

# **Università degli Studi di Bologna**

---

## **FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

### **DISTART**

Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti,  
delle Acque, del Rilevamento e del Territorio

*Corso di Laurea in Ingegneria Civile – Indirizzo Infrastrutture*

*Insegnamento:* **INSERIMENTO E COMPATIBILITA'**

**DELLE INFRASTRUTTURE NEL TERRITORIO**

## **STUDIO SPERIMENTALE DI METODOLOGIE DI RIPRISTINO E CONTROLLO DEGLI SCAVI IN TRINCEA PER RETI DI SERVIZI URBANE**

*Tesi di Laurea di:*

**FRANCESCO PETRETTO**

*Relatore:*

**Chiar.mo Prof. Ing. CESARE SANGIORGI**

*Correlatori:*

**Chiar.mo Prof. Ing. GIULIO DONDI**

**Chiar.mo Prof. Ing. ANDREW R. DAWSON**

*Sessione I*

---

*Anno Accademico 2008 - 2009*

# Indice

INTRODUZIONE	I
➤ <b>CAPITOLO 1    LE TRINCEE URBANE</b>	
1.1     Introduzione	2
1.2     Le sovrastrutture per strada ordinaria	3
<i>1.2.1 I materiali vergini impiegati</i>	5
<i>1.2.2 Le terre provenienti da scavo</i>	7
1.3     Gli scavi per reti di servizi urbani	8
1.4     Il riciclaggio delle terre da scavo	10
➤ <b>CAPITOLO 2    IL QUADRO NORMATIVO</b>	
2.1     Introduzione	14
2.2     La Normativa Comunitaria	14
2.3     Introduzione alla Normativa Italiana	15
2.4     Il quadro Normativo Italiano	15
<i>2.4.1 Classificazione dei rifiuti da costruzione e demolizione</i>	19
<i>2.4.2 Codifica dei rifiuti da costruzione e demolizione</i>	20
<i>2.4.3 Le terre e rocce da scavo</i>	21
2.5     La circolare del ministero dell'ambiente n° 5205/05	23

2.6	Le specifiche tecniche	27
2.7	Le norme tecniche adottate	28
	2.7.1 <i>Interventi su strada con pavimentazione ordinaria in C.B.</i>	29
	2.7.2 <i>Ulteriori prescrizioni sull'esecuzione dei lavori</i>	32
	2.7.3 <i>Qualità dei materiali e prove di verifica sulle lavorazioni eseguite</i>	32
2.8	Le Specifiche Tecniche Inglesi	33
	2.8.1 <i>“Series 800 – Road Pavements, Unbound, Cement and other Hydraulically Bound mixture”</i>	33
	2.8.2 <i>“SROH – Specification for Reinstatement of Openings in Highways”</i>	35

➤ **CAPITOLO 3 LA SPERIMENTAZIONE INGLESE**

3.1	Il progetto “ZeroWASTER”	44
3.2	1 <sup>a</sup> Fase: SEPARAZIONE	48
3.3	2 <sup>a</sup> Fase: PREQUALIFICA	51
	3.3.1 <i>Il contenuto d'acqua “w”</i>	52
	3.3.2 <i>Le proprietà elettriche: Dielectric Value e Impedance</i>	53
	3.3.3 <i>La compattazione e l'indice CBR di una terra</i>	58
	3.3.4 <i>Il Clegg Hammer</i>	60
	3.3.5 <i>L'aggregato grosso, il “Crushing”</i>	63
3.4	3 <sup>a</sup> Fase: TRATTAMENTO	64
	3.4.1 <i>Le ceneri volanti “Fly Ash”</i>	65
	3.4.2 <i>La scelta del trattamento</i>	67
3.5	L'obiettivo del progetto “ZeroWASTER”	68

3.6	Le indagini di laboratorio	69
3.6.1	<i>Fase 1: la separazione mediante lo “Starscreen”</i>	72
3.6.2	<i>Fase 2: La prequalifica del materiale</i>	73
3.6.3	<i>Fase 3: il trattamento</i>	76
➤	<b>CAPITOLO 4 ANALISI DEI RISULTATI</b>	
4.1	Introduzione	82
4.2	I risultati ottenuti dai campioni 1÷15	83
4.2.1	<i>I risultati dei test meccanici sui campioni 1÷15</i>	87
4.2.2	<i>L’analisi dell’aggregato prodotto dalla frantumazione</i>	90
4.3	I risultati ottenuti dai campioni 16÷23	92
4.3.1	<i>I risultati dei test meccanici sui campioni 16÷23</i>	94
4.4	Conclusioni	96
➤	<b>CAPITOLO 5 LE CONCLUSIONI</b>	
5.1	Osservazioni sui risultati sperimentali	100
5.2	Il processo di riciclaggio studiato e le sue peculiarità	101
5.3	La valutazione della portanza in sito	105
5.4	Sviluppi futuri del progetto	108
5.5	Conclusioni	110
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	111
	<b>ALLEGATI</b>	119

## *Introduzione*

Al giorno d'oggi il tema ambientale ricopre grossa importanza sia nel campo tecnico–ingegneristico che sociale per via dei cambiamenti e peggioramenti che la qualità della vita sta subendo nel'ultimo secolo. La ricerca sta indirizzando i propri studi verso nuove tecniche che siano in grado di recuperare e riciclare i materiali di scarto che potrebbero diventare fonte di inquinamento.

Ogni anno in Italia e in Inghilterra, come d'altronde nel resto d'Europa, milioni di tonnellate di materiale di qualsiasi genere, comprendente asfalto, terra, aggregati di varia pezzature, vengono rimossi dalla loro sede affinché possano essere svolti lavori di manutenzione ordinaria o per la costruzione di reti che forniscano le utenze dei servizi idrici, elettrici, telefonici e fognari. Con tali interventi vengono prodotti grossi quantitativi di materiale destinati alla discarica in quanto non idonei o non contemplati dalle specifiche tecniche vigenti per il loro rimpiego. Una soluzione a questo problema potrebbe essere dato dal riciclaggio delle terre da scavo direttamente in sito, il che consentirebbe una netta riduzione dell'immissione di materiale di scarto nell'ambiente e di emissioni prodotte dai mezzi pesanti durante il loro trasporto sull'asse cantiere – discarica – cava – cantiere.

Una delle tecniche più usate in ingegneria stradale, per recuperare le terre da scavo o in generale terreni aventi scarse prestazioni meccaniche, è quella della stabilizzazione mediante i più noti leganti idraulici, calce o cemento. Purtroppo la spesa per tali interventi non è sempre economicamente vantaggiosa a scapito dell'impiego di materiali vergini provenienti da cava.

Da studi sperimentali condotti in precedenza, è stata valutata la possibilità di diminuire i quantitativi di legante idraulico con l'aggiunta di un materiale fine che abbia le stesse caratteristiche pozzolaniche. Le ceneri volanti, prodotto di scarto ottenuto dalla

combustione del carbone per la produzione di energia elettrica, presentano le caratteristiche fisiche e chimiche richieste. L'utilizzo di questo materiale è vantaggioso avendo costo nullo, poiché viene considerato un rifiuto dell'industria del carbone, ed il suo impiego porterebbe ad una diminuzione dell'impatto ambientale dell'opera.

Il progetto di ricerca "ZeroWASTER" svolto dall'Università di Nottingham nel Regno Unito in collaborazione con società private finanziatrici e il Dipartimento dei Trasporti Inglese, ha studiato e investigato le modalità con la quale possano essere impiegate le ceneri volanti per il confezionamento di miscele di terre trattate provenienti da scavi per trincee urbane. L'obiettivo finale è stato quello di redare un protocollo d'intervento che renda effettivo il riciclaggio del 100% del materiale prodotto in seguito all'escavazione.

# CAPITOLO 1

➤ *Le trincee urbane*

## 1.1 Introduzione

La funzione principale di una sovrastruttura stradale è quella di sopportare nel tempo i carichi indotti dal traffico e garantire un piano viabile regolare per la circolazione dei veicoli. In ambito urbano, oltre le sopracitate funzioni, gli strati profondi dell'infrastruttura rappresentano la sede per la posa delle reti di servizi, che forniscono le utenze di luce elettrica, gas, acqua e linea telefonica.

La posa delle infrastrutture avviene all'interno di scavi a sezione ristretta, eseguiti spesso sulla sede stradale. Le reti vengono posizionate nel sottofondo della pavimentazione, o più raramente nello strato di fondazione. Tali strati, che hanno la funzione di sopportare i carichi e distribuirli, rappresentano le fondamenta della pavimentazione, per cui il posizionamento delle reti al loro interno e la conseguente compattazione influisce direttamente sulla vita utile della struttura.

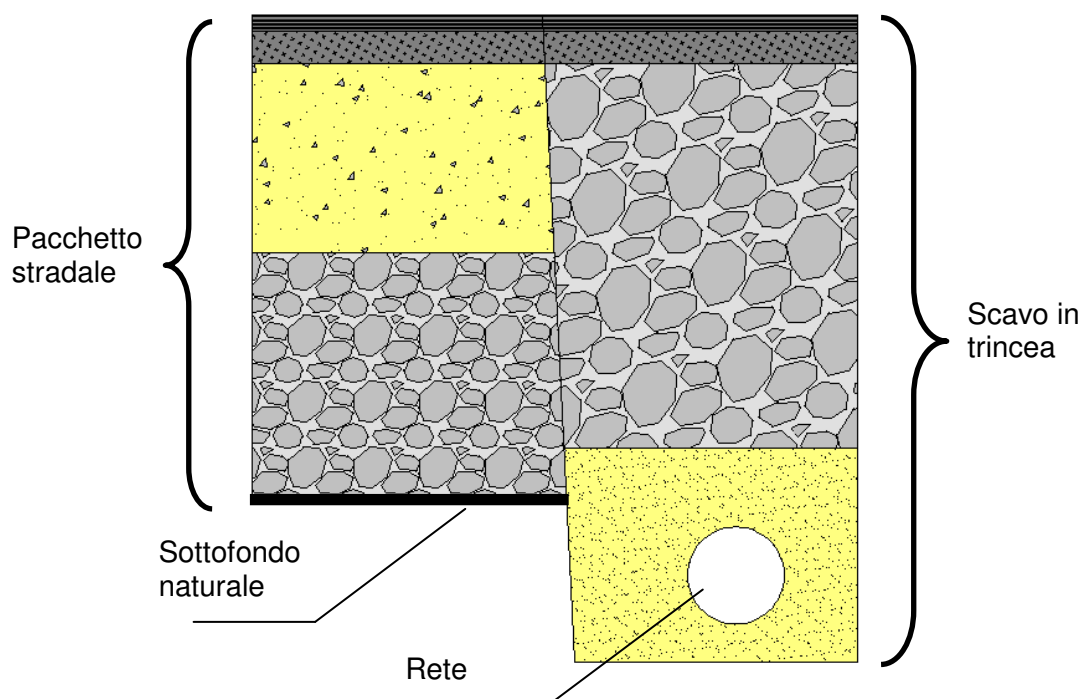


Fig. 1.1 – La sovrastruttura stradale e la trincea per reti di servizi urbani

Le reti presenti sul territorio urbano sono soggette periodicamente ad interventi di vario tipo da parte dell'ente gestore che portano alla rottura della pavimentazione e alla rimozione mediante escavazione meccanica degli strati non legati. Gli scavi hanno



dimensioni e forme differenti a seconda del tipo di intervento. Nel caso della posa di nuove reti lo scavo avrà un'estensione lineare di larghezza ridotta che interesserà una striscia continua sulla pavimentazione, mentre per operazioni di manutenzione ordinaria l'intervento sarà localizzato e lo scavo avrà una larghezza maggiore con dimensioni tali da consentire le operazioni di riparazione.

Le operazioni di escavazione producono volumi di materiale eterogeneo con differente granulometria, che, in origine, costituivano gli strati inferiori della sovrastruttura. La terra da scavo estratta potrebbe non presentare le caratteristiche adatte per un riutilizzo, secondo le prescrizioni delle specifiche tecniche, per cui sarebbe destinata alla discarica. Il ripristino della pavimentazione e la conseguente chiusura della trincea avviene mediante l'impiego di inerti vergini provenienti da cava, che verranno stesi e compattati in strati all'interno dello scavo. Dalla corretta esecuzione di tali operazioni e dalla qualità dei materiali impiegati, dipenderà la vita utile dell'intervento nel tempo e, di conseguenza, l'integrità della pavimentazione stradale.

## 1.2 Le sovrastrutture per strada ordinaria

Una pavimentazione stradale, sia essa flessibile o rigida, è tradizionalmente costituita da più strati sovrapposti di materiali differenti, composti da miscele di aggregati lapidei e leganti, a formare una vera e propria struttura frapposta tra i carichi ed il terreno in posto (fig.1.2).

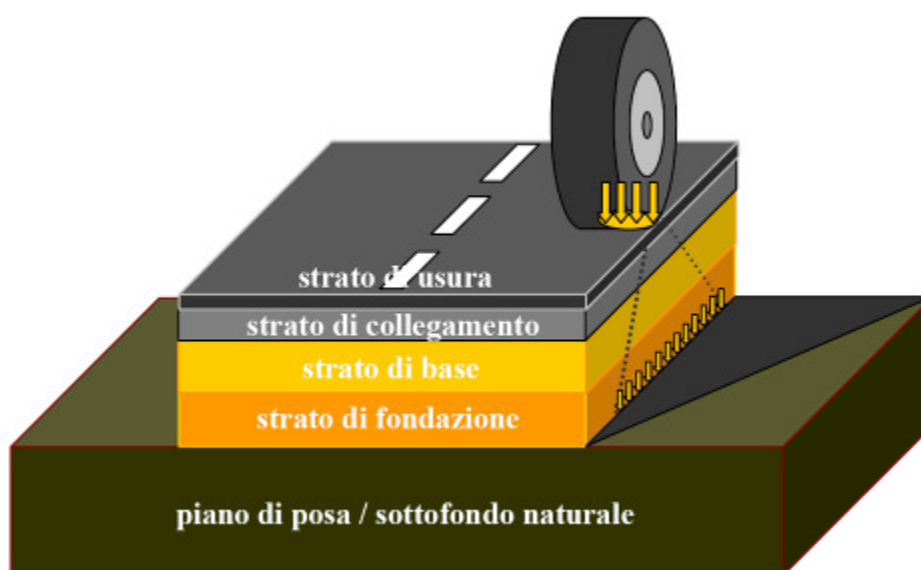


Fig. 1.2 – La sovrastruttura stradale

La serie di strati costituenti ha in genere, una ossatura litica con dimensione degli elementi decrescente dal basso verso l'alto, a fronte di una qualità crescente delle caratteristiche meccaniche degli inerti stessi e della miscela che li comprende.

Come visto precedentemente, il ruolo primario della sovrastruttura stradale è quello di distribuire sul piano di posa, ripartendoli convenientemente, gli sforzi dovuti ai carichi del traffico e che, per tale motivo essa dovrà avere uno spessore tale per cui le pressioni trasmesse al suolo siano sufficientemente ridotte e non superino quelle critiche del terreno. In generale, a partire dal piano di posa, si possono trovare i seguenti strati:

- uno strato di fondazione di 30÷40 cm, posato sul terreno naturale in posto o di bonifica o sul piano finito del rilevato stradale, generalmente costituito da una miscela selezionata di inerti non legati aventi una granulometria assortita; esso ha in primo luogo, la funzione statica di ripartizione dei carichi, ma funge anche da elemento di separazione tra il terreno di sottofondo ed i materiali superficiali più pregiati; in tale senso ostacola anche la risalita capillare dell'acqua e la contaminazione degli strati sovrastanti da parte delle particelle fini del sottofondo;
- uno strato di base di 20÷25 cm, che nel caso di sovrastruttura flessibile, è costituito da conglomerato bituminoso con dimensione nominale degli aggregati di solito inferiore a quella dello strato di fondazione; esso è chiamato a resistere a fenomeni tipici di fatica essendo uno strato inflesso e prevalentemente sottoposto a sollecitazioni di trazione; riveste altresì un ruolo fondamentale nella limitazione del fenomeno dell'ormaiamento superficiale in base alla sua maggiore o minore cedevolezza;
- uno strato di collegamento o binder 7÷10 cm, in conglomerato bituminoso, avente la funzione di collegare lo strato di base e lo strato d'usura; esso presenta aggregati di dimensione nominale intermedia (20÷25 mm);
- uno strato di usura, o manto d'usura di 3÷4 cm, in conglomerato bituminoso; su di esso gravano direttamente le sollecitazioni indotte dai veicoli; deve essere quindi in grado di resistere alle azioni normali e tangenziali trasmesse dai pneumatici, soprattutto in fase di accelerazione e decelerazione; una funzione fondamentale dello strato di usura è legata al fatto che, la superficie d'estradosso costituisce il piano viabile della sovrastruttura, sul quale debbono essere

garantite caratteristiche di resistenza all'urto ed all'abrasione degli inerti, una certa tenacità del legante ed un'opportuna rugosità della superficie finita; assieme allo strato di collegamento, l'usura ha anche la funzione di impedire la dannosa percolazione dell'acqua di superficie verso gli strati profondi, qualora non sia stata appositamente progettata come drenante. In quest'ultimo caso occorre una impermeabilizzazione bituminosa ad hoc.

Come già accennato, i compiti fondamentali che una sovrastruttura deve garantire durante la sua *vita utile* sono principalmente due: il trasferimento delle sollecitazioni indotte dai carichi mobili o statici al sottofondo naturale e la realizzazione di un piano viabile regolare, che garantisca una condizione di moto sicuro e confortevole per chi la percorre. La scelta dei materiali da impiegare e il dimensionamento degli spessori della sovrastruttura da adottare vengono scelti dal progettista in base ai volumi di traffico a cui saranno sottoposti nella configurazione di esercizio. I compiti che la sovrastruttura dovrà svolgere in opera sono garantiti a livello macroscopico, dall'azione meccanica congiunta degli strati, mentre a livello microscopico dalle proprietà fisiche dei materiali impiegati per la realizzazione del pacchetto stradale. Quindi la scelta del materiale inciderà fortemente sulla durata della vita utile della pavimentazione e della suo corretto funzionamento in opera.

### **1.2.1 I materiali vergini impiegati**

Il primo materiale da prendere in considerazione è il terreno, poiché questo, sia in condizioni naturali, che opportunamente corretto, costituisce il materiale di formazione degli strati inferiori (solo sottofondo e a volte fondazione) della maggior parte delle pavimentazioni moderne.

Il terreno da usare per detti strati deve avere adeguate caratteristiche granulometriche, variabili dalle dimensioni di una sabbia fine a quelle di una ghiaia, e può essere adoperato così come proviene dalle cave o dal greto di un torrente, senza alcuna correzione. Più generalmente la fondazione è composta da un misto granulare o stabilizzato granulometrico ed è definibile come strato non legato, in quanto non vengono impiegati leganti (fig.1.3). Tuttavia, le caratteristiche di assortimento della curva granulometrica che lo contraddistinguono conferiscono al materiale in opera spiccate

proprietà di compattezza e portanza. Oltre ad una precisa configurazione geometrica, gli elementi litici che compongono la fondazione debbono anche rispondere a determinati requisiti fisici e meccanici al fine di garantire il soddisfacimento dei compiti che lo strato deve assolvere. Ecco che, la scelta degli inerti, non può essere casuale, ma deve sottostare a precise regole e norme.

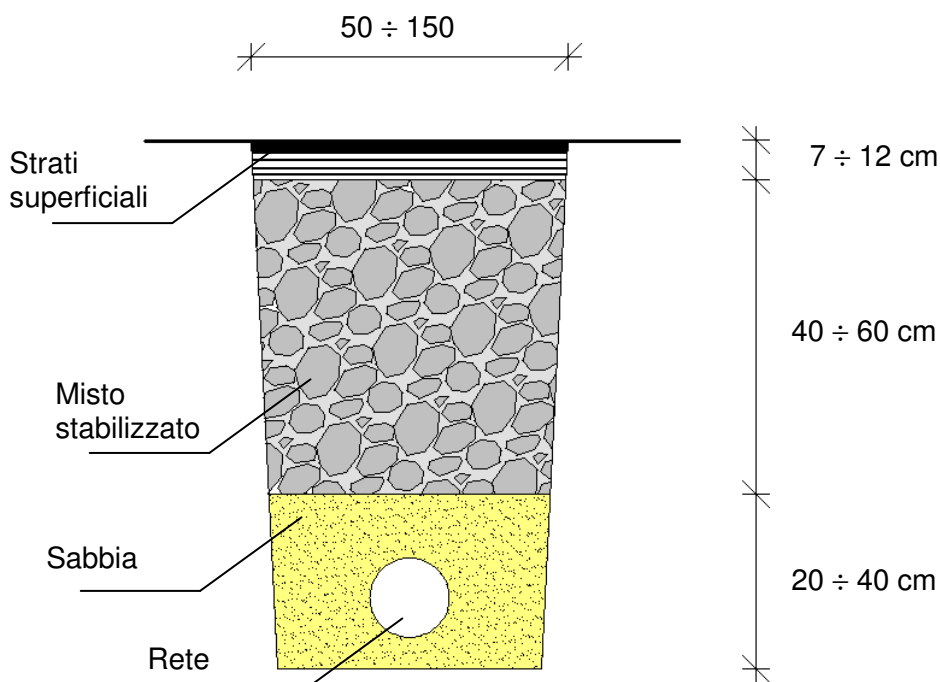


Fig. 1.3 – Sezione tipo di trincea per reti di servizio urbane

I materiali lapidei impiegati nel confezionamento degli strati della sovrastruttura hanno una composizione granulometrica differente, partendo dalla pezzatura grossolana si ha:

- **pietrisco:** elementi litoidi, ottenuti dalla frantumazione di pietrame o ciottoli, aventi forma sufficientemente poliedrica e spigoli vivi, di dimensioni comprese tra 25 e 71 mm (passante al crivello 71 e trattenuto al 25),
- **pietrischetto:** elementi litoidi sempre provenienti dalla frantumazione di pietrame o ciottoli, di forma poliedrica e a spigoli vivi, come per il pietrisco, ma di dimensioni comprese fra 10 e 25 mm,
- **graniglia:** materiale litoide da frantumazione, a spigoli di vivi, di dimensioni comprese fra 2 e 10 mm,

- sabbia (da frantoio): materiale litoide, fine, proveniente dalla frantumazione di pietrame o ghiaie, di dimensioni massime di 2 mm e trattenuto dal setaccio 200 A.S.T.M. (corrispondente al setaccio 0.075 UNI 2332);
- additivo: materiale molto fine, con almeno l'85% passante al setaccio 0.075 UNI e per il 100% al setaccio 0.18 UNI; si aggiunge ai leganti ed ai conglomerati bituminosi per conferire a questi particolari caratteristiche.

Per la composizione degli strati inferiori, si possono miscelare insieme terreni aventi differenti caratteristiche granulometriche e scarse prestazioni meccaniche. Se al composto si aggiunge un aggregato fine (passante al setaccio 0.075 mm) con proprietà leganti, il materiale ottenuto prende il nome di terra stabilizzata. Tale intervento migliora la resistenza meccanica dello strato in cui viene impiegato.

### **1.2.2 Le terre provenienti da scavo**

Gli strati della pavimentazione stradale sono composti da materiali con caratteristiche fisiche e meccaniche differenti. Per la composizione della miscela di ogni strato, si fa riferimento ad un fuso definito in fase progettuale, all'interno del quale dovrà essere racchiusa la curva granulometrica del materiale impiegato. In seguito allo scavo non si avrà più questa separazione, perché l'escavazione meccanica creerà un rimescolamento dei vari strati, ottenendo un materiale eterogeneo avente caratteristiche granulometriche varie e sconosciute. La pezzatura grossa, costituente gli strati profondi si mescolerà con quella fine impiegata negli strati superficiali, il materiale in seguito all'escavazione non presenta quindi le caratteristiche granulometriche idonee per il reimpiego diretto.

Il motivo per cui avviene la scarifica della pavimentazione e lo scavo a sezione ristretta per l'apertura di una trincea, è dovuto frequentemente ad interventi in ambito urbano di manutenzione sulle reti per servizi urbani. Un tipico esempio di intervento è la rottura di una tubatura che, creando una perdita continua d'acqua, innalza notevolmente l'umidità del terreno, peggiorando le condizioni del materiale. Le dimensioni dello scavo solitamente non sono rilevanti ed i volumi di terra su cui si lavora sono ridotti ( $0.5 \div 1.5 \text{ m}^3$ ). Non è raro trovare all'interno degli scavi materiali di

qualsiasi natura e composizione, come pezzi di tubature dismesse, inquinanti plastici e arborei, e materiali non impiegati nella tecnica stradale.

L'eterogeneità della terra da scavo (fig. 1.4), dovuta alle cause sopra elencate, rende il materiale difficilmente riutilizzabile senza un trattamento preventivo. Questo perché la composizione granulometrica varia con contenuto d'acqua non ottimale, non garantisce le adeguate proprietà meccaniche richieste all'interno delle specifiche tecniche.



Fig. 1.4 – Eterogeneità delle terre da scavo

### 1.3 Gli scavi per reti di servizi urbani

Le reti per servizi urbani vengono posizionate generalmente nel sottofondo naturale, che costituisce la base su cui viene costruita la sovrastruttura stradale, mentre raramente vengono adagate nello strato di fondazione. Le reti sono costituite da un insieme di tubature di varia dimensione che forniscono le utenze dei beni primari (acqua, luce, gas, telefono). La posa avviene mediante l'apertura di uno scavo in trincea di dimensioni variabili dovute al diametro nominale delle tubature. Per tali motivi la larghezza dello scavo viene decisa in base al tipo di rete da posare o dal tipo di intervento da eseguire (fig. 1.5).

Questo tipo di scavo viene definito a sezione ristretta. Con tale termine si definiscono tutti gli scavi delimitati da pareti, di norma verticali o sub verticali, che riproducono il perimetro dell'opera effettuati al di sotto del piano orizzontale passante per il punto di quota inferiore del terreno lungo il perimetro medesimo. Tale piano è fissato per l'intera area o per più parti in cui può essere suddivisa, in relazione all'accidentalità del terreno ed alle quote dei piani finiti di fondazione. Il fondo degli scavi deve risultare perfettamente piano, e devono essere presi i dovuti provvedimenti per evitare ristagni d'acqua sull'impronta delle fondazioni dell'opera d'arte.



Fig. 1.5 – Scavo in trincea per la posa di una tubatura in ambito urbano

La prima operazione eseguita è la delimitazione dell'area di scavo mediante il taglio della pavimentazione lungo il perimetro, per poter rimuovere gli strati superficiali legati di conglomerato bituminoso. La seconda fase consiste nella rimozione con escavazione meccanica degli strati profondi non legati, fino alla quota di progetto stabilita. Nel caso di trincee urbane la profondità di scavo non è mai elevata, di rado vengono superate quote superiori a 1.5 m, poiché le infrastrutture vengono posate ad una profondità tale da rendere pratico l'intervento di manutenzione. La metodologia di lavoro viene definita dalle autorità locali, in particolare dagli uffici tecnici delle amministrazioni competenti e prevede di norma il rinterro con materiale selezionato proveniente dagli scavi, o se non idoneo, con materiale proveniente da cava di prestito. Il tutto dovrà essere disposto nella trincea in modo uniforme, in strati di spessore

opportuno accuratamente costipato sotto e lateralmente alla tubatura, per ottenere un buon appoggio e impedire cedimenti e spostamenti laterali.

Infine il completamento del rinterro si diversifica in base alla larghezza dello scavo; nel caso di area  $< 1.5 \text{ m}^2$  il riempimento avviene mediante malta autolivellante e autocompattante, fino ad una quota variabile tra i  $10 \div 20 \text{ cm}$  per consentire la stesa del tappeto d'usura. Mentre per scavi di dimensioni maggiori, vengono disposti due strati differenti sopra quello di sabbia, il primo costituito da materiale arido appartenente ai gruppi A1, A2-4, A2-5, A3, con uno spessore variabile in base alla profondità di scavo, il secondo di chiusura costituito da uno strato in misto cementato per pavimentazioni lapidee o inerte naturale stabilizzato o misto granulometrico.

I volumi di terreno scavato sono variabili, nel caso di intervento di manutenzione variano tra i  $0.5 \text{ m}^3$  e  $1.5 \text{ m}^3$ , mentre per la posa di una nuova rete si avranno gli stessi volumi ma per ogni metro lineare di estensione.

#### **1.4 Il riciclaggio delle terre da scavo**

Quando il materiale proveniente dallo scavo non presenta le caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche idonee per il riutilizzo, è destinato alla discarica per lo smaltimento e questo crea un aumento del costo complessivo dell'opera. Con il riciclaggio del materiale direttamente in sito, si potrebbero diminuire notevolmente le voci in bilancio relative ai costi di trasporto e all'acquisto di nuovo materiale. Con il rimpiego diretto vengono annullati il trasporto mediante mezzo pesante delle terre da scavo in discarica e del trasporto del materiale vergine dai siti di stoccaggio al cantiere. Così facendo diminuiscono i tempi di permanenza dei macchinari e degli addetti sulla sede stradale che sono causa di rallentamenti alle correnti veicolari interessate. A questo va aggiunto inoltre che riutilizzando il terreno si annulla la necessità di acquistare totalmente o in parte gli inerti vergini che hanno un elevato costo di mercato.

Il riciclaggio del materiale porterebbe, oltre ad una netta riduzione dei costi, anche ad una diminuzione dell'impatto ambientale dell'opera sotto vari aspetti. Gli scarti destinati alla discarica e al conseguente smaltimento diverrebbero materie prime secondarie durante l'operazione di chiusura dello scavo. Inoltre non essendo più



necessario il trasporto del materiale per la sostituzione, si abbatterebbero le emissioni prodotte dai mezzi pesanti che sono fonte costante di inquinamento nell'atmosfera.

Rimane da risolvere il problema del miglioramento delle caratteristiche proprie delle terre da scavo, che al momento dell'estrazione non presentano le proprietà idonee al rimpiego, come già visto nel paragrafo "Le terre provenienti da scavo".

Una delle tecniche maggiormente impiegate nell'ingegneria stradale è rappresentata dalla stabilizzazione mediante leganti idraulici (calce e cemento) delle terre. Miscelando insieme terreno, legante ed un opportuno contenuto d'acqua, si instaurano una serie di reazioni che provocano l'indurimento nel tempo della composto, che creano un aumento delle proprietà meccaniche del terreno trattato. Nel breve termine i principali cambiamenti sono:

- variazione dei limiti di Atterberg: aumenta il limite plastico  $W_p$  e si riduce di conseguenza l'indice plastico  $IP$ ;
- modifica della distribuzione granulometrica per via della flocculazione,
- la curva ottenuta con prova Proctor risulta più appiattita e l'optimum di densità secca si verifica con un tenore in acqua superiore;
- si ha una riduzione generale della densità per effetto dell'aumento dell'indice dei vuoti;
- si ha una riduzione del rigonfiamento e del ritiro a causa della diminuzione di affinità all'acqua dei materiali trattati, sia dalla formazione di legami stabili che si oppongono ai cambiamenti di volume;
- l'indice CBR aumenta notevolmente in seguito al fenomeno di presa.

Gli effetti a lungo termine delle terre riguardano maggiormente gli aspetti prestazionali della miscela, perché al termine del fenomeno di indurimento si otterrà:

- incremento sensibile di resistenza a taglio (soprattutto in termini di coesione ed in parte anche di angolo d'attrito interno);
- aumento del modulo di elasticità;
- il modulo di Poisson varia tra 0.08 e 0.12 per sollecitazioni inferiori al 25 % della resistenza ultima a compressione;
- incrementi significativi della resistenza a fatica;
- miglioramento della durabilità sotto l'azione dell'acqua e del gelo.

Il riciclaggio delle terre mediante stabilizzazione rappresenta un ottimo intervento per il miglioramento delle prestazioni dei materiali scadenti ed il loro riuso. L'impiego dei leganti idraulici, come agente stabilizzante, causa però un aumento del costo complessivo del trattamento, perdendo in parte l'economicità del riciclaggio. È stata valutata la possibilità di diminuire il loro contenuto nella miscela mediante l'impiego di polveri fini, aventi caratteristiche idrauliche simili.

Il materiale che maggiormente presenta queste proprietà è la cenere volante, emessa nella combustione del carbone all'interno delle centrali per la produzione di energia elettrica o derivante dall'incenerimento dei rifiuti solidi urbani. Le ceneri volanti hanno proprietà chimiche, fisiche simili a quelle dei leganti idraulici, il che le rendono idonee alla miscelazione congiunta. Le ceneri di carbone sono costituite da particelle di dimensione micronica, a forma sferoidale e struttura amorfa, risultanti dalla fusione in caldaia e successiva ricondensazione lungo il percorso dei fumi della frazione inerte silico-alluminosa presente nel polverino di carbone utilizzato per la generazione del vapore. La loro costituzione chimica dà al materiale le proprietà pozzolaniche necessarie per l'impiego nelle miscele cementizie come legante.

L'impiego delle ceneri volanti per la stabilizzazione dei terreni contribuisce quindi a diminuire l'impatto ambientale delle operazioni di scavo e chiusura delle trincee. Le polveri rappresentano un materiale altamente inquinante e dannoso per la salute umana per via delle ridotte dimensioni, possono essere causa di malattie alle vie respiratorie.

L'opportunità di riutilizzare interamente questo rifiuto, valorizzandolo sempre più anche dal punto di vista economico, e la contemporanea esigenza di rispettare a tal fine stringenti specifiche di controllo di qualità, stanno spingendo sempre più le modalità di gestione delle ceneri verso quelle tipiche di un prodotto.

Le ceneri, la cui produzione in Italia è di circa 1 Mt/a e sfiora in Europa le 40 Mt/a (fonti ENEL S.p.A.), rappresentano oggi un valido sottoprodotto del processo di generazione elettrica secondo modalità specificate da precisi standard tecnici e nel rispetto della normativa vigente sul riutilizzo dei rifiuti.

# CAPITOLO 2

➤ *Il quadro normativo*

## 2.1 Introduzione

In Italia, così come in Europa, la produzione di rifiuti è andata progressivamente aumentando quale sintomo del progresso economico e dell'aumento dei consumi. La diversificazione dei processi produttivi ha, inoltre, generato la moltiplicazione della tipologia dei rifiuti, con effetti sempre più negativi sull'ambiente.

Le considerevoli quantità di rifiuti prodotti, unite alla difficoltà di smaltimento e alla crescita dei costi di trattamento, hanno determinato un sempre maggior interesse verso il riciclaggio, la possibilità cioè di recuperare alcune frazioni dei rifiuti reinserendoli nei cicli produttivi sotto forma di materie prime seconde. La stessa Comunità Europea, nell'intraprendere una nuova strategia per una razionale politica e gestione del rifiuto, ha attribuito una notevole importanza, oltre che alla prevenzione e allo smaltimento sicuro dei rifiuti inevitabili, alle azioni volte ad aumentare il riciclaggio e il riutilizzo.

Oggi, tuttavia, l'Italia, per quanto attiene le percentuali di recupero, si colloca in una posizione piuttosto arretrata rispetto agli altri Paesi Europei, in particolare nel settore dei rifiuti inerti in genere. Studi sperimentali stanno valutando la possibilità di aumentare l'introduzione di materiali destinati alla discarica all'interno del processo produttivo di riciclaggio delle terre provenienti da scavo nelle trincee urbane mediante tecniche sperimentali.

## 2.2 La normativa comunitaria

La consapevolezza che nessun paese può gestire le sue politiche ambientali senza tenere conto delle interrelazioni tra i sistemi ecologici ha indotto la Comunità europea a rafforzare la necessità di programmare le politiche e gli interventi e a porre in essere una stringente normativa in materia dei rifiuti; in particolare: la direttiva *75/442/CEE*, vera e propria norma quadro, modificata e integrata dalla direttiva *91/156/CEE*, dalla direttiva *91/689/CEE* sui rifiuti pericolosi e dalla direttiva *94/62/CE* sugli imballaggi e i rifiuti di imballaggi; infine la direttiva *99/31/CE* relativa alle discariche. Alla fine di dare razionalità e chiarezza alle disposizioni succedutesi nel tempo, la nuova direttiva

2006/12/CE abroga la direttiva quadro precedente, riproducendone sostanzialmente i contenuti.

Con le norme sopra citate, la strategia perseguita è dettata dalla priorità assoluta nella prevenzione della produzione dei rifiuti, cui segue il recupero e infine, come ultima opzione, lo smaltimento. Viene preferito, in generale, il recupero del materiale rispetto all'attività di recupero dell'energia. Vengono sanciti il principio di prossimità, che stabilisce l'obbligo di smaltimento dei rifiuti il più vicino alla fonte di produzione, e il principio di autosufficienza, per il quale ciascun Stato membro deve essere in grado di risolvere nei suoi ambiti territoriali i problemi derivanti dalla produzione dei rifiuti.

Non si specificano le modalità d'intervento, stabilendosi che i singoli Stati membri attuino le politiche più efficienti, ferma restando la preferenza del riciclaggio sul recupero energetico. Si sollecitano, inoltre, gli Stati ad introdurre strumenti economici intesi a promuovere il riciclo dei rifiuti e i prodotti non inquinanti, nonché a ottenere una base statistica più completa sulla produzione dei rifiuti. Infine, si ribadisce il principio di sussidiarietà nell'elaborazione dei Piani di gestione dei rifiuti così da garantire la valutazione delle condizioni locali e regionali.

### **2.3 Introduzione alla normativa italiana**

Prima dell'entrata in vigore del D. Lgs. n. 152/06, modificato in alcune parti dal D. Lgs. n. 04/2008, la gestione dei rifiuti era disciplinata in Italia dal D. Lgs. n. 22 del 5 febbraio 1997 “ *Attuazione delle direttive 91/156/Ce sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/36/CE sugli imballaggi e rifiuti di imballaggio*” che, abrogando la legislazione precedente, introduceva una serie di principi, finalità e disposizioni che innovavano completamente l'intero settore in sintonia con le direttive europee.

### **2.4 Il Quadro Normativo Italiano**

Il D. Lgs. n. 152/2006, recante “Norme in materia ambientale”, emanato in attuazione della “Delega Ambientale” (Legge n. 308/2004) ed entrato in vigore il 29 aprile 2006, è la normativa principale di riferimento relativa ai rifiuti provenienti da attività di costruzione e demolizione. Il 16 gennaio 2008 è entrato successivamente in

vigore il D. Lgs. n. 4 “Ulteriori disposizioni correttive ed integrative del decreto legislativo 152/2006” il quale modifica e completa il quadro normativo.

Tale provvedimento si è imposto come “Testo Unico Ambientale”, unificando e coordinando le diverse fonti legislative nazionali, apportando modifiche, in molti casi di rilievo sostanziale, alla disciplina dei vari settori normativi sull’ambiente ed introducendo varie novità in attuazione di direttive comunitarie.

In particolare, la norma, abrogando il D. Lgs. n. 22/97, noto come “Decreto Ronchi”, ha riformulato l’intera disciplina in materia di rifiuti e bonifiche dei siti contaminati, con l’introduzione di modifiche e la redistribuzione delle competenza fra i diversi enti e soggetti coinvolti. Alla disciplina dei rifiuti il decreto dedica la sua Parte quarta (“Norme in materia di gestione dei rifiuti e di bonifica dei siti inquinati”) e ad essa devono, pertanto, far riferimento i soggetti che, nell’ambito delle loro attività, producono i rifiuti da demolizione e costruzione, classificati come “rifiuti speciali”, ai sensi dell’art. 184, comma 3, lett. b) dello stesso decreto. A tal riguardo, il decreto dispone l’esclusione dall’elenco degli “speciali” delle terre e rocce da scavo non pericolose per le quali sia applicabile il successivo articolo 186 Titolo I, Parte quarta del decreto.

La possibilità di assoggettamento delle terre e rocce da scavo a due diversi regimi giuridici è un complesso sistema, disegnato, prima dell’entrata in vigore del D. Lgs. n. 152/2006, dalla Legge n. 93/2001 e dall’interpretazione successivamente fornita dalla Legge n. 443/2001 (Legge Lunardi). Tale sistema è finalizzato a consentire la gestione delle terre e rocce da scavo al di fuori dell’applicazione delle severe norme in materia di rifiuti. Si evidenzia che gli “Indirizzi Guida per la gestione delle terre e rocce da scavo”, redatti dall’Agenzia per la Protezione dell’Ambiente e per i servizi Tecnici (APAT) nel 2005, sia pur emanati, prima dell’entrata in vigore del D. Lgs. n. 152/2006, in applicazione della Legge Lunardi, costituiscono un importante riferimento tecnico e valido strumento per la gestione delle terre e rocce da scavo.

Per quanto concerne le fasi “gestionali” dei rifiuti, cioè le movimentazioni dei rifiuti successive alla loro produzione ed al deposito temporaneo, il D. Lgs. n. 152/2006, con l’articolo 188, comma 2, riconferma l’onere, già previsto dall’abrogato D. Lgs. n. 22/97, del produttore/detentore del rifiuto di affidare gli stessi a un trasportatore regolarmente iscritto all’Albo Nazionale Gestori Ambientali e di garantire il

conferimento a soggetti autorizzati al suo recupero o smaltimento, principi confermati nel D. Lgs. n. 04/2008.

La norma di riferimento per il conferimento dei rifiuti da costruzione e demolizione in discarica è il D. Lgs. n. 36/2003, recante “Attuazione della Direttiva n. 1999/31/Ce relativa alle discariche di rifiuti”, che introduce un nuovo sistema di classificazione delle discariche, dedicate a tre classi di rifiuti:

- Rifiuti non pericolosi;
- Rifiuti inerti;
- Rifiuti pericolosi;

Tra le novità rilevanti in materia di rifiuti, introdotte dal nuovo provvedimento, inerenti gli adempimenti a carico dei produttori di rifiuti da costruzione e demolizione, vanno segnalati la ridefinizione delle condizioni del “deposito temporaneo” dei rifiuti nel luogo di produzione degli stessi, in attesa del conferimento presso impianti autorizzati, e lo snellimento degli adempimenti relativi alla tenuta delle scritture contabili ambientali, nonché del quadro sanzionatorio.

