFU) attraverso il recupero e riciclaggio per la produzione di prodotti innovativi”, 2009;
- (6) M. Collepari, “Scienza e tecnologia del calcestruzzo”, HEOPLI, 1991;
- (7) M. Collepari, “Il nuovo calcestruzzo”, ENCO SRL, 2009;
- (8) M. Collepari, “Il calcestruzzo reoplastico”, 1975;
- (9) L. Bertolini, “Materiali da costruzione”, Volume 1, CittàStudi, 2006;
- (10) M. Collepari, “Admixtures-enhancing concrete performance”, 2005;
- (11) E. Ferretti, “A Discussion of Strain-Softening in Concrete”, International Journal of Fracture (Letters Section), Vol. 126, No.2, pp. L27-L34, 2004;
- (12) “Proprietà Efficaci dei Calcestruzzi con Pneumatici a Fine Uso (PFU)”, Valentina Serra, Corso di Laurea in Ingegneria Civile N.O. – Laurea Triennale, Tesi di Laurea in Sperimentazione dei Materiali dei Modelli e delle Strutture, A.A. 2005/2006, Relatore: Ing. Elena Ferretti, Correlatori: Prof. Maria Chiara Bignozzi, Ing. Luca Landi, Ing. Elena Casadio;
- (13) “Caratterizzazione Meccanica di Calcestruzzi Additivati con PFU: Possibili Applicazioni in Campo Aeroportuale”, Letizia Gaetti, Corso di Laurea in Ingegneria Edile/Architettura – Laurea a Ciclo Unico, Tesi di Laurea in Scienza delle Costruzioni, A.A. 2006/2007, Relatore: Prof. Erasmo Viola, Correlatori: Prof. Maria Chiara Bignozzi, Prof. Andrea Simone, Ing. Elena Ferretti;
- (14) “Calcestruzzi Additivati con PFU: una Proposta in Campo Aeroportuale”, Fabio Zambelli, Corso di Laurea in Ingegneria per l’Ambiente e il Territorio

- N.O. – Laurea Triennale, Tesi di Laurea in Scienza delle Costruzioni L, A.A. 2006/2007, Relatore: Ing. Elena Ferretti;
- (15) “Comportamento Ciclico di Calcestruzzi Additivati con PFU: Caratterizzazione Meccanica e Possibili Applicazioni”, Mara Cesano, Corso di Laurea in Ingegneria per l’Ambiente e il Territorio N.O. – Laurea Triennale, Tesi di Laurea in Scienza delle Costruzioni L, A.A. 2007/2008, Relatore: Ing. Elena Ferretti, Correlatore: Prof. Maria Chiara Bignozzi;
- (16) A. Di Tommaso, “Fondamenti di Scienza delle Costruzioni”, Parte I, PATRON EDITORE, 1995;
- (17) G. Rizzoni, “ Elettrotecnica. Principi e applicazioni”, McGraw-Hill, 2008;
- (18) G. Tesoriere, “Strade, ferrovie, aeroporti”, Volume 2, UTET, Torino 1974;
- (19) G. Tesoriere, “Strade, ferrovie, aeroporti. - Infrastrutture aeroportuali”, Volume 3, UTET, Torino 1993, pp. 243-287;
- (20) P. Giannattasio, “Il progetto delle pavimentazioni aeroportuali”, LITHORAPID, 1981;
- (21) ASTM, D 6270-98 (riapprovata nel 2004), “Standard practice for use of scrap tires in civil engineering applications”;
- (22) L. J. Murdock, “Magazine of Concrete Research”, Vol.135, No.12, 1960.

SITOGRAFIA

- (23) www.bologna-airport.it
- (24) www.ambientediritto.it
- (25) www.csiro.an
- (26) www.ecopneus.it
- (27) www.etrma.org
- (28) www.wbcasd.org
- (29) www.borsarifiuti.com
- (30) www.google.it
- (31) www.wikipedia.org