In relazione agli adempimenti di cui sopra, è opportuno evidenziare che il D. Lgs. n. 152/2006 ha lasciato in vigore, per un periodo transitorio, le norme regolamentari di attuazione del D. Lgs. n. 22/97, in attesa dell’emanazione delle nuove norme tecniche.

Con l’entrata in vigore del D. Lgs. n. 04/2008, è stato disciplinato il sopraccitato deposito temporaneo dei rifiuti. Con suddetto decreto è stato uniformato il limite riferito al criterio temporale, sia per i rifiuti pericolosi che per quelli non pericolosi, al periodo di giacenza di tre mesi (in precedenza il limite fissato dal D. Lgs. n. 152/2006 era di due mesi); ha dato una nuova definizione di deposito temporaneo: “*il raggruppamento dei rifiuti effettuato, prima della raccolta, nel luogo in cui gli stessi sono prodotti*” nell’articolo 183, comma 1, lett. m) del Testo Unico Ambientale. Condizioni affinché tale definizione possa essere applicata sono:

1. i rifiuti devono essere raccolti ed avviati alle operazioni di recupero o di smaltimento secondo una delle seguenti modalità alternative, a scelta del produttore, con cadenza almeno trimestrale, indipendentemente dalle quantità delle quantità in deposito”;

- quando il quantitativo di rifiuti in deposito raggiunga complessivamente i 10 metri cubi nel caso di rifiuti pericolosi o i 20 metri cubi nel caso di rifiuti non pericolosi.
  - In ogni caso, allorché il quantitativo di rifiuti pericolosi non superi i 10 metri cubi l'anno e il quantitativo di rifiuti non pericolosi non superi i 20 metri cubi l'anno, il deposito temporaneo non può avere durata superiore ad un anno;
2. il deposito temporaneo deve essere effettuato per categorie omogenee di rifiuti e nel rispetto delle relative norme tecniche, nonché, per i rifiuti pericolosi, nel rispetto delle norme che disciplinano il deposito delle sostanze pericolose in essi contenute (sono riportati solo i punti inerenti l'argomento di ricerca).

Il D. Lgs. n. 152/2006, tramite l'articolo 181, ha predisposto le regole per il recupero dei rifiuti in modo da favorire la riduzione dello smaltimento finale degli stessi, attraverso:

- a) il riutilizzo, il riciclo o altre forme di recupero;
- b) l'adozione di misure economiche e la determinazione di condizioni di appalto che prevedano l'impiego dei materiali recuperati dai rifiuti al fine di favorire il mercato dei materiali medesimi;
- c) al fine di favorire ed incrementare la attività di riutilizzo, riciclo e recupero le autorità competenti ed i produttori promuovono analisi dei cicli di vita dei prodotti, informazioni e tutte le altre iniziative utili.

Il D. Lgs. n. 04/2008 ha completato il precedente decreto con l'introduzione dell'articolo 181-*bis*, nel quale vengono sottratte dalla nozione di rifiuto le sostanze, le materie ed i prodotti secondari individuati da apposito decreto ministeriale sulla base di criteri, requisiti e condizioni definite all'interno di suddetto articolo; in particolare legifera che i metodi di recupero dei rifiuti utilizzati per ottenere materie, sostanze e prodotti secondari, devono garantire l'ottenimento di materiali con caratteristiche fissate da Decreto Ministeriale.



### 2.4.1 Classificazione dei rifiuti da costruzione e demolizione (CED)

Il D. Lgs. n. 152/2006 riporta la dizione di rifiuto contenuta nella Direttiva 91/156/Ce. All'articolo 183, comma 1, lett. a), definisce rifiuto "qualsiasi sostanza od oggetto che rientra nelle categorie riportate nell'Allegato A alla parte quarta del presente decreto di cui il detentore si disfi, abbia deciso o abbia l'obbligo di disfarsi". All'articolo 183, comma 1, lett. b) definisce produttore di rifiuti "la persona la cui attività ha prodotto rifiuti e la persona che ha effettuato operazioni di pretrattamento, di miscuglio o altre operazioni che hanno mutato la natura o la composizione di detti rifiuti". Attualmente sulla base di tale definizione e delle sentenze della Corte di Cassazione Penale n. 4957/2000, n. 15165/2003 3 n. 40618/2004, la linea interpretativa considera produttore dei rifiuti da costruzione e demolizione l'impresa "materialmente" esecutrice dei lavori. Ai sensi dell'articolo 181, comma 12, dello stesso decreto, un rifiuto rimane tale "fino al compimento delle operazioni di recupero, che si realizza quando non sono necessari ulteriori trattamenti perché le sostanze, i materiali e gli oggetti ottenuti possono essere usati in un processo industriale o commercializzati come materia prima secondaria, combustibile o come prodotto da collocare a condizione che il detentore non se ne disfi o non abbia deciso o non abbia l'obbligo di disfarsene".

I materiali provenienti da attività di costruzione e demolizione rientrano, ai sensi dell'art. 184, comma 3 lett. b) del D. Lgs. n. 152/2006, nella categoria dei "rifiuti speciali", con l'esclusione delle terre e rocce da scavo non pericolose per le quali si applichi l'articolo 186.

Ai fini della gestione in impianti di discarica, i rifiuti da costruzione e demolizione ricadono nella più generale categoria dei "rifiuti inerti", definiti dal D. Lgs. n. 36/2003, relativo alle modalità gestionali delle discariche, come di seguito riportate:

- "rifiuti inerti" (art. 2, comma 1, lett. e): i rifiuti solidi che non subiscono alcuna trasformazione fisica, chimica, biologica significativa; i rifiuti inerti non si dissolvono, non bruciano ne sono soggetti ad altre reazioni fisiche o chimiche, non sono biodegradabili e, in caso di contatto con altre materie, non comportano effetti nocivi tali da provocare inquinamento ambientale o danno alla salute umana. La tendenza a dar luogo a percolati e la percentuale inquinante globale

dei rifiuti, nonché l'ecotossicità dei percolati devono essere trascurabili e, in particolare, non danneggiare la qualità delle acque, superficiali e sotterranee”.

Tale definizione, pertanto, è funzionale al conferimento dei rifiuti inerti in discariche “dedicate”, secondo il sistema di classificazione di cui al D. Lgs. n. 36/2003 e nel rispetto di ammissibilità dettati dal D.M. 3 agosto 2003.

Il D. Lgs. n. 04/2008 ha modificato l'articolo 183, comma 5, lett. p) del D. Lgs. n. 152/2006, nel quale vengono definiti i sottoprodotti come quelle sostanze e materiali dei quali il produttore non intende disfarsi ai sensi dell'articolo 183, comma 1, lett. a), che soddisfano tutti i seguenti criteri, requisiti e condizioni:

1. siano originati da un processo non direttamente destinato alla loro produzione;
2. il loro impiego sia certo, sin dalla fase della produzione, integrale e avvenga direttamente nel corso del processo di produzione o di utilizzazione preventivamente individuato e definito;
3. soddisfino requisiti merceologici e di qualità ambientale idonei a garantire che il loro impiego non dia luogo ad emissioni ed a impatti ambientali qualitativamente e quantitativamente diversi da quelli autorizzati per l'impianto dove sono destinati ad essere utilizzati;
4. non debbano essere sottoposti a trattamenti preventivi o a trasformazioni preliminari per soddisfare i requisiti merceologici e di qualità ambientale di cui al punto 3), ma posseggano tali requisiti sin dalla fase della produzione;
5. abbiano un valore di mercato.

#### **2.4.2 Codificazione dei rifiuti da costruzione e demolizione**

L'identificazione di ogni singola tipologia di rifiuti prodotti va effettuata mediante un sistema di codificazione (codici CER) a sei cifre. La catalogazione unica dei rifiuti è contenuta nell'”Elenco europeo dei rifiuti”, Istituito dall'Unione Europea con Decisione n. 2000/532/Ce e s.m.i., integralmente recepito nel D. Lgs. n. 152/2006, parte quarta. Ai fini dell'applicazione di tale catalogazione, il Ministero dell'ambiente e della Tutela del Territorio ha emanato la Direttiva 9 aprile 2002 recante “Indicazione per la corretta e piena applicazione del Regolamento Comunitario n. 2557/2001 sulle spedizioni di rifiuti ed in relazione al nuovo elenco dei rifiuti”. Tale direttiva, ad oggi vigente, rappresenta

un manuale d'uso per la corretta assegnazione dei codici CER alle singole tipologie di rifiuti e comprende i criteri di riferimento per l'attribuzione delle relative classi di pericolosità.

Il criterio di codificazione dei rifiuti si basa prevalentemente sull'attività che ha generato il rifiuto, nonché sulla presenza di sostanze classificate pericolose. I criteri di attribuzione della codificazione ai rifiuti sono:

- Ogni singola tipologia di rifiuto è identificata da un codice a sei cifre (AA BB CC) in cui:
  - AA: 1° livello, costituito da 20 categorie – classi di attività generatrici dei rifiuti;
  - BB: 2° livello, costituito da capitoli relativi al singolo processo produttivo o sub – attività che genera i rifiuti;
  - CC: 3° livello, costituito dai codici che identificano il singolo rifiuto prodotto;

Per la corretta attribuzione del codice CER, pertanto, i rifiuti devono essere preventivamente caratterizzati, in base all'indicazione precisa della provenienza, del ciclo di lavorazione/trattamento ed al contenuto di sostanze pericolose, classificate tali ai sensi della Direttiva n. 67/548/CEE. Se un rifiuto è identificato come pericoloso mediante riferimento specifico o generico a sostanze pericolose e come non pericoloso in quanto diverso da quello pericoloso, esso è classificato come pericoloso solo se le sostanze raggiungono determinate concentrazioni (percentuale in peso), specificate dalla Direttiva n. 88/379/CEE.

Si evidenzia che i rifiuti classificati pericolosi sono contrassegnati con un asterisco all'interno del catalogo dei CER. In suddetta classificazione (Allegato D alla Parte Quarta del D. Lgs. n. 152/2006) i rifiuti da costruzione e demolizione sono elencati al capitolo 17 “rifiuti delle operazioni di costruzione e demolizione” comprendente anche le terre provenienti da siti contaminati.

### **2.4.3 Le terre e rocce da scavo**

Il D. Lgs. n. 152/2006 all'articolo 186 del Titolo I, Parte quarta, detta le condizioni affinché le terre e rocce provenienti da operazioni di scavo e di bonifica

possano essere escluse dal regime dei rifiuti. Successivamente il D. Lgs. n. 04/2008, ha modificato l'articolo 186, predisponendo nuove condizioni affinché le terre e rocce da scavo possano essere utilizzate per reinterri, riempimenti, rimodellazioni e rilevati secondo le seguenti condizioni:

- a) Siano impiegate direttamente nell'ambito di opere o interventi preventivamente individuati e definiti;
- b) Sin dalla fase della produzione vi sia certezza dell'integrale utilizzo;
- c) L'utilizzo integrale della parte destinata a riutilizzo sia tecnicamente possibile senza necessità di preventivo trattamento o di trasformazioni preliminari per soddisfare i requisiti merceologici e dei qualità idonei a garantire che il loro impiego non dia luogo ad emissioni e, più in generale, ad impatti ambientali qualitativamente e quantitativamente diversi da quelli ordinariamente consentiti ed autorizzati per il sito dove sono destinate ad essere utilizzate;
- d) Sia garantito un livello di tutela ambientale;
- e) Sia accertato che non provengano da siti inquinati;
- f) Le loro caratteristiche chimiche e chimico – fisiche siano tali che il loro impiego nel sito prescelto non determini rischi per la salute e per la qualità delle matrici ambientali interessate ed avvenga nel rispetto delle norme di tutela antinquinamento (compatibilità con l'ambiente di destinazione).

L'impiego di terre da scavo nei processi industriali come sottoprodotti, in sostituzione dei materiali da cava, è consentito nel rispetto delle condizioni fissate all'articolo 183, comma 1, lettera p) commentato in precedenza. Per la corretta applicazione dell'articolo 186 si devono osservare, inoltre, eventuali normative e/o indirizzi territoriali specifici (leggi, linee guida ed altri indirizzi emanati dalle Regioni territorialmente competenti).

Il D. Lgs. n. 152/2006 al comma 5, prevedeva che per i materiali destinati al riutilizzo, definiti al comma 1, dovesse essere richiesto il parere delle Agenzie Regionali e delle province autonome per la Protezione dell'Ambiente (A.R.P.A), nel caso in cui il progetto non fosse sottoposto a valutazione d'impatto ambientale (V.I.A.). L'entrata in vigore del successivo D. Lgs. n. 04/2008, ha abrogato questo aspetto, non ritenendo più necessario il parere tecnico esterno.

Il comma 2 del D. Lgs. n. 04/2008 detta i tempi di deposito delle terre e rocce da scavo. Nel caso in cui la produzione delle terre avvenga nell'ambito della realizzazione

di opere o attività sottoposte a V.I.A. o ad autorizzazione ambientale integrata, devono risultare da apposito progetto approvato dall'autorità titolare del relativo procedimento. Nel caso in cui i progetti prevedano il riutilizzo delle rocce e terre da scavo, i tempi dell'eventuale deposito possono essere quelli della realizzazione del progetto purché non superino in ogni caso i tre anni. Se la produzione di terre e rocce da scavo proviene da attività diverse di quelle menzionate nel comma 2, quindi soggette a denuncia inizio attività o a permesso a costruire, l'attesa di utilizzo, che non può superare un anno, deve essere dimostrata e verificata nell'ambito della procedura per il permesso a costruire o secondo quanto previsto dalla D.I.A.

## **2.5 La Circolare del Ministero dell'Ambiente n. 5205/05**

La circolare del ministero dell'Ambiente 15 luglio 2005, n. 5205, fornisce le indicazioni per rendere operativo nel settore edile, stradale e ambientale il D.M. 203/03. Suddetta circolare va a implementare la norma tecnica UNI 10006 "Costruzioni e manutenzione delle strade. Tecniche d'impiego delle terre", che mediante l'Allegato A presente in essa, stabiliva quali materiali inerti di riciclo potessero essere impiegati come materie prime per la realizzazione di strade. Questo provvedimento pone finalmente delle basi concrete per un importante impulso al settore del riciclaggio dei rifiuti da costruzione e demolizione. La circolare infatti fornisce le indicazioni per rendere operativo nel settore edile, stradale e ambientale il D.M. 203/03 che prevede, da parte di enti pubblici o società a prevalente capitale pubblico l'obbligo di coprire il proprio fabbisogno annuale di manufatti e beni con una quota di prodotti ottenuti da materiale riciclato in una misura non inferiore al 30 %. In origine, l'iniziativa di introdurre questo obbligo nasce con la legge Finanziaria del 2002, che si indirizzava alla sola fornitura di beni per la PA (impiego della carta riciclata negli uffici pubblici); in seguito con il decreto attuativo 203/03 si rivolgeva anche alle opere pubbliche in sede di formulazione dei capitolati d'appalto con l'obbligo di prevedere l'impiego di materiale riciclato. La condizione necessaria affinché un materiale possa essere utilizzato per la realizzazione di beni o manufatti, è che sia iscritto al "*Repertorio del riciclaggio*". L'ammissione al repertorio avviene sulla base di una domanda che l'azienda produttrice deve inviare all'Osservatorio utilizzando un apposito modello e corredata da

documentazione tecnica specifica per ogni settore. Per quanto concerne il settore edile, stradale e ambientale, i criteri tecnici e prestazionali, che i materiali e i manufatti riciclati devono possedere per ottenere l'iscrizione al repertorio del riciclaggio vengono forniti nella circolare stessa.

Il materiale riciclato, ammissibile alla iscrizione al Repertorio del riciclaggio, viene definito al punto 1 della circolare come: “*materiale realizzato utilizzando rifiuti post – consumo da costruzione e demolizione*”. La restrizione ai rifiuti di post – consumo non dovrebbe costituire per gli impianti di trattamento una limitazione, in quanto la “*materia prima* “ è nella stragrande maggioranza dei casi, costituita da rifiuti da costruzione e demolizione. Esistono, tuttavia, alcuni impianti che, inseriti in bacini d'utenza caratterizzati da particolari risorse e/o attività economiche (produzione di energia), ricevono e trattano scarti di lavorazione non rientrati di fatto nella definizione di rifiuto post – consumo.

Per quanto concerne la composizione dell'aggregato riciclato, il limite dei rifiuti derivanti dal post – consumo è, comunque, non assoluto. Infatti la circolare n. 5205/05 prevede che i rifiuti derivanti dal post – consumo possano essere miscelati con altri derivanti da diversa origine ( rifiuti inerti industriali, terre e rocce di scavo naturale, ecc. ), mantenendo, tuttavia, la natura prevalente della miscela con un limite minimo della provenienza da rifiuti da post – consumo pari al 60 %. Le tipologie di prodotti inerti di riciclo elencati dalla Circolare 5205/2005 sono:

- A. 1 – Aggregato realizzato per la realizzazione del *corpo dei rilevati* di opere in terra dell'ingegneria civile;
- A. 2 – Aggregato riciclato per la realizzazione di *sottofondi stradali*, ferroviari aeroportuali e di piazzali civili e industriali;
- A. 3 – Aggregato riciclato per la realizzazione di *strati di fondazione* delle infrastrutture di trasporto e di piazzali civili e industriali;
- A. 4 – Aggregato riciclato per la realizzazione di *recuperi ambientali*, riempimenti colmate;
- A. 5 – Aggregato riciclato per la realizzazione di *strati accessori* (aventi funzioni antigelo, drenante, etc.);

- A. 6 – Aggregato riciclato conforme alla norma UNI EN 12620:2004 per il confezionamento di calcestruzzi con classe di resistenza Rck ≤ 15 MPa, secondo indicazioni della norma UNI 8520-2.

PARAMETRO	MODALITÀ DI PROVA	LIMITE
Materiali litici di qualunque provenienza, pietrisco tolto d'opera, calcestruzzi, laterizi, refrattari, prodotti ceramici, malte idrauliche ed aeree, intonaci, scorie spente e loppe di fonderia di metalli ferrosi (caratterizzate secondo EN 13242)	Separazione visiva sul trattenuto al setaccio 8 mm (rif. UNI EN 13285:2004)	> 80 % in massa
Vetro e scorie vetrose	Idem	≤ 10 % in massa
Conglomerati bituminosi	Idem	≤ 15 % in massa
Altri rifiuti minerali dei quali sia ammesso il recupero nei sottofondi stradali ai sensi della legislazione vigente	Idem	≤ 15 % in totale e ≤ 5 % per ciascuna tipologia
Materiali deperibili: carta, legno, fibre tessili, cellulosa, residui alimentari, sostanze organiche eccetto bitume. Materiali plastici cavi: corrugati, tubi o parti di bottiglie di plastica, etc.	Idem	≤ 0.1 % in massa
Altri materiali (metalli, gesso, guaine, gomme lana di roccia o di vetro, etc.)	Idem	≤ 0.4 % in massa
Equivalente in sabbia	UNI EN	> 30 %
Perdita in peso per abrasione con apparecchio "Los Angeles"	(UNI EN 1097/2)	≤ 45 %
Passante al setaccio 63 mm	UNI EN 933/1	= 100%
Passante al setaccio 4 mm	UNI EN 933/1	≤ 60 %
Rapporto tra il passante al setaccio 0.5 mm ed il passante al setaccio 0.063 mm	UNI EN 933/1	> 3/2
Passante al setaccio 0.063 mm	UNI EN 933/1	≤ 15 %
Indice di forma (frazione > 4 mm)	(UNI EN 933/4)	≤ 40 %
Indice di appiattimento (frazione > 4 mm)	(UNI EN 933/3)	≤ 35 %
Ecocompatibilità	Test di cessione di cui all' Allegato 3 D.M 05/02/98	Il materiale dovrà risultare conforme al test di cessione previsto dal D.M 05/02/98

Allegato C2 – Sottofondi Stradali

Le specifiche tecniche dei prodotti precedentemente elencati sono contenute nelle tabelle allegate alla Circolare n. 5205/05 (Allegato C1 rilevati, C2 sottofondi stradali, C3 strati di fondazione, C4 recuperi ambientali, riempimenti colmate, C5 strati accessori), di cui si allegano nel presente paragrafo quelle relative ai sottofondi stradali (allegato C2) e agli strati di fondazione (allegato C3).

<b>PARAMETRO</b>	<b>MODALITÀ DI PROVA</b>	<b>LIMITE</b>
Materiali litici di qualunque provenienza, pietrisco tolto d'opera, calcestruzzi, laterizi, refrattari, prodotti ceramici, malte idrauliche ed aeree, intonaci, scorie spente e loppe di fonderia di metalli ferrosi (caratterizzate secondo EN 13242)	Separazione visiva sul trattenuto al setaccio 8 mm (rif. UNI EN 13285:2004)	> 90 % in massa
Vetro e scorie vetrose	Idem	≤ 5 % in massa
Conglomerati bituminosi	Idem	≤ 5 % in massa
Altri rifiuti minerali dei quali sia ammesso il recupero nei sottofondi stradali ai sensi della legislazione vigente	Idem	≤ 5 % per ciascuna tipologia
Materiali deperibili: carta, legno, fibre tessili, cellulosa, residui alimentari, sostanze organiche eccetto bitume. Materiali plastici cavi: corrugati, tubi o parti di bottiglie di plastica, etc.	Idem	≤ 0.1 % in massa
Altri materiali (metalli, gesso, guaine, gomme lana di roccia o di vetro, etc.)	Idem	≤ 0.4 % in massa
Passante al setaccio da 40 mm	UNI EN 933/1	100 %
Passante al setaccio da 20 mm	UNI EN 933/1	> 61 % < 79 %
Passante al setaccio da 10 mm	UNI EN 933/1	> 41 % < 64 %
Passante al setaccio da 4 mm	UNI EN 933/1	> 31 % < 49 %
Passante al setaccio da 2 mm	UNI EN 933/1	> 22 % < 36 %
Passante al setaccio da 1 mm	UNI EN 933/1	> 13 % < 30 %
Passante al setaccio da 0.5 mm	UNI EN 933/1	> 10 % < 20 %
Passante al setaccio da 0.063 mm	UNI EN 933/1	≤ 10 %
Rapporto tra il passante al setaccio 0.5 mm ed il passante al setaccio 0.063 mm	UNI EN 933/1	> 3/2
Equivalente in sabbia	UNI EN 933/8	> 30 %
Perdita in peso per abrasione con apparecchio "Los Angeles"	(UNI EN 1097/2)	≤ 45 %
Indice di forma (frazione > 4 mm)	(UNI EN 933/4)	≤ 40 %
Indice di appiattimento (frazione > 4 mm)	(UNI EN 933/3)	≤ 35 %
Ecocompatibilità	Test di cessione di cui all' Allegato 3 D.M 05/02/98	Il materiale dovrà risultare conforme al test di cessione previsto dal D.M 05/02/98

Allegato C3 – Strati di fondazione

Le caratteristiche relative agli aggregati, riportate negli allegati della circolare riprendono in gran parte la norma UNI 10006:2002 nel 2004 è stata sostituita dalle norme UNI EN 13285 "Miscele non legate - specifiche " e UNI EN 13242 "Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l'impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione di strade".

Due condizioni necessarie aggiuntive imposte dalla circolare affinché il bene possa essere impiegato come bene riciclato nella PA sono:



- i materiali iscritti al repertorio del riciclaggio devono presentare contestualmente medesimo uso, ancorché con aspetto, caratteristiche o ciclo produttivo diversi, e prestazioni conformi all'utilizzo cui sono destinati rispetto a quelli realizzati a partire da materiali vergini;
- congruità di prezzo: la congruità di prezzo degli aggregati riciclati iscrivibili al repertorio del riciclaggio si ritiene rispettata se tale valore non risulta superiore a quello relativo ai corrispondenti materiali che si vanno a sostituire.

## **2.6 Le Specifiche Tecniche Italiane**

Le specifiche tecniche rappresentano le norme che devono essere seguite durante la realizzazione di un'opera, nel caso del progetto la manutenzione stradale. Le specifiche tecniche fanno riferimento a loro volta alle norme tecniche, che disciplinano le procedure e le opere che concorrono alla realizzazione dell'opera (es. Standard per prova CBR o caratteristiche per il confezionamento di una miscela non legata).

Il progetto di ricerca "ZeroWASTER" è stato realizzato sulle specifiche tecniche inglesi, che si differenziano da quelle italiane per natura, origine e risultato finale. In Italia le specifiche sono competenza, a livello territoriale, delle amministrazioni locali proprietarie della strada, che riferendosi al regolamento edilizio proprio disciplinano i lavori di manutenzione stradale mediante un capitolato, ad esempio per il comune di Bologna è il "Regolamento per l'esecuzione di interventi nel sottosuolo stradale di proprietà comunale".

Il citato regolamento disciplina le azioni e i comportamenti cui debbono uniformarsi i soggetti che realizzano interventi nel sottosuolo stradale di proprietà comunale ovvero soggetto a servitù di uso pubblico, al fine di armonizzare gli stessi interventi con gli interessi pubblici connessi alla gestione della viabilità urbana ed alla relativa attività manutentiva, nonché alla prestazione di servizi alla cittadinanza in termini qualitativamente e temporalmente adeguati.

All'interno del regolamento sono riportate le metodologie d'intervento per ogni tipo di sovrastruttura presente sul territorio comunale:

- Interventi su strade con pavimentazione in conglomerato bituminoso;
- Interventi su strade con pavimentazione in materiali lapidei;

- Interventi su marciapiedi con qualsiasi tipo di pavimentazione;
- Interventi interferenti con essenze arboree od arbustive;
- Posa in opera/rimessa in quota di botole o chiusini di ispezione dei manufatti.

All'interno delle specifiche tecniche vengono richiamate le norme tecniche relative ai materiali ed alle prove necessarie per lo svolgimento degli interventi descritti.

## 2.7 Le Norme Tecniche adottate

Le Norme Italiane ed Inglesi recepiscono le Norme Europee scritte dal “*CEN – COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION*”, il comitato europeo di normalizzazione avente sede a Bruxelles. Le norme tecniche sono elaborate cercando di tenere conto dei punti di vista di tutte le parti interessate per rappresentare il reale stato dell'arte della materia ed il necessario grado di consenso.

Il progetto di ricerca “ZeroWASTER” è stato sviluppato basandosi su specifiche tecniche elaborate dal Dipartimento dei Trasporti Inglese, che fanno riferimento alle norme tecniche europee, le stesse adottate in Italia. La ricerca ricopre tutti gli aspetti relativi alle pavimentazioni stradali concernente prove di caratterizzazione dei materiali, prove di resistenza e standard per il confezionamento di miscele di aggregati e leganti. Nel particolare le norme che individuano i temi principali sono state:

- a) EN 13242:2008 “Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l'impiego in opere di Ingegneria Civile e nella costruzione di strade”: la norma specifica le proprietà di aggregati ottenuti mediante processo naturale o industriale oppure riciclati per materiali non legati e legati con leganti idraulici, per impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione di strade;
- b) EN 13285:2004 “Miscele non legate – Specifiche”: la norma specifica i requisiti per miscele non legate impiegate per la costruzione e la manutenzione di strade, aeroporti e altre aree soggette a traffico, con gli opportuni riferimenti alla UNI EN 13242;
- c) EN 14227 – 3 “Miscele legate con leganti idraulici, Specifiche: parte 3 miscele legate con ceneri volanti”: la norma specifica le miscele legate con ceneri volanti per strade, aeroporti e altre soggette a traffico, con requisito per i loro costituenti, composizione, classificazione in base alle prestazioni in laboratorio;

- d) EN 14227 – 14 “Miscele legate con leganti idraulici, Specifiche: parte 14 terra trattata con ceneri volanti”: la norma specifica i terreni trattati con ceneri volanti per strade, aeroporti e altre aree soggette a traffico, e specifica i requisiti per i suoi costituenti, la sua composizione e una classificazione sulla base delle prestazioni di laboratorio.

### **2.7.1 Interventi su strade con pavimentazione in conglomerato bituminoso**

La procedura riportata di seguito identifica lo schema da seguire nel caso d'interventi di manutenzione su reti di servizi posizionate al di sotto del piano viabile comunale per ripristinare gli strati componenti la pavimentazione stradale. La tipologia di lavoro si diversifica in base al tipo di strato impiegato per la costruzione della struttura originale, verrà riportato solo il caso più noto (sovrastutture in conglomerato bituminoso), per i restanti si lascia la consultazione al capitolato di uso e manutenzione del sottosuolo del Comune di Bologna.

Gli interventi su strade con pavimentazioni di conglomerato bituminoso dovranno essere eseguiti conformemente alle allegate schede esplicative “A – B – C – D”, nel rispetto delle seguenti prescrizioni:

- a) Taglio della pavimentazione eseguito con fresa meccanica, per la larghezza di scavo stabilità; nel caso in cui le caratteristiche stradali o il tipo d'intervento (pronto intervento), impediscano l'uso della fresa, il taglio della pavimentazione dovrà essere eseguito esclusivamente con macchie a lama rotante. Qualora l'asse dello scavo sia posizionato ad una distanza minore o uguale a 1 metro dal bordo o dal ciglio stradale si dovrà eseguire la fresatura fino a tale limite, per l'intero spessore della pavimentazione;
- b) Scavo e trasporto a rifiuto di tutto il materiale di risulta;
- c) Il piano di posa delle condotte può essere eseguito con sabbia di fiume o con sottofondo in conglomerato cementizio;
- d) Riempimento dello scavo eseguito nel modo seguente:
  - per scavi di sezione fino a 1.5 m<sup>2</sup>, con malta fluida autolivellante ed auto costipante fino alla quota di -15 cm dal piano viabili. Gli scavi posizionati

- al di fuori della sede stradale ma comunque a distanza inferiore ad 1 metro dal ciglio della medesima, dovranno essere reinterrati con malta fluida autolivellante ed auto costipante;
- per scavi di sezione superiore a  $1.5 \text{ m}^2$ , con materiali aridi appartenenti ai gruppi A1, A2-4, A2-5, A3 (CNR – UNI 10006), stesi in opera a regola d'arte per strati di 30 cm per volta, bagnati e costipati a rifiuto, fino a -65 cm dal piano stradale finito; successiva stesa di inerte naturale stabilizzato per uno spessore di 50 cm (sempre per strati, bagnato e costipato) fino a -15 cm dal piano stradale finito;
- e) Copertura provvisoria di primo tempo dello scavo con conglomerato bituminoso “chiuso”, con inerti tipo 0 – 22 mm, per lo spessore di 15 cm (da eseguire a regola d'arte, previa spruzzatura della mano di attacco con emulsione bituminosa adeguata nella qualità e quantità, rullatura del conglomerato bituminoso con appositi rulli costipatori e successivi “copertura”, con particolare attenzione alle “attaccature”, con emulsione bituminosa acida e sabbia fine di Po asciutta), compreso il rifacimento della segnaletica orizzontale e verticale eventualmente cancellata o danneggiata. Devono essere effettuati con estrema urgenza ed ogni qualvolta si rendesse necessario, allo scopo di eliminare ogni possibile pericolo alla pubblica incolumità, eventuali interventi intermedi con aggiunta di conglomerato bituminoso a fronte di assestamenti della pavimentazione;
- f) Dopo aver assoggettato al traffico l'area d'intervento per un congruo periodo di tempo, comunque non inferiore a un mese verrà eseguita, previo accordo con il personale di sorveglianza del Comune, in stagione opportuna, la copertura di secondo tempo (o definitiva) dello scavo nel modo seguente:
- fresatura della pavimentazione per una larghezza minima pari a quella di scavo maggiorata di una quantità  $L_1$  su entrambi i lati (Allegato “P”) che sarà direttamente proporzionale alla profondità di scavo eseguito, andando così a riprendere nelle zone adiacenti tutti gli eventuali cedimenti e assestamenti causati dal sezionamento e conseguente indebolimento della fondazione stradale nel caso dei lavori e per lo spessore minimo di 4 cm dal piano della pavimentazione esistente;

- tappeto di usura in conglomerato bituminoso dello spessore minimo di 4 cm (previa mano d'attacco con emulsione bituminosa), realizzato utilizzando conglomerati bituminosi modificati, appositi rulli costipatori e copertura finale con emulsione acida e sabbia di Po, curando particolarmente la saturazione dei giunti di contatto con le vecchie pavimentazioni e garantendo l'uniformità rispetto alla pavimentazione stradale esistente. Nelle strada con pavimentazione in conglomerato normale e per sezioni di ripristino con superficie orizzontale non superiore a 10 m<sup>2</sup> è ammesso l'impiego di conglomerato bituminoso normale sempre per lo spessore di 4 cm;
- riporto di tutti i chiusini, boccaporti, botole e caditoie stradali interessanti dal lavoro alla quota della nuova pavimentazione avendo particolare cura nel rifacimento delle pendenze per lo smaltimento delle acque meteoriche;
- per motivate e comprovabili ragioni tecniche, in relazione ai lavori eseguiti, il Comune potrà richiedere variazioni alle quantità dei ripristini da eseguire. In particolare tale richiesta potrà essere formulata quando siano effettuati scavi longitudinali di larghezza superiore al 20 % dell'intera larghezza della carreggiata stradale, oppure siano stati eseguiti numerosi e ravvicinati tagli trasversali, tali da provocare rilevanti irregolarità superficiali, discontinuità delle pendenze della carreggiata, disomogeneità nella struttura della pavimentazione con conseguente perdita delle caratteristiche di impermeabilità superficiale;
- nel caso in cui non si fosse verificato alcun calo ne ammaloramento dei fianchi dello scavo, il concessionario potrà proporre al Comune, che si riserva la facoltà di accettare, di regolarizzare lo scavo mediante la stesa di un microtappeto a caldo o mediante la stesa a freddo di una malta bituminosa additivata (slurry – seal);
- rifacimento della segnaletica orizzontale e verticale.

### **2.7.2 Ulteriori prescrizioni sull'esecuzione dei lavori**

Le prescrizioni tecniche per gli interventi nel sottosuolo, nel Comune di Bologna, stabilisce che le condutture sotterranee devono essere posate ad una profondità non inferiore a 1 metro dal piano stradale, intendendo tale misura presa dalla generatrice superiore esterna della condotta. Soltanto nei casi di forzata impossibilità di raggiungere detta profondità, per impedimenti inamovibili nel sottosuolo, potrà essere consentita una minore profondità, con le adeguate prescrizioni speciali da concordare con i tecnici del Comune e con gli altri utenti interessati dal sottosuolo.

La profondità dei manufatti in sede di marciapiedi non dovrà essere inferiore a 0.5 m. In tutti i casi dovranno essere particolarmente osservate le norme C.E.I. (Comitato Elettrotecnico Italiano) con riguardo alle eventuali azioni elettrolitiche o di accoppiamento prodotto da tubature metalliche o da condutture elettriche di altri servizi pubblici. Con i nuovi impianti dovranno essere scrupolosamente osservate tutte le altre specifiche normative tecniche ed amministrative stabilite dalla legislazione vigente.

Sono state riportate solamente le prescrizioni interessanti il progetto di ricerca all'interno del capitolato di uso e manutenzione del sottosuolo.

### **2.7.3 Qualità dei materiali e prove di verifica sulle lavorazioni eseguite**

La qualità di materiali utilizzati e le lavorazioni da eseguirsi dovranno rispettare le caratteristiche stabilite dal Capitolato Speciale d'Appalto del Comune di Bologna, "Capo C – Norme Tecniche", per la costruzione e la manutenzione delle stradi comunali, in particolare per quanto riguarda il modulo di deformazione delle fondazioni stradali e sulle caratteristiche dei conglomerati.

Le prove sono a carico dei Concessionari ed è fatto obbligo di eseguire a campione, per le diverse tipologie d'intervento e caratteristiche delle infrastrutture, o su ordine del Comune di Bologna, le seguenti prove prestazionali regolarmente certificate da laboratori autorizzati.

1. Prove durante il RIEMPIMENTO:

- Prova di carico con piastra (Norma CNR n. 9/67, 146/92)
- a 65 cm dal piano stradale finito su materiali aridi:

$M_d$  (con  $\Delta p$  compreso tra 0.5 e 1.5 kg/cm<sup>2</sup>)  $\geq$  150 kg/cm<sup>2</sup> (15 MPa)

- a 15 cm dal piano stradale finito su inerte naturale stabilizzato:

$M_d$  (con  $\Delta p$  compreso tra 1.5 e 2.5 kg/cm<sup>2</sup>)  $\geq$  500 kg/cm<sup>2</sup> (50 MPa)

- a 5 cm dal piano stradale finito su misto cementato (a 28 giorni):

$M_d$  (con  $\Delta p$  compreso tra 2.5 e 3.5 kg/cm<sup>2</sup>)  $\geq$  4000 kg/cm<sup>2</sup> (400 MPa)

- a 5 cm dal piano stradale finito su malta fluida autolivellante:

$M_d$  (con  $\Delta p$  compreso tra 1.5 e 2.5 kg/cm<sup>2</sup>)  $\geq$  1600 kg/cm<sup>2</sup> (160 MPa)

- Prova di carico con piastra a due cicli per valutare il costipamento

- valori attesi:  $M_{d1}/M_{d2} = 0.25 \div 0.4$

2. Prove di verifica a LAVORO CONCLUSO:

- Trave di Benkelmann (Norma CNR 141/92)

- deflessione  $\leq$  0.7 mm (media su 10 prove)

## 2.8 Le Specifiche Tecniche Inglesi

Il progetto di ricerca “ZeroWASTER” è stato sviluppato seguendo le specifiche tecniche inglesi. In Inghilterra tali specifiche, che disciplinano i lavori sulle infrastrutture viarie, sono elaborate da parte del Dipartimento dei Trasporti a differenza di quelle italiane che provengono dagli uffici tecnici competenti. I regolamenti a cui si è fatto riferimento sono stati:

- “*Series 800 – Road Pavements, Unbound, Cement and other Hydraulically Bound mixture*” ;
- “*SROH – Specification for Reinstatement of Opening in Highways*”;
- “*Practical Guide to Street Works*”

### 2.8.1 “Series 800 – Road Pavements, Unbound, Cement and other Hydraulically Bound mixture”

La specifica tecnica “*Series 800*”, emanata dal “*Highway Authorities*”, riguarda le miscele non legate, legate con cemento o altri leganti di tipo idraulico, che vengono impiegate all’interno di una pavimentazione stradale. L’elaborato è suddiviso in due

volumi, il primo contiene le specifiche elaborate dal Dipartimento dei Trasporti che fanno riferimento alle norme tecniche europee adottate anche in Italia, mentre il secondo volume, da consultare in parallelo, contiene le spiegazioni e i consigli per la corretta applicazione delle specifiche tecniche in campo stradale, del quale si parlerà in seguito.

All'interno della norma la prima distinzione che viene fatta è quella tra materiali legati e non legati, che rappresentano i materiali impiegati nel progetto "ZeroWASTER" per la chiusura degli scavi.

La specifica tecnica classifica i materiali non legati in 4 differenti gruppi (type 1 – 4), in base alle caratteristiche geometriche degli aggregati, hanno origine da frantumazione di inerti di dimensioni maggiori che possono essere sia vergini di cava, sia provenienti da materiale riciclato. La composizione degli inerti provenienti da riciclo non può superare valori limite per determinati materiali. La curva granulometrica ottenuta dall'analisi della miscela, deve essere racchiusa all'interno del fuso granulometrico che stabilisce dei limiti per ottenere un composto delle proporzioni in massa richieste dal capitolato. Ogni inerte costituente un gruppo inoltre deve garantire determinati parametri prestazionali, il principale è rappresentato dalla resistenza a frantumazione ottenuta mediante la prova Los Angeles. All'interno della prima parte della norma sono riportate le specifiche per la compattazione dei materiali in strati a seconda dello spessore e del macchinario usato per l'operazione. I materiali di tipo 1 che hanno origine da rocce, scorie o calcestruzzo frantumato o da aggregati riciclati devono avere caratteristiche conformi a quanto riportato nella norma BS EN 13285.

Nella seconda parte della norma sono riportate tutte le specifiche tecniche relative alle miscele ottenute con l'impiego di leganti idraulici, quindi si parlerà di miscele legate. La norma identifica tramite una sigla di abbreviazione tutte le miscele ottenibili impiegando i differenti leganti idraulici idonei a questo utilizzo, un composto ottenuto dalla miscelazione di cemento e materiale granulare sarà chiamato "*CBGM – Cement Bound Granular Material*" mentre una miscela di terreno trattato con ceneri volanti sarà "*SFA – Soil treated by Fly Ash*". La norma stabilisce inoltre le quantità minime di legante da impiegare che si diversificano a seconda della produzione della miscela in sito o in laboratorio, in particolare per quanto riguarda l'uso delle ceneri volanti predispone una quantità minima di legante (calce) da usare come attivatore per il



processo di presa. Vengono analizzate tutte le miscele ottenute con l'impiego dei leganti idraulici, ognuna di queste deve rispettare quanto elaborato e prescritto dalle norme tecniche BS EN 13242.

## 2.8.2 “SROH – Specification for Reinstatement of Openings in Highways”

Il Dipartimento dei Trasporti inglese, mediante l'ente “HAUC – Highway Authorities & Utilities Committee” ha elaborato un insieme di specifiche tecniche raccolte all'interno del capitolato denominato: “Specification for Reinstatement of Openings in Highways” che stabiliscono le procedure per i lavori di ripristino di scavi avvenuti sulla sede stradale.

La prima classificazione eseguita riguarda la suddivisione delle differenti tipologie di strade in 5 classi, in base al valore limite di sollecitazioni per le quali sono state progettate. Il parametro di progetto impiegato per la classificazione è stato il numero di assi equivalenti standard (*msa millions of standard axles*) mostrati nella tabella della figura 2.1.

Table S1.1 Road Categories	
Road Category	Traffic Capacity
Type 0	Roads carrying over 30 to 125 msa
Type 1	Roads carrying over 10 to 30 msa
Type 2	Roads carrying over 2.5 to 10 msa
Type 3	Roads carrying over 0.5 to 2.5 msa
Type 4	Roads carrying up to 0.5 msa

Fig. 2.1 – Estratto dalla specifica tecnica “SROH” – Classificazione delle strade

Per strade aventi un numero di *msa* superiore ai 125 previsti dalla specifica tecnica, i progetti di ripristino del pacchetto stradale devono essere elaborati secondo capitolati specifici per questo tipo di infrastrutture.

Successivamente la norma classifica le trincee in base alla dimensione dello scavo eseguito in quattro classi:

- “*Small Excavation*”, gli scavi con un'area  $\leq 2 \text{ m}^2$ ;

- “*Narrow Trenches*”, le trincee con larghezza  $\leq 300$  mm, o un’area  $\geq 2$  m<sup>2</sup>;
- “*Deep Openings*”, gli scavi con profondità  $\geq 1.5$  m;
- “*Other Openings*”, gli scavi con un’area  $\geq 2$  m<sup>2</sup>.

In particolare la norma definisce, per le superfici costituite da elementi modulari, la larghezza dello scavo da eseguire tramite la rimozione degli elementi, che risulterà di dimensioni maggiori rispetto ad uno scavo eseguito su una pavimentazione in conglomerato bituminoso. Tale specifica riferita a moduli di dimensioni maggiori o minori di 300 mm, è visibile nelle figure 2.2 e 2.3 riportate successivamente.

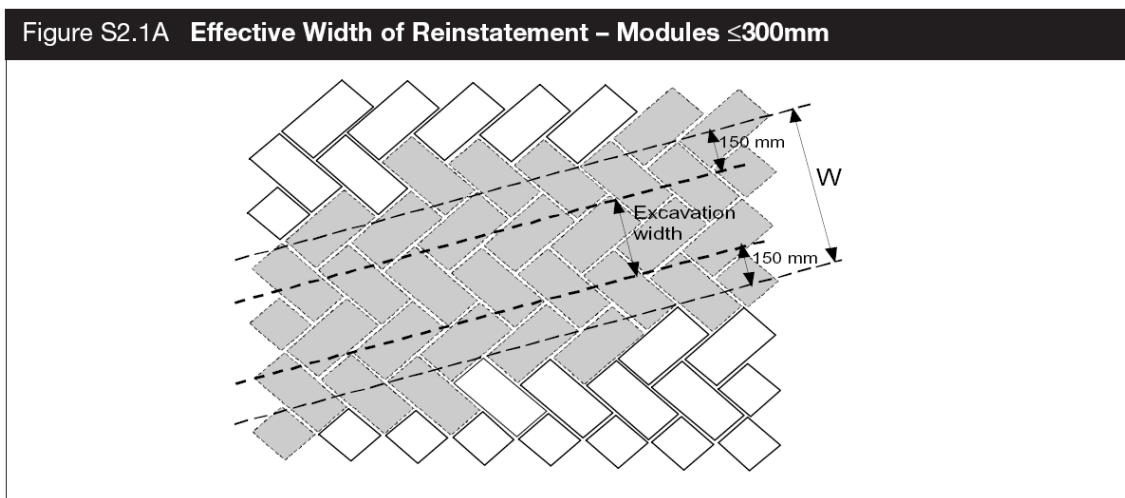


Fig. 2.2 – Estratto dalla “SROH” – Larghezza di scavo per strade in elementi modulari  $\leq 300$  mm

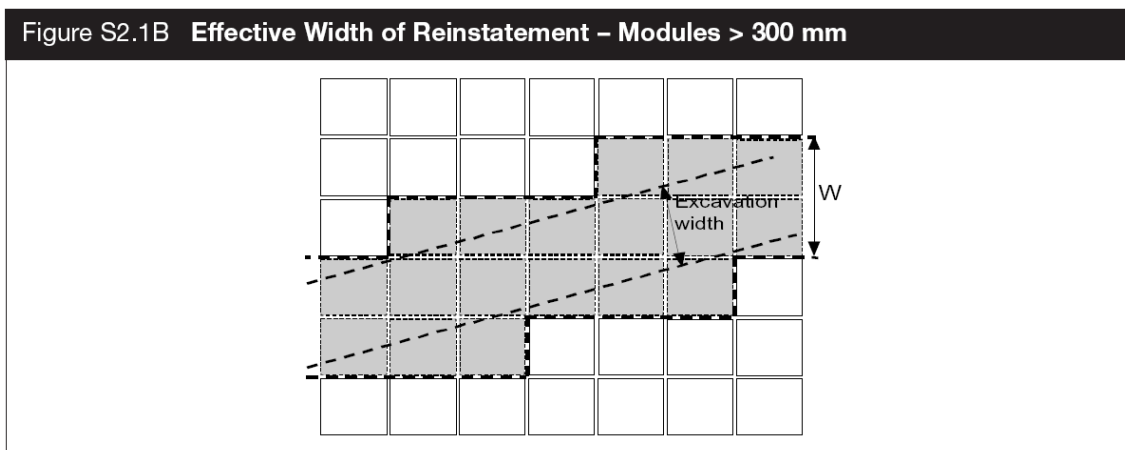


Fig. 2.3 – Estratto dalla “SROH” – Larghezza di scavo per strade in elementi modulari  $> 300$  mm

Gli scavi eseguiti su pavimentazioni di tipo flessibile devono avere, secondo la specifica tecnica, un contorno ben definito e squadrato in modo da ottenere uno scavo avente una forma regolare senza discontinuità (fig.2.4). Tale operazione è richiesta affinché si possa eseguire successivamente una corretta operazione di sigillatura onde evitare infiltrazioni d’acqua che rappresentano una fonte di deterioramento per gli strati della pavimentazione.

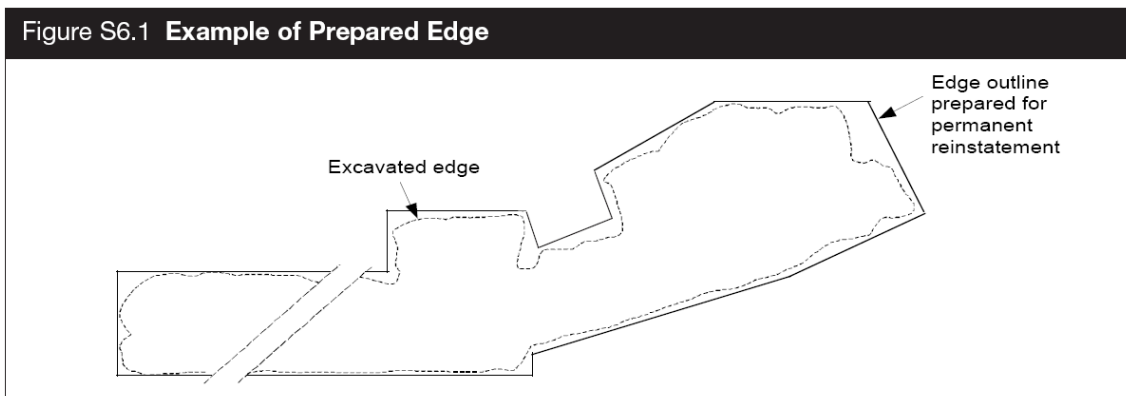


Fig. 2.4 – Estratto dalla “SROH” – Metodologia per l’esecuzione dei contorni dello scavo

La norma identifica la possibilità di impiegare materiali per il ripristino degli scavi, con materiali alternativi. Nel paragrafo S 1.6, si specifica che possono essere usati materiali secondari, vergini, riciclati o una combinazione di essi purché garantiscano in opera i requisiti prestazionali richiesti per lo strato in cui vengono stesi; gli “*Alternative Reinstatement Materials*” permessi dalla specifica tecnica sono elencati e descritti in un’appendice all’interno della norma.

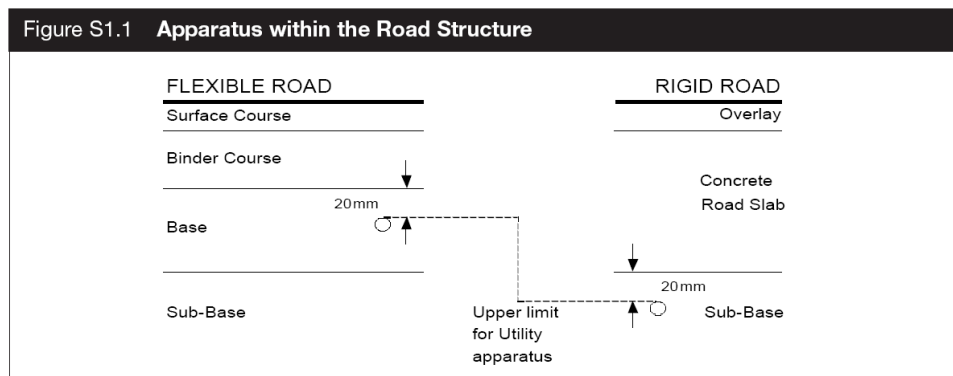


Fig. 2.5 – Estratto dalla specifica tecnica “SROH” – posizionamento rete di servizi

L'uso dei materiali stabilizzati è permesso negli strati in cui vengono posate le reti di servizi, che devono essere adagiate a non meno di 20 mm dal lato superiore dello strato di base per le pavimentazioni flessibili e a 20 mm dal lato inferiore dello strato di cemento armato nelle pavimentazioni rigide (fig.2.5).

La norma classifica i materiali da ripristino in 5 classi differenti (*A Graded Granular Materials* – *B Granular Materials* – *C Cohesive/Granular materials* – *D Cohesive materials* – *E Unacceptable Materials*), suddividendoli in base alle caratteristiche riscontrate. Tutti i materiali granulari per poter essere considerati idonei per il ripristino, devono passare attraverso il setaccio con apertura pari a 75 mm (*BS Sieve*) mentre per trincee aventi una larghezza inferiore a 150 mm, il setaccio impiegato avrà maglie di 37.5 mm (*BS Sieve*).

La classe A rappresenta il gruppo di materiali migliori, con proprietà fisiche, chimiche e di resistenza paragonabili a quelle di un materiale vergine; infatti la norma suggerisce che, nel caso in cui si trovi un materiale di classe A, è comunque opportuno classificarlo in una classe inferiore perché non è un materiale nuovo proveniente dalla cava. Nel caso in cui le terre nello stato in cui si trovano al momento dello scavo, o in seguito a trattamento non garantiscano i dovuti requisiti di resistenza, dovranno essere scartate e sostituite con materiale inerte proveniente dalla cava.

I materiali classificati nella categoria E (inaccettabili) o aventi particelle con diametro nominale maggiore di 37.5 mm, non potranno essere impiegati neanche nello strato costituente il letto di posa della rete. Sono invece previsti per tale impiego i materiali alternativi, definiti all'interno della specifica nell'Appendice A9 (*Alternative Reinstatement Materials ARMs*).

Il Dipartimento dei Trasporti Inglese ha sviluppato in parallelo alla specifica tecnica vista in precedenza, un manuale per la corretta interpretazione e applicazione sul campo della norma. Il testo non ha carattere normativo essendo un capitolato tecnico, anche se al suo interno sono riportate evidenziate parti della specifica, ma rappresenta una guida da seguire per le imprese che svolgono i lavori.

I punti principali contenuti all'interno di tale guida, per l'esecuzione di un lavoro corretto, coprono tutte le differenti fasi in cui si suddivide l'intervento. Molto importante da utilizzare in sito è la classificazione delle terre da scavo in 5 classi (A – B – C – D – E), tramite un procedimento di riconoscimento visivo e manuale. Tale

operazione permette di ottenere in tempi ridotti indicazioni sul tipo di materiale ottenuto dallo scavo (fig.2.6), tale metodologia è riportata in allegato *Annex 1*.

Property		CLASS				
		A	B	C	D	E
<b>Grading</b>	Passing 63 microns BS sieve	Max 10%	Max 10 %	10 – 80%	min 80%	
	Uniformity coefficient (D <sub>60</sub> /D <sub>10</sub> )	> 10	Less well graded Than class A	Not single size		
	Max size	< 50 mm	< 75 mm	< 75 mm	< 75 mm	
<b>Consistency</b>	Plasticity index (BS 1377:part 2: method 5.4)	Max 6				> 65
	Liquid limit (BS 1377:part 2: method 4)					>90
<b>Compaction</b> (BS 1377: part 4 Vibrating Hammer, method 3.7)	Moisture content (mc) at compaction	- 2% < omc < 1%	- 2% < omc < 1%	For granular content (gc) < 50%, mc = 0.8-1.2 times of PL, for gc > 50%, - 2% < mc < 1%	0.8-1.2 times of PL	
<b>Strength</b>	TFV (10% fines value) (BS 812 : part 111) soaked condition	> 40 kN				
	Soaked CBR (SROH A 9.4.2)	15 – 30	7 – 15	4 – 7	2 – 4	

Fig. 2.6 – Estratto dalla specifica “SROH” – Classificazione delle terre da scavo

Una corretta compattazione in sito dei materiali garantisce il raggiungimento dell’adeguato addensamento. Grazie allo svolgimento di questa operazione è possibile ottenere le proprietà di resistenza richieste dalla specifica tecnica. La “*Practical Guide to*

*Street Works*” fornisce differenti indicazioni su tale operazione, in modo da poter valutare direttamente in sito la validità del lavoro eseguito o di un’eventuale correzione. Nel caso si ecceda con la compattazione, si ottiene uno strato avente uno spessore minore rispetto a quanto previsto dalle specifiche, il che porta alla rottura dei materiali granulari, ad una scarsa densità nella parte superficiale e alla formazione di un materiale “*overstressed*” dovuto all’eccessiva permanenza della forza compattante. Se lo strato ottenuto, ha uno spessore di dimensioni superiori a quanto stabilito, significa che la compattazione non è stata sufficiente e non è stato ottenuto un adeguato grado di addensamento (fig.2.7).

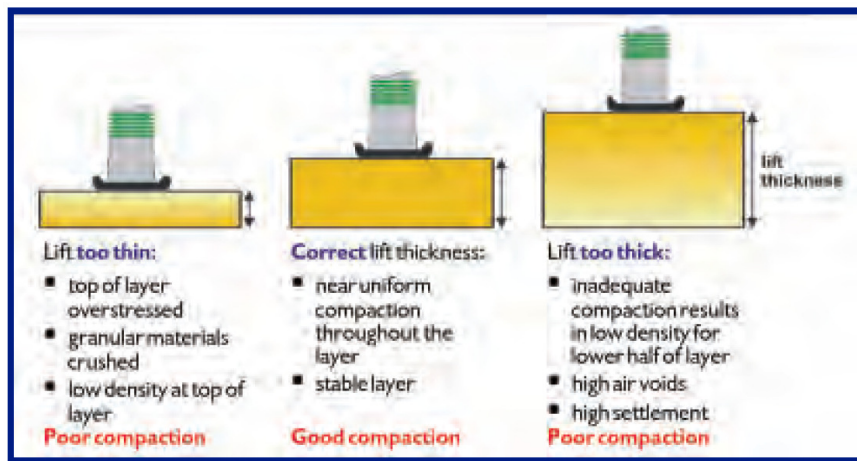


Fig. 2.7 – Estratto dalla“*Practical Guide to Street Works*” – Effetti della compattazione

Per valutare l’effettivo addensamento dello strato ottenuto in seguito alla compattazione, la guida ha redatto una tabella di conversione tra lo spessore dello strato e la percentuale del suo cedimento che andrà valutato a seconda del materiale compattato (fig.2.8 – 2.9).

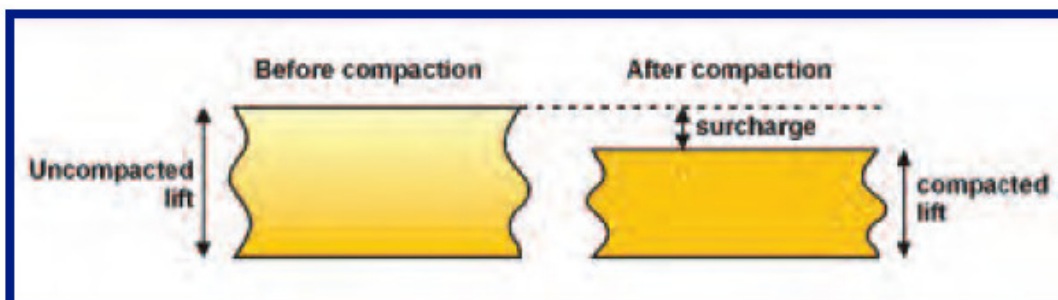


Fig. 2.8 – Estratto dalla“*Practical Guide to Street Works*” – Effetti della compattazione

% surcharge	Compacted lift thicknesses (in mm)					
	40	50	60	100	150	200
10%	4	5	6	10	15	20
15%	6	7.5	9	15	22.5	30
20%	8	10	12	20	30	40
25%	10	12.5	15	25	37.5	50
30%	12	15	18	30	45	60
35%	14	17.5	21	35	52.5	70
40%	16	20	24	40	60	80

Fig. 2.9 – Estratto dalla “*Practical Guide to Street Works*” – Tabella di conversione

Prendendo come esempio il materiale granulare impiegato per il ripristino degli scavi, il cedimento deve essere pari a circa il 25% dello spessore dello strato mentre, nel caso si tratti di materiale coesivo, la percentuale sarà pari al 40%.

La guida specifica il metodo con cui si devono compattare gli strati in base alla larghezza dello scavo al fine di garantire una corretta operazione. I passaggi dello strumento compattante devono avvenire secondo le modalità esplicitate nella figura 2.10.

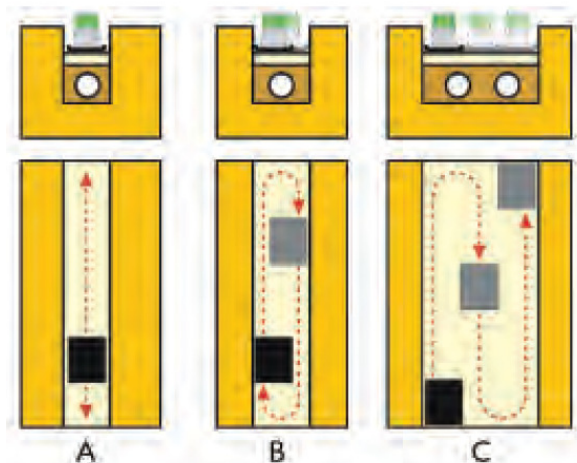


Fig. 2.10 – Estratto dalla “*Practical Guide to Street Works*” – Metodologia di compattazione

La “*Practical Guide to Street Works*” rappresenta quindi una guida pratica e di facile consultazione in sito al fine di svolgere correttamente le operazioni di ripristino della sovrastruttura stradale in seguito ad interventi di manutenzione di reti per servizi urbani. Si lascia alla consultazione degli allegati per una visione globale delle indicazioni fornite.

# CAPITOLO 3

➤ *Lo studio sperimentale inglese*



### 3.1 Il progetto “ZeroWASTER”

Il continuo sviluppo economico e tecnologico che ha caratterizzato l'ultimo secolo, ha portato ad una richiesta sempre maggiore di materie prime che non sono inesauribili. Questo ha creato un continuo aumento sia dei prezzi che della produzione di sostanze inquinanti. Per far fronte a questi problemi la ricerca si è orientata verso la concreta possibilità di riciclare le materie di scarto, in modo da poterle reintrodurre nel ciclo produttivo ad un costo minore e salvaguardando, per quanto possibile, l'ambiente.

Da queste considerazioni nasce l'idea base del progetto “ZeroWASTER”: introdurre nel campo della manutenzione stradale, in particolare nelle operazioni di apertura e chiusura delle trincee urbane, materiali di scarto provenienti sia dalla rimozione dei vecchi materiali, sia da cicli produttivi esterni.

L'ideatore del progetto “ZeroWASTER” è stato il professor Andrew Dawson facente parte del centro di ricerca N.T.E.C. dell'Università di Nottingham nel Regno Unito. Il “Nottingham Transportation Engineering Center”, nel quale sono state svolte le ricerche sperimentali del progetto, è nato nel 2001 grazie alla partnership commerciale con la SHELL BITUMEN; è diretto dal professor Andy Collop che ha incentrato gli studi del dipartimento sui materiali e le pavimentazioni stradali.

Il progetto ha come obiettivo principale il reimpiego delle terre provenienti dallo scavo di trincee urbane come materiale di rinterro. Nella maggior parte dei casi il terreno non presenta proprietà meccaniche che lo rendano idoneo al riutilizzo, quindi l'unica soluzione possibile è lo stoccaggio in discarica che potrebbe divenire nel tempo fonte di inquinamento. In seguito ad una prima fase di studio teorico, basata su una ricerca bibliografica in materia di riciclaggio, atta a verificare l'effettivo impiego dei materiali di scarto nel processo di manutenzione stradale, si è scoperto che studi precedenti hanno impiegato le ceneri volanti nel confezionamento delle miscele cementizie come filler. Le prime conclusioni tratte furono quindi che, grazie alle ottime proprietà pozzolaniche simili a quelle del cemento o della calce, le ceneri volanti potrebbero essere impiegate nella miscela per la stabilizzazione delle terre insieme ai leganti idraulici tradizionali.

I materiali di scarto da reintrodurre nel processo di manutenzione sono due aventi differente origine. Il prodotto di scarto principale sono le terre ottenute dall'apertura

degli scavi per la posa o la manutenzione delle reti urbane, quali acqua gas o energia elettrica, quindi derivanti direttamente dal processo primario. I secondi sono le ceneri volanti, polveri fini prodotte nella combustione di combustibile organico per la produzione di energia elettrica; anch'esse sostanze inquinanti ma con origine da un processo esterno e quindi materie di scarto di tipo secondario.

I vantaggi dell'effettivo impiego di questi materiali all'interno del ciclo produttivo hanno un impatto differenziato sulla popolazione. Hanno infatti effetti direttamente percepibili dall'utente della rete nel breve periodo, infatti svolgendo tutte le operazioni in sito si riducono i tempi di attesa creati dalla congestione dovuta ad un cantiere temporaneo sulla sede stradale e vengono ridotti gli spostamenti di veicoli pesanti sull'asse cantiere – discarica – cava – cantiere che sono causa di aumento del livello di traffico e peggioramento del livello di servizio dell'infrastruttura. Nell'impatto a lungo termine si riducono i quantitativi di inquinanti immessi nell'ambiente tramite la riduzione della produzione di rifiuti destinati alla discarica e grazie all'abbattimento delle emissioni nocive prodotte dai gas di scarico dei mezzi pesanti usati per il trasporto dei materiali.

Le ricerche sperimentali condotte all'interno dei laboratori dell'Università hanno riguardato differenti aspetti dell'ambito stradale, per alcune di esse è stato necessario appoggiarsi a dipartimenti esterni al N.T.E.C., ma sempre facenti parte dell'Università di Nottingham. Il principale è stato lo S.C.H.E.M.E., il dipartimento di ingegneria chimica ed ambientale, nel quale il professor Phil Hall e il professor Phil Windsor hanno collaborato allo studio del progetto supervisionando le fasi inerenti l'analisi della costituzione fisica del materiale oggetto dello studio.

La ricerca è stata sviluppata da un gruppo di lavoro con la collaborazione esterna di società private che hanno supportato il progetto con una sovvenzione economica. Ha preso parte al progetto anche il Governo Inglese tramite il "Department for Transport" perché ha interessi diretti essendo il proprietario di tutte le reti presenti con lo scopo di avere un ritorno sia in termini economici che tecnici. Le società finanziatrici inizialmente sono state due:

- Yorkshire Water, ente gestore della rete idrica dello Yorkshire, situata nella zona nord – est di Nottingham,
- Parker Plant Ltd, azienda privata che produce macchinari da cantiere.

Successivamente si è aggiunta come partner la società H<sub>2</sub>O, che gestisce in appalto i lavori di manutenzione della rete idrica gestita dalla Yorkshire Water che ha concesso la supervisione dei lavori in sito per poter analizzare le procedure impiegate tutt'ora.

L'interesse esterno delle società private operanti in questo campo proviene dall'obiettivo del progetto: il riciclaggio delle terre da scavo. Questo perché le frequenti operazioni di manutenzione che portano alla rimozione della sovrastruttura stradale per la riparazione delle reti e, allo stesso tempo, per lo sviluppo e la posa di nuove infrastrutture, garantirebbe alle società una forte riduzione dei costi delle materie prime necessarie per la chiusura delle trincee.

Il materiale proveniente dagli scavi generalmente è eterogeneo, non sempre presenta caratteristiche proprie che lo rendano idoneo al riciclaggio quindi prima deve essere analizzato per avere delle indicazioni sulle reali condizioni.

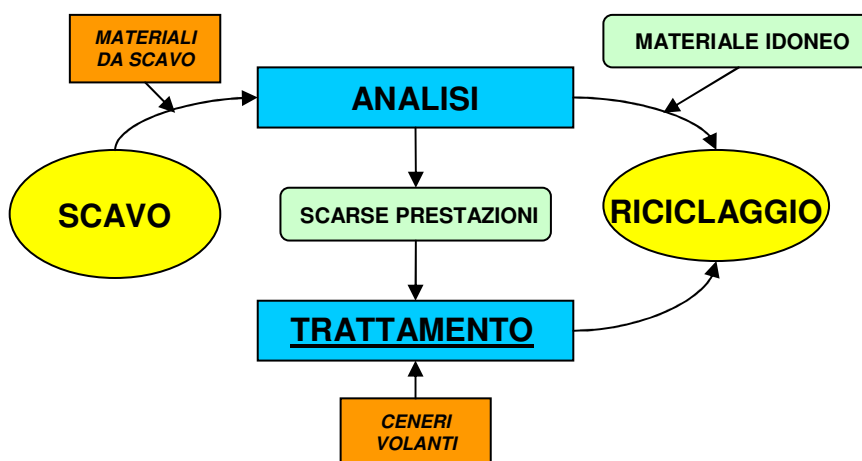


Fig. 3.1 – Flow chart del processo di riciclaggio

Se in seguito alle valutazioni il materiale presenta caratteristiche prestazionali che soddisfino gli standard tecnici, può essere direttamente reimpiegato nel ciclo produttivo; in alternativa deve essere trattato al fine di migliorare le proprietà meccaniche per rendendolo resistente alle azioni cui sarà soggetto in opera (fig.3.1).

La società Yorkshire Water ha fornito i campioni di terra da scavo impiegati nella ricerca, la prequalifica ha costituito il punto di partenza di un processo sistematico necessario a determinare una procedura di lavoro, il cui scopo è quello di ottimizzare il rendimento del ciclo ed aumentare la percentuale di materiale riciclabile. Entrando nello specifico si può suddividere il processo in tre fasi principali (fig.3.2):

1. Separazione,
2. Prequalifica,
3. Trattamento.

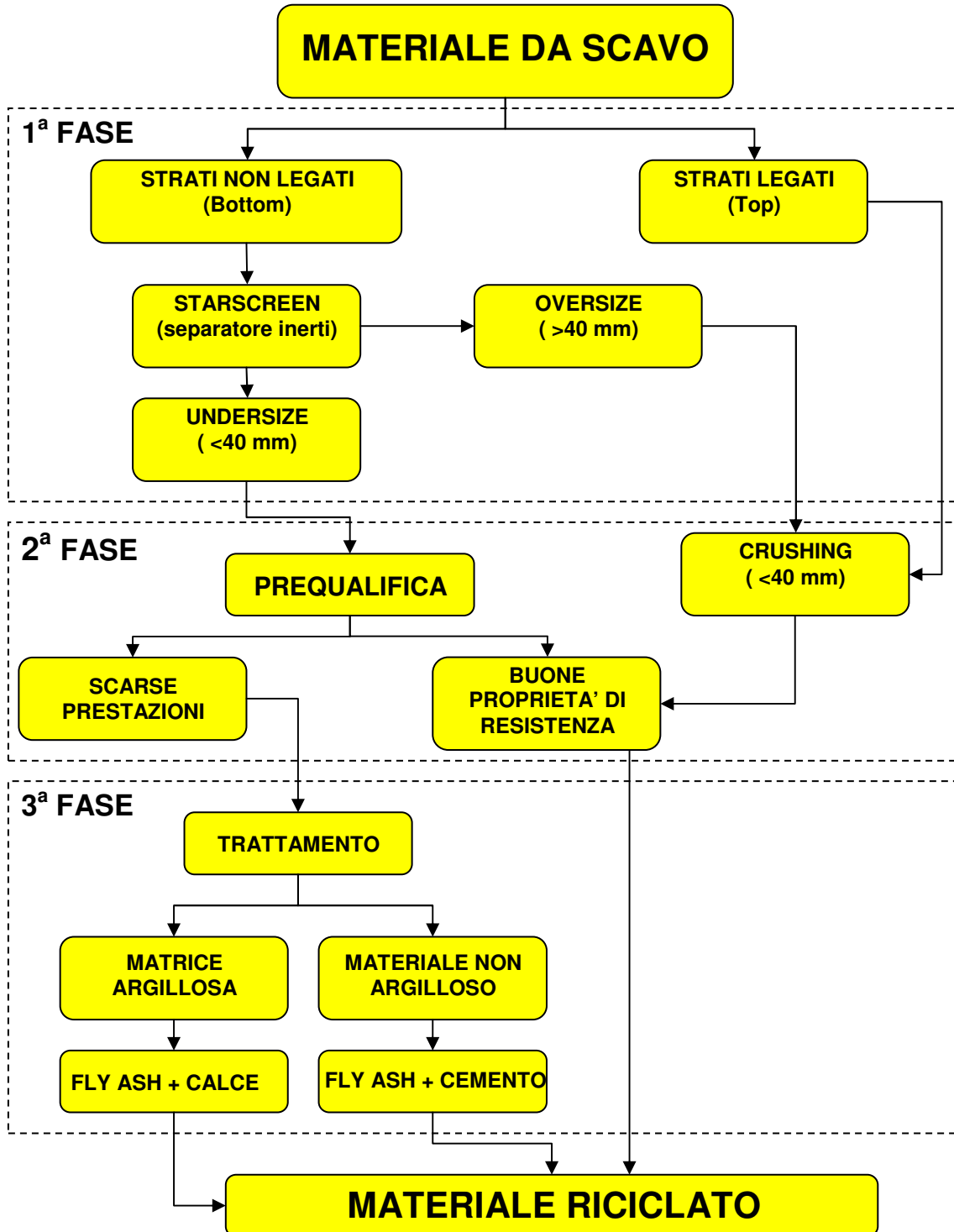


Fig. 3.2 – Flow chart dettagliata delle fasi del processo

Ogni singola fase si suddivide a sua volta in sotto fasi differenti (illustrate nella diagramma di figura 3.2) in cui vengono impiegate tecniche specifiche e macchinari per l'analisi e il trattamento del materiale.

### 3.2 1<sup>a</sup> Fase: *SEPARAZIONE*

L'operazione iniziale per l'apertura di una trincea su una pavimentazione di tipo flessibile composta dagli strati superiori legati mediante bitume e gli strati profondi non legati, prevede il taglio della superficie mediante una sega circolare lungo il perimetro dell'area d'intervento (fig.3.3).

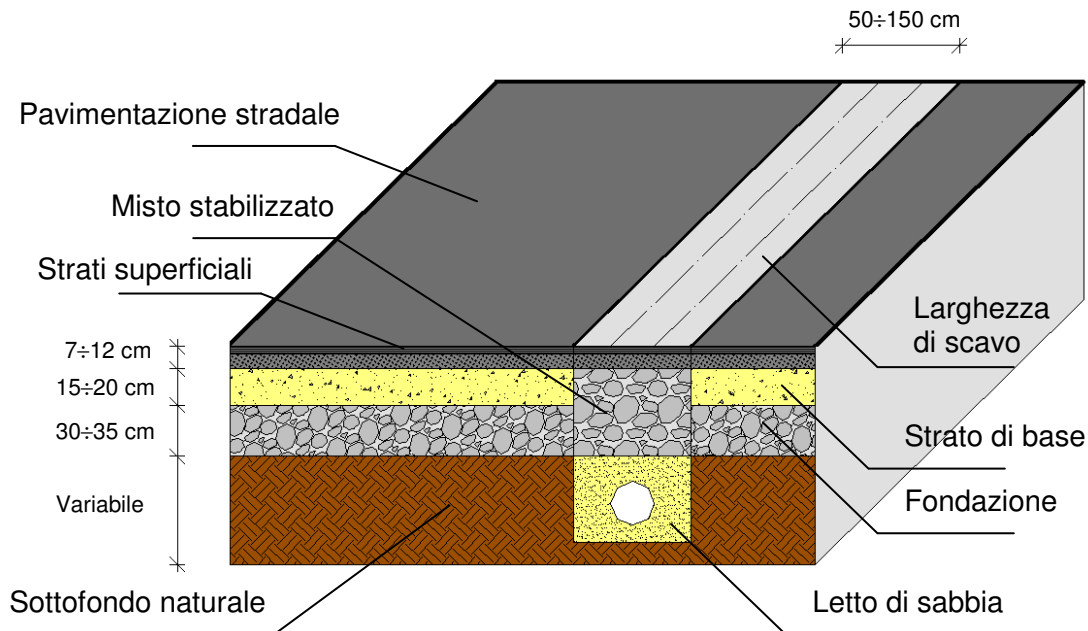


Fig. 3.3 – Schema tipo di pavimentazione e area di intervento

In seguito vengono separati gli strati perché subiranno un trattamento con metodologia differente per via della loro natura. In interventi di questo tipo, gli strati bituminosi, vengono rimossi in grossi blocchi compatti che hanno circa le dimensioni dell'area della trincea. Nella fase 1 vengono inviati insieme agli inerti con pezzatura maggiori di 40 mm ad un macchinario frantumatore in modo che li renda di dimensioni consone al diretto reimpiego.

Gli strati inferiori non legati sono composti di varia natura comprendenti pezzature di granulometria assortita per via del rimescolamento avvenuto durante l'

escavazione in sito. L'obiettivo della fase 1 è quindi quello di separare le differenti granulometrie presenti in due categorie distinte:

1. Aggregato grosso > 40 mm
2. Aggregato fine < 40 mm



Fig. 3.4 – Starscreen

La soluzione adottata è stata quella di utilizzare un macchinario destinato all'industria del legname e agricola avente la funzione di separare il materiale in due gruppi di dimensioni differenti. La società "Pearson Separation Ltd" ha fornito il macchinario denominato "Starscreen" (fig.3.4), il modello scelto è stato il più piccolo della categoria per due motivi:

- dimensioni del corpo contenute idonee ad un futuro impiego in sito;
- tramoggia di recapito con volumi ridotti paragonabili al volume di terreno estratto dallo scavo.

Il macchinario è un impianto di separazione meccanica per gli inerti, è costituito da un corpo principale di circa 10 metri suddiviso a sua volta in 4 step in cui si svolgono le operazioni meccaniche. Nella parte posteriore è posizionata la tramoggia di recapito che ha la funzione di indirizzare il materiale, tramite un piano scorrevole, nella parte

centrale in cui avviene la separazione degli inerti. In questa fase il macchinario disgrega il materiale mediante degli apparati meccanici composti da stelle rotanti in plastica (fig. 3.5a). L'azione rotante delle "Star" produce una forza di taglio che, al momento del contatto, disgrega il materiale in ammassi di dimensioni minori fino a ridurlo alla misura necessaria. La pezzatura più grossa ottenuta viene trattenuta e trasportata nella tramoggia di raccolta posta nella parte anteriore. Allo stesso tempo l'aggregato fine con dimensioni minori di 40 mm passa, per effetto della gravità, attraverso le stelle rotanti su un piano scorrevole che lo accumula nella tramoggia posta lateralmente. Nel caso in cui il materiale sia formato da grossi ammassi compatti, vi sono delle molle a flessibilità variabile che hanno la funzione di trattenuta momentanea per consentire un'azione più incisiva della prima fila di stelle rotanti (fig. 3.5b).



Fig. 3.5a – Dettaglio delle "Star"



Fig. 3.5b – Dettaglio dell'azione delle "Screen"

I corpi rotanti sono in materiale plastico, il che consente di ridurre i costi di manutenzione e sostituzione. Infatti durante il funzionamento sono queste le parti maggiormente sollecitate ed esposte ad una elevata usura dovuta all'attrito che viene a crearsi al contatto diretto con il materiale. Il macchinario possiede inoltre differenti regolazioni dei suoi componenti meccanici, il che lo rende pratico e adattabile a diversi usi. Per variare la dimensione di separazione si agisce direttamente sulle distanze di posizionamento delle stelle rotanti su ogni fila che aumentando e diminuendo creano un vaglio vibrante che ha la funzione di trattenuta dell'aggregato grosso. In caso di materiale poco disgregato e compatto si agisce simultaneamente su due fattori: la velocità delle stelle rotanti viene aumentata in modo da incrementare la forza di taglio e in contemporanea vengono irrigidite le molle di trattenuta iniziali per aumentare il

tempo d'azione di disgregazione meccanica della prima fila di stelle rotanti. Lo “Starscreen” possiede altre numerose regolazioni che agiscono sulla velocità di rotazione dei nastri trasportatori delle tramogge, servono per adattare il macchinario alle differenti tipologie di materiale trattabile.

La prima fase termina al momento della totale separazione degli inerti in due granulometrie diverse: nella parte frontale l'aggregato grosso con pezzatura > 40 mm mentre nella parte laterale l'aggregato fine con dimensioni < 40 mm. Il processo continua con la fase successiva ed il materiale separato in tre gruppi diversi:

- aggregato grosso,
- aggregato fine,
- blocchi di materiale legato.

### **3.3 2<sup>a</sup> Fase: *PREQUALIFICA***

I materiali ottenuti dalla prima fase del processo saranno trattati diversamente per via delle dimensioni: l'aggregato grosso e i blocchi degli strati legati vengono frantumati mediante un macchinario (*Jaw Crusher*) che li riduce ad una pezzatura inferiore. L'aggregato fine viene analizzato e qualificato, in modo da ottenere parametri sulle reali condizioni di idoneità al reimpiego da rinterro diretto. La fase di prequalifica rappresenta la parte di ricerca sperimentale svolta all'interno dei laboratori dell'N.T.E.C. ed è costituita da un insieme di prove per la caratterizzazione iniziale dei campioni di terreno sui seguenti indicatori:

- *Contenuto d'acqua*: umidità del campione che influisce sulle caratteristiche meccaniche di resistenza del terreno;
- *Dielectric Value*: proprietà elettrica del terreno che descrive la variazione del campo elettrico del terreno, varia in base al contenuto d'acqua;
- *Impedence*: proprietà elettrica del terreno che descrive la resistenza prodotta dal terreno alla trasmissione di corrente elettrica al suo interno;
- *Indice CBR*: indice di portanza di un terreno rispetto ad un valore standard;
- *Clegg Hammer*: indice di portanza del terreno correlabile mediante relazione empirica all'indice CBR.



### 3.3.1 Il contenuto d'acqua “w”

Il contenuto d'acqua di un terreno rappresenta una delle caratteristiche fondamentali per l'analisi di un campione poiché ne modifica e altera le proprietà meccaniche ed influenza quelle elettriche. L'acqua presente in un terreno può essere:

1. *gravitazionale*: riempie i vuoti esistenti tra i singoli granuli ed obbedisce alle leggi della gravità;
2. *capillare*: in un terreno saturo d'acqua, per effetto delle tensioni di capillarità si ha una risalita d'acqua;
3. *adsorbita*: avvolge i granuli di terra con una pellicola sottilissima (centesimi di  $\mu$ ).

Il fenomeno dell'adsorbimento riveste una notevole importanza nell'influire sulle proprietà di un terreno argilloso. In particolare attorno alla pellicola *d'acqua adsorbita* che riveste il granulo se ne forma un'altra definite *acqua pellicolare*. Nei granuli adiacenti, per effetto delle tensioni superficiali, nascono azioni di mutua attrazione. Sono appunto tali tensioni superficiali presenti nelle pellicole d'acqua che fanno nascere una forza di compressione dalla quale dipende la *coesione* cioè la mutua attrazione tra le particelle solide. Tali tensioni superficiali sono piccole nelle sabbie ed assumono valori notevoli nei limi ed ancor più nelle argille. All'aumentare dell'umidità nel terreno le tensioni superficiali diminuiscono sino ad annullarsi in un terreno saturo d'acqua: ciò è dovuto all'aumentare del raggio della lamina liquida che aumenta con l'aumentare dell'umidità. In un terreno saturo pertanto il raggio della lamina liquida è pari a infinito. La presenza delle molecole d'acqua e degli ioni diffusi intorno ad ogni granulo argilloso crea pertanto un complesso di cariche elettriche. Di questo si dà una rappresentazione schematica in fig. 3.6.

Il processo di interazione fra i granuli avviene prevalentemente attraverso gli strati d'acqua adsorbita e di ioni diffusi e qualche volta anche attraverso contatto diretto. Le singole particelle, per effetto della carica negativa esistente sulla loro superficie, esercitano una reciproca azione repulsiva che decresce all'aumentare della distanza mutua dei granuli e della concentrazione elettrolitica. La tendenza al rigonfiamento di alcuni minerali argillosi, quali la montmorillonite e l'illite quando posti a contatto di acqua, è la manifestazione apparente delle forze di repulsione.

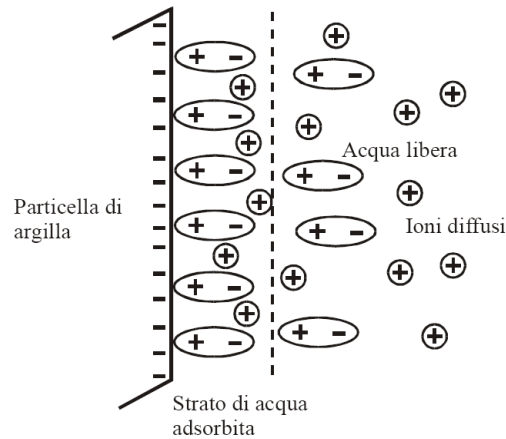


Fig. 3.6 – Schema di una particella di argilla con gli strati di acqua adsorbita e di ioni diffusi

Alla repulsione dovuta alle cariche elettriche sulla superficie dei granuli, si sovrappone un'attrazione dovuta alle forze di Van der Waals. Queste sono prodotte dal campo magnetico generato dal moto degli elettroni attorno ai nuclei e dipendono dalla costante dielettrica del mezzo, ma non dalla concentrazione elettrolitica, e diminuiscono molto rapidamente con la distanza tra i granuli.

Il contenuto d'acqua rappresenta quindi un fattore che determina ed influenza notevolmente le caratteristiche di un terreno. È il punto di partenza per lo studio della prequalifica del campione perché ad esso potranno essere correlate le caratteristiche elettriche ed i parametri di resistenza meccanica che rappresentano gli indicatori necessari per valutarne un possibile rimpiego.

### 3.3.2 Le proprietà elettriche: *Dielectric Value, Impedence*

La matrice delle terre naturali è formata da un composto di minerali o associazioni di minerali che presentano una determinata conducibilità elettrica dovuta per lo più alla presenza degli ioni di cui sono formati e dalla presenza d'acqua nel campione. Infatti, l'acqua che generalmente imbibisce parzialmente o totalmente i pori della roccia discioglie i composti ionici, come ad esempio  $\text{NaCl}$  e  $\text{Ca(OH)}_2$ , che si dissociano completamente e la soluzione acquosa diventa un buon conduttore di corrente. In questo modo la soluzione ha la capacità di condurre maggiormente corrente che non la matrice solida della roccia, influenzandone il comportamento elettrico.

Se nella terra sono presenti minerali argillosi, questi incidono profondamente soprattutto sulla resistività dei terreni in quanto, attraverso particolari interazioni con la soluzione elettrolitica, si verificano fenomeni di ionizzazione dei minerali argillosi e di conduzione superficiale. La ionizzazione è dovuta alla particolare struttura dei minerali argillosi: la disposizione parallela dei multistrati di silice e di alluminio e magnesio creano una carica negativa dovuta alla sostituzione di ioni di alluminio con quelli di silice all'interno della struttura. Per bilanciare questa parziale carica negativa, le particelle d'argilla attraggono i cationi dall'ambiente circostante; in questo modo si distribuisce sulla superficie del minerale argilloso una nuvola di cationi. Questi cationi non fanno parte della struttura cristallina dell'argilla, ma sono semplicemente trascinati dalla soluzione acquosa che la circonda e le argille possono così prendere ioni dalla soluzione e sostituirli con ioni differenti dalla loro struttura; lo scambio di ioni è funzione del tipo di minerale argilloso. Pertanto la conducibilità elettrica di formazioni argillose è rappresentata dalla resistenza associata all'elettrolita libero nel volume di poro della roccia e dalla resistenza associata all'argilla.

Per poter valutare la conducibilità elettrica del campione, direttamente relazionata da quanto visto prima al contenuto d'acqua, si è fatto riferimento a due proprietà elettriche del terreno:

- Dielectric Value,
- Impedence.

Lo scopo per cui vengono analizzate e misurate le proprietà elettriche del materiale è quello di trovare una correlazione con il contenuto d'acqua; avendo infatti una corrispondenza fra di esse si può trovare in sito il valore del "w" in maniera diretta e sbrigativa senza bisogno di ricorrere alle tecniche tradizionali di essiccazione e peso in laboratorio, operazione che richiede 24 ore secondo gli standard tecnici.

La costante dielettrica (*Dielectric Value*) è una grandezza fisica che descrive come un campo elettrico influenza ed è influenzato da un mezzo dielettrico, ed è determinata dalla capacità di un materiale di polarizzarsi in presenza del campo e, quindi, di ridurre il campo elettrico totale nel materiale. In breve quindi la permittività è la predisposizione di un materiale a trasmettere o permettere un campo elettrico. In un dielettrico si manifestano delle cariche libere di polarizzazione e tramite il termine costante dielettrica  $\epsilon$  viene fornita una quantificazione di tale polarizzazione. Nel mezzo

generico, la costante dielettrica è data dal prodotto tra la costante nel vuoto ed il termine  $\epsilon_r$  che rappresenta la permittività elettrica relativa ed è un numero adimensionale sempre maggiore di 1. Poiché nella legge di Coulomb la permittività (costante dielettrica) compare al denominatore, la forza che si esercita fra due cariche elettriche, in valore assoluto, è massima nel vuoto e diminuisce al crescere della permittività relativa. Ciò significa che minore è la costante dielettrica di un mezzo, più esso presenterà caratteristiche isolanti, dato che, se si collocano due corpi di carica opposta alle estremità di una barretta di materiale dielettrico (quindi con costante dielettrica bassa) insorge un campo elettrico lungo la barretta, dando così una forza (legge di Coulomb) alta; al contrario, se tra le due cariche viene posto un materiale conduttore (quindi con costante dielettrica alta), la carica fluisce attraverso di esso e il campo elettrico si annulla dopo pochi istanti, dando così una forza (legge di Coulomb) bassa. Occorre ricordare che i materiali isolanti vengono anche chiamati dielettrici. Nel caso dell'aria, la permittività elettrica è  $\epsilon_r = 1,00059$ , approssimata ad 1 che è il valore assegnato alla costante dielettrica nel vuoto mentre l'acqua ha un valore molto elevato pari a circa 78,5. Ciò significa che nella valutazione su di un campione della costante dielettrica, quello con il valore più alto avrà una capacità migliore di condurre energia elettrica dovuto al maggior contenuto d'acqua. Quindi le due proprietà, chimica e fisica sono correlabili.

La misura delle caratteristiche fisiche e chimiche dei materiali è ottenuta con diversi metodi chimici, fisici o meccanici. Alcuni di questi metodi possono richiedere tempi lunghi di test o avere caratteristiche distruttive sui campioni da provare, inoltre spesso si ha la necessità di indagare le caratteristiche globali di un materiale e non soltanto le sue caratteristiche superficiali. Per questo motivo l'esecuzione di tali misure per mezzo di segnali a radiofrequenza si presenta come molto promettente, per la non invasività e velocità ottenibili. I metodi di misura a radiofrequenza delle caratteristiche dei materiali sono numerosi, variano in funzione dell'accuratezza richiesta, del materiale da investigare e dalla necessità di una misura in laboratorio o sul campo. Un metodo che si è rilevato fra i più sensibili è il metodo di misura a risonanza: dalla variazione di frequenza di risonanza e fattore di merito di un risonatore è possibile ottenere il valore della costante dielettrica di un campione di materiale accoppiato con esso.

La strumentazione impiegata in questa fase della prequalifica è composta da un sensore elettronico che viene posizionato sulla superficie del campione, il quale ne misura la costante dielettrica (fig. 3.7). Il sensore è provvisto di un peso tarato, posizionato nella parte superiore, poiché la misura è soggetta alla pressione esercitata su di esso. Rappresenta una strumentazione compatta, pratica e di facile impiego utile da usare in sito per avere informazioni direttamente correlabili con il contenuto d'acqua del terreno, quindi una relazione tra proprietà fisiche e chimiche.



Fig. 3.7 – Strumentazione di prova per la determinazione della Dielectric Value

La costante dielettrica è stata misurata per poter mettere in relazione la capacità di condurre elettricità con l'umidità del campione di terreno; in parallelo a questa operazione è stata misurata anche un'altra proprietà elettrica del campione: l'Impedenza perchè la capacità di trasmissione è data dall'impedenza creata dal mezzo che la conduce.

L'impedenza è una grandezza fisica vettoriale che rappresenta la forza di opposizione di un bipolo al passaggio di una corrente elettrica alternata. È esprimibile come numero complesso ed è data dal rapporto tra la tensione e la corrente. Nel caso di regime in corrente continua rappresenta la più nota resistenza elettrica del circuito.

La strumentazione di prova è costituita da quattro apparecchi: un generatore di corrente, un voltmetro, collegato ad uno oscilloscopio che consente di visualizzare, su

un grafico bidimensionale, l'andamento temporale dei segnali elettrici e misurare tensioni, correnti, potenze ed energie elettriche (fig. 3.8). Il quarto componente è il campione di terreno che funge da conduttore elettrico, ogni qualvolta tra due punti viene applicata, una differenza di potenziale attraverso gli elettrodi (dispersori).



Fig. 3.8 – Configurazione di prova per l'impedenza

Conoscendo la tensione tramite l'oscilloscopio e la differenza di potenziale grazie al voltmetro, si può calcolare l'impedenza. Ogni campione in funzione del suo contenuto d'acqua presenterà differenti valori, questo perché una maggior umidità consente una conduzione migliore di corrente elettrica all'interno del campione che quindi darà un basso valore di impedenza. Viceversa in caso di terre aride, si avranno alti valori di impedenza a causa della mancanza del conduttore principale: l'acqua.

Le operazioni di misura delle proprietà elettriche del terreno sono pratiche e veloci, servono per avere una correlazione con l'effettivo contenuto d'acqua del terreno che rappresenta un parametro fondamentale per la caratterizzazione del materiale in sito.

### 3.3.3 L'indice CBR di una terra e la compattazione

L'indice CBR è un indice di portanza che esprime la qualità di una terra, in termini di resistenza ai carichi trasmessi dal piano viabile. La portanza è definibile come capacità portante quindi come tensione verticale corrispondente ad una deformazione prefissata, ma sufficientemente piccola da limitare le plasticizzazioni del terreno. In particolare l'indice CBR è il rapporto, espresso in %, fra il carico necessario a fa penetrare un pistone in un provino di terra e un determinato carico di riferimento. Per un dato terreno, esso varia in funzione delle sue condizioni di Densità e Umidità; questo è il motivo per cui uno dei parametri fondamentali è conoscere il contenuto d'acqua del campione ed il suo relativo comportamento in funzione di esso.



Fig. 3.9 – Strumentazione di prova CBR

Le metodologie di compattazione e prova sono state standardizzate dagli organi competenti e differiscono in alcune parti. Gli standard italiani prevedono la compattazione secondo la prova “Proctor” con la quale si determina la massima massa volumica (densità) del secco della terra ottenuta tramite costipamento meccanico; l'umidità corrispondente è definita umidità ottima ed è per questa che si ha la massima densità raggiungibile con l'energia di costipamento impegnata. Secondo i “British Standard” può essere impiegata la compattazione mediante vaglio vibrante o vaglio di tipo meccanico simile a quello della prova Proctor, sono previsti sei differenti modi di

compattazione, due di tipo statico e quattro di tipo dinamico nel quale è possibile raggiungere la densità voluta oppure la forza di compattazione richiesta. Un'ulteriore differenza riguarda la granulometria del campione infatti, secondo le norme inglesi, il materiale testato deve avere il 100% in peso del passante al setaccio 20 mm, in caso ci sia del trattenuto ed esso superi il 25% la prova non può essere eseguita su quel materiale, mentre in Italia il setaccio impiegato è quello con apertura 25 mm, ed il trattenuto deve essere minore del 35%.

Lo stampo usato è composto da tre elementi principali: la base, il corpo cilindrico e il collare superiore; ha un diametro nominale di  $152 \pm 0.5$  mm ed una altezza di 127 mm, quest'ultimo valore deve essere preciso ed è ottenuto tramite la rasatura del campione. In seguito alla compattazione, il collare viene estratto e si procede alla rasatura della parte superiore del provino in modo da ottenere un volume ben definito della fustella.



Fig. 3.10 – Dettaglio della prova CBR

Gli standard prevedono la preparazione di provini sia con un contenuto d'acqua pari a quello di progetto, sia in condizioni di totale saturazione dopo 4 giorni immerso in acqua. A questo punto il provino è pronto per essere testato. Il test consiste nel far penetrare con velocità costante di 1.27 mm un pistone cilindrico di 49.6 mm, viene registrata in automatico la forza necessaria alla penetrazione ad un dato cedimento (fig. 3.10). I risultati della prova di penetrazione vengono riportati in un diagramma avente in ascisse la penetrazione del pistone (in mm) e in ordinate i corrispondenti carichi (in kN).



Si ottiene un diagramma che permette di individuare i carichi corrispondenti alle penetrazioni di 2,5 e 5 mm. Il rapporto percentuale tra questi carichi e i carichi fissi di riferimento (13.6 kN a 2,5 mm e 20.4 kN a 5 mm) individua il CBR del campione. Si prenderà come riferimento il maggiore dei quattro. Nel caso il grafico presentasse un flesso, si dovrà correggere la curva traslando l'origine degli assi lungo x sino al punto in cui la tangente passante per il flesso incrocia suddetto asse. Viene preso questo punto come riferimento per valutare i 2,5 e 5 mm (fig. 3.11).

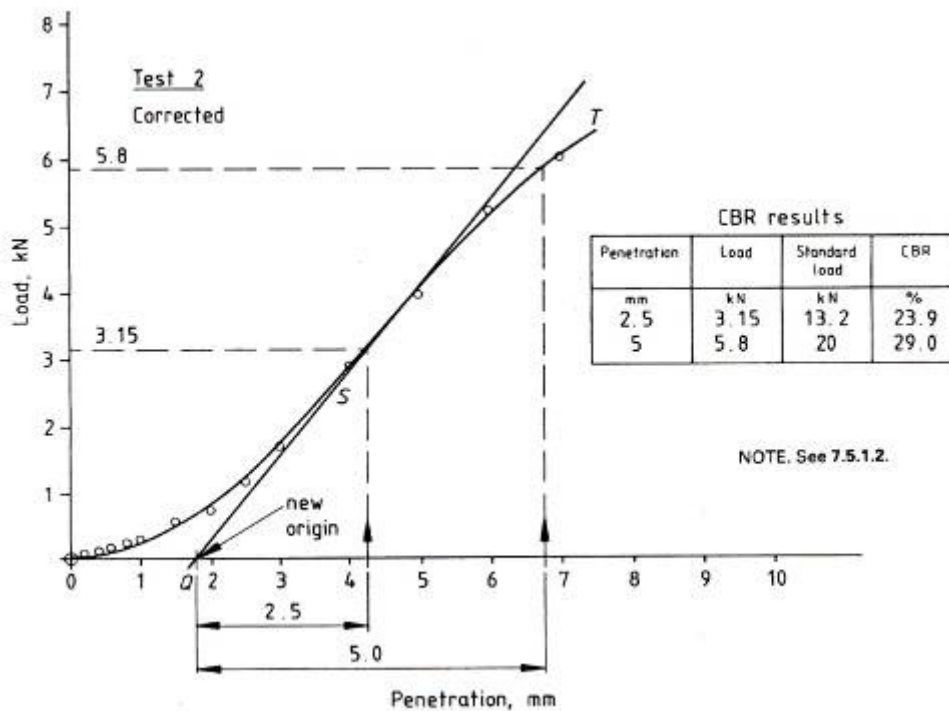


Fig. 3.11 – Grafico prova CBR modificato estratto da British Standard

### 3.3.4 Il Clegg Hammer

Il Clegg Hammer, anche chiamato “*The Clegg Impact Soil Tester*”, è uno strumento dalle dimensioni compatte che viene usato per valutare indirettamente tramite una correlazione empirica l'indice di portanza di una terra (indice CBR). Lo strumento è composto da un pestello con massa pari a 4.5 kg, che scorre all'interno di una guida verticale, che viene lasciato cadere da un'altezza prefissata fino ad impattare contro la superficie del terreno (fig. 3.12). L'accelerometro, montato all'interno del pestello, crea un segnale digitale in seguito alla decelerazione del pestello. Un apposita

centralina fornisce come valore di output, il valore d’impatto: “*Impact Value (IV)*”. L’indice IV può essere correlato alla resistenza del terreno e valutato sotto forma di indice CBR “*California Bearing Ratio*”.



Fig. 3.12 – “Clegg Hammer”

La prima versione del Clegg Hammer è stata sviluppata in Australia, venne introdotto per la prima volta all’8° *Australian Road Research Conference* nel 1976. Dopo la sua presentazione è stato largamente utilizzato in Australia ed Europa. Negli Stati Uniti è stato prodotto in una versione alternativa con un pestello di dimensioni maggiori (10 kg) ed è stato usato molto frequentemente nei test di resistenza dei campi sportivi.

Come detto, il valore di output estrapolato è l’*Impact Value IV*, viene correlato con l’indice CBR dalla relazione:

$$CBR = [0.24 \cdot (IV) + 1]^2 \quad [1]$$

Un'altra relazione molto utile, in particolar modo nel campo delle terre stabilizzate, tra l'IV e la resistenza a compressione delle stabilizzazioni a cemento ( $\text{Log } f^c$  rappresenta la resistenza a compressione della terra stabilizzata in "psi"), è stata sviluppata dalla "Portland Cement Association" nella forma:

$$\text{Log } f^c = 0.08087 + 1.3094 \log(IV) \quad [2]$$

La strumentazione è stata scelta per via delle sue forme compatte che lo rendono uno strumento adatto all'impiego in sito poiché una trincea ha generalmente dimensioni ridotte che rendono difficili le operazioni di misura all'interno dello scavo.



Fig. 3.13 – "Clegg Hammer in sito"

Il Clegg Hammer allo stesso tempo, grazie alla sua duttilità d'uso, è impiegabile per misurazioni in laboratorio. I dati ottenuti potranno essere correlati e confrontati con quelli della prova CBR in modo da avere una corrispondenza univoca, ed avere un valore di portanza della terra in modo pratico e veloce direttamente in sito (fig.3.13).

### 3.3.5 Il “Crushing” dell’aggregato grosso (*oversize*)

Il materiale proveniente dalla separazione effettuata nella prima fase, avente dimensioni  $> 40$  mm, insieme ai blocchi compatti degli strati superficiali legati con bitume, devono essere ridotti ad una pezzatura inferiore in modo da poter essere impiegati come materiale da riporto. Il macchinario impiegato è un piccolo frantumatore di inerti (*Jaw Crusher*, fig.3.14a), è stato scelto per via delle dimensioni ridotte compatibili con i volumi di materiale (circa  $1,2 \text{ m}^3$ ) proveniente dallo scavo (fig.3.14b). Il macchinario è stato fornito dalla società “Cautrac Ltd”, essendo una prova, il test è avvenuto all’interno della sede dell’azienda.



Fig. 3.14a – “Jaw Crusher”



Fig. 3.14b – “Sezione d’ingresso”

L’aggregato grosso viene inserito nella parte superiore del macchinario; per effetto della compressione creata da una grossa ganascia contro la parete fissa i blocchi si frantumano in elementi di pezzatura inferiore. La dimensione finale può essere variata agendo su un dispositivo di regolazione che modifica la distanza della ganascia dalla parte fissa. Così facendo si crea una trattenuta che consente alla parte mobile di frantumare gli aggregati e ridurli fino alle dimensioni richieste. Nella parte inferiore è predisposta una tramoggia in cui viene raccolto l’inerte così prodotto.

La granulometria ottenuta deve rientrare all’interno del fuso granulometrico fornito dagli standard inglesi “*SROH – Specification for the Reinstatement of Openings in Highways, Appendix 9 and SHW – Series 800, clause 803*” (fig.3.15 – linea blu) in modo da poter essere impiegato come materiale “*type I*”.

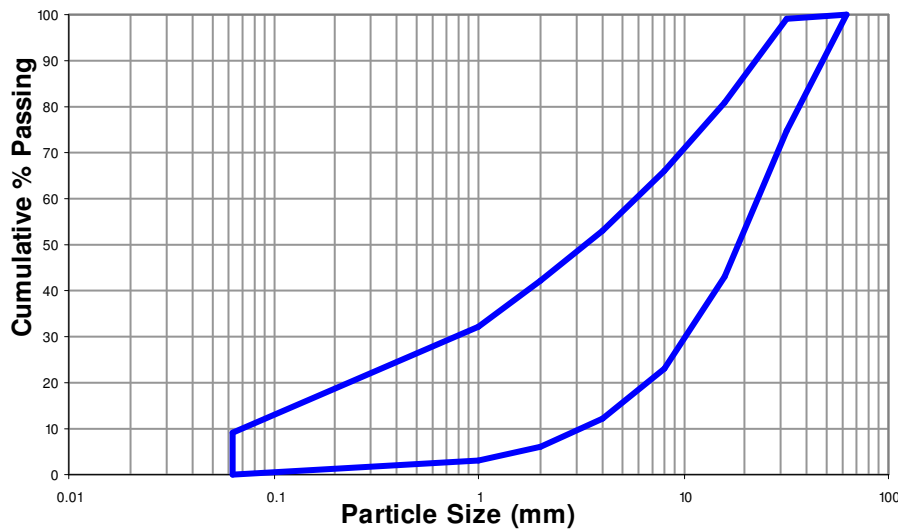


Fig. 3.15 – “Fuso granulometrico per aggregato grosso”

Nel caso in cui l’analisi granulometrica del materiale ottenuto dalla frantumazione non rientrasse all’interno del fuso bisogna correggere l’assortimento con l’aggiunta di pezzatura idonea. Nel caso in cui il quantitativo di materiale vergine sia eccessivo, l’aggregato grosso va scartato dal processo.

### 3.4 3<sup>a</sup> Fase: *TRATTAMENTO*

I risultati ottenuti nella seconda fase forniscono un insieme di dati relativi alle proprietà meccaniche e fisiche del materiale proveniente dallo scavo, che servono per valutare l’effettivo impiego come riciclato nei rinterri. In caso di indice CBR non adeguato, il terreno dovrà essere sottoposto a trattamento al fine di migliorarne la resistenza e garantire il rispetto degli standard richiesti per il riutilizzo.

Il trattamento viene effettuato miscelando al terreno proveniente dallo scavo, un legante idraulico, calce o cemento, più il materiale di scarto, le ceneri volanti, per via delle elevate proprietà pozzolaniche. L’operazione di aggiunta di un legante idraulico ad un terreno naturale prende il nome di stabilizzazione che mediante una reazione chimica scaturita dalla presenza dell’acqua instaura un fenomeno di presa nel tempo.

L’impiego della calce avviene per conferire alle terre incoerenti e scarsamente portanti, un miglioramento delle caratteristiche meccaniche sfruttando l’interazione

delle particelle umide dell'argilla con la calce; lo sviluppo della reazione di idratazione della calce porta ad un indurimento dell'impasto e perciò ad un incremento delle capacità portanti. L'impiego del cemento avviene invece per migliorare le proprietà di terreni a prevalente matrice sabbiosa aumentando la sua resistenza a compressione; nel caso in cui un materiale possedesse una certa quantità di particelle limo – argillose potrebbe essere utile combinare all'azione del cemento anche un certo dosaggio di calce. L'impiego delle ceneri volanti durante la fase di stabilizzazione consente di ridurre la materia prima nella miscela, avendo un risparmio di tipo economico e ambientale. Le ceneri volanti essendo un prodotto di scarto hanno come unico costo quello di trasporto, quindi si rende utile una sostanza destinata alla discarica.

### **3.4.1 Le ceneri volanti “Fly Ash”**

Le ceneri volanti sono il residuo fine prodotto nella combustione del carbone polverizzato all'interno delle centrali termoelettriche; questo viene trasportato tramite i gas prodotti e trattenuto per mezzo di filtri elettrostatici o meccanici, in modo da evitarne la dispersione nell'atmosfera. A causa delle elevate temperature a cui si formano, le ceneri volanti fondono e poi, trascinate dai fumi, subiscono un brusco raffreddamento per cui presentano una struttura prevalentemente vetrosa (silice amorfa) e quindi reattiva (fig.3.16). Le particelle hanno dimensioni minori di quelle del cemento portland e della calce, hanno una forma generalmente sferica con un diametro che varia tra i 10 e 100 micron. La loro composizione chimica è basata principalmente da ossidi di silicio, di ferro e di calcio, ma sono presenti in quantità minori magnesio, potassio, sodio e zolfo. La loro composizione è importante perché alla base della suddivisione in due classi differenti:

- Classe C: sono le ceneri volanti con un contenuto minimo del 50 % di ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ), provengono dalla combustione di lignite e hanno ottime proprietà pozzolaniche ed idrauliche;
- Classe F: chiamati anche silicio - alluminati, hanno un contenuto minimo di ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) pari al 70 %, anch'essi hanno proprietà pozzolaniche, ma minori rispetto ai primi.

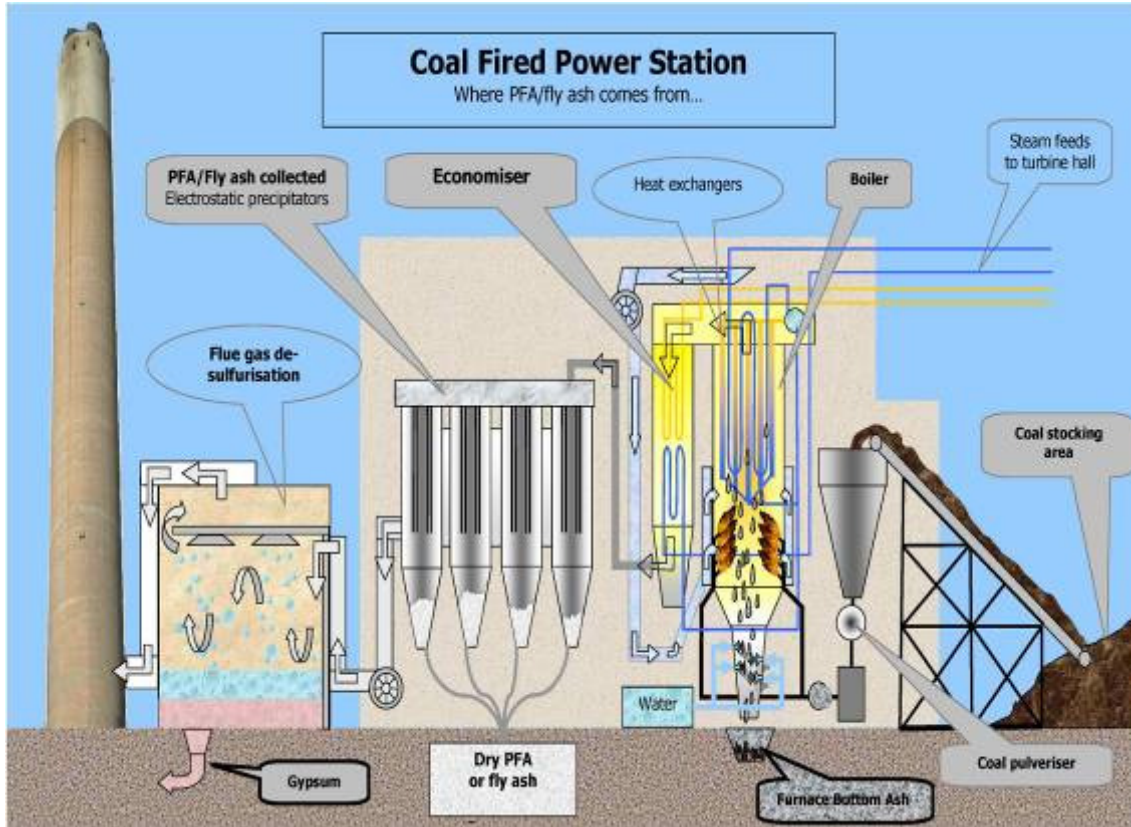


Fig. 3.16 – “Processo di produzione delle Ceneri Volanti”

Le ceneri volanti classificate come classe C hanno una percentuale maggiore di calce, a questo sono dovute le proprietà idrauliche oltre quelle pozzolaniche che caratterizzano entrambi. Per questa ragione i PFA (dall'inglese Pulverized Fly Ash) di classe C sono chiamati anche ceneri volanti idrauliche (hydraulic fly ash), possono essere usati anche come attivatori di leganti secondari. I PFA sono impiegati in ambito stradale grazie alle sopracitate proprietà pozzolaniche, ciò è dovuto alla presenza di silicati e alluminati, che ad una temperatura ordinaria e in presenza di acqua, subiscono una reazione chimica con l'idrossido di calcio. Alla fine del fenomeno si crea un composto avente alta stabilità che determina un miglioramento della performance del prodotto sotto due aspetti:

1. questi materiali non mostrano nessun tipo di collegamento a meno che non siano combinati con altri chiamati attivatori. Hanno un alta percentuale di ossido di calcio che, in presenza di acqua, producono l'idrossido di calcio. Il cemento e la calce sono frequentemente usati per questo scopo;

2. i materiali trattati con le ceneri volanti mostrano un miglioramento della resistenza nel lungo periodo.

Le ceneri volanti hanno altre proprietà vantaggiose per il loro impiego come stabilizzante di terre e materiali granulari dovute alle proprie caratteristiche fisiche:

- le particelle (come detto principalmente sferiche) hanno un'azione plasticizzante che crea una riduzione di richiesta d'acqua per la miscela e la compattazione,
- la bassa densità delle particelle ha l'effetto di aumentare il volume dei materiali cementizi, in base ad un volume predefinito, riducendo allo stesso tempo i problemi di scarsa resistenza nel breve periodo,
- le miscele a base di PFA hanno un miglior comportamento alla frattura rispetto alle miscele confezionate con il solo cemento. La reazione pozzolanica con l'idrossido di calcio produce durante l'idratazione del cemento un processo più lento, riducendo la formazione di fratture e diminuendone le dimensioni. Di conseguenza riduce la formazione di fratture riflesse sul lato opposto dello strato.

Uno dei problemi delle miscele trattate con i PFA è l'alta suscettibilità al congelamento e al ripetuto contatto con fonti d'acqua eccessive e continue, quindi si rende necessario l'impiego in aggiunta con cemento o calce.

### **3.4.2 La scelta del trattamento**

In base alle proprietà delle ceneri volanti e per quanto disposto nelle specifiche tecniche, al loro impiego va associato l'uso di un legante idraulico. La scelta del trattamento a cui sottoporre il materiale da riciclare quindi si basa sulla matrice costituente prevalentemente il terreno. Le terre si possono dividere in due grandi gruppi:

1. matrice argillosa,
2. matrice sabbiosa,

per i primi è preferibile usare la calce in aggiunta alle ceneri volanti, mentre per i secondi il cemento. Questa scelta è dovuta all'interazione chimica che avviene fra le particelle durante il miscelamento in presenza d'acqua.



### 3.5 L'obiettivo del progetto “ZeroWASTER”

Il terreno proveniente dallo scavo di una generica trincea urbana trattato con il processo di riciclaggio analizzato, produce due materiali aventi caratteristiche fisiche differenti: l'aggregato fine nelle condizioni iniziali nel caso fosse di buone qualità, o in alternativa modificato con il trattamento per migliorarle, e l'aggregato grosso ottenuto dalla frantumazione degli elementi inerti di dimensioni maggiori di 40 mm.

Al momento della chiusura, i due materiali verranno collocati all'interno dello scavo in posizioni diverse:

1. lo strato inferiore sarà composto dagli elementi ottenuti dalla separazione con lo “Starscreen” aventi una dimensione  $< 40$  mm, saranno disposti in modo da realizzare il letto su cui verrà adagiata la rete di servizio;
2. lo strato superiore, composto dai materiali che rispettino gli standard tecnici, provenienti dalla frantumazione comporranno lo strato finale su cui verranno stesi gli strati di conglomerato bituminoso per il ripristino del piano viabile (fig.3.17).

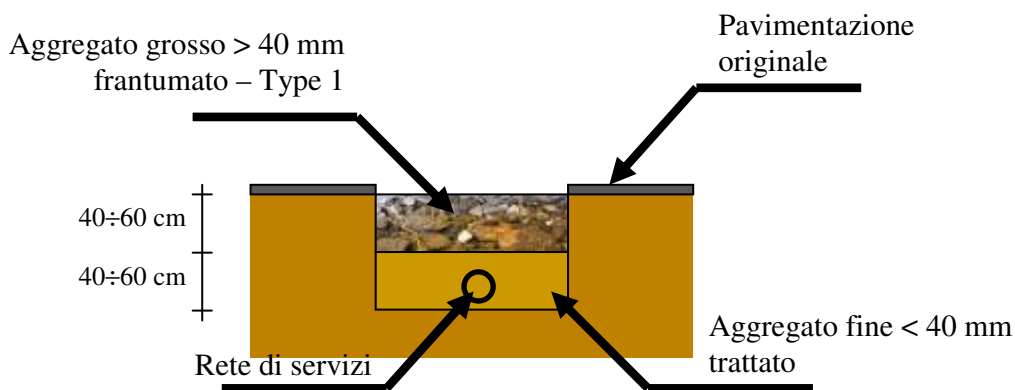


Fig. 3.17 – “Trincea con materiale riciclato”

I materiali riciclati, componenti il nuovo pacchetto, dovranno essere compattati secondo gli standard inglesi: “*SROH – Specification for the Reinstatement of Openings in Highways, Tab. A8.1 Appendix 8*” (fig.3.18) in modo da ottenere la densità ottimale in sito, necessaria per ottenere le caratteristiche di resistenza richieste. Lo standard tecnico prevede l'impiego di differenti mezzi di compattazione utilizzabili in sito. Per ogni

modello sono riportati, in base allo spessore dello strato e il tipo di materiale di cui è composto, il numero di passaggi da effettuare per ottenere l'addensamento richiesto.

<b>Table A8.1 Compaction Requirements for Granular, Cohesive and Cement Bound Materials</b>						
<b>Compaction Plant and Weight Category</b>	<b>Cohesive Material (less than 20% granular content)</b>			<b>Granular Material (20% or more granular content including cement bound material)</b>		
	<b>Minimum Passes/Lift for compacted lift thickness up to</b>			<b>Minimum Passes/Lift for compacted lift thickness up to</b>		
	<b>100 mm</b>	<b>150 mm</b>	<b>200 mm</b>	<b>100 mm</b>	<b>150 mm</b>	<b>200 mm</b>
<b>Vibrotamper</b> 50 kg minimum	4	8 #	NP	4	8	NP
<b>Vibrating Roller</b> <b>Single Drum</b> 1000-2000 kg/m	8	NP	NP	6	NP	NP
2000-3500 kg/m	3	6	NP	3	5	7
Over 3500 kg/m	3	4	6 #	3	4	6
<b>Twin Drum</b> 600-1000 kg/m	NP	NP	NP	6	NP	NP
1000-2000 kg/m	4	8	NP	3	6	NP
Over 2000 kg/m	2	3	5 #	2	3	4
<b>Vibrating Plate</b> 1400-1800 kg/m <sup>2</sup>	NP	NP	NP	5	NP	NP
Over 1800 kg/m <sup>2</sup>	3	6	NP	3	5	7

Fig. 3.18 – “Tabella per la compattazione degli strati della trincea”

### 3.6 Le indagini di laboratorio

I campioni oggetto della ricerca sono stati prelevati in sito dalla società Yorkshire Water nella zona nord – est rispetto alla città di Nottingham, in cantieri di manutenzione della rete idrica della contea. La composizione dei terreni provenienti dallo scavo è molto eterogenea, principalmente composto da terra a matrice sabbiosa o argillosa, con miscelati insieme numerosi elementi estranei generalmente impiegati nella tecnica stradale. Durante l'analisi iniziale dei vari campioni sono stati rinvenuti nell'ammasso di terra che in origine costituiva la sovrastruttura stradale, frammenti di tubature in PVC, parti di tombini in metallo, un numero vario di mattoni pieni usati per la costruzione delle abitazioni e un' indefinita quantità di materiale estraneo a cui non è stato possibile dare un'origine certa. Mentre gli strati di conglomerato, costituenti la vecchia pavimentazione, in questa fase del progetto non sono stati analizzati.

Il primo passo di analisi dei campioni è stata la separazione della frazione grossa da quella fine mediante l'impiego del macchinario "Starscreen". I campioni analizzati provenivano da 28 differenti cantieri sparsi nella contea dello Yorkshire, i primi 15 campioni sono stati analizzati all'inizio del progetto circa due anni fa seguendo la stessa procedura analizzata in precedenza. In seguito la società gestore della rete idrica ha fornito all'Università altri 13 campioni per consentire la raccolta di un numero maggiore di dati. I campioni etichettati dal 16 al 28, posseggono differenti caratteristiche rappresentative delle varie condizioni riscontrate in sito. I campioni scelti per l'analisi sono stati i primi 6, i campioni 21 e 22 sono stati scartati per via delle caratteristiche simili con il campione 20, mentre quelli successivi al 23 debbono ad oggi essere analizzati. Prima di essere trattati con il macchinario per la separazione degli inerti sono stati descritti visivamente, in modo da avere un confronto con le proprietà fisiche e chimiche del materiale (fig.3.19).

Descrizione visiva	
n° 16	Argilla molto umida in grossi blocchi
n° 17	Terra, pietre e argilla
n° 18	Fango - Argilla
n° 19	Grossi blocchi di argilla
n° 20	Terra, inerti calcarei, argilla
n° 23	Inerti argillosi, terreno sabbioso secco

Fig. 3.19 – "Analisi visiva dei campioni"

Un problema successivo sono state le condizioni del materiale al momento dello scavo; gli interventi della società Yorkshire Water prevedevano per lo più manutenzione ordinaria della rete idrica in seguito a rottura della tubatura e relativa perdita d'acqua. Questo fenomeno ha causato spesso l'allagamento dello scavo della trincea alzando il contenuto d'acqua del campione, portandolo ad un livello non adatto ad ottenere l'adeguato addensamento necessario a raggiungere le caratteristiche di resistenza richieste dalle specifiche tecniche.



Fig. 3.20a – Campione n°16



Fig. 3.20b – Campione n°17



Fig. 3.20c – Campione n°18



Fig. 3.20d – Campione n°19



Fig. 3.20e – Campione n°20



Fig. 3.20f – Campione n°23

La composizione dei campioni 16 – 18 – 19 (fig.3.20 a-c-d) è prevalentemente a matrice argillosa con un contenuto d'acqua elevato, nei quali si è riscontrato maggiormente il fenomeno dell'eterogeneità del materiale. In particolare il 16 e il 19 inizialmente erano composti da due grossi ammassi compatti del peso circa di 400 kg

l'uno, in cui l'effetto prodotto dall'eccessiva umidità ha evidenziato la tendenza dell'argilla ad aggregarsi in grossi blocchi. Il campione 17 (fig.3.20b) è stato il materiale su cui ci si è concentrati maggiormente per via della sua composizione: buon assortimento granulometrico con la presenza di argilla visibile direttamente. Il campione 20 (fig.3.20e) grazie al contenuto d'acqua e la sua composizione fisica ha mostrato buone proprietà di resistenza nelle condizioni in cui si trovava al momento dello scavo, il che ha fatto supporre che il materiale provenisse da un intervento di manutenzione eseguito in precedenza nello stesso punto. Le stesse considerazioni sono state fatte per il campione 23 (fig.3.20 f), che ha mostrato anch'esso ottime proprietà di resistenza. Per questi due campioni è stata prevista un'analisi granulometrica per poterne studiare la composizione e avere come riferimento di studio, la curva granulometrica.

### **3.6.1 Fase 1: La separazione mediante lo “Starscreen”**

I campioni sono stati trasportati all'interno dei laboratori dell'Università in grossi sacchi in plastica per cercare di preservare il contenuto d'acqua originale. In seguito all'analisi visiva sono stati posizionati uno per volta nella tramoggia del macchinario separatore. Durante l'operazione sono stati riscontrati differenti problemi che hanno causato il blocco momentaneo del macchinario. Le cause principali sono state imputate alla natura del materiale e all'umidità al momento della separazione. I campioni 16 e 19 (fig.3.21 a-d), erano costituiti da grossi blocchi di argilla compatta che il macchinario non è riuscito a disgregare. Durante la trattenuta iniziale del materiale, da parte della prima fila di “Screen”, per favorire l'azione disgregante delle “Star”, si è verificato il cedimento del fissaggio degli elementi a molla che ha causato il blocco delle operazioni per un nuovo serramento dei dadi di tenuta (fig.3.21c). Superato questo primo problema, il materiale, a causa dell'elevata umidità, ha iniziato ad attaccarsi agli organi rotanti compromettendo l'effettiva disgregazione e separazione degli inerti (fig.3.21d).

Al completamento del ciclo di separazione è stato riscontrato che per i campioni costituiti prevalentemente da argilla, il macchinario non è stato sempre in grado di separare, in dimensioni minori di 40 mm, gli ammassi creatisi in seguito all'interazione tra le particelle e l'acqua capillare. Questo fenomeno è stato valutato durante l'analisi al

tatto dell'aggregato grosso che, sotto la pressione del palmo della mano, si è deformato confermando la sola presenza di argilla aggregata.

Durante la separazione dei campioni 20 e 23, non è stato riscontrato nessun problema, l'operazione è avvenuta correttamente con una netta separazione degli inerti nei due gruppi granulometrici richiesti.



Fig. 3.21a – “Aggregato grosso in uscita”



Fig. 3.21b – “Aggregato fine in uscita”



Fig. 3.21c – “Azione di trattenuta delle Screen”



Fig. 3.21d – “Star intaccate dall’argilla umida”

### 3.6.2 Fase 2: La prequalifica del materiale

Il primo fattore analizzato in laboratorio è stato il contenuto d'acqua del campione, uno dei parametri principali per la caratterizzazione del terreno. Il procedimento seguito è quello adottato dal “British Standard – BS 1377/2” secondo il quale inizialmente viene preso un campione di terreno rappresentativo del stato reale, viene pesato e successivamente messo in forno ad una temperatura di 105°. L'acqua contenuta al suo

interno verrà espulsa dopo 24 h, il quantitativo in percentuale è dato dal rapporto tra il peso dell'acqua contenuta nei pori ed il peso dello stesso campione essiccato (fig.3.22).

$$W = \frac{M_w - M_D}{M_D} \times 100$$

Fig. 3.22 – “Formula per il contenuto d’acqua di un campione”

Il campione a questo punto è pronto per essere compattato negli appositi stampi in modo da poter valutare l’indice CBR del terreno. Il contenuto d’acqua è quello originale, in modo da ottenere un valore di resistenza del materiale proveniente dallo scavo nelle condizioni reali. Ovviamente gli standard seguiti sono stati quelli inglesi, in particolare per questa prova il “BS 1377/4”, mentre in Italia si fa riferimento alla norma “CNR UNI 10009 – Prove sui Materiali Stradali”.

La compattazione è stata di tipo dinamico, avvenuta mediante un martello pneumatico che esercita una forza pari a 44.5 kN. Il terreno è stato disposto all’interno dello stampo in tre differenti strati di 2 kg, ognuno dei quali compattato per un minuto. In seguito è stato rimosso il collare superiore per effettuare il taglio del terreno in eccesso in modo da raggiungere il volume richiesto. Sono state seguite le prescrizioni del British Standard anche per quanto concerne la compattazione.

Prima di iniziare le prove CBR, è stata valutata la costante dielettrica del campione, questa scelta è dovuta ad un aspetto pratico: la superficie del campione deve essere omogenea e uniforme, per poter effettuare in maniera corretta l’operazione. La lettura è avvenuta in 5 differenti posizioni per ogni lato del campione. Sono stati riscontrati valori coerenti con quanto studiato teoricamente: valori più alti in corrispondenza di un alto contenuto d’acqua, viceversa bassi valori per i campioni più secchi ad esclusione del campione 20 probabilmente dovuto alla composizione mineralogica differente (fig.3.20e). A questo punto il campione è pronto per essere testato meccanicamente, essendo la lettura della costante dielettrica un metodo non invasivo. La scala di valori adottata per la lettura dei dati ottenuti durante la prova, da convertire successivamente per ottenere l’indice CBR, è stata un ibrido tra i “British Standard” e “AASHO mod.”. La lettura è avvenuta per i tutti i cedimenti dei decimi del primo millimetro, poi ogni valore per ogni quarto di millimetro sino al limite di 7.5mm. I dati impiegati per calcolare l’indice CBR sono stati quelli corrispondenti ai 2.5 mm e 5

mm, prendendone il maggiore. Durante le prove eseguite è stata necessaria la correzione teorica dei dati, tramite la traslazione dell'origine degli assi. La prova è stata eseguita sia nella parte superiore che in quella inferiore del campione.

Campioni	n° 16	n° 17	n° 18	n° 19	n° 20	n° 23
Contenuto d'acqua (%)	15.77	11.53	14.83	18.25	8.01	2.39
Indice CBR medio (%)	1.15	34.5	3.38	3.18	103.71	208.03
Costante Dielettrica	37.74	16.46	36.71	26.05	20.14	8.14
Clegg Hammer (%)	2.38	25.81	5.38	3.84	66.57	98.02

Fig. 3.23 – “Valori del contenuto d'acqua e dell'indice CBR”

I risultati ottenuti hanno ricoperto un range molto vario; i valori più bassi sono stati riscontrati per le argille con alto contenuto d'acqua, mentre i risultati migliori si sono avuti per i campioni a prevalente matrice sabbiosa. Da escludere il risultato ottenuto dal campione 23 per quanto riguarda l'indice CBR perché dovuto ad un valore eccessivamente basso del contenuto d'acqua e la presenza di inerti con dimensioni che superano i 4 mm (fig.3.23).

La seconda prova di caratterizzazione meccanica è stata il Clegg Hammer, lo strumento è stato usato per avere una corrispondenza tra l'indice CBR calcolato in laboratorio, con l'indice CBR in sito, calcolato a partire dal valore dell'Impact Value dato dallo strumento. Ogni campione è stato testato in due punti differenti per ogni lato del provino, ed è stato preso come analisi il valore medio dei 4. I dati trovati sono stati coerenti con quelli ottenuti tramite la prova CBR, la tendenza osservata è stata che per bassi valori di portanza, il Clegg Hammer tende a sopravvalutare l'indice, mentre per alti valori lo strumento porta a sottovalutarlo, si lasciano le considerazioni sui risultati al capitolo successivo.

La seconda fase del processo si è conclusa con la misura diretta dell'impedenza per ogni campione. L'operazione, anche in questo caso, è avvenuta in 5 punti differenti per ogni lato del provino (fig.3.26). È stata valutata l'impedenza per due differenti frequenze, 100 Hz e 1000 Hz; sono state provate frequenze minori e maggiori, ma hanno portato ad un segnale instabile di cui era impossibile valutare la quantità di



tensione e corrente in modo corretto e accettabile. Questa prova è stata lasciata per ultima a causa della sua invasività nel campione, infatti l'inserzione dei dispersori sulle superfici ha creato, in alcuni casi, la rottura parziale del campione e quindi non si aveva più l'uniformità necessaria per le altre prove.



Fig. 3.24 – “Campione essiccato”



Fig. 3.25 – “Compattatore”



Fig. 3.26 – “Dielectric Value”



Fig. 3.27 – “Impedenza”

### 3.6.3 Fase 3: Il trattamento

Il trattamento con le ceneri volanti insieme al legante idraulico è avvenuto solo per i campioni, che in seguito alla fase di prequalifica, hanno presentato scarse prestazioni meccaniche di resistenza. Come indice di valutazione è stato preso il valore ottenuto dalla prova CBR.

L'aggiunta del tipo di legante idraulico è stata scelta in base alla natura del terreno, i campioni n° 16 – 18 – 19 a prevalente matrice argillosa sono stati miscelati

con ceneri volanti e calce, mentre per il campione 17, è stato impiegato il cemento portland, unico terreno a matrice sabbiosa con scarsa resistenza. Per effettuare la miscelazione dei componenti è stato impiegato un mescolatore rotante piano (*Pan Mixer*), ogni campione è stato impastato per 3 minuti (fig.3.28).



Fig. 3.28 – “Pan Mixer”

Dalla prove eseguite, è stato riscontrato che la quantità di materiale miscelabile non può superare i 6÷8 kg, poiché per quantitativi maggiori il macchinario non è in grado di impastare correttamente la miscela. Pertanto il suo impiego è adatto solo ad un utilizzo in laboratorio al fine di eseguire prove a titolo di ricerca su ridotti volumi di terreno trattato.

La quantità di fine da introdurre nel macchinario insieme al campione, per il confezionamento della miscela, si è basata su precedenti studi effettuati all’Università di Birmingham.

Le percentuali in peso scelte per i campioni sono state:

- Campione n°16: 4 % calce + 4 % ceneri volanti, 1 e 7 giorni,
- Campione n°17: 4 % cemento + 4 % ceneri volanti, 1 – 3 – 7 giorni,  
6 % cemento + 6 % ceneri volanti, 1 – 3 – 7 giorni,  
4 % calce + 4 % ceneri volanti, 3 e 7 giorni,
- Campione n°18: 4 % calce + 4 % ceneri volanti, 1 giorno,
- Campione n°19: 4 % calce + 4 % ceneri volanti, 7 giorni.

Il numero contenuto dei giorni di presa, a cui i campioni sono stati sottoposti, è motivato dal fatto che nell'impiego futuro in sito, il prodotto finale deve garantire una buona resistenza alle sollecitazioni in tempi brevi. Questo è dovuto al fatto che il cantiere non può restare chiuso un tempo eccessivo, poiché la normale circolazione va ristabilita al più presto. Inevitabilmente questo porta all'obbligo di avere un prodotto che sia in grado di resistere al carico indotto dal traffico in 24÷48 ore.

I giorni di presa non sono stati gli stessi per tutti i campioni per problemi di natura pratica; il materiale proveniente dallo scavo era in quantità ridotte, il che non ha permesso di confezionare altri provini da compattare e testare successivamente a differenti giorni di presa. Per il campione n°18 e n°19 è stato possibile confezionare un unico provino trattato e si è scelto di analizzare il primo ad un giorno di presa ed il secondo a 7 giorni. La scelta è stata motivata dal fatto che i due campioni avevano una composizione ed un contenuto d'acqua simile e soprattutto presentavano un indice CBR, nelle condizioni iniziali, che si discostava solo di qualche punto decimale. Questo ha reso paragonabili i dati ottenuti in seguito al trattamento. Il campione n°17 è stato fornito in grandi quantità, probabilmente perché derivante da una trincea di grandi dimensioni. Il che ha permesso, a titolo di ricerca, di trattarlo anche con calce per vedere l'effetto ottenibile dall'impiego di questo tipo di legante su un terreno di tipo sabbioso e non argilloso.

La verifica dell'efficienza dei trattamenti effettuati sui campioni è stata valutata con delle prove di tipo meccanico. Per poterle effettuare, i campioni sono stati compattati in stampi aventi forme diverse relative ai test da eseguire.

Sono stati impiegati 2 provini: si è scelto di compattare negli stampi CBR i materiali a prevalente matrice argillosa, miscelati con calce e ceneri volanti (n°16 – 18 – 19), e di sottoporli a test CBR. I valori di partenza dell'indice di portanza, infatti, erano molto bassi e non ci sarebbe stata la certezza che, per effettuare una prova a compressione libera dopo un giorno di presa, l'estrazione del campione dal provino avvenisse senza disgregazione del materiale (rottura prematura del campione).

I campioni a matrice sabbiosa trattati con cemento e ceneri volanti (n°17), sono stati compattati in stampi cubici di dimensioni 100 mm x 100 mm x 100 mm (fig.3.29 – fig. 3.30), gli stessi impiegati per il confezionamento dei provini cubici di calcestruzzo. Sono stati scelti tali stampi per avere un termine di paragone con il valore di resistenza a

compressione di una miscela cementizia. Le prove usate per testare i campioni sono state: la prova CBR per i campioni argillosi trattati con calce e ceneri volanti, e la prova UCS (*Ultimate compressive strength* – fig.3.31) l'equivalente della prova a compressione ad espansione libera per i campioni sabbiosi trattati con cemento e ceneri volanti.

Il calcestruzzo, prima che si instauri il fenomeno di presa, è un materiale dotato di una certa lavorabilità che consente il giusto livellamento all'interno del provino. Infatti, per poter effettuare il test le norme richiedono che il campione abbia una dimensione pari a 100 mm x 100 mm x 100 mm.



Fig. 3.29 – “Stampi cubici”



Fig. 3.30 – “Campione UCS rasato”

Al momento della compattazione dei terreni trattati negli stessi stampi è sorto il problema di come raggiungere il volume richiesto. La soluzione adottata è stata quella di unire due moduli cubici mediante delle staffe (fig. 3.29), così facendo è stato creato un volume maggiore per la compattazione del materiale. In seguito alla rimozione dell'elemento superiore ed al taglio del terreno in eccesso si è raggiunto il volume richiesto dagli standard (fig. 3.30 – 3.31); la stessa operazione avviene con il posizionamento del collare nei provini CBR.

In seguito alle prove CBR effettuate sui campioni n°16 – 18 – 19 dopo 7 giorni di presa sono stati ottenuti risultati che verranno analizzati nel paragrafo successivo. Si è deciso di estrarre i campioni dallo stampo CBR (fig.3.32) e testarli con un macchinario che valutasse la resistenza a trazione indiretta: l'ITT (*Indirect Tensile Test* – fig.3.34) in modo da avere dei dati supplementari sulla resistenza del materiale.



Fig. 3.31 – “Provini cubici”



Fig. 3.32 – “Provini CBR estratti”



Fig. 3.33 – “UCS”



Fig. 3.34 – “ITT”

Grazie all’ausilio di tali prove è stato possibile valutare il miglioramento delle proprietà di resistenza meccanica ottenute dai campioni in seguito al trattamento con i leganti idraulici e le ceneri volanti. I risultati migliori sono stati ottenuti dall’impiego del cemento come legante che ha mostrato di garantire un aumento della resistenza del campione già nel breve periodo. I risultati complessivi verranno commentati e discussi nel capitolo successivo.

# CAPITOLO 4

➤ *Analisi dei risultati*

## 4.1 Introduzione

Il progetto prevede che tutte le operazioni di riciclaggio del materiale proveniente dallo scavo debbano essere eseguite direttamente in sito. Il terreno di scavo va inizialmente caratterizzato fisicamente e meccanicamente al fine di valutare l'effettiva possibilità di reimpiego. Sono quindi necessarie delle prove eseguibili in sito che siano pratiche e che non necessitino di un tempo troppo elevato per l'elaborazione dei risultati. I due parametri da valutare in sito sono il contenuto d'acqua del terreno e l'indice di portanza dato dal Clegg Hammer, a cui va aggiunta la descrizione visiva del materiale che fornisce informazioni sulla composizione della terra. Generalmente l'umidità si ottiene in laboratorio in seguito all'essiccazione in forno per 24 ore; in sito tale operazione è difficilmente eseguibile pertanto la si stima tramite la misura delle proprietà elettriche possedute dal terreno. Per la caratterizzazione meccanica viene utilizzato l'indice CBR. Solitamente tale prova richiede una strumentazione che permette di svolgere anche in sito le operazioni, ma con macchinari e procedure poco pratiche aventi lunghe tempistiche e che richiedono operai specializzati per l'elaborazione dei risultati. Per sopperire a tali problemi è stato usato il Clegg Hammer. Affinché i dati ottenuti in sito da tali prove possano essere usati come parametri per la scelta del successivo trattamento del terreno, nel caso fosse necessario, è stata eseguita una campagna di prove sperimentali in laboratorio che ha interessato la fase 2 del progetto.

Il terreno, quando non presenta le caratteristiche necessarie per rispettare gli standard tecnici, viene stabilizzato mediante la miscelazione con legante idraulico e ceneri volanti. Per valutare il miglioramento delle proprietà meccaniche e, quindi, dell'effettivo funzionamento della miscela studiata, sono stati eseguiti test di resistenza in laboratorio su provini di campioni trattati con differenti percentuali di legante e ceneri volanti. Sono state eseguite tre prove differenti: sui campioni composti prevalentemente da argilla è stata scelta la prova CBR e la prova ITT (*Indirect Tensile Test*), mentre per i campioni a matrice sabbiosa la prova a compressione ad espansione libera da cui sono stati ottenuti dati confrontabili a quelli normalmente registrati nei test sulle miscele cementizie.

## 4.2 I risultati ottenuti dai campioni 1÷15

La società Yorkshire Water ha fornito all'Università di Nottingham 28 campioni, provenienti da differenti scavi per la manutenzione della rete idrica di cui è gestore, per lo sviluppo e lo studio del progetto "ZeroWASTER". I campioni sono stati analizzati in due fasi differenti; inizialmente ne sono stati forniti 15 per i quali sono state eseguite un numero maggiore di prove per valutarne diversi aspetti che vedremo successivamente.

In seguito alla separazione mediante lo "Starscreen", è stata studiata la composizione granulometrica ottenuta:

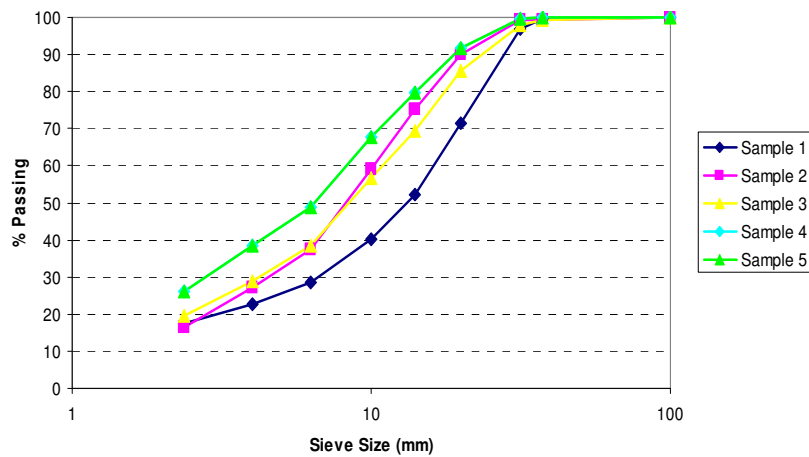


Fig. 4.1 – Curva Granulometrica campioni 1÷5

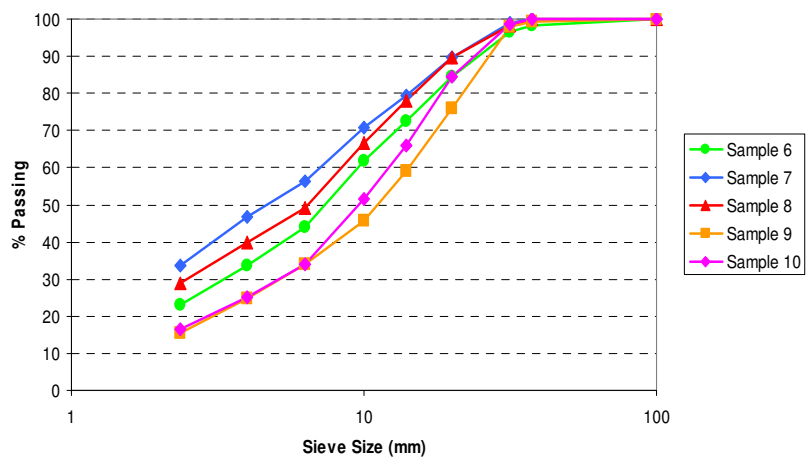


Fig. 4.2 – Curva Granulometrica campioni 5÷10



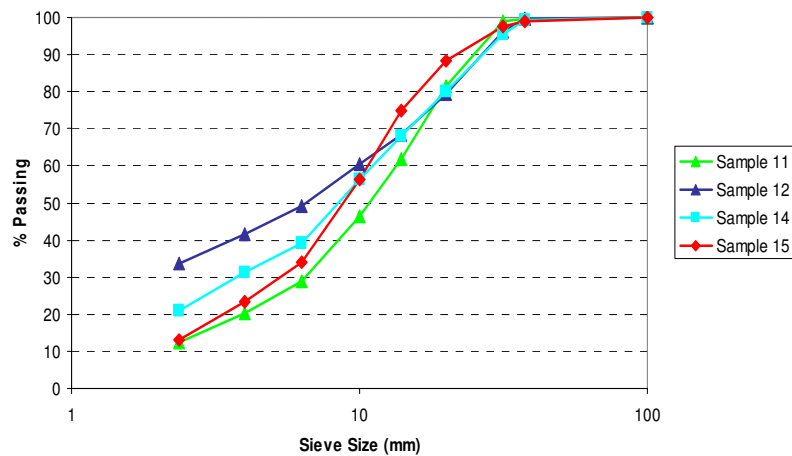


Fig. 4.3 – Curva Granulometrica campioni 10÷15

La composizione granulometrica dei campioni varia molto (fig. 4.1 – 4.2 – 4.3) e non sempre presenta le caratteristiche adatte per il reimpiego, soprattutto perché la quantità di fini risulta eccessiva a scapito della pezzatura grossa.

Il passo successivo è stato la misura del contenuto d’acqua e delle caratteristiche elettriche del terreno che sono state legate mediante la correlazione empirica:

$$Moisture \_ Index = \log \left[ \frac{1}{impedance \times DielectricValue} \right] \quad [3]$$

Grazie a tale formula è possibile valutare il contenuto d’acqua in sito tramite la misura dell’impedenza e la costante dielettrica del terreno. Queste due operazioni sono eseguibili senza particolari difficoltà e gli strumenti impiegati hanno dimensioni consone all’uso in sito. Nel grafico riportato di seguito sono stati messi in relazione il contenuto d’acqua del campione misurato in laboratorio con quello calcolato. I risultati hanno fornito un rapporto medio tra i due di circa 3 a 1. Il discostarsi dal valor medio è risultato in certi casi eccessivo (come si può vedere in figura 4.4) poiché nell’impiego pratico porterebbe ad un errore di qualche punto percentuale per il contenuto d’acqua, il che non è accettabile per lo studio del trattamento. Un numero esiguo di campioni non è sufficiente per convalidare il modello, per cui si dovranno analizzare i successivi campioni per ottenere un numero maggiore di dati.

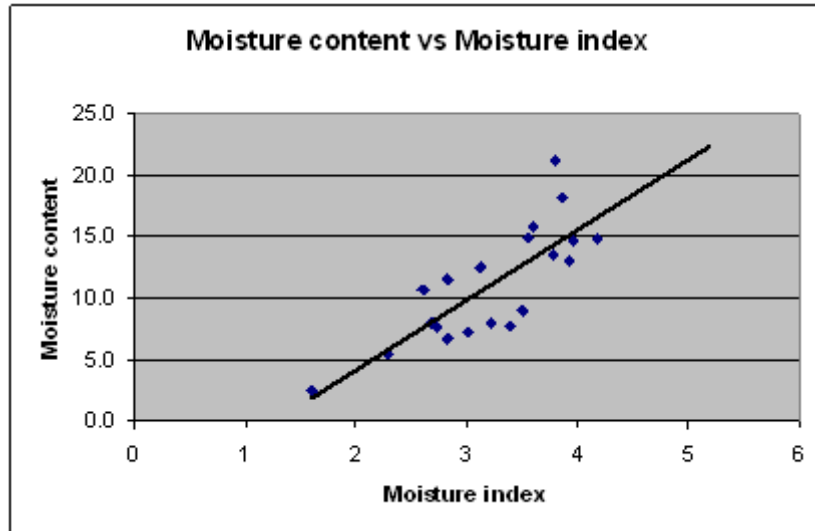


Fig. 4.4 – Relazione tra contenuto d’acqua misurato e teorico

Sempre nella fase di prequalifica del materiale sono stati raccolti i dati relativi alle caratteristiche di resistenza del terreno, anch’essi messi in relazione con il contenuto d’acqua del terreno, in modo da ottenere una corrispondenza tra caratteristiche meccaniche e umidità che sono necessarie per la scelta del trattamento. In ascissa sono riportati gli indici di umidità dei campioni calcolati con la formula citata in precedenza, mentre sull’asse delle ordinate sono stati inseriti i valori dell’indice CBR ottenuto dalle prove di laboratorio. I dati sono stati interpolati per ottenere la retta di regressione lineare (fig.4.5).

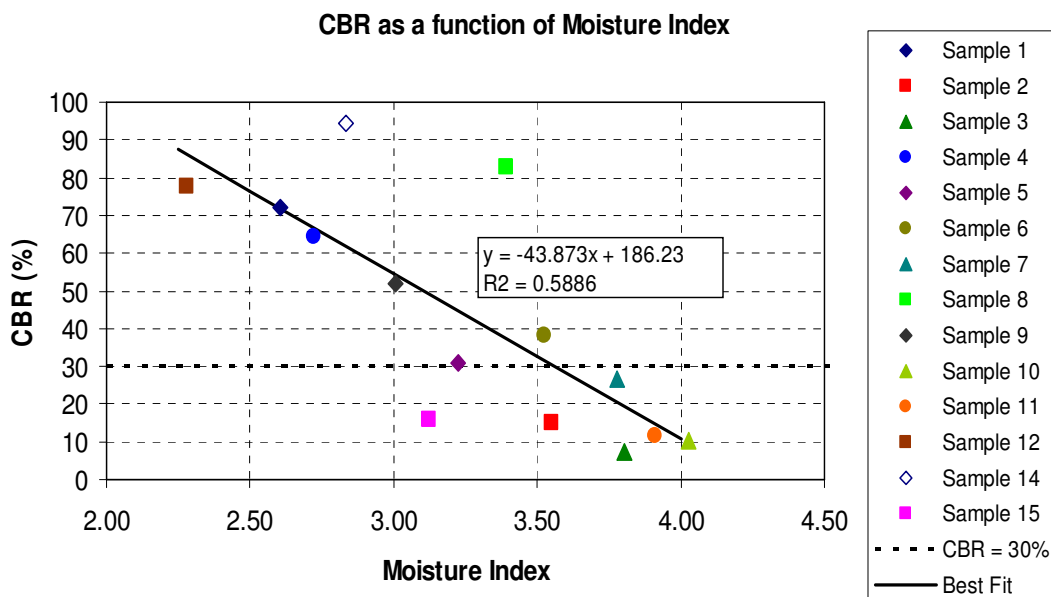


Fig. 4.5 – Relazione tra contenuto d’acqua e indice CBR

La stessa operazione è stata eseguita utilizzando, al posto dei valori dell'indice CBR ottenuto dalle prove in laboratorio, l'indice CBR misurato con il Clegg Hammer (fig.4.6).

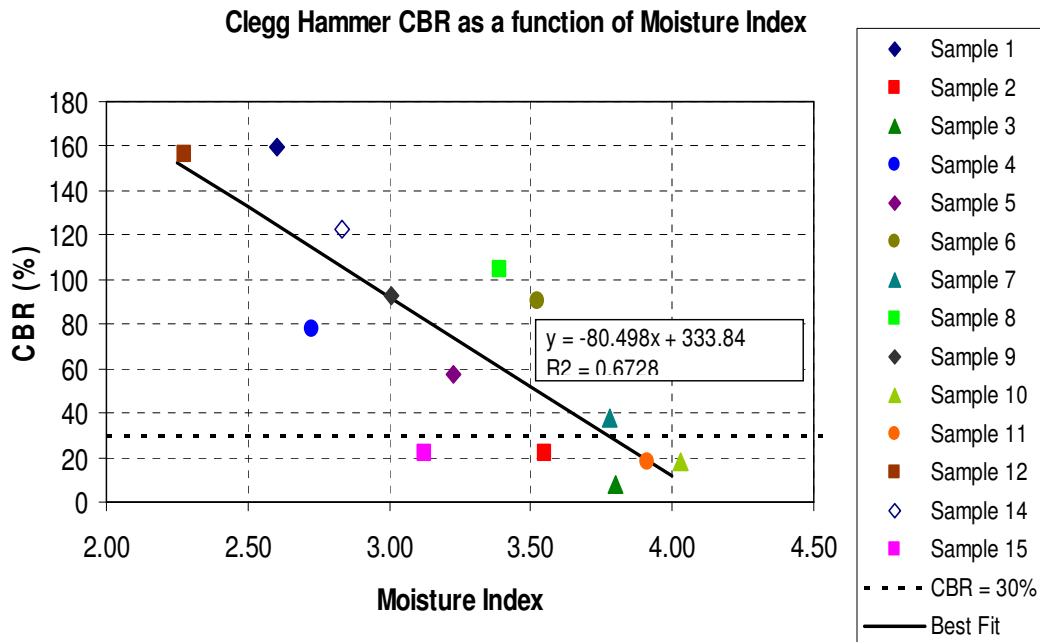


Fig. 4.6 – Relazione tra contenuto d'acqua e indice CBR Clegg Hammer

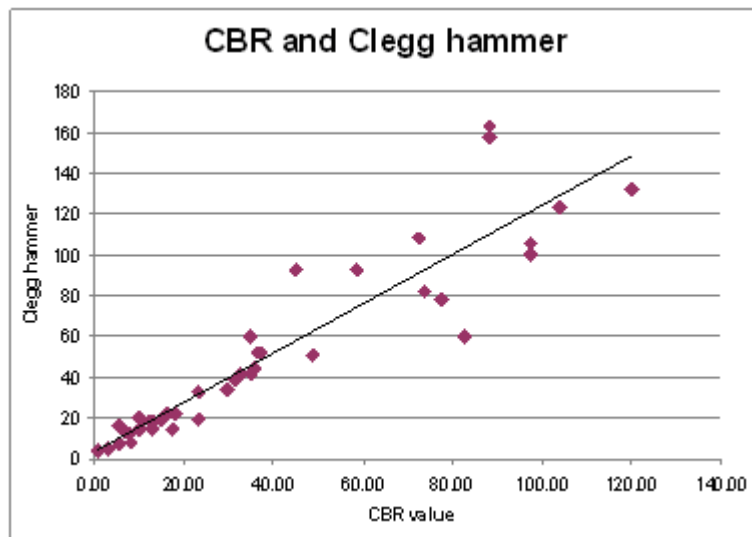


Fig. 4.7 – CBR vs Clegg Hammer

Dall'analisi dei risultati risulta chiara la corrispondenza di valori tra l'indice CBR ottenuto dalla prova di laboratorio con quelli del Clegg Hammer. Quest'ultimo tende a sottovalutare la portanza del campione per elevati valori.

Si presuppone che il motivo sia dovuto alla massa impattante di soli 4.5 kg che non è sufficiente ad esercitare la dovuta forza su terre aventi resistenza elevata. Questo discostamento è evidenziato maggiormente nel grafico di figura 4.7, in cui sono messi in funzione gli indici misurati con le differenti prove. Mentre un estratto del grafico mostra, per valori inferiori di indice del 60%, l'effettiva corrispondenza (fig.4.8).

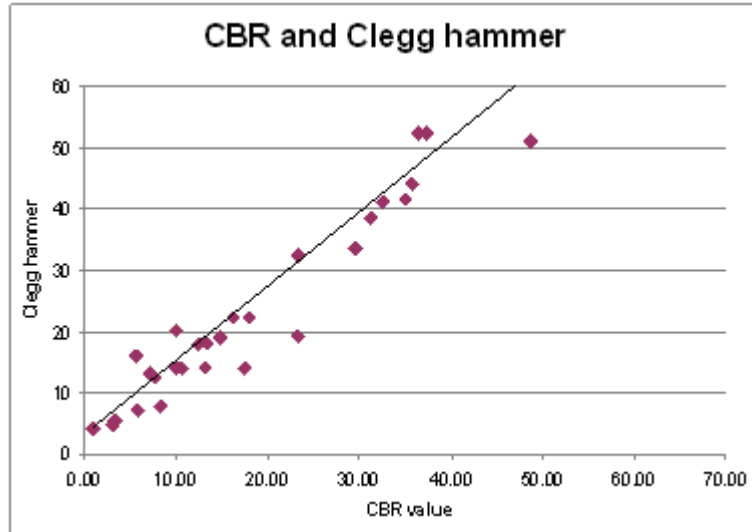


Fig. 4.8 – CBR vs Clegg Hammer minori 60%

#### 4.2.1 I risultati dei test meccanici sui campioni 1÷15

La fase della prequalifica ha fornito i dati necessari per la scelta del trattamento a cui sottoporre le terre per poterne migliorare le resistenze meccaniche. I primi 15 campioni sono stati trattati con l'aggiunta del 4% in peso di cenere volante e 4 % di cemento o 4 % di calce (fig.4.9 i cui valori sono espressi in  $N/mm^2$ ). Inoltre è stato possibile verificare la resistenza anche nelle condizioni iniziali e ciò ha permesso di avere un valore di riferimento per valutare il miglioramento raggiunto.

Le prove di resistenza sono state effettuate a differenti giorni di maturazione della miscela, i provini trattati con calce non sono stati testati a un giorno perché la reazione che si sviluppa a contatto con l'acqua ha tempi maggiori rispetto a quelli dati dal cemento. La scelta di testare i provini solo nel breve periodo è data dalle proprietà richieste al terreno in sito, la miscela deve garantire infatti adeguate caratteristiche di resistenza in poco tempo affinché possa essere riaperta al più presto la circolazione al

traffico veicolare. Nella tabella seguente sono riportati i valori ottenuti dalle prove a compressione sui provini cubici eseguite con le stesse modalità impiegate per testare i calcestruzzi.

Campioni	Trattamento	1 giorno	dopo 3 gg.	dopo 7 gg.
1	Originale	0.596		
	4% PFA, 4% cemento	2.898	4.650	5.691
	4% PFA, 4% calce		0.930	
2	Originale	0.152		
	4% PFA, 4% cemento		1.288	
	4% PFA, 4% calce	0.550	0.629	0.193
3	Originale	0.138		
	4% PFA, 4% cemento		0.370	
	4% PFA, 4% calce	0.323	0.325	0.291
4	Originale	0.369		
	4% PFA, 4% cemento	1.329	1.785	2.838
	4% PFA, 4% calce		0.448	
5	Originale	0.380		
	4% PFA, 4% cemento	2.457	3.003	2.758
	4% PFA, 4% calce		1.098	
6	Originale	0.421		
	4% PFA, 4% cemento		2.110	
	4% PFA, 4% calce	0.613	0.711	0.823
7	Originale	0.273		
	4% PFA, 4% cemento	1.619	0.970	1.921
	4% PFA, 4% calce		0.543	
8	Originale	0.573		
	4% PFA, 4% cemento	3.198	3.730	5.057
	4% PFA, 4% calce		0.659	
9	Originale	no mat.		
	4% PFA, 4% cemento	1.409	2.344	
	4% PFA, 4% calce		0.662	
10	Originale	0.137		
	4% PFA, 4% cemento		1.171	
	4% PFA, 4% calce	0.548	0.527	0.844
11	Originale	0.124		
	4% PFA, 4% cemento	0.812	1.035	2.452
	4% PFA, 4% calce		0.270	
12	Originale	rotto		
	4% PFA, 4% cemento	3.517	5.704	5.893
	4% PFA, 4% calce		1.187	
14	Originale	0.486		
	4% PFA, 4% cemento		2.758	
	4% PFA, 4% calce	0.855	0.687	1.688
15	Originale	0.145		
	4% PFA, 4% cemento	1.582	1.720	2.614
	4% PFA, 4% calce		0.812	

Fig. 4.9 – UCS campioni n°1-15

Mediante un foglio di calcolo sono stati messi in relazione i risultati ottenuti dalle prove UCS nelle condizioni iniziali con l'indice CBR misurato dalle prove in laboratorio. L'equazione data dall'interpolazione lineare dei valori ha permesso di avere una tavola di conversione per ottenere, a partire dal valore della prova UCS, l'indice CBR teorico di una terra stabilizzata (fig.4.10).

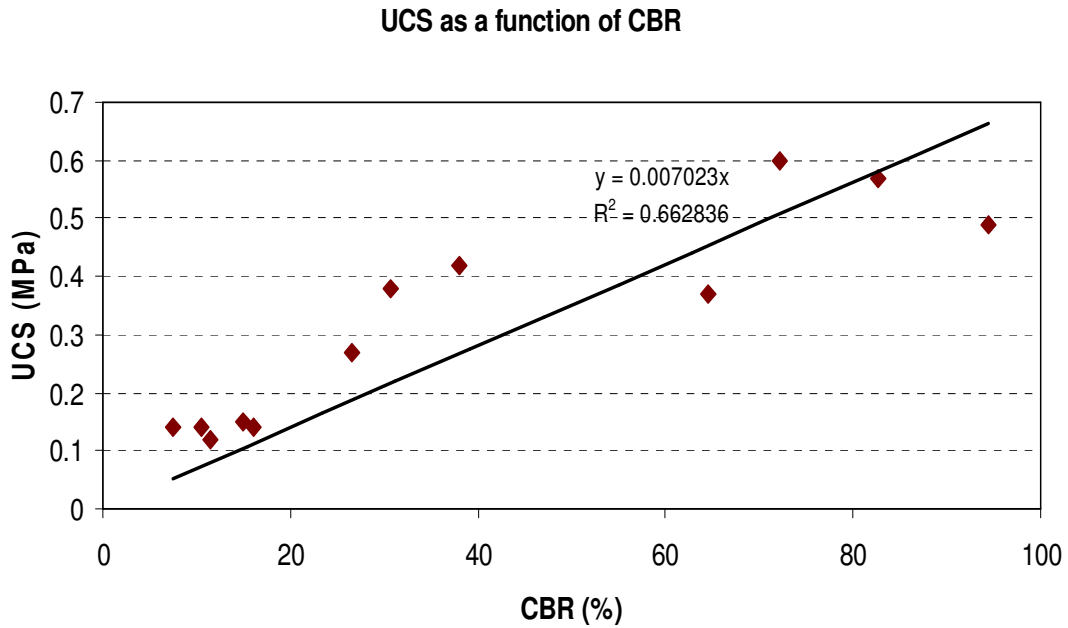


Fig. 4.10 – UCS in funzione dell'indice CBR

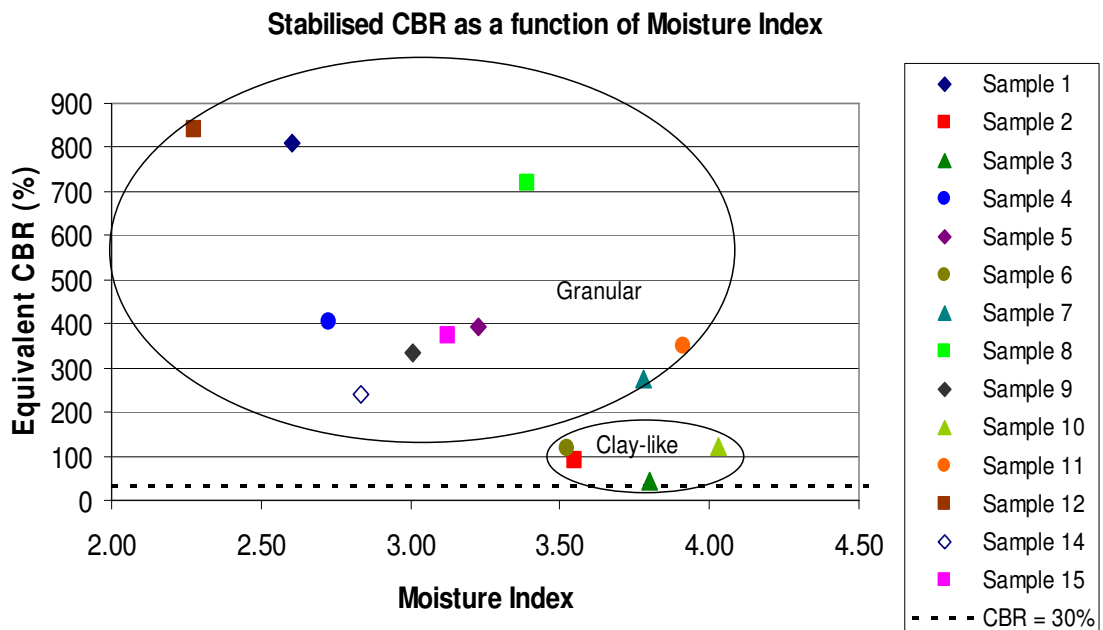


Fig. 4.11 – CBR teorico vs Contenuto d'acqua teorico

Il grafico ottenuto, mettendo in relazione l'indice CBR teorico calcolato a partire dal valore di resistenza a compressione con il contenuto d'acqua, anch'esso teorico trovato mediante la relazione empirica, mostra come le terre composte principalmente da argilla e stabilizzate forniscano un valore di portanza teorico nettamente inferiore rispetto a quello dato dalle terre granulari. Solo nel caso del campione n°3 ci si è avvicinati alla soglia minima del 30 % di indice CBR (fig.4.11).

#### 4.2.2 L'analisi dell'aggregato prodotto dalla frantumazione

Gli aggregati aventi dimensioni maggiori di 40 mm ottenuti dalla separazione con lo "Starscreen" sono destinati alla frantumazione. In un futuro intervento di riciclaggio gli inerti derivanti da questa operazione sono destinati a costituire lo strato finale dell'intervento su cui poggeranno gli strati di conglomerato bituminoso. La riduzione della pezzatura è dovuta alla curva granulometrica definita dagli standard tecnici per questo tipo di materiale come visto nel paragrafo 3.3.5.

I campioni per cui è stato possibile prelevare un quantitativo sufficiente di aggregato grosso per i test, sono stati il numero 14 e 15 (fig.4.12 – 4.13).



Fig. 4.12 – Campione n°14

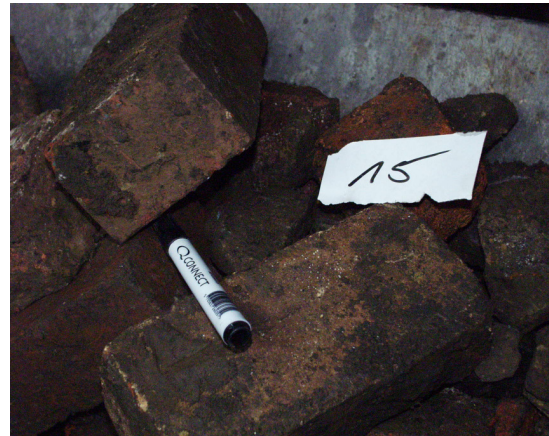


Fig. 4.13 – Campione n°15

Come è visibile dalle immagini, le dimensioni degli inerti superavano notevolmente le dimensioni richieste. Di particolare interesse il campione 15, in cui al suo interno sono stati trovati mattoni pieni impiegati per la costruzione delle abitazioni.

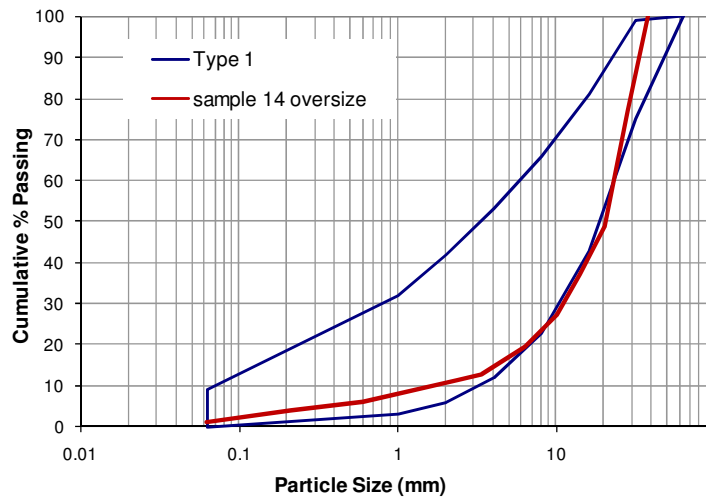


Fig. 4.14 – Curva granulometrica campione n°14 oversize

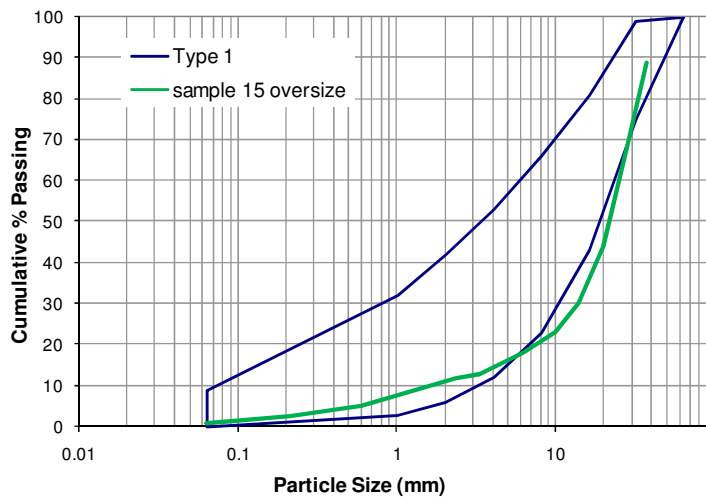


Fig. 4.15 – Curva granulometrica campione n°15 oversize

Il fuso granulometrico, in linea blu, rappresenta il limite in cui deve essere contenuta la curva granulometrica di un materiale definito dagli standard “type 1” per essere impiegato negli strati di una pavimentazione stradale in cui è richiesto. I risultati migliori sono stati ottenuti dalla frantumazione dell’aggregato grosso del campione 14, ciò è dovuto principalmente alle migliori qualità del prodotto di partenza. Con una piccola correzione granulometrica potrebbe essere riutilizzato per la chiusura dello scavo. La frantumazione dei mattoni pieni costituenti il campione 15 non ha dato i risultati sperati, infatti la curva granulometrica non risulta idonea secondo gli standard di reimpiego. I dati ottenuti durante questi test sono serviti per valutare l’effettivo



rendimento del macchinario “Jaw Crusher”, poiché è tutt’ora l’unico modello disponibile. In futuro verranno testate altre apparecchiature aventi differente funzionamento sempre al fine di ottimizzare e massimizzare la quantità di materiale riciclabile.

### 4.3 I risultati ottenuti dai campioni 16÷23

Il primo passo è stato, come per gl’altri campioni, la separazione mediante lo “Starscreen”, in modo da ottenere le due granulometrie differenti. Si è deciso che per l’aggregato fine non fosse più necessario lo studio della composizione granulometrica dei campioni poiché nello svolgimento delle future operazioni in sito essa non sarà prevista, a causa della complessità e dei tempi d’esecuzione. Si è passati direttamente alla prequalifica dei campioni al fine di raccogliere il maggior numero di dati possibili relativi alle proprietà elettriche dei terreni da aggiungere a quelli già raccolti.

La costante dielettrica misurata sui campioni varia in funzione del contenuto d’acqua del terreno. I terreni più aridi presentano bassi valori, dovuti alla difficoltà nel condurre elettricità al loro interno, allo stesso tempo l’impedenza per tali campioni tende a crescere. I valori della costante dielettrica messi in relazione con l’indice CBR del terreno misurato in laboratorio presentano un andamento di tipo esponenziale: per bassi valori di portanza la costante cresce, mentre diminuisce al crescere della resistenza del terreno (fig.4.16).

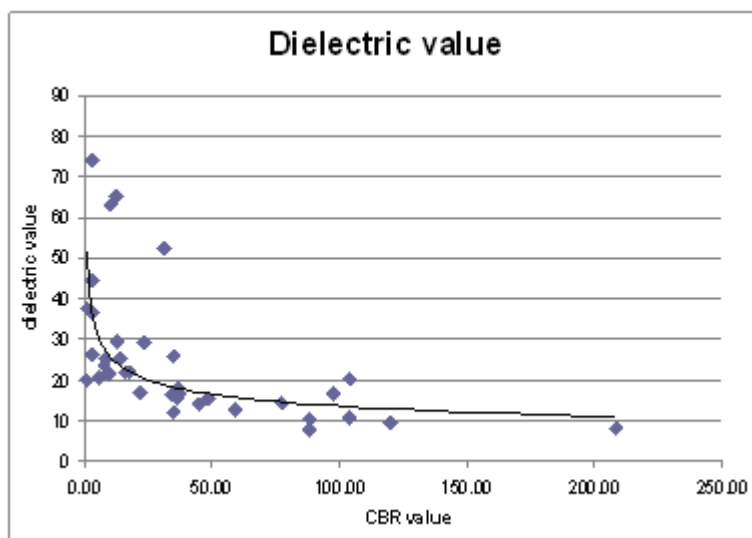


Fig. 4.16 – Dielectric Value campioni n°1-23

Fisicamente ciò può essere dovuto al fatto che i campioni con un elevato contenuto d'acqua sono ben distanti dall'optimum che, come è noto, restituisce l'addensamento che raggiunge le più elevate proprietà di resistenza. Mettendo in relazione i valori dell'impedenza sempre con l'indice CBR misurato in laboratorio, si nota come il parametro cresca insieme al valore di resistenza, ma il fenomeno è meno marcato rispetto alla costante dielettrica. In base alle prime prove eseguite, si è deciso di non misurare l'impedenza per valori di frequenza pari a 10 Hz poiché i risultati ottenuti hanno mostrato un andamento discontinuo e non rappresentativo del fenomeno.

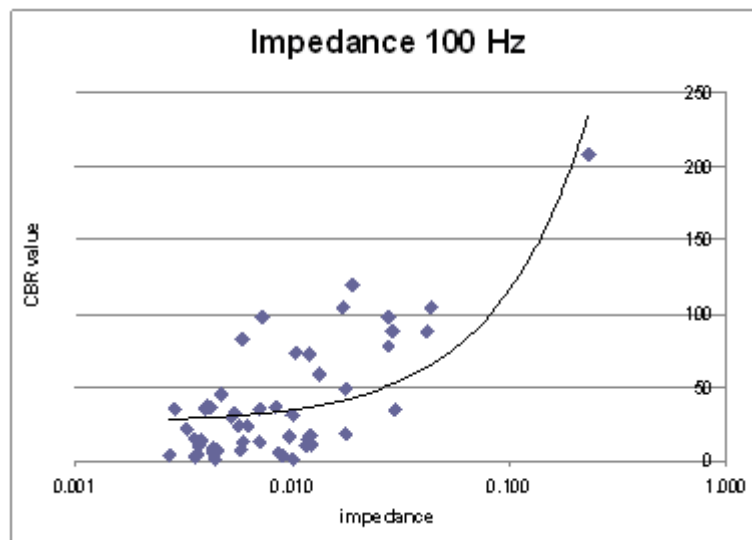


Fig. 4.17 – Impedance a 100 Hz dei campioni n°1-23

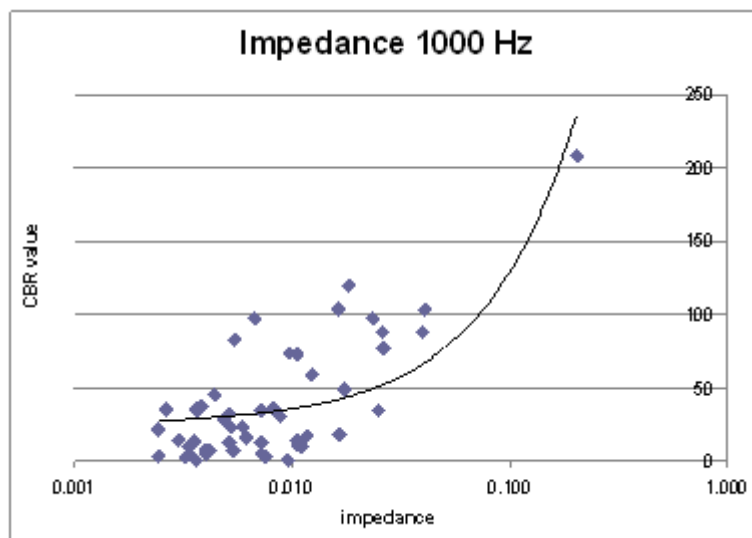


Fig. 4.18 – Impedance a 1000 Hz dei campioni n°1-23

Nei grafici è presente il dato rappresentativo del campione 23 che risulta distanziato rispetto a tutti gl'altri perché il provino aveva un contenuto d'acqua molto basso (2.39 %) ed era composto prevalentemente da pezzatura grossa che ha influenzato i risultati della prova CBR. L'eccessiva aridità è la causa della crescita dell'impedenza e del basso valore della costante dielettrica misurata.

### 4.3.1 I risultati dei test meccanici sui campioni 16÷23

La prova CBR eseguita in laboratorio ha evidenziato le scarse prestazioni di resistenza per i campioni n°16 – 17 – 18 – 19. Escluso il n°17 che si è assestato su indice medio pari al 34.5 %, di poco inferiore al minimo richiesto per l'idoneità al rimpiego, i restanti campioni non hanno superato il 4 %, valore estremamente lontano dagli standard richiesti. Gli stessi risultati sono stati confermati dal prova eseguita mediante il Clegg Hammer, che ha sottovalutato i valori solo per i campioni n°20 e n°23 aventi un indice CBR, oltre il 100 %.

	n°16	n°17	n°18	n°19	n°20	n°23
CBR Index	1.15	34.50	3.38	3.18	103.74	208.03
CBR Clegg Hammer	2.38	25.81	5.38	3.84	66.57	98.02

Fig. 4.19 – Tabella indici CBR

In base ai dati sopra riportati si è scelto di stabilizzare i campioni mediante l'impiego di leganti idraulici e ceneri volanti per valutare l'effettivo miglioramento meccanico raggiungibile. Le terre argillose, tutte tranne il n°17, sono state miscelate con la calce idrata mentre il campione a matrice sabbiosa è stato trattato con l'aggiunta del cemento portland. Non sempre i quantitativi di materiale forniti dalla società Yorkshire Water sono stati sufficienti per il confezionamento dello stesso numero di provini per ogni campione, come nel caso del n°18 e n°19.

Le prove usate per testare questi provini sono state la prova CBR e la prova ITT a trazione indiretta sulle terre argillose, la prova UCS a compressione ed espansione libera per le terre stabilizzate con il cemento.

Il campione n°16 è stato compattato all'interno di fustella CBR, i risultati migliori per questa prova sono stati ottenuti con il 4 % di calce e il 4 % di ceneri volanti, portando ad un netto miglioramento, ma non sufficiente per garantire gli adeguati standard di resistenza. È stata eseguita la prova ITT a sette giorni solo sul campione testato dopo un giorno di presa poiché i rimanenti si sono rotti durante l'estrazione dallo stampo (fig.4.20).

Campione n°16	CBR	C. H. CBR	ITT (MPa)
Condizioni iniziali	1.15	2.38	-
4 % Calce + 4 % Ceneri volanti (1 giorno)	14.18	19.23	-
4 % Calce + 4 % Ceneri volanti (7 giorni)	-	-	0.0585
6 % Calce + 6 % Ceneri volanti (1 giorni)	9.18	16.01	Rotto
6 % Calce + 6 % Ceneri volanti (7 giorni)	17.08	24.02	Rotto

Fig. 4.20 – Campione n°16

Il campione n°17, unico composto da una matrice sabbiosa, è stato compattato all'interno di stampi cubici. I valori di resistenza a compressione riportati sono dati dalla media dei risultati ottenuti dalla rottura di due provini. Il materiale proveniente dallo scavo era presente in grosse quantità il che ha permesso di confezionare anche dei campioni trattati con la calce. L'esperimento ha dimostrato l'inefficienza di quest'ultimo legante per questo tipo di terreno. I campioni sono stati trattati con il 6 % di cemento e il 6 % di cenere volante per valutare l'aumento di resistenza rispetto a quelli trattati con il 4 %. I valori ottenuti non sono stati ritenuti soddisfacenti in relazione all'aumento del costo della miscela dovuto al maggior quantitativo di cemento impiegato (fig.4.21).

Campione n°17	UCS (1 g.)	UCS (3 g.)	UCS (7 g.)
Condizioni iniziali	-	-	-
4 % Cemento + 4 % Ceneri volanti	4.40	6.40	6.60
6 % Cemento + 6 % Ceneri volanti	4.90	Rotto	8.65
4 % Calce + 4 % Ceneri volanti	Rotto	1.25	1.35

Fig. 4.21 – Campione n°17

Per il campione n°18 e n°19 non è stato possibile preparare un adeguato numero di provini a causa della scarsità di materiale. Si è scelto pertanto di testare le terre stabilizzate ad un giorno di presa con la prova CBR, e lo stesso campione, in seguito all'estrazione dallo stampo, con la prova ITT a sette giorni (fig.4.22).

Campione n°18	CBR	C. H. CBR	ITT (MPa)
Condizioni iniziali	3.38	5.38	-
4 % Calce + 4 % Ceneri volanti (1 giorno)	21.85	19.23	-
4 % Calce + 4 % Ceneri volanti (7 giorni)	-	-	0.0955
Campione n°19	CBR	C. H. CBR	ITT (MPa)
Condizioni iniziali	3.18	3.84	-
4 % Calce + 4 % Ceneri volanti (1 giorno)	36.65	27.67	-
4 % Calce + 4 % Ceneri volanti (7 giorni)	-	-	0.0553

Fig. 4.22 – Campione n°18 e n°19

I risultati migliori si sono ottenuti con il campione n°19 che ha migliorato il suo indice CBR di dieci volte rispetto al valore di partenza, ma di poco inferiore anch'esso alla soglia del 40 %. Mentre non sono risultati soddisfacenti i valori ottenuti per gl'altri campioni a matrice argillosa.

#### 4.4 Conclusioni

I risultati ottenuti dalle prove sperimentali hanno mostrato la validità delle proprietà elettriche per la valutazione del contenuto d'acqua in sito, operazione fondamentale per poter svolgere il riciclaggio delle terre. Il range di misure ottenuto è coerente rispetto a quanto previsto in seguito agli studi teorici, poiché l'umidità del campione influisce sulla capacità di conduzione di corrente elettrica al suo interno. Inoltre mettendo in relazione i valori delle proprietà elettriche trovati con l'indice di portanza è stato confermato che i campioni aventi un contenuto d'acqua eccessivo hanno delle caratteristiche meccaniche minori.

Tali campioni sono stati oggetto di trattamento con le ceneri volanti e legante idraulico miscelati in diverse quantità e testati a differenti giorni di presa. Mediamente c'è stato un miglioramento della resistenza dei campioni. I risultati migliori sono stati ottenuti impiegando il 4% di cemento come legante miscelato insieme al 4% di cenere volante. Questo fenomeno è dovuto al fatto che il valore di partenza della resistenza per i terreni a matrice sabbiosa era maggiore rispetto a quelli di tipo argilloso.

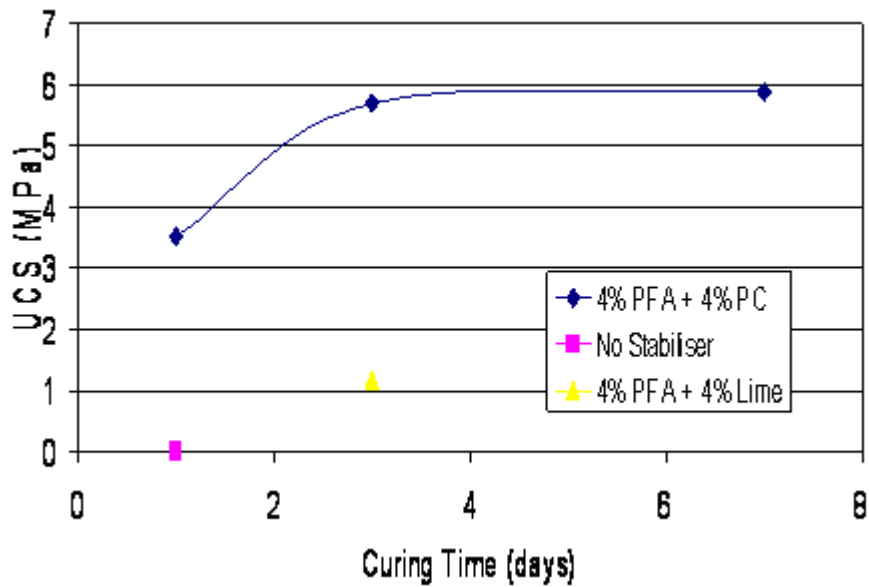


Fig. 4.23 – Campione trattato con cemento e ceneri volanti

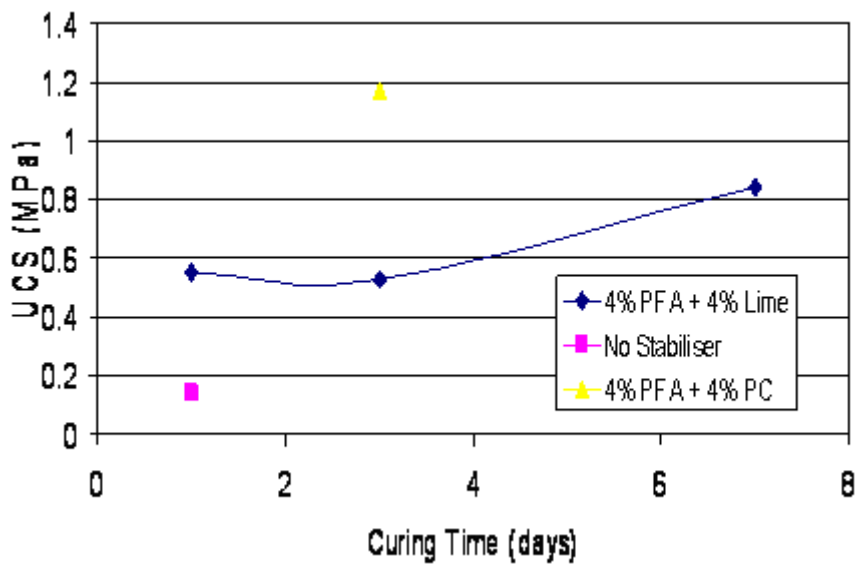


Fig. 4.24 – Campione trattato con calce e ceneri volanti

I campioni trattati con la calce hanno mostrato un miglioramento progressivo nel tempo delle prestazioni meccaniche, mentre le terre trattate con il cemento hanno sviluppato le proprietà di resistenza dal primo giorno di presa (Esempio fig.4.23 – 4.24).

L'impiego delle ceneri volanti insieme ai leganti idraulici tradizionali ha mostrato, in seguito ai test di laboratorio, l'effettiva possibilità di riciclare le terre da scavo migliorandone le proprietà meccaniche di resistenza. Permane il problema di svolgere dei test futuri in sito per valutare l'efficacia del trattamento in condizioni reali poiché i test di laboratorio non riescono a rappresentare totalmente l'aleatorietà del problema del riciclaggio delle terre da scavo.

# CAPITOLO 5

➤ *Conclusioni*



## 5.1 Osservazioni sui risultati sperimentali

Gli studi sperimentali condotti hanno mostrato la validità del progetto di ricerca riguardo l'effettiva possibilità di riciclare il terreno proveniente da scavo direttamente in sito. Non sempre il materiale presenta, nelle condizioni reali, le proprietà adatte al reimpiego. Grazie alle tecniche di trattamento viste in precedenza è possibile modificare, migliorando le resistenze meccaniche, le terre da scavo rendendole idonee per il ripristino della pavimentazione.

La prima lavorazione subita dal materiale, all'interno del processo di riciclaggio visto nei capitoli precedenti, è stata la separazione granulometrica mediante lo "Starscreen". Tale macchinario ha mostrato l'effettiva adattabilità al campo della tecnica stradale, mettendo in luce le uniche difficoltà durante il trattamento dei terreni argillosi aventi elevata umidità.

Questo tipo di materiale ha rappresentato fonte di studio e di analisi durante tutte le fasi del progetto poiché sono state le terre che hanno mostrato le peggiori caratteristiche fisiche e meccaniche, presentando in diversi casi valori non accettabili dell'indice di portanza. Per sopperire a questo problema si è scelto di trattare il materiale non idoneo con l'aggiunta di un legante idraulico e cenere volante, avente anch'essa proprietà pozzolaniche. La scelta dei dosaggi e del tipo di miscelazione è avvenuta successivamente ad una fase di prequalifica del materiale nella quale sono state valutate le caratteristiche del terreno. È stato possibile correlare le proprietà elettriche del campione al contenuto d'acqua reale, al fine di ottenere un lettura pratica in sito dell'umidità del terreno senza ricorrere alle tecniche tradizionali. Per completare la caratterizzazione iniziale del campione sono state eseguite le prove di portanza che hanno fornito un parametro indicativo sulla resistenza meccanica del terreno.

La scelta del trattamento, a cui sottoporre il materiale avente dimensione minore di 40 mm ottenuto con il macchinario separatore, è stata dettata dalle caratteristiche del terreno. Per materiali argillosi è stato scelto come legante idraulico la calce, mentre per quelli sabbiosi il cemento in aggiunta alle ceneri volanti entrambi miscelati con lo stesso quantitativo. Le resistenze ottenute in seguito a tale trattamento hanno reso idonei i materiali per la costituzione dello strato in cui verranno posate le reti per servizi, secondo quanto richiesto dalle specifiche tecniche riportate in allegato.

L'aggregato grosso, avente diametro nominale maggiore di 40 mm ottenuto dalla separazione granulometrica, è stato ridotto di pezzatura mediante un macchinario frantumatore. Il materiale ottenuto deve possedere una curva granulometrica tale che possa essere contenuta all'interno del fuso granulometrico visto in precedenza, richiesto dalle specifiche tecniche inglesi per il reimpiego. L'aggregato grosso, se idoneo, costituirà lo strato di chiusura sul quale verranno stesi successivamente gli strati in conglomerato bituminoso.

Grazie a tale processo risulta possibile il riciclaggio delle terre da scavo, il che porterebbe ad una riduzione delle materie di scarto e ad un grosso risparmio economico. Tali operazioni possono essere svolte totalmente in sito riducendo le tempistiche di lavoro e i disagi creati dal posizionamento del cantiere viario sulla sede stradale.

## **5.2 Il processo di riciclaggio studiato e le sue peculiarità**

Durante lo studio del processo dei materiali di risulta delle attività di scavo la posa di reti di servizi urbani, sono emerse alcune peculiarità non considerate precedentemente. Esse rappresentano un punto di partenza per il miglioramento e l'ottimizzazione di tutto il processo produttivo con lo scopo finale di aumentare la quantità di materiale effettivamente riciclabile.

Alcuni dei macchinari impiegati derivano da attività esterne alla tecnica di cantiere stradale, che sono stati adattati alle esigenze richieste dal progetto; ne è un esempio lo "Starscreen", il separatore degli aggregati. Il macchinario è stato progettato per l'impiego nell'industria agricola e nella produzione del legname, materiali ben differenti per caratteristiche e proprietà dalle terre da scavo trattate. Alcune terre tendono a compattarsi in grossi blocchi per effetto della coesione tra le particelle, il che rende difficile la loro separazione, questo perché il macchinario, essendo progettato per il legno, non è predisposto per imprimere in tali casi una adeguata forza disgregante. Tale fenomeno porta a una perdita di tempo, perché gli ammassi di dimensioni eccessive, quando vengono bloccati dalla prima fila di "Screen", provocano il cedimento delle viti di serraggio degli elementi che portano ad un intervento manuale da parte dell'operatore per il corretto riposizionamento. Una soluzione a questo problema potrebbe essere data

dalla separazione preventiva da parte di un operatore in blocchi di dimensioni minori per facilitare l'azione disgregante, prima dell'effettivo trattamento con lo "Starscreen".

Il passo successivo riguarda la caratterizzazione del materiale al fine di valutarne le proprietà fisiche e meccaniche. Il contenuto d'acqua, in particolare, rappresenta uno dei principali parametri da conoscere preventivamente. Come visto in precedenza tramite le proprietà elettriche è possibile valutare l'umidità direttamente in sito e, grazie ai dati raccolti dalle prove di laboratorio, avere una correlazione specifica. Tali test, eseguiti su campioni compattati all'interno di fustelle CBR, potrebbero essere migliorati sotto alcuni aspetti, in particolare durante la valutazione dell'impedenza. Durante questa prova infatti il dispersore viene infisso nella parte superficiale del terreno la quale non sempre è rappresentativa delle effettive condizioni di umidità dell'intero campione. Ciò è dovuto al fatto che il test viene eseguito per ultimo nel processo di prequalifica per via della sua invasività ed il tempo trascorso tra la compattazione e la prova porta ad una variazione dell'umidità del campione. Sarebbe più adeguato usare dispersori capaci di penetrare più in profondità nel campione in modo da raggiungere l'interno che non viene influenzato nel breve periodo dalle condizioni climatiche esterne.

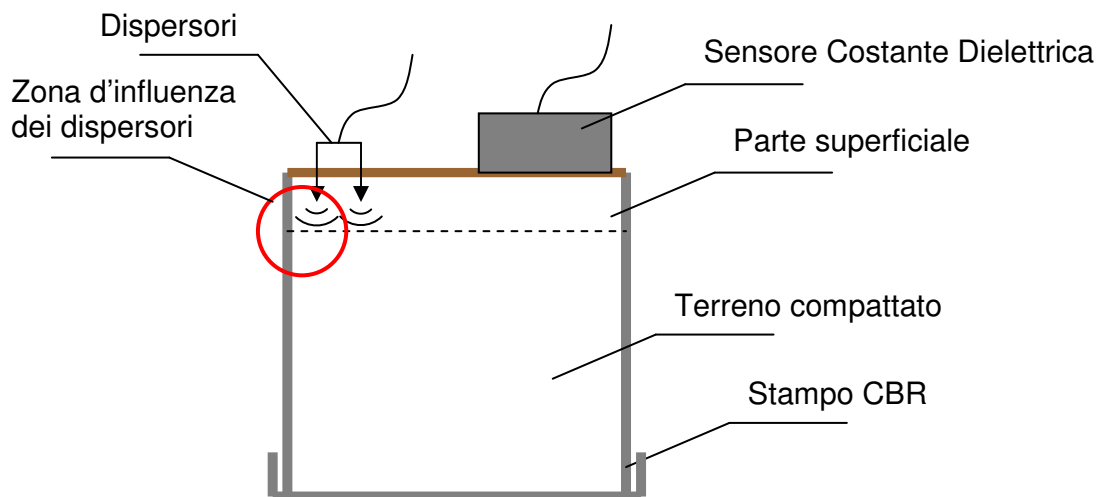


Fig. 5.1 – Schema di misura dell'Impedenza e della Costante Dielettrica

Inoltre, per entrambe le prove elettriche andrebbero eseguiti test su terreni non compattati all'interno dei provini CBR, per valutare se il metallo costituente la fustella vada ad influenzare la capacità di conduzione della corrente elettrica e della differenza

di potenziale che viene a crearsi all'interno del provino durante la misura della costante dielettrica e l'impedenza (fig. 5.1).

Terminata la fase di prequalifica del materiale, si è in possesso dei dati necessari per la scelta del trattamento a cui sottoporre ai campioni che non hanno mostrato le adeguate proprietà per il riutilizzo. Il trattamento avviene mediante la miscelazione del terreno con ceneri volanti e legante idraulico al fine di instaurare il fenomeno di presa ed il successivo indurimento. Tale operazione avviene all'interno di un mescolatore rotante piano definito "Pan mixer" (fig.5.2). I volumi di campione trattato sono ridotti poiché per quantitativi maggiori si va incontro ad una miscelazione non soddisfacente, creando un materiale disomogeneo nel quale non è uniforme la distribuzione dei leganti. Questo fenomeno è stato riscontrato in seguito alla prova ITT eseguita sul campione n°16 miscelato con il 6% di cenere volante e il 6% di calce. Il provino si è rotto in seguito ad un carico molto basso ed il computer non ha potuto registrare il valore di rottura poiché è tarato per i test sui campioni di calcestruzzo che danno risultati con una scala più alta. In seguito all'analisi visiva del provino rotto, è stato possibile verificare il colore disomogeneo nelle due metà dato dalla miscelazione non corretta. Infatti erano presenti zone molto scure, dovute ad una eccessiva presenza di ceneri volanti e zone più chiare in cui il trattamento non era presente. Sarebbe opportuno quindi miscelare per più di tre minuti, come previsto per i campioni trattati con il 4%, i terreni miscelati con quantitativi maggiori di legante.



Fig. 5.2 – Miscelazione nel "Pan mixer" prima e dopo

Per valutare l'effettivo miglioramento delle prestazioni, le terre trattate sono state sottoposte a prove meccaniche. Durante la compattazione dei campioni a matrice sabbiosa, sono stati riscontrati diversi problemi di natura pratica che hanno portato ad ottenere provini cubici che non presentavano una superficie perfettamente regolare necessaria per il test a compressione. È stato scelto pertanto di posizionare i campioni all'interno del macchinario con l'asse di compressione disposto perpendicolarmente a quello di compattazione della prova. Ciò ha permesso di creare un contatto regolare, ma a causa di tale operazione, si è probabilmente sottostimato il valore di resistenza a compressione cubica del campione. Il carico di rottura è stato infatti applicato parallelamente agli strati costituenti il provino (fig.5.3). I dati ottenuti, anche se sottostimano l'effettiva resistenza a compressione, sono da ritenere a favore di sicurezza perché i valori ottenuti soddisfano comunque gli standard tecnici.



Fig. 5.3 – La direzione di compattazione e compressione

Il materiale ottenuto dal trattamento con le ceneri volanti verrà impiegato nello scavo per costituire lo strato in cui sarà posata la rete di servizio, mentre lo strato finale di chiusura sarà costituito dal materiale oversize maggiore di 40 mm frantumato. Tale

materiale, affinché sia idoneo al riutilizzo, deve avere una granulometria che rientri all'interno del fuso granulometrico imposto dalle specifiche tecniche. In caso ciò non avvenisse il materiale deve essere corretto granulometricamente con l'aggiunta della pezzatura mancante o scartato dal processo. Generalmente la frantumazione mediante "Jaw Cursher" non riesce a produrre un adeguato quantitativo di pezzatura media, che potrebbe essere ottenuta dalla scarifica della pavimentazione nell'area di intervento. Infatti, con questa operazione viene prodotto un materiale composto prevalentemente da aggregati fini e medi a scapito della pezzatura grossa. Occorre valutare l'effettiva possibilità di riciclaggio degli strati legati, perché anche la frantumazione all'interno del macchinario non ha prodotto un inerte di granulometria adatta al reimpiego. Una soluzione a questo problema potrebbe essere data dall'impiego della malta autocompattante nota in Inghilterra come "Flowable Fill", un calcestruzzo composto da un mix di inerti, cemento, acqua e ceneri volanti avente una elevata lavorabilità e che da ottimi risultati di resistenza in seguito al fenomeno di presa in breve tempo. Una soluzione potrebbe essere quella di impiegare gli aggregati ottenuti dalla frantumazione come inerte per miscela cementizia. Il materiale ottenuto si potrebbe impiegare per la chiusura della trincea, stendendolo sopra lo strato costituente il letto di posa delle reti. Questo materiale si presta perfettamente alle caratteristiche necessarie per le finalità di questo progetto: essere pratico, economico e che rispetti l'ambiente. Grazie alle sue caratteristiche di lavorabilità si adatta perfettamente alle irregolarità delle pareti dello scavo e, inoltre, non necessita di compattazione, operazione complessa all'interno di scavi aventi ridotte dimensioni. Il materiale ottenuto possiede elevate proprietà di resistenza che potrebbero essere eccessivamente superiori a quelle della pavimentazione in cui viene steso.

### **5.3 La valutazione della portanza in sito**

Fino ad ora il progetto ha studiato le tecniche per il riciclaggio delle terre da scavo in modo da poterle riutilizzare come materiale per la chiusura di una generica trincea urbana. Gli esperimenti condotti in laboratorio hanno mostrato l'effettiva possibilità di tale test, confermando le proprietà pozzolaniche delle ceneri volanti impiegate come

legante idraulico. Il passo successivo sarà quello di valutare e testare un intervento di chiusura degli scavi direttamente in sito con questa tecnica.

In laboratorio le caratteristiche di resistenza dei campioni sono state valutate tramite la prova CBR e le prove a compressione ad espansione libera, ma tali test non sono eseguibili in sito con estrema facilità. Generalmente la portanza di una terra in sito viene valutata mediante la prova di carico con piastra statica (*Plate Loading Test PLT*), che consiste nel caricare la piastra imprimendo delle pressioni predefinite e misurando i cedimenti per mezzo dei comparatori centesimali, dai risultati si determina il Modulo di Deformazione. L'esecuzione di tale prova necessita di operatori specializzati e di una attrezzatura complessa, il che la rende poco pratica e con tempistiche non adeguate ai fini del progetto.

Negli ultimi anni è si è diffusa in Italia la prova di portanza mediante “Light Falling Weight Deflectometer” o abbreviato LFWD. Il principio di funzionamento del LFWD è il medesimo del Falling Weight Deflectometer: una massa nota impatta più volte una piastra di carico posizionata sul piano in esame; pressioni e cedimenti sono registrati ad ogni colpo. In virtù delle dimensioni degli elementi di carico e dei dispositivi di acquisizione dati, il LFWD risulta agevolmente trasportabile da un singolo operatore. In commercio esistono diverse apparecchiature di questo tipo che si differenziano sostanzialmente per dimensioni e forma della massa impattante, per l'altezza di caduta, per le dimensioni della piastra di carico e per la posizione della cella di carico e degli accelerometri (geofoni) (fig.5.4).

La piastra in acciaio zincato del diametro di 300 mm e dello spessore di 20 mm, può essere considerata rigida ai fini del calcolo dei moduli del piano sottoposto a prova. Essa è dotata di una coppia di maniglie che ne facilitano il posizionamento e il trasporto. Tra la piastra di carico e la massa battente sono frapposti nell'ordine: un compensatore di inclinazione per condurre prove su piani inclinati, un accelerometro per la misurazione dei cedimenti, una cella di carico per misurazione dei carichi in gioco e uno smorzatore a molle (buffer) per modulare la forza impattante.

In seguito alla prova si il valore del *modulo di deformazione dinamico*  $E_{dv}$ , *dei cedimenti*  $s$  e *delle velocità*  $s$  misurate per ciascun colpo e i rispettivi valori medi. Il tempo necessario per l'esecuzione della procedura appena descritta non supera generalmente i due/tre minuti.

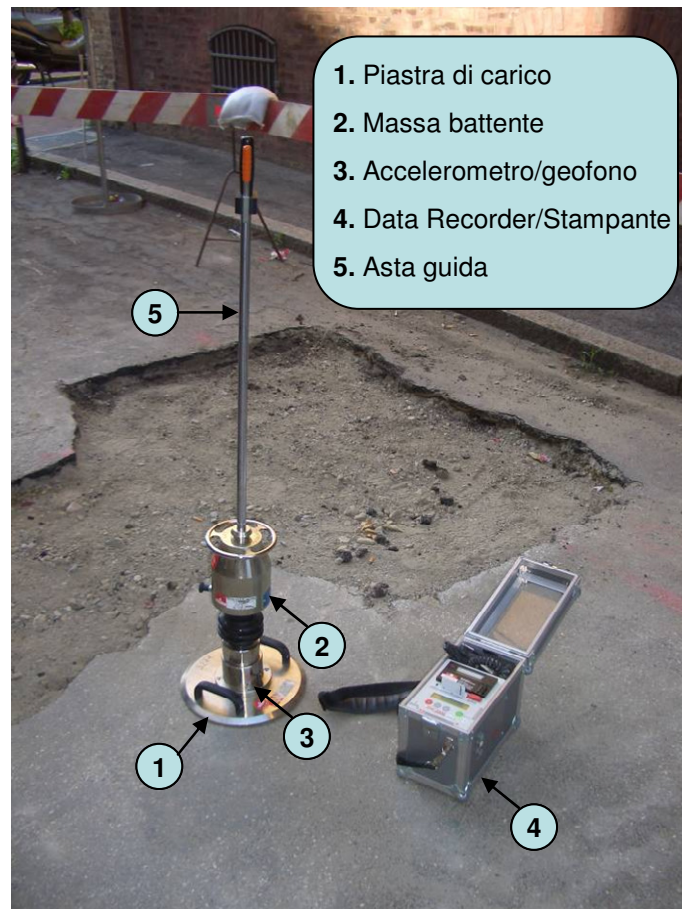


Fig. 5.4 – Il Light Falling Weight Deflectometer

La funzionalità dell'apparecchiatura è legata anche alla disponibilità immediata del risultato della prova; ai fini dei controlli in cantiere, infatti, è possibile sfruttare il LFWD per verificare la qualità e l'omogeneità dell'addensamento richiedendo interventi mirati in quei punti ove i risultati non fossero soddisfacenti. Tali caratteristiche la rendono idonea per la valutazione della portanza in sito di un intervento di ripristino degli strati non legati della pavimentazione stradale come quello visto nel processo di riciclaggio analizzato.



## 5.4 Sviluppi futuri

Il riciclaggio delle terre da scavo per il ripristino del pacchetto stradale, con le metodologie analizzate, prevede lo svolgimento di operazioni eseguibili totalmente in sito affinché vengano annullati i viaggi di trasporto del materiale dal cantiere alla discarica e dalla cava al cantiere ed in modo da diminuire i tempi necessari per svolgere l'intervento. Per raggiungere questi obiettivi è prevista la progettazione di un macchinario semovente trasportabile in sito e che abbia dimensioni consone alla sede stradale su cui dovrà operare.

La società Pearson Ltd, finanziatrice del progetto, ha l'incarico di assemblare entro la fine dell'anno un primo prototipo che sarà fonte di test pratici con lo scopo di brevettarlo in futuro. Il punto di partenza per la progettazione di tale macchinario è lo "Starscreen" su cui verranno montate tutte le attrezzature per svolgere il riciclaggio in sito delle terre da scavo. La scelta del separatore come elemento primario è dovuta a due motivi, le sue notevoli dimensioni e la sua funzione, fondamentale per ottenere una granulometria adeguata al reimpiego.

Partendo dal corpo dello "Starscreen" è prevedibile che la prima operazione sia quella di dotarlo di un organo di propulsione e di una struttura meccanica che lo renda trasportabile o idoneo alla circolazione su strada. Il posizionamento dei cingoli può essere variabile in modo che sia adattabile alle differenti larghezze dipendenti dalla tipologia di scavo. Passando alla parte pratica riguardante le operazioni di riciclaggio all'uscita del macchinario separatore, potrebbe essere disposto nella parte superiore un frantumatore per l'aggregato grosso prodotto ed un successivo vaglio per il controllo granulometrico. Nella parte inferiore, nella tramoggia d'uscita dal separatore, si potrebbe posizionare la strumentazione per la prequalifica ed un nastro trasportatore che convogli il materiale ad un mescolatore elicoidale che misceli l'aggregato fine con il legante e le ceneri volanti. Questo eviterebbe che gli operatori entrino in contatto con le polveri fini nocive e dannose per le vie respiratorie. Nella parte superiore potrebbe essere previsto eventualmente un serbatoio contenente acqua per la correzione dell'umidità della miscela.

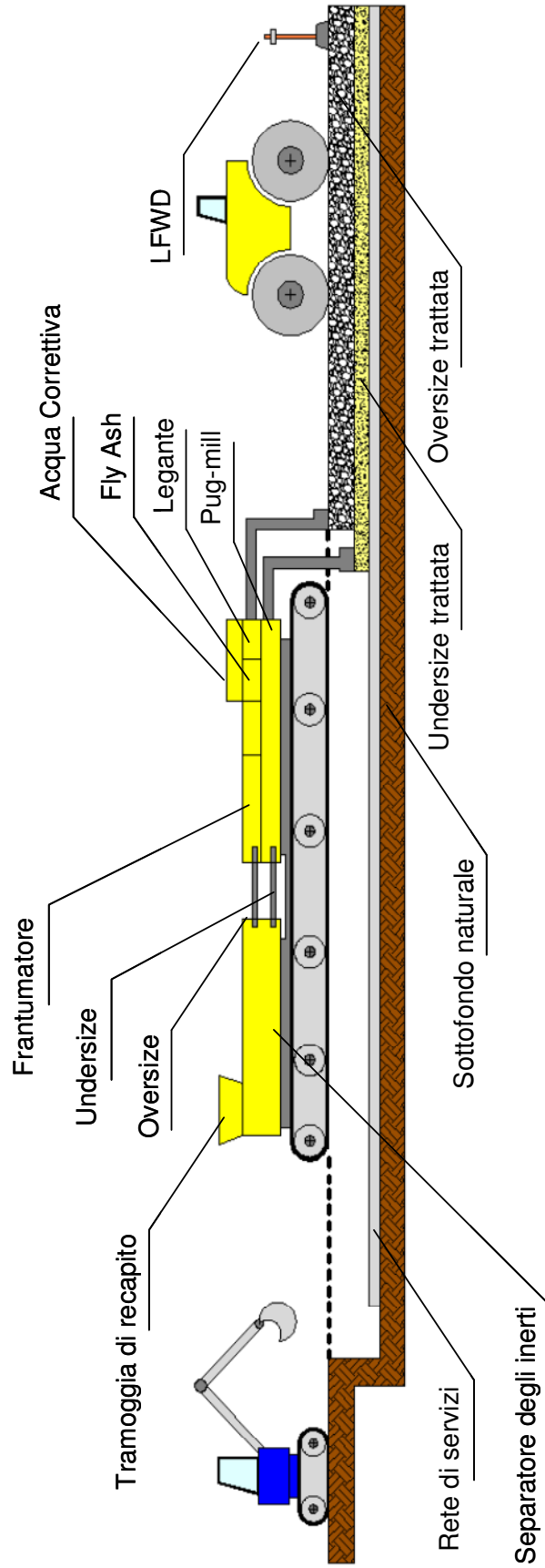


Fig. 5.5 – Descrizione del macchinario operante in sito

Il treno semovente è composto da un escavatore, il macchinario riciclatore ed un vibrotamper che, in continuo, consentono di eseguire l'escavazione dei materiali, il riciclaggio, la conseguente posa e compattazione in strati. Al termine di questo processo un operatore dotato di Light Falling Weight Deflectometer avrà il compito di testare l'intervento effettuato al fine di valutare la portanza raggiunta in sito affinché si abbia nel tempo un intervento in grado di resistere a carichi per il quale è stato progettato ed eseguito (fig.5.5).

## 5.5 Conclusioni

L'obiettivo del progetto di ricerca costituisce un tema fondamentale nel campo della tecnica stradale ed ha sempre più interesse in ambito sociale in quanto la tematica ambientale ed in particolare il riciclaggio delle materie di scarto diventa sempre più tema di studio e analisi. La ricerca trattata in questa tesi è stata svolta per intero presso l'Università di Nottingham, questo ha permesso di evidenziare le grosse differenze che intercorrono tra la legislazione italiana ed inglese in materia. In particolare, in Italia c'è un vero e propria lacuna normativa a riguardo, non essendo predisposto chiaramente un testo legislativo e la relativa specifica tecnica riguardo il riciclaggio delle terre da scavo come materia prima secondaria negli interventi di manutenzione o costruzione delle pavimentazioni stradali.

Le amministrazioni locali hanno mostrato notevole interesse per quanto concerne tali tecniche, in quanto rappresentano una direzione da intraprendere per il futuro. Il Comune di Bologna sta revisionando il capitolato di uso del sottosuolo comunale per interventi di manutenzione sulla pavimentazione stradale, indirizzando le specifiche tecniche verso una caratterizzazione prestazionale dell'intervento e lasciando libera scelta per il tipo di materiale da impiegare per tali operazioni.

In concordanza con il Comune, la società privata che gestisce la rete idrica, fognaria, del gas ed elettrica di Bologna, HERA S.p.A., ha manifestato una parziale apertura a tali tecniche, concedendo all'Università di Bologna la possibilità di intraprendere una campagna di prove in sito per poter valutare l'affidabilità di un futuro impiego, come controllo di qualità, della piastra dinamica (*Light Falling Weight*

*Deflectometer – LFWD*) sugli interventi di chiusura delle trincee urbane nei propri cantieri.

L'impiego delle tecniche descritte potrebbe portare benefici sia all'amministrazione comunale in quanto si ha la garanzia che l'intervento eseguito sia duraturo nel tempo e non provochi disagi all'utente, e allo stesso tempo il gestore delle reti di servizi avrebbe la sicurezza di non dover intervenire successivamente nello stesso punto in cui è già avvenuto il ripristino della pavimentazione a causa di un lavoro eseguito non correttamente.

Il progetto di ricerca "ZeroWASTER" è quindi un ottimo punto di partenza per lo sviluppo delle tecniche di riciclaggio delle terre da scavo in sito e rappresenta anche il punto di partenza per un nuovo studio riguardo i controlli di qualità (*QA & QC*) eseguibili sulle terre compattate per la caratterizzazione prestazionale in termini di resistenza.

# Bibliografia

## Riferimenti in Letteratura:

[1] – Bloomingdale, N., (2006), Analytical Spectral Devices Inc., <http://www.asdi.com>, personal communication.

[2] – Goetz, A.F.H., Chabrilat, S. and Lu, Z., (2001), “Field reflectance spectrometry for detection of swelling clays at construction sites”, *Field Analytical Chemistry and Technology*, issue 3, pp. 143-55.

[3] – Guthrie, W.S., Ellis, P.M. and Scullion, T., (2002) “Repeatability and Reliability of the Tube Suction Test”, *Transportation Research Record 1772*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., 2002, pp. 151-57.

[4] – HAUC, (2005), *Manual of Contract Documents for Highway Works*, volume 1: Specification for Highway Works Series 800, Road Pavements – Unbound, Cement and Other Hydraulic Bound Mixtures, Amendment (May), Highway and Utilities Committee (HAUC).

[5] – Scullion, T. & Saarenketo, T., (1997) “Using suction and Dielectric measurement as performance indicators for aggregate base materials”, *Transportation Research Record 1577*, TRB, National Research Council, Washington D.C., 2002, pp. 37-44.

[6] – Sorensen, L.K. and Dalsgaard, S., (2005), “Determination of clay and other soil spectra by near infrared spectroscopy” *Soil Science Society of American Journal*, **69**, pp. 159-67.

[7] – Yorkshire Water, (2005), “*Summary of excavations statistics for the period April 2004 to February 2005*”, Personal Communication.

[8] – Primel, L. and Tourenq, C. (2000). *Aggregates*, AA Balkema, Rotterdam.

- [10] – Wills, B.A. (1997). *Mineral processing Technology*, 6<sup>th</sup> ed., Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [11] – WRAP (2004). *The use of recycled materials for pipe bedding, pipe surround, backfill, sub-base and roadbase for the utility industry*, Waste and Resources Action Programme (WRAP), [http://www.aggregain.org.uk/case\\_studies/2688\\_the\\_use\\_of\\_.html](http://www.aggregain.org.uk/case_studies/2688_the_use_of_.html)
- [12] – G. Tesoriere, “*Strade ferrovie e aeroporti vol. II – Opere in terra e sovrastrutture stradali*”, UTET 2000 quinta edizione Torino.
- [13] – Comune di San Giuseppe Vesuviano – “*Regolamento per la esecuzione di scavi su suolo pubblico, art.1 – generalità e definizioni, art. 12 modalità operative*”, 2005.
- [14] – Direzione Generale Infrastrutture e Mobilità, Regione Lombardia – “*Sintesi inerente lo stato della manutenzione stradale in ambito internazionale, in Italia ed in Regione Lombardia*”, settembre 2005.
- [15] – Paolo Trombetti, “*Micro e mini trincea: tecnologia di scavo nel rispetto ambientale*”, Notiziario tecnico Telecom Italia – anno 18 n°1 2009.
- [16] – Prof. Ing. Gianluca Cerni, Università di Perugia, “*L'utilizzo degli inerti da recupero nei lavori pubblici – La normativa e lo stato della sperimentazione sui materiali inerti da recupero*”, Spoleto, ottobre 2008.
- [17] – HAUC, Department for Transport, New Roads and Street Works Act – “*Specification for the Reinstatement of Openings in Highways*”, London, giugno 2002.
- [18] – HAUC, Department for Transport, Highway Authorities and Utilities Committee – “*Practical Guide to Street Works*”, London, giugno 2006.

[19] – HAUC, Department for Transport, New Roads and Street Works Act – “*Specification for the Reinstatement of Openings in Highways – Appendix A8*”, London, giugno 2002.

[20] – Dott. Avv. Rosa Bertuzzi, “*D.Lgs n. 4/2008: novità e modifiche al D.Lgs. n. 152/2006*”, febbraio 2009.

[21] – Industria della Carta, Speciale Codice dell’ambiente – “*Decreto legislativo 152/06 alias il nuovo codice dell’ambiente*”, giugno 2006.

[22] – Consiglio Superiore della Magistratura, Ufficio per gli Incontri di Studio – “*I crimini ambientali: rifiuti, paesaggio e violazioni urbanistiche*”, Roma, 25/27 marzo 2009.

[23] – D.Lgs. 3 aprile 2006, n 152, “*Norme in Materia Ambientale*”, Gazzetta Ufficiale n. 88 del 14 aprile 2006 – suppl. ord. n. 96.

[24] – D.Lgs. 16 gennaio 2008, n. 4, “*Ulteriori disposizioni correttive ed integrative del decreto legislativo 3 aprile 2006, n 152, recante norme in materia ambientale*”, Gazzetta Ufficiale n. 24 del 29 gennaio 2008 – suppl. ord. n. 24.

[25] – Prof. Ing. Giorgio Bressi – “*Circolare 15 luglio 2005, n.5205 – Indicazioni per l’operatività nel settore edile, stradale e ambientale, ai sensi del decreto ministeriale 8 maggio 2003, n.203*”, Rimini novembre 2006

[26] – Enel Ricerca, Giulio Belz – “*L’impiego delle ceneri di carbone nei calcestruzzi*”, settembre 2006.

[27] – Ambiente e Sicurezza, Il Sole 24 Ore – Pirola, Giorgio Bressi, Direttore tecnico ANPAR – “*Rifiuti Inerti: dalla circolare n. 5205/2005, nuove prospettive per il riciclaggio*”, Pag. 41-53, n°21, novembre 2005.

[28] – Nilo Cesar Consoli, Pedro Domingos Marques Prietto, Joao Harb Carraro and Karla Salvagni Heineck, “*Behaviour of compacted soil – fly ash – carbide lime mixtures*”, pag 774-782, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, settembre 2001.

[29] – Lyncole XIT Grounding – “*Soil Resistivity Testing Four Point Wenner Method, LEP – 1001*”, settembre 2005.

[30] – E. Fratticioli, A. Ocera, M. Dionigi and R. Sorrentino, Dipartimento di Ingegneria Elettronica e dell’Informazione, Università di Perugia, “*Un sistema di misura della costante dielettrica con sensori risonanti a microonde: caratterizzazione ed applicazioni*”, Perugia 2006.

[31] – A. Lang, C. Eng. – “*Development of a user friendly probe for the measurement of the normal resistivity of soil surrounding a power cable laid direct in the ground*” – Tokyo, 2004

[32] – T. Saarenko, “*Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys*”, Department of science, University of Oulu, novembre 2006.

[33] – C. Scolletaro, “*Influenza delle argille sulle proprietà elastiche ed elettriche di mezzi eterogenei e porosi ed applicazione del Modello Elettrosismico*”, ottobre 2005.

[34] – J. Beeghly, “*Recent Experiences with lime – fly ash stabilization of pavement subgrade soils, base and recycled asphalt*”, International ash Symposium, Center for applied Energy Research, Pittsburgh 2003.

[35] – Enel produzione Ricerca, G. Belz “*Valorizzazione delle ceneri volanti provenienti dagli impianti di combustione a carbone*”, Milano 2003.



[36] – G.S. Ghataora, I.M. Alobaidi and J. Billam, “*Use of pulverized fly ash in trench backfill*”, pag. 228-237, Journal of Materials in Civil Engineering, agosto 2000.

[37] – G.S. Ghataora, I.M. Alobaidi and E. Faragher “Use of recycled aggregates for cementitious backfill”, Waste and Resource Management, pagg. 23-28, febbraio 2006.

[38] – Clegg Impact Soil Tester, JMW Limited, [www.jmwlimited.co.uk](http://www.jmwlimited.co.uk)

[39] – U.S Environmental Protection Agency Radiation Protection Division, “*Modification of the Clegg Hammer as an alternative to nuclear density gauge to determine soil compaction*”, Febbraio 2006.

[40] – O. Al-Amoudi, I.M. Asi, Z. Khan, “ Clegg Hammer – California Bearing Ratio Correlations”, pagg. 512-523, Journal of Materials in Civil Engineering, novembre 2002.

[41] – B. Tuncer, Edil and C. Benson, “*Sustainable construction case history: fly ash stabilization of road surface gravel*”, World of coal ash, maggio 2007 Covington Kentucky.

[42] – A. Dawson, S. Schulz, P. Windsor, A. Bachelor “Treatment and Recycling of soil and Aggregates of trench Excavations“, Nottingham 2006.

#### **Riferimenti nelle Norme e Specifiche:**

[43] – Prescrizioni tecniche per gli interventi nel sottosuolo di proprietà del comune di Bologna – Bologna 2005.

[44] – Prescrizioni tecniche per gli interventi nel sottosuolo di proprietà del comune di Bologna, Allegati – Bologna 2005.

[45] – UNI EN 450 – 1 Ceneri Volanti per calcestruzzo: Definizione, specificazioni e criteri di conformità, dicembre 2007.

[46] – UNI EN 450 – 2 Ceneri Volanti per calcestruzzo: Valutazione della conformità, dicembre 2007.

[47] – ASTM, D 5239 – 04, Characterizing fly ash for use in soil Stabilization, United States 2004

[48] – UNI EN 13242 – Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l'impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione di strade, marzo 2008.

[48] – UNI EN 13285 – Miscele non legate, specifiche, marzo 2004.

[49] – UNI EN 14227 – 3 – Miscele legate con leganti idraulici, specifiche, parte 3: miscele legate con ceneri volanti, novembre 2004.

[50] – UNI EN 14227 – 14 – Miscele legate con leganti idraulici, specifiche, parte 14: terra trattata con ceneri volanti, luglio 2006.

[51] – BS EN 13286 – 42:2003 – Unbound and Hydraulically bound mixtures – Test method for the determination of the indirect tensile strength of hydraulically bound mixtures.

[52] – BS 812 – 111:1990 – Testing Aggregates – Methods for determination of ten per cent fines value (TFV).

[53] – BS 1377 – 2:1990 – Moisture Content, Density, Wet and Dry sieving for soil.

[54] – BS EN 1097 – 2:1998 – Tests for mechanical and physical properties of aggregates, methods for the determination of resistance to fragmentation.

[55] – BS 1377 – 4:1990 – Determination of the California Bearing Ratio (CBR).

**Riferimenti Web:**

[56] – <http://www.mmdsizers.com/>

[57] – <http://www.wrap.org.uk/>

[58] – <http://www.dft.gov.uk/>

[59] – <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/>

[60] – <http://www.pearsonseparation.co.uk/>

[61] – <http://www.standardsforhighways.co.uk/>

[62] – <http://roads.dicea.unifi.it/fiv-old/>

[63] – <http://www.ukqaa.org.uk/index.html>

[64] – <http://diectad.unipv.it/corsi/PdIV/>

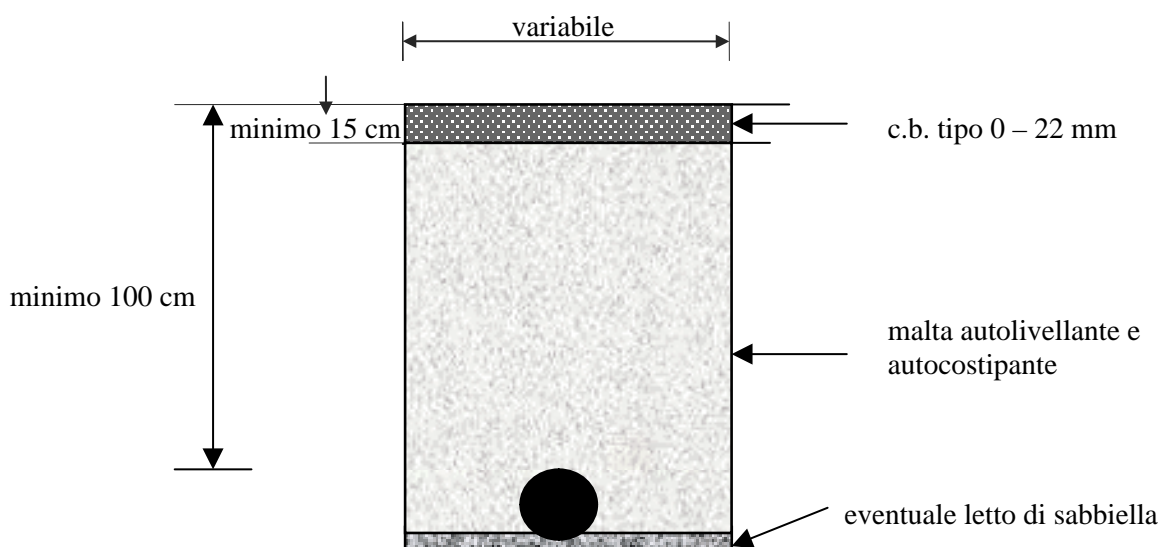
[65] – <http://pubs.asce.org/default.htm>

[66] – [http://pavementinteractive.org/index.php?title=Main\\_Page](http://pavementinteractive.org/index.php?title=Main_Page)

[67] – [http://www.elletipi.it/capitolato\\_materiali\\_stradali.htm](http://www.elletipi.it/capitolato_materiali_stradali.htm)

[68] – <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/fafacts.pdf>

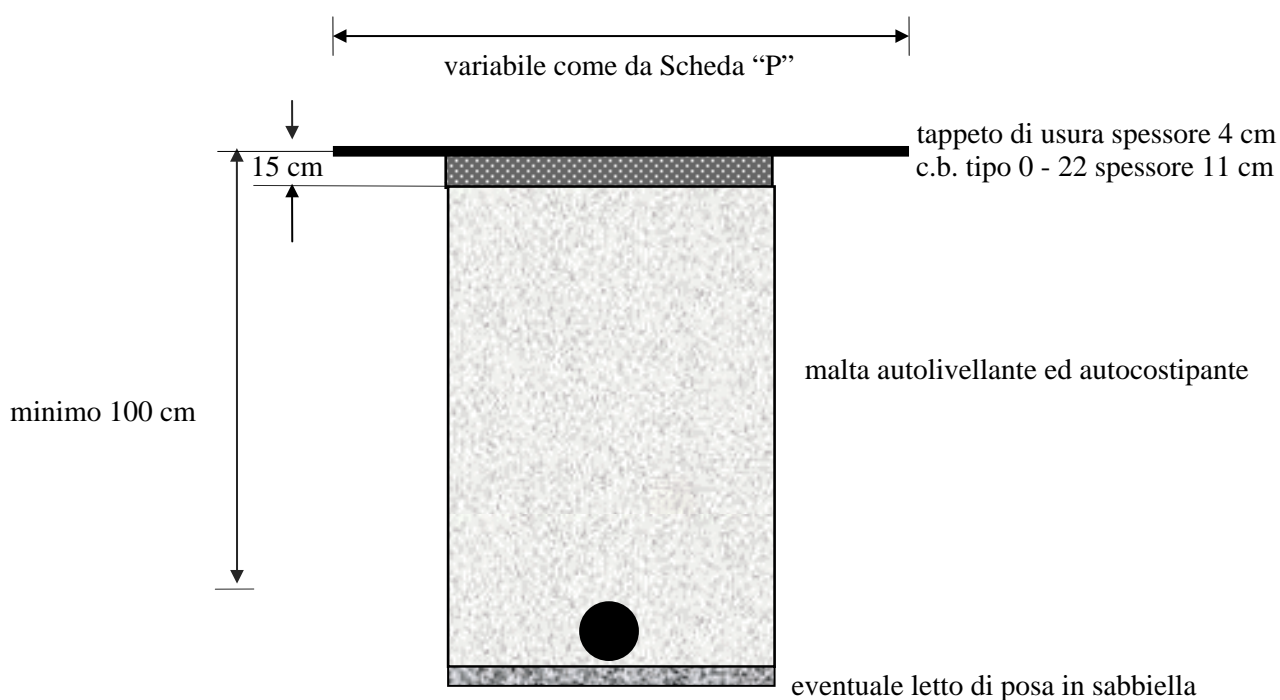
**INTERVENTI SU STRADE  
CON PAVIMENTAZIONE IN CONGLOMERATO BITUMINOSO  
PRIMO TEMPO - (per scavi di sezione fino a 1,5 m<sup>2</sup>)**



**FASI DI LAVORAZIONE**

- taglio con fresa meccanica o con macchine a lama rotante;
- scavo con trasporto a rifiuto di tutto il materiale di risulta;
- posa del letto di sabbia;
- riempimento con malta autolivellante e costipante fino a 15 cm dal piano stradale finito;
- copertura provvisoria di primo tempo con conglomerato bituminoso tipo 0 - 22 mm, spessore 15 cm;
- refacimento della segnaletica stradale;
- potranno essere richiesti spessori maggiori sulle direttrici principali ad alto scorrimento; tali spessori verranno prescritti dall'Ufficio preposto al controllo.**

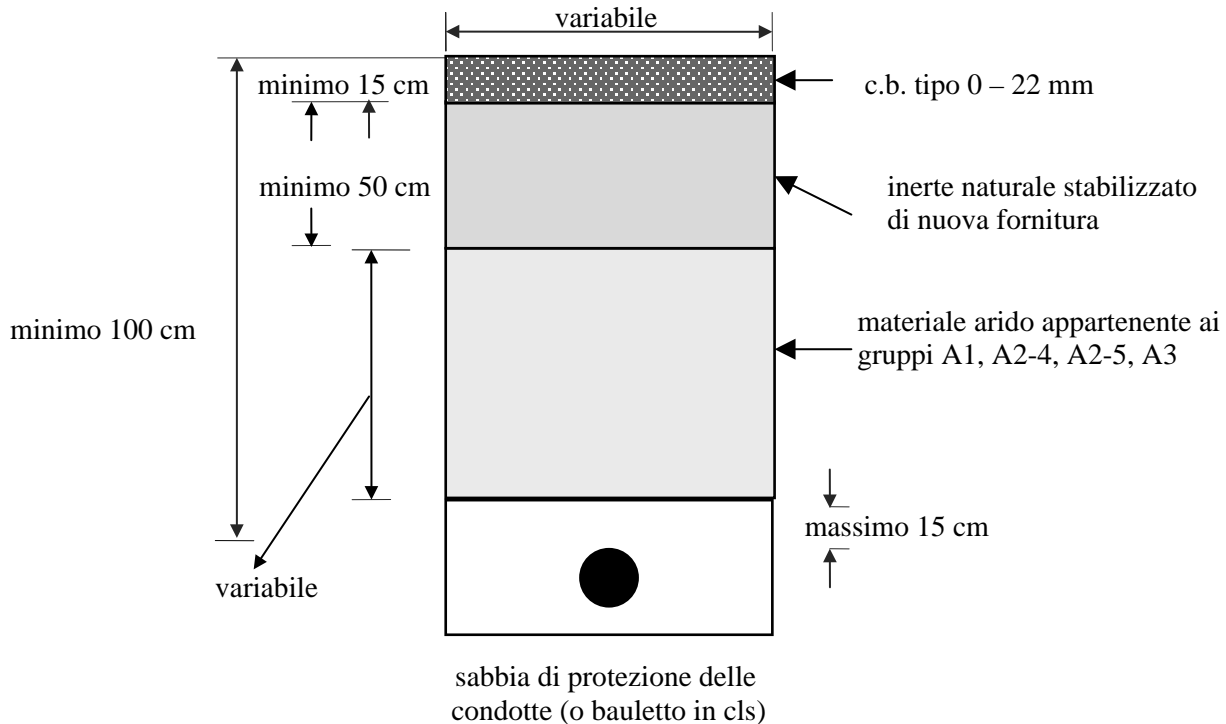
**INTERVENTI SU STRADE  
CON PAVIMENTAZIONE IN CONGLOMERATO BITUMINOSO  
SECONDO TEMPO - (per scavi di sezione fino a 1,5 m<sup>2</sup>)**



**FASI DI LAVORAZIONE**

- fresatura della pavimentazione di primo tempo per uno spessore di minimo 4 cm per la larghezza prescritta **dall’Ufficio preposto al controllo** e comunque non meno di quanto già riportato nelle norme generali relative alla fresatura ed all’esecuzione dei tappeti d’usura;
- tappeto di usura in conglomerato bituminoso modificato tipo 0 – 8 / 12 mm dello spessore di 4 cm compresa copertura in emulsione acida e sabbia di Po;
- rifacimento della segnaletica stradale;
- potranno essere richiesti spessori maggiori sulle direttrici principali ad alto scorrimento; tali spessori verranno prescritti dall’Ufficio preposto al controllo.**

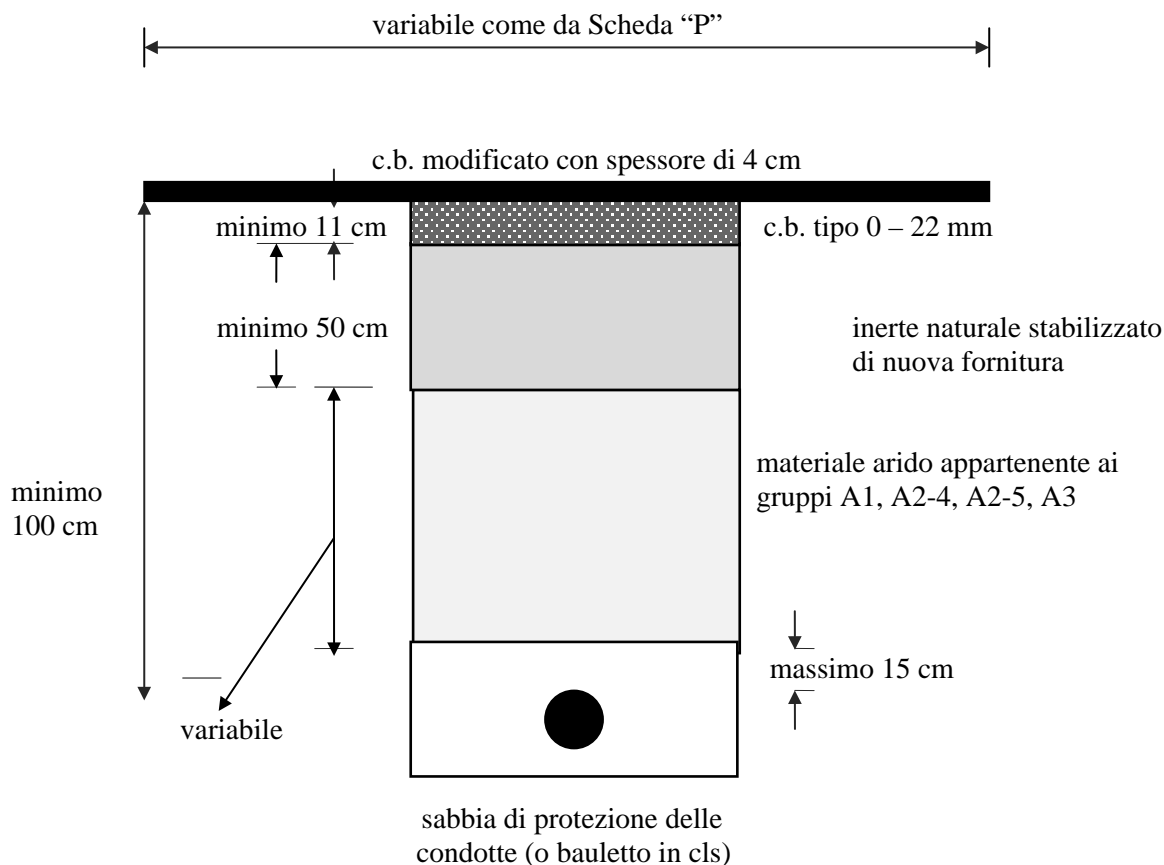
**INTERVENTI SU STRADE**  
**CON PAVIMENTAZIONE IN CONGLOMERATO BITUMINOSO**  
**PRIMO TEMPO - (per scavi di sezione superiore a 1,5 m<sup>2</sup>)**



**FASI DI LAVORAZIONE**

- a) taglio con fresa meccanica o con macchine a lama rotante;
- b) scavo con trasporto a rifiuto di **tutto** il materiale di risulta;
- c) posa delle condotte e protezione delle stesse con sabbia, o contenute in bauletto di calcestruzzo, per uno spessore di massimo 15 cm dalla generatrice superiore del tubo;
- d) riempimento con materiale arido appartenente ai gruppi A1, A2-4, A2-5, A3 fino a 65 cm dal piano stradale finito;
- e) fondazione di inerte naturale stabilizzato per lo spessore di 50 cm;
- f) copertura provvisoria di primo tempo con conglomerato bituminoso tipo 0 - 22 mm, spessore 15 cm;
- g) rifacimento della segnaletica stradale;
- h) **potranno essere richiesti spessori maggiori sulle direttrici principali ad alto scorrimento; tali spessori verranno prescritti dall'Ufficio preposto al controllo.**

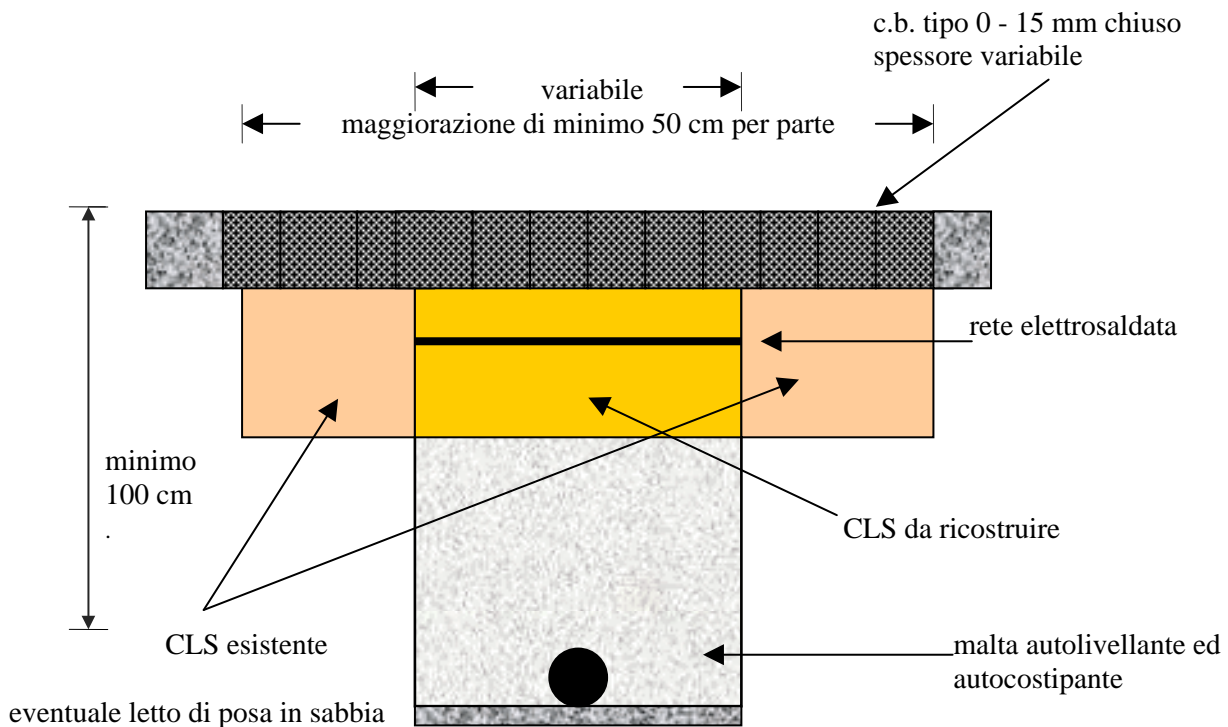
**INTERVENTI SU STRADE**  
**CON PAVIMENTAZIONE IN CONGLOMERATO BITUMINOSO**  
**SECONDO TEMPO - (per scavi di sezione superiore a 1,5 m<sup>2</sup>)**



**FASI DI LAVORAZIONE**

- a) fresatura della pavimentazione di primo tempo per uno spessore di minimo 4 cm per la larghezza prescritta **dall’Ufficio preposto al controllo** e comunque non inferiore ad una carreggiata;
- b) tappeto di usura in conglomerato bituminoso modificato tipo 0 – 8 / 12 mm dello spessore di 4 cm, previa posa di mano d’attacco in emulsione acida, compresa copertura con emulsione acida e sabbia di Po;
- c) rifacimento della segnaletica stradale;
- d) **potranno essere richiesti spessori maggiori sulle direttrici principali ad alto scorrimento; tali spessori verranno prescritti dall’Ufficio preposto al controllo.**

**INTERVENTI SU STRADE  
CON PAVIMENTAZIONE IN MATERIALI LAPIDEI  
CON SOTTOFONDAZIONE IN CLS PREESISTENTE  
PRIMO TEMPO - (per scavi di sezione fino a 1,5 m<sup>2</sup>)**



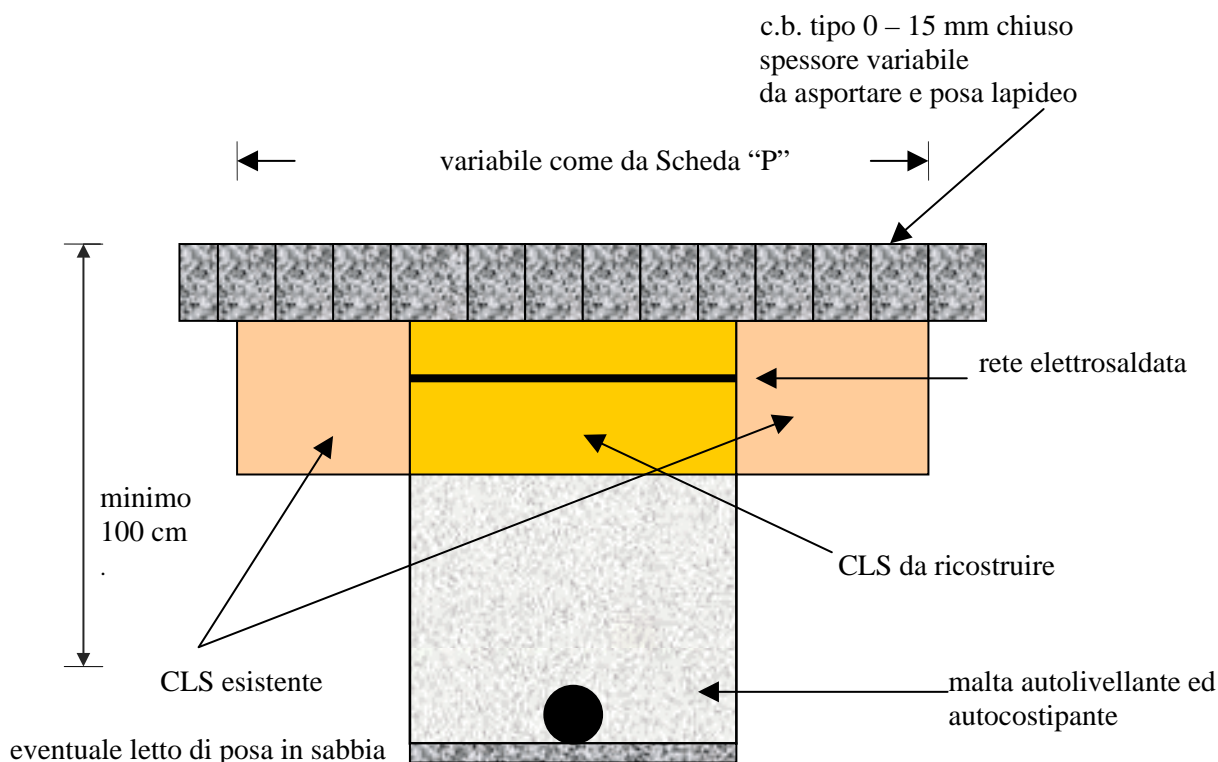
**FASI DI LAVORAZIONE**

- disfacimento di pavimentazione lapidea eseguita a mano;
- scavo con trasporto a rifiuto di **tutto** il materiale di risulta;
- posa delle condotte e protezione delle stesse con sabbia, o contenute in bauletto di calcestruzzo per uno spessore di massimo 15 cm dalla generatrice superiore del tubo;
- riempimento con malta autolivellante ed autocostipante fino al piano d’imposta della sottofondazione in cls;
- ricostruzione della sottofondazione in cls con caratteristiche analoghe a quella preesistente integrata con la posa di rete elettrosaldata;
- copertura provvisoria di primo tempo con c.b. tipo 0 - 15 mm; spessore variabile.

**N.B. L’Ufficio preposto al controllo ha facoltà di prescrivere direttamente il ripristino di secondo tempo.**



**INTERVENTI SU STRADE  
CON PAVIMENTAZIONE IN MATERIALI LAPIDEI  
CON SOTTOFONDAZIONE IN CLS PREESISTENTE  
SECONDO TEMPO - (per scavi di sezione fino a 1,5 m<sup>2</sup>)**

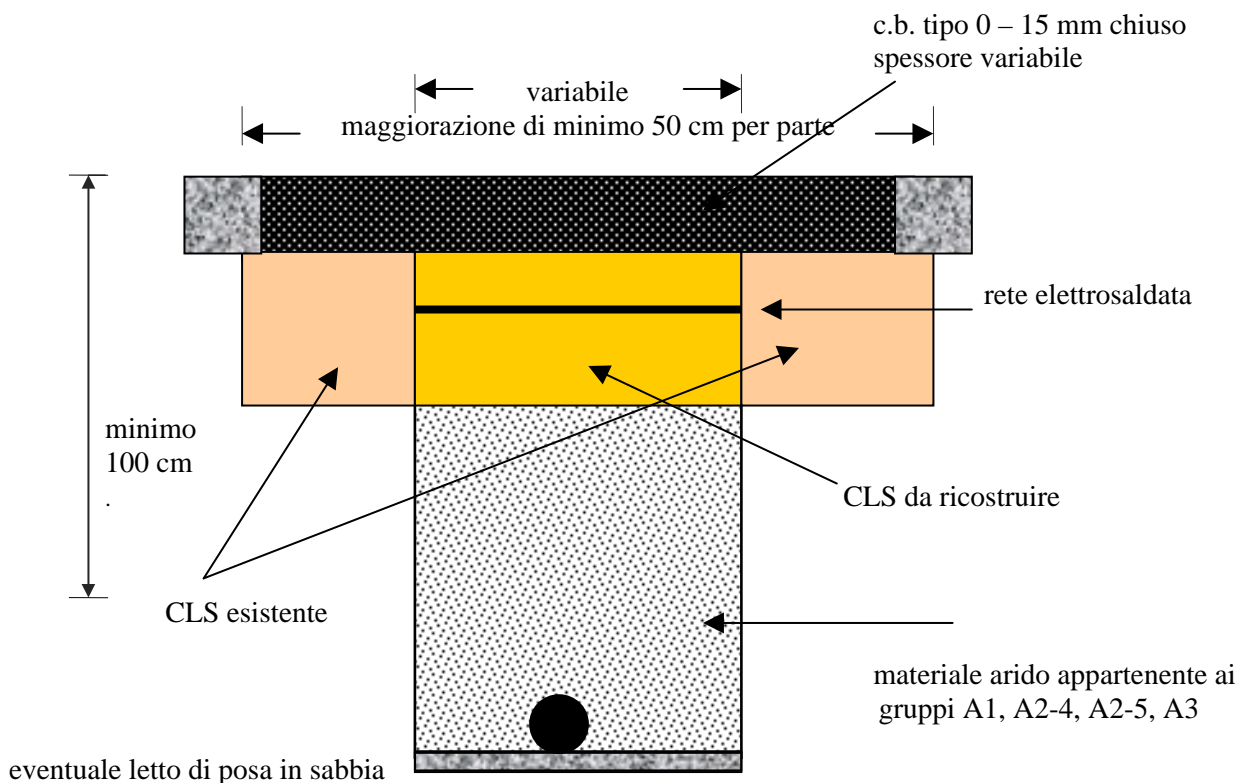


**FASI DI LAVORAZIONE**

- demolizione pavimentazione provvisoria in conglomerato bituminoso;
- scavo con trasporto a rifiuto di **tutto** il materiale di risulta;
- refacimento pavimentazione lapidea;
- sigillatura delle connessure con emulsione acida e graniglia se eseguita su strada con traffico, con cemento se eseguita su strada pedonalizzata;
- refacimento della segnaletica stradale.

**N.B. L’Ufficio preposto al controllo ha facoltà di prescrivere direttamente il ripristino di secondo tempo.**

**INTERVENTI SU STRADE  
CON PAVIMENTAZIONE IN MATERIALI LAPIDEI  
CON SOTTOFONDAZIONE IN CLS PREESISTENTE  
PRIMO TEMPO - (per scavi di sezione superiore a 1,5 m<sup>2</sup>)**

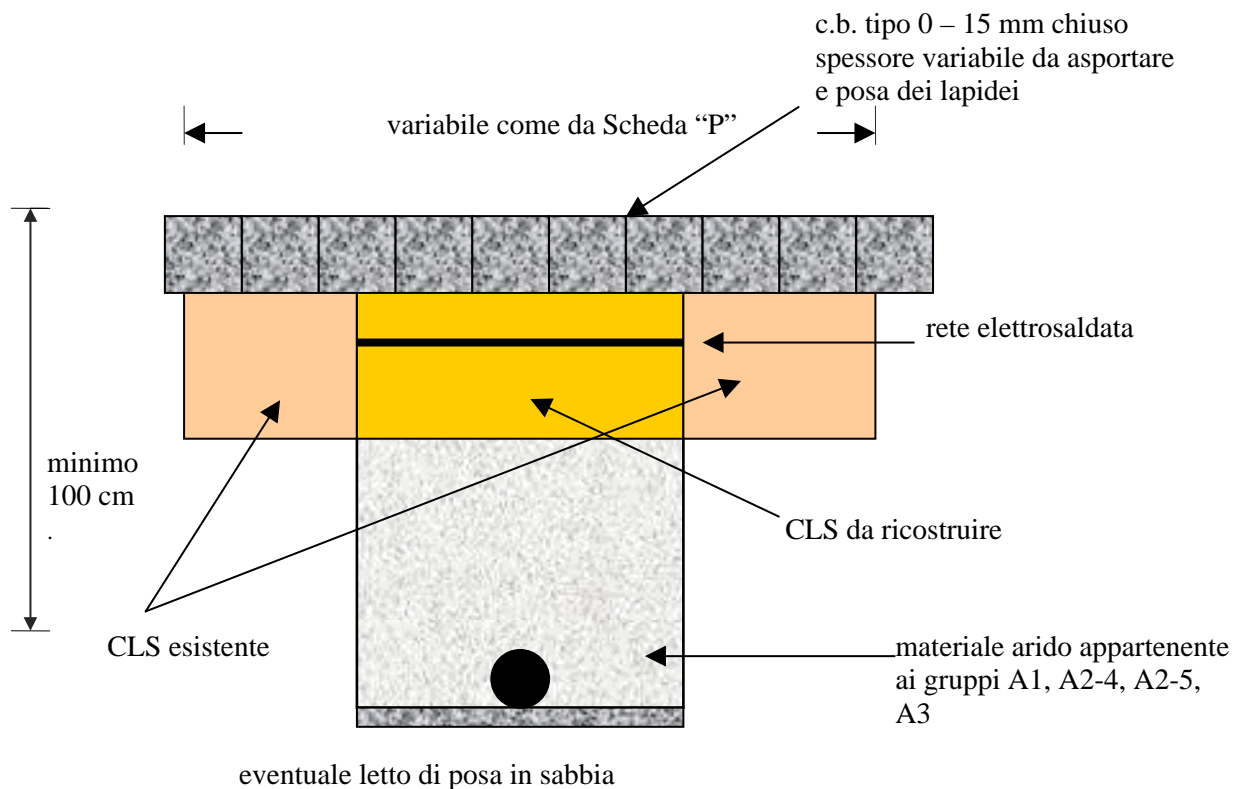


**FASI DI LAVORAZIONE**

- disfacimento pavimentazione lapidea eseguita a mano;
- demolizione fondazione in calcestruzzo;
- scavo con trasporto a rifiuto di **tutto** il materiale di risulta;
- posa della condotta;
- riempimento con materiale arido fino alla quota inferiore del cls preesistente;
- ricostruzione del sottofondo in cls e posa di rete elettrosaldata di collegamento al preesistente;
- copertura provvisoria di primo tempo con c.b. tipo 0 - 15 mm; spessore variabile;
- rifacimento della segnaletica stradale.

**N.B. L'Ufficio preposto al controllo ha facoltà di prescrivere direttamente il ripristino di secondo tempo.**

**INTERVENTI SU STRADE  
CON PAVIMENTAZIONE IN MATERIALI LAPIDEI  
CON SOTTOFONDAZIONE IN CLS PREESISTENTE  
SECONDO TEMPO - (per scavi di sezione superiore a 1,5 m<sup>2</sup>)**

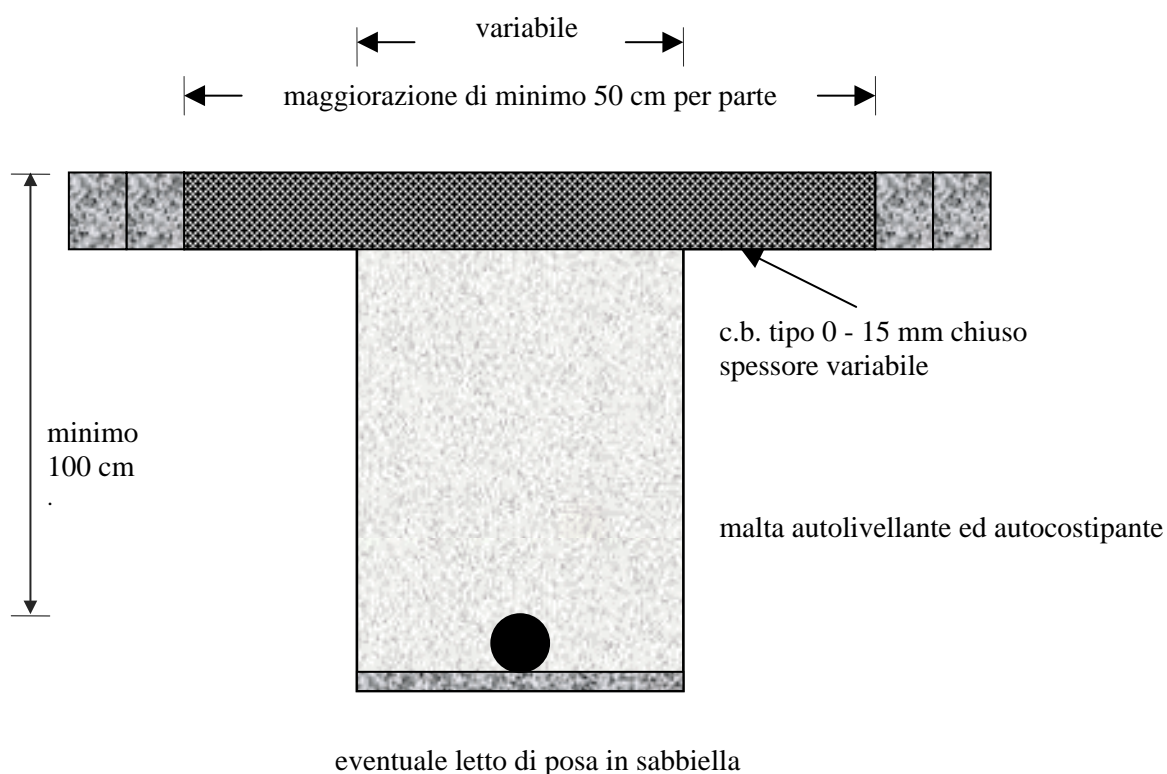


**FASI DI LAVORAZIONE**

- demolizione pavimentazione provvisoria in conglomerato bituminoso;
- scavo con trasporto a rifiuto di **tutto** il materiale di risulta;
- refacimento pavimentazione lapidea;
- sigillatura delle connessioni con emulsione acida e graniglia se eseguita su strada con traffico, con cemento se eseguita su strada pedonalizzata;
- refacimento della segnaletica stradale.

**N.B. L'Ufficio preposto al controllo ha facoltà di prescrivere direttamente il ripristino di secondo tempo.**

**INTERVENTI SU STRADE  
CON PAVIMENTAZIONE IN MATERIALI LAPIDEI  
PRIVE DI SOTTOFONDAZIONE IN CLS  
PRIMO TEMPO - (per scavi di sezione fino a 1,5 m<sup>2</sup>)**

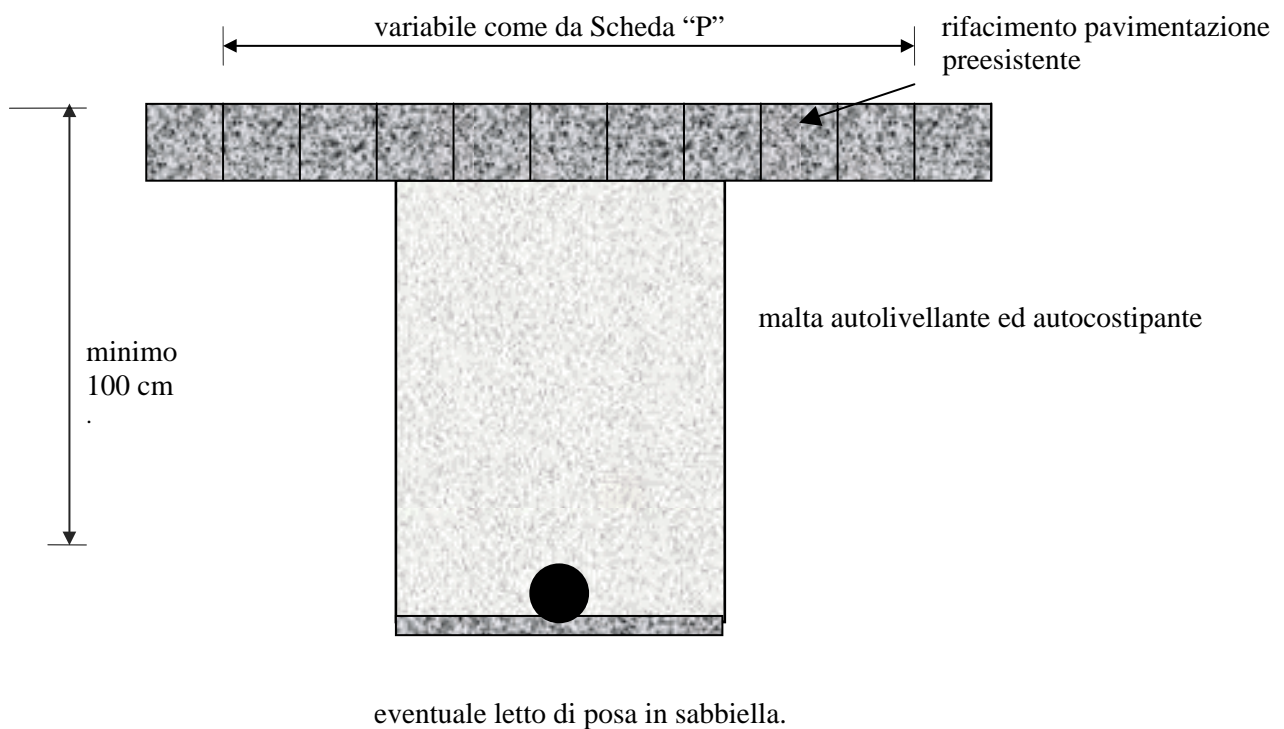


**FASI DI LAVORAZIONE**

- disfacimento pavimentazione lapidea eseguita a mano;
- scavo con trasporto a rifiuto di **tutto** il materiale di risulta;
- posa della condotta;
- riempimento con malta autolivellante ed autocostipante fino a 5 cm dal piano stradale finito;
- copertura provvisoria di primo tempo con c.b. tipo 0 - 15 mm; spessore 5 cm;
- rifacimento della segnaletica stradale.

**N.B.** L'Ufficio preposto al controllo ha facoltà di prescrivere direttamente il ripristino di secondo tempo.

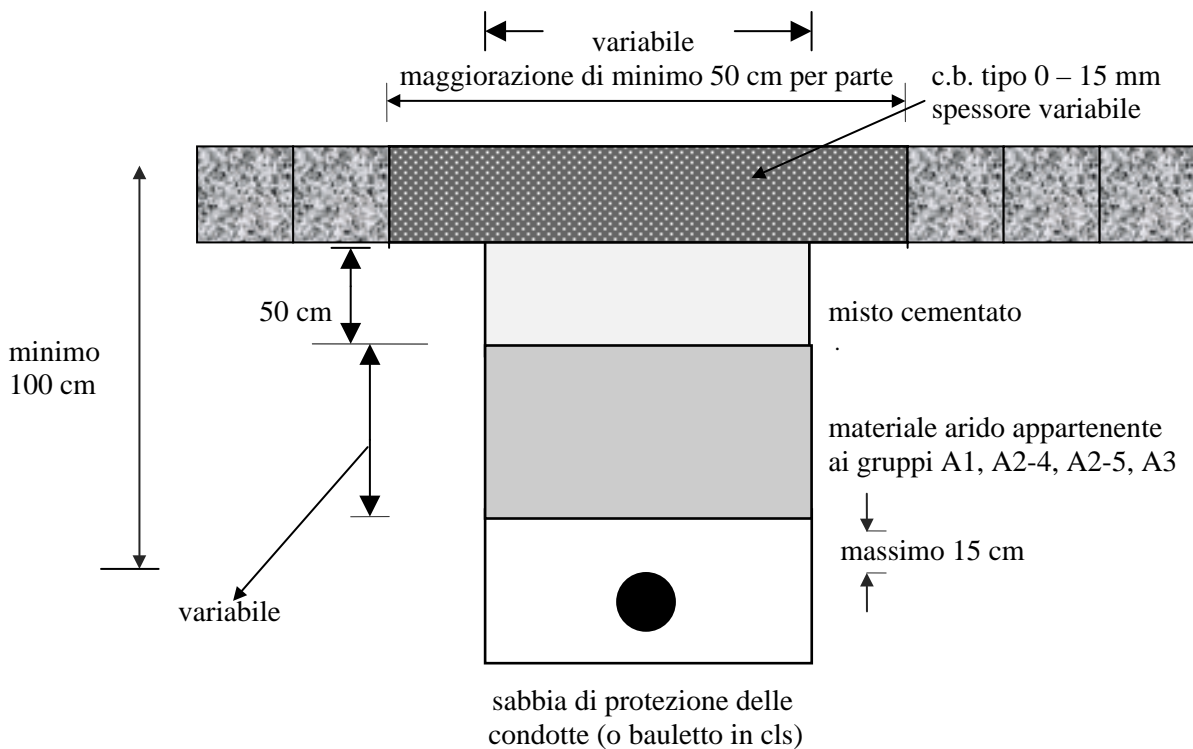
**INTERVENTI SU STRADE  
CON PAVIMENTAZIONE IN MATERIALI LAPIDEI  
PRIVE DI SOTTOFONDAZIONE IN CLS  
SECONDO TEMPO - (per scavi di sezione fino a 1,5 m<sup>2</sup>)**



**FASI DI LAVORAZIONE**

- asportazione del materiale di ripristino di primo tempo per lo spessore necessario;
- posa della pavimentazione lapidea su sottofondo (sabbia o sottovaglio) miscelato con cemento a secco (1 - 1,5 q per m<sup>3</sup>);
- sigillatura delle connessure con bitume a caldo o con emulsione bituminosa modificata;
- rifacimento della segnaletica stradale.

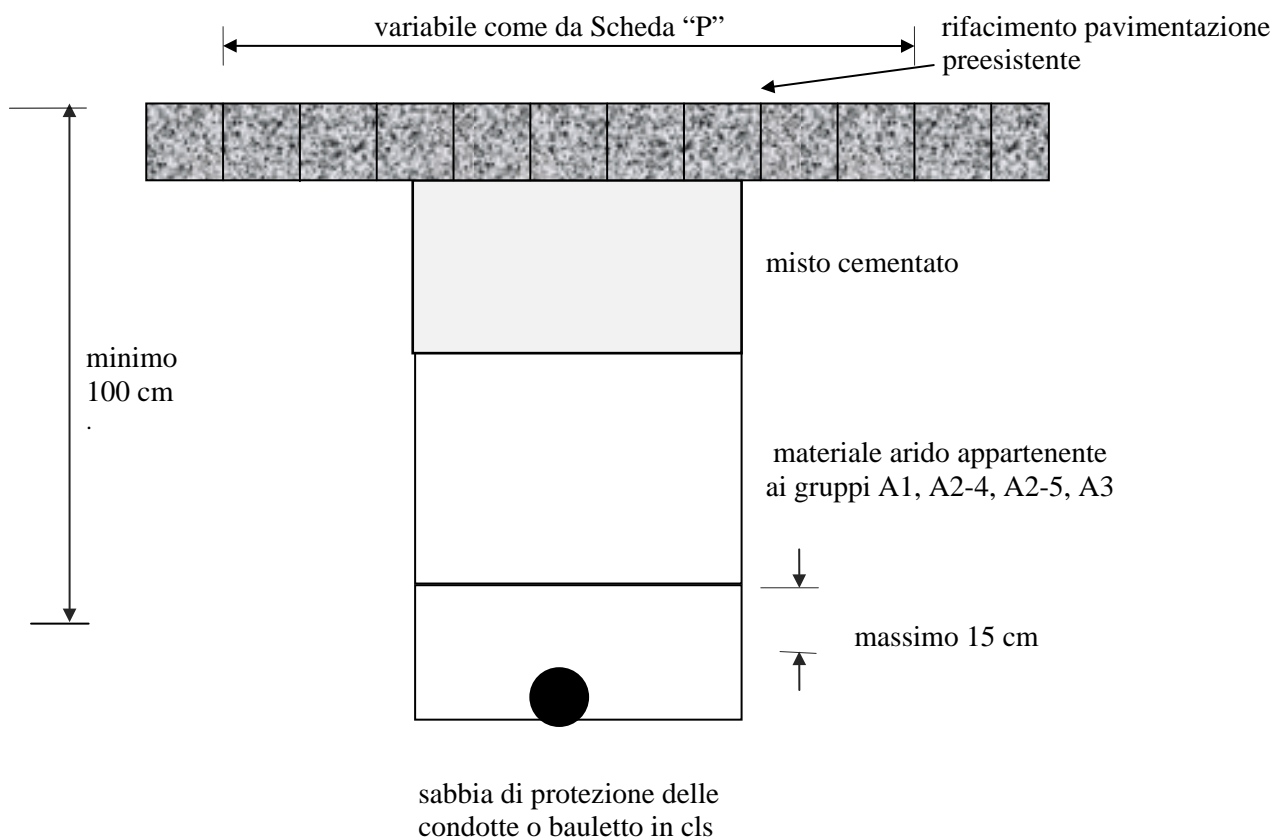
**INTERVENTI SU STRADE**  
**CON PAVIMENTAZIONE IN MATERIALI LAPIDEI**  
**PRIVE DI SOTTOFONDAZIONE IN CLS**  
**PRIMO TEMPO - (per scavi di sezione superiore a 1,5 m<sup>2</sup>)**



**FASI DI LAVORAZIONE**

- a) disfacimento pavimentazione lapidea eseguito a mano;
- b) scavo con trasporto a rifiuto di **tutto** il materiale di risulta;
- c) posa delle condotte e protezione delle stesse con sabbia, o contenute in bauletto di calcestruzzo, per uno spessore di massimo 15 cm dalla generatrice superiore del tubo;
- d) riempimento con materiale arido appartenente ai gruppi A1, A2-4, A2-5, A3 fino a 50 cm dal piano di appoggio della pavimentazione;
- e) fondazione con misto cementato fino al piano di posa della pavimentazione lapidea;
- f) copertura provvisoria di primo tempo con c.b. tipo 0 - 15 mm, spessore variabile;
- g) rifacimento della segnaletica stradale.

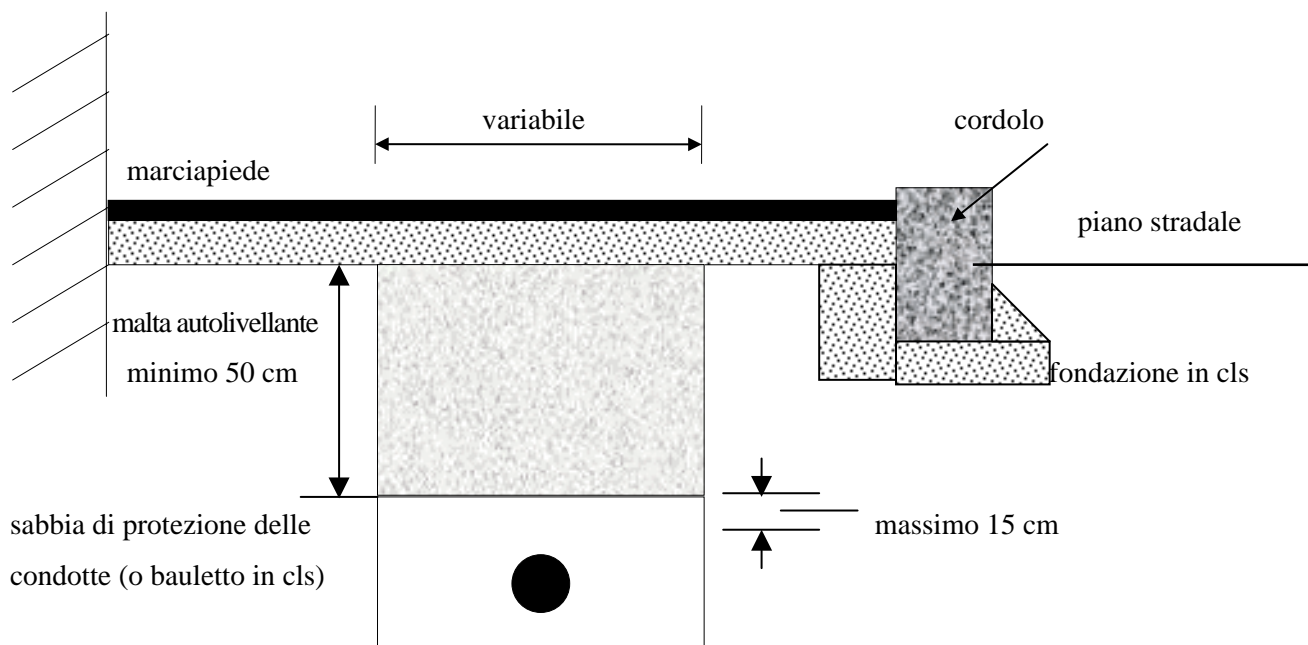
**INTERVENTI SU STRADE**  
**CON PAVIMENTAZIONE IN MATERIALI LAPIDEI**  
**PRIVE DI SOTTOFONDAZIONE IN CLS**  
**SECONDO TEMPO - (per scavi di sezione superiore a 1,5 m<sup>2</sup>)**



**FASI DI LAVORAZIONE**

- a) asportazione del materiale di ripristino provvisorio di primo tempo per lo spessore necessario;
- b) posa della pavimentazione lapidea su sottofondo (sabbia o sottovaglio) miscelato con cemento a secco (1 - 1,5 q per m<sup>3</sup>);
- c) sigillatura delle connessioni con bitume a caldo o con emulsione bituminosa modificata;
- d) rifacimento della segnaletica stradale.

## INTERVENTI SU MARCIAPIEDI CON QUALISIASI TIPO DI PAVIMENTAZIONE



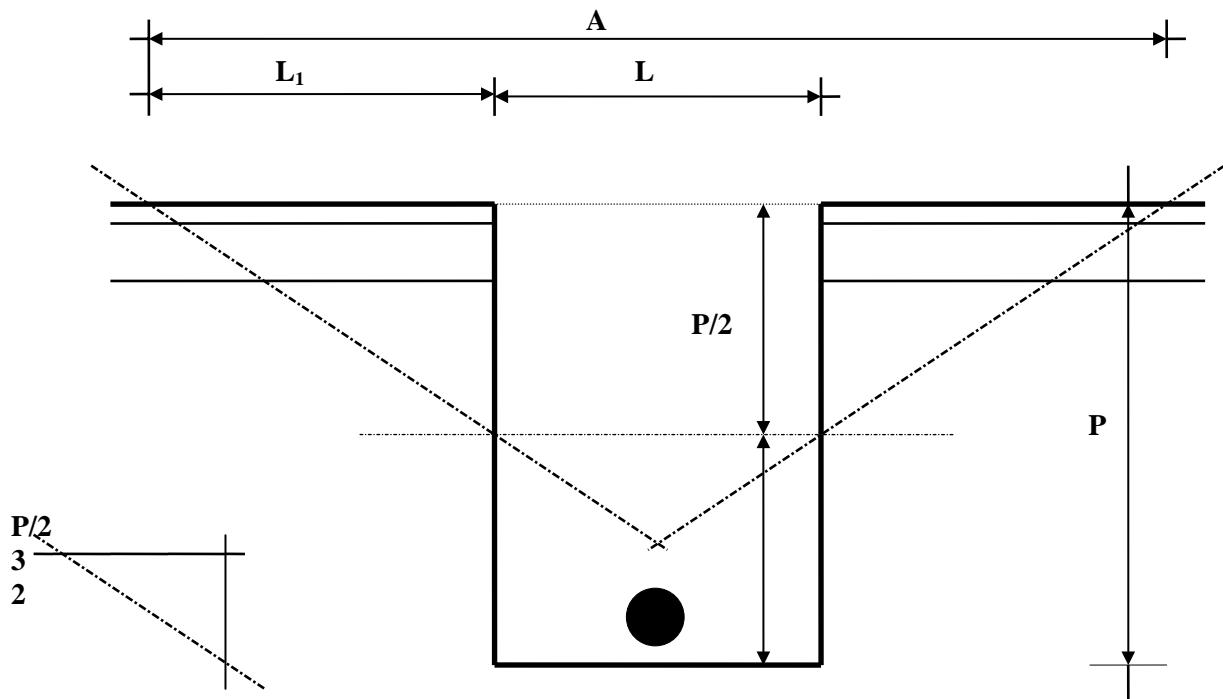
### FASI DI LAVORAZIONE

- fresatura del marciapiede per tutta la larghezza se in conglomerato bituminoso, oppure rimozione del materiale lapideo;
- demolizione del massetto in cls per la larghezza della sezione di scavo se esistente, o scarifica di 10 cm per tutta la larghezza del marciapiede;
- scavo con trasporto a rifiuto di **tutto** il materiale di risulta;
- posa delle condotte e protezione delle stesse con sabbia, o contenute in bauletto di calcestruzzo per uno spessore di massimo 15 cm dalla generatrice superiore del tubo;
- riempimento dello scavo con malta autolivellante fino alla quota necessaria per la posa del massetto e della pavimentazione (conglomerato bituminoso, masselli, lastre, cubetti, betonelle, ....);
- esecuzione di massetto in cls “classe 150” per uno spessore di 10 cm;
- refacimento della preesistente pavimentazione (nel caso di conglomerato bituminoso si dovrà utilizzare materiale tipo 0 – 6 mm per uno spessore di 3 cm e si dovrà eseguire la successiva copertura con emulsione bituminosa acida e sabbia di Po).



**CALCOLO PER LA DETERMINAZIONE DELLA  
LARGHEZZA TEORICA MINIMA  
PER IL RIPRISTINO DEFINITIVO**

SEZIONE SCAVO TIPO



$$L_1 = P/2 \times 3/2 = 3P/4$$

$$A = L + 2L_1$$

**A = L + 3P/2 LARGHEZZA RIPRISTINO TEORICO MINIMO**

# APPENDIX A1

## Backfill Materials

### A1.1 Class A – Graded Granular Materials

1) Materials should be well-graded granular material with a uniformity coefficient greater than 10. Material shall, at the time of compaction, be at an appropriate moisture content between +1% and –2% of the optimum moisture content as determined by BS1377: Part 4; Vibrating Hammer Method, Method 3.7, or shall be acceptable when subjected to Field Identification Test No.3.

2) Materials shall show a 10% fines value of 40 kN or more, as determined in accordance with BS812: Part 111, tested in the soaked condition. The principal materials that will be excluded are sandstones, weakly cemented gritstones, the softer magnesium limestones, oolitic limestones and the majority of chalks.

3) Manmade aggregates, e.g. slag, PFA's, clinkers and bottom furnace ash will need individual assessment; it is possible to demonstrate satisfactory performance with some of these materials, even when they fail to meet the 10% fines value requirement.

### A1.2 Class B – Granular Materials

Material at the time of compaction shall be at an appropriate moisture content between +1% and –2% of the optimum moisture content as determined by BS1377: Part 4; Vibrating Hammer, Method 3.7, or shall be acceptable when subjected to Field Identification Test No.3.

### A1.3 Class C – Cohesive/Granular Materials

1) Materials with less than 50% granular content by mass, shall at the time of compaction, be at an appropriate moisture content between 0.8 and 1.2 times the plastic limit, or be acceptable when subjected to Field Identification Test No.2.

2) Materials with a minimum of 50% granular content by mass, shall at the time of compaction, be at an appropriate moisture content between +1% and –2% of the optimum moisture content as determined by BS1377: Part 4; Vibrating Hammer, Method 3.7, or shall be acceptable when subjected to Field Identification Test No.3.

### A1.4 Class D – Cohesive Materials

1) Cohesive materials at the time of compaction shall be at an appropriate moisture content between 0.8 and 1.2 times the plastic limit, or be acceptable when subjected to Field Identification Test No. 2.

2) Clays that contain insufficient moisture when excavated, or have dried excessively during site storage, as defined by Field Identification Test No. 2, may only be re-used provided that they are wetted to comply with Section A1.4 (1) and compacted in accordance with Appendix A8 for Class D Cohesive Materials.

3) It may be difficult to compact cohesive materials to uniformly achieve an adequate bearing capacity. Undertakers must select a lump size for clays within the limits specified in Appendix A2 and must ensure that all compaction equipment is operated within the requirements of Appendix A8. Failure to comply with Appendix A2 and/or Appendix A8 will result in unacceptable settlement and variable bearing capacity.

4) High silt content materials, as defined by Field Identification Test No. 1, shall be compacted in accordance with Appendix A8 requirements for Class D Cohesive Materials.

#### **A1.5 Class E – Unacceptable Materials**

The following materials, listed as unacceptable in SHW Clause 601 paragraphs 2(ii) and 3, shall not be used at any level within the permanent structure of any reinstatement:

- 1) Peat and materials from swamps, marshes or bogs.
- 2) Logs, stumps and perishable materials.
- 3) Materials in a frozen condition. (Such materials, if otherwise suitable, shall be classified as suitable when unfrozen.)
- 4) Clays having a liquid limit exceeding 90, determined in accordance with BS1377: Part 2 Method 4, or a Plasticity Index exceeding 65, determined in accordance with BS1377: Part 2, Method 5.4.
- 5) Materials susceptible to spontaneous combustion.
- 6) Materials having hazardous chemical or physical properties requiring special measures for excavation, handling, storage, transportation, deposition and disposal.

#### **A1.6 Field Identification Tests**

The following identification tests must be carried out immediately prior to the placement and compaction of the backfill material.

##### **Field Identification Test No 1 – Silt Identification**

High silt content materials can usually be identified by a simple hand test:

##### ***Preparation***

Select a moist sample of the fine material only.

##### ***Test – Silt Identification***

With clean dry hands, rub the sample between the palms, remove the excess material by striking the palms together and wait a few minutes for body heat to dry out any material adhering to the hands. Finally, rub hands together briskly.

##### ***Result***

If no significant quantity of material remains adhering to the palms, i.e. the palms are relatively clean, then the sample tested is essentially a silt.

**Note:** The proportion of granular material discarded to produce the fine sample must be taken into account when estimating the approximate silt content of the bulk material.

### **Field Identification Test No 2 – Clay Condition**

Clays suitable for compaction with pedestrian controlled compaction plant can usually be identified by a simple roll test:

#### ***Preparation***

Select a sample of small lumps of the fine material only, at a moisture content representative of the bulk material.

#### ***Test – Clay Condition***

With clean dry hands, take the sample and squeeze together in one hand and release. If the sample crumbles away and mostly fails to hold together into a 'ball' then the sample is too dry for compaction. If not, break off part of the ball and roll between the palms or between one palm and any convenient clean dry flat surface, for example the back of a spade. Roll out the sample into a long thin cylinder until it fractures or begins to show significant transverse cracks.

#### ***Result***

If the strand can be rolled into intact or uncracked lengths that are thinner or longer than a standard pencil, i.e. less than 7 mm diameter or more than 175 mm length then the sample is too wet or too plastic for compaction. Any result between the ball and the pencil is acceptable for use provided the bulk of the material consists of lumps less than 75 mm in size.

### **Field Identification Test No 3 – Granular Condition**

All granular materials must be compacted near to their optimum moisture content. The optimum moisture content can vary considerably depending on the average particle size and to a much smaller extent, on the type of mineral or rock involved. However, a laboratory compaction test is invariably carried out on a sample of material from which the larger particles have been removed, the sample is always compacted in a small smooth sided steel cylinder and the standard methods of compaction bear little similarity with current compaction plant. Experience has shown that the most commonly specified laboratory compaction test i.e. BS1377: Part 4; Vibrating Hammer, Method 3.7 will produce an optimum moisture content result that is, typically, significantly wetter than the field optimum for a granular material that is to be compacted within a trench using a vibrotamper.

Granular materials suitable for compaction by pedestrian controlled plant can usually be identified by a simple visual examination. Typically, the test will identify materials within 1% to 1.5% of the field optimum moisture content depending on the mineral type. Experience has shown that compaction within this visual moisture range will not normally show any significant reduction in compaction performance. The test cannot indicate the actual moisture content of any material but this is rarely of any relevance as far as an operator is concerned.

#### ***Preparation***

Depending on the size of the stockpile, dig out representative samples from beneath the outer surface, at several positions around the outside in a conical shape.

**Test – Coarse Aggregate**

Examine several of the medium- and larger-sized particles from each sample extracted.

**Result**

Material within the target moisture content range will show a dull sheen when viewed obliquely against the light, with all fines adhering to the larger particles, and no free water will be visible. Material at the dry limit will not show the characteristic sheen, fines will not be strongly adherent and many of the fines will be free. Material at the wet limit will begin to show free moisture collecting in surface grooves or amongst the fines, fines will not be strongly adherent and many of the fines will amalgamate as soggy clusters. Any result between the wet and dry limits is acceptable provided the bulk of the sample is reasonably well graded.

Sands used as finefill or as a regulating layer also need to be used near to the optimum moisture content and can be identified by a simple squeeze test.

**Test – Fine Aggregate**

Take a small sample of representative sand, squeeze in one hand and release.

**Result**

If the sample crumbles away and mostly fails to adhere together into a 'ball' then the sample is too dry. Any reasonable degree of adherence is acceptable provided no free water is squeezed out.

**Field Identification Test No 4 – Granular Grading**

All unbound granular materials must be reasonably well graded; i.e. must contain a range of particle sizes, from fine to coarse, with an adequate proportion of particles of intermediate sizes. A well-graded material can be compacted to give a dense and stable structure of interlocking particles with a low proportion of air voids within the structure.

**Preparation**

Depending on the size of the stockpile, dig out representative samples from beneath the outer surface at several positions around the outside.

**Test – Granular Grading**

Spread out each sample and examine under good light.

**Result**

**Class A Graded Granular Materials** – should not contain any particles greater than 75 mm nominal size and, in general, should be 50 mm or smaller. Smaller particles down to less than 5 mm nominal size should be present in gradually increasing numbers as the size decreases. Finer particles, from sand size down to dust, should be present and will usually be adhering to the larger particles. Fine particles should be visible adhering to around 30 per cent or more of the surface of the majority of the larger particles.

**Class B Granular Materials** – should show the same general features as described above but will usually be less well graded overall compared with Class A Graded Granular Materials.

**Class C Cohesive/Granular Materials** – will usually contain a much larger proportion of fine material. The granular content should still be less than 75 mm nominal size, down to less than 5 mm nominal size and should not be single sized.

# APPENDIX A8

## Compaction Requirements

### A8.1 Granular, Cohesive and Cement Bound Materials

All graded granular, granular, cohesive/granular, cohesive and cement bound materials laid above the surround to apparatus shall be compacted in accordance with Table A8.1.

Table A8.1 <b>Compaction Requirements for Granular, Cohesive and Cement Bound Materials</b>						
Compaction Plant and Weight Category	Cohesive Material (less than 20% granular content)			Granular Material (20% or more granular content including cement bound material)		
	Minimum Passes/Lift for compacted lift thickness up to			Minimum Passes/Lift for compacted lift thickness up to		
	100 mm	150 mm	200 mm	100 mm	150 mm	200 mm
<b>Vibrotamper</b> 50 kg minimum	4	8 #	NP	4	8	NP
<b>Vibrating Roller</b> <b>Single Drum</b> 1000-2000 kg/m	8	NP	NP	6	NP	NP
2000-3500 kg/m	3	6	NP	3	5	7
Over 3500 kg/m	3	4	6 #	3	4	6
<b>Twin Drum</b> 600-1000 kg/m	NP	NP	NP	6	NP	NP
1000-2000 kg/m	4	8	NP	3	6	NP
Over 2000 kg/m	2	3	5 #	2	3	4
<b>Vibrating Plate</b> 1400-1800 kg/m <sup>2</sup>	NP	NP	NP	5	NP	NP
Over 1800 kg/m <sup>2</sup>	3	6	NP	3	5	7
<b>All Above Plant</b>	For Maximum and Minimum compacted lift thickness See Appendix A2.6, Table A2.3					
<b>Alternative Compaction Plant for Areas of Restricted Access</b> (including small excavations and trenches less than 200 mm width)						
<b>Vibrotamper</b> 25 kg minimum	Minimum of 6 compaction passes					
<b>Percussive Rammer</b> 10 kg minimum	Maximum of 100 mm compacted lift thickness					
Notes:						
1 NP = Not Permitted						
2 # = Not permitted on wholly cohesive material i.e. clay and/or silt with no particles > 75 micron (µm)						
3 Single drum vibrating rollers are vibrating rollers providing vibration on only one drum						
4 Twin drum vibrating rollers are vibrating rollers providing vibration on two separate drums						

### A8.2 Chalk Materials

All chalk materials, including medium and high-density chinks shall be compacted in accordance with Table A8.2. However, if the chalk is unstable after compaction, the unstable material shall be removed and replaced with fresh material. Fresh chalk shall be compacted in accordance with Table A8.2, except that the specified number of compaction passes shall be reduced by one pass. If the chalk is still unstable after compaction, it shall be deemed to be unsuitable for use as backfill and replaced with suitable material.

<b>Table A8.2 Compaction Requirements for Chalk Materials</b>			
<b>Compaction Plant and Weight Category</b>	<b>Chalk Material Minimum Passes/Lift for compacted lift thickness up to</b>		
	<b>100 mm</b>	<b>150 mm</b>	<b>200 mm</b>
<b>Vibrotamper</b> 50 kg minimum	3	6	<b>NP</b>
<b>Vibrating Roller</b>			
<b>Single Drum</b>			
1000–2000 kg/m	6	8	<b>NP</b>
2000–3500 kg/m	<b>NP</b>	4	6
Over 3500 kg/m	<b>NP</b>	<b>NP</b>	4
<b>Twin Drum</b>			
600–1000 kg/m	6	8	<b>NP</b>
1000–2000 kg/m	2	4	6
Over 2000 kg/m	<b>NP</b>	3	4
<b>Vibrating Plate</b>			
1400–1800 kg/sq.m	6	8	<b>NP</b>
Over 1800 kg/sq.m	<b>NP</b>	6	8
<b>Alternative Compaction Plant for Areas of Restricted Access</b> (including small excavations and trenches less than 200 mm width)			
<b>Vibrotamper</b> 25 kg minimum	<b>Minimum of 6 compaction passes</b> <b>Maximum of 100 mm compacted lift thickness</b>		
<b>Percussive Rammer</b> 10 kg minimum			
Notes:			
1 <b>NP</b> = Not Permitted			
2 Single drum vibrating rollers are vibrating rollers providing vibration on only one drum			
3 Twin drum vibrating rollers are vibrating rollers providing vibration on two separate drums			

### A8.3 Bituminous Mixtures

All bituminous mixtures permitted in Appendix A2 shall be compacted to the following requirements:

- 1) Mixtures laid within any reinstatement as follows:
  - a) Reinstatement of 250 mm width or less;
  - b) Reinstatement within 250 mm of the edge of any other reinstatement; or
  - c) Reinstatement within 250 mm of a fixed feature within any reinstatement shall be compacted in accordance with Table A8.3.
- 2) Compaction should be discontinued if the mixture shows any signs of distress, regardless of whether the minimum number of passes required by Table A8.3 have been applied; see Section NG10.2.3.



3) Mixtures laid in all other locations shall be compacted to the in-situ air void requirements of Section S10.2.3. However, material requirements and laying conditions are unchanged and it will be necessary for compaction to be carried out to a procedure that is capable of achieving the in-situ air void content requirements.

<b>Table A8.3 Compaction Requirements for Bituminous Mixtures</b>				
<b>Compaction Plant and Weight Category</b>	<b>Bituminous Mixtures</b>			
	<b>Minimum Passes/Lift for compacted lift thickness up to</b>			
	<b>40 mm</b>	<b>60 mm</b>	<b>80 mm</b>	<b>100 mm</b>
<b>Vibrotamper</b> 50 kg minimum	5 #	7 #	NP	NP
<b>Vibrating Roller</b>				
<b>Single Drum</b>				
1000–2000 kg/m	6	NP	NP	NP
2000–3500 kg/m	5	7	8	NP
Over 3500 kg/m	4	6	7	NP
<b>Twin Drum</b>				
600–1000 kg/m	5	7	NP	NP
1000–2000 kg/m	4	5	6	8
Over 2000 kg/m	3	4	4	6
<b>Vibrating Plate</b>				
1400–1800 kg/m <sup>2</sup>	6	NP	NP	NP
Over 1800 kg/m <sup>2</sup>	3	5	6	8
<b>All Above Plant</b>	For Maximum and Minimum compacted lift thickness See Appendix A2.6, Table A2.2			
<b>Alternative Compaction Plant for Areas of Restricted Access</b> (including small excavations and trenches less than 200 mm width)				
<b>Vibrotamper</b> 25 kg minimum	Minimum of 6 compaction passes Maximum of 75 mm compacted lift thickness			
<b>Percussive Rammer</b> 10 kg minimum				
Notes:				
1 NP = Not Permitted				
2 # = Vibrotamper not permitted on permanent surface course of trenches >500 mm width				
3 Twin drum vibrating rollers are preferred for compaction of bituminous mixtures				
4 Single drum vibrating rollers are vibrating rollers providing vibration on only one drum				
5 Twin drum vibrating rollers are vibrating rollers providing vibration on two separate drums				

# APPENDIX A9

## Alternative Reinstatement Materials (ARMs)

### A9.1 Introduction

1) New or alternative materials have been, or may be, developed for use in highway construction and maintenance. These materials may allow more rapid, reliable and cost-effective reinstatements, with less dependence on the skill and physical effort of the operators. These materials may also offer significant environmental or practical advantages, and/or cost benefits, compared with conventional materials, including various combinations of the following:

- a) Reduced usage of virgin materials, by including recycled or secondary materials
- b) Lower energy requirements during manufacture and/or laying
- c) Reduced landfill requirements during construction or reconstruction
- d) Self-cementing properties to improve performance, reliability of laying and compaction
- e) Self-levelling or flowable, to avoid or reduce the need for compaction
- f) May be placed in fewer lifts

2) These materials are termed Alternative Reinstatement Materials (ARMs), and are categorised by this Specification into two generic groups:

#### a) **Structural Materials for Reinstatements (SMRs)**

This generic group is intended to include proprietary or alternative bound reinstatement materials that include a cementitious, chemical or hydraulic binder or are inherently self-cementing. SMRs are categorised as follows:

##### i) **Foamed Concretes for Reinstatements (FCRs)**

These are cement-bound materials that have been prepared off-site, generally as “prescribed” mixes, at an approved mixing plant and under appropriate quality control procedures. They are flowable in nature and should not require compaction when placed. Materials manufactured under these conditions, and any foamed concretes conforming to Clause 1043 of the SHW are deemed to be approved for use as ARMs. FCRs may not necessarily incorporate a coarse aggregate.

##### ii) **Flowable SMRs (FSMRs)**

These materials comprise any type and/or combination of aggregates and binders. They are flowable mixes that should not normally require compaction, and are capable of achieving strengths equivalent to FCRs. These materials may only be used on a trial basis by prior agreement.

iii) **Non-flowable SMRs (NFSMRs)**

These materials comprise any type and/or combination of aggregates and binders. They are non-flowable mixes that will normally require compaction on site, and are capable of achieving strengths equivalent to FCRs in their compacted state. These materials may only be used on a trial basis by prior agreement.

b) **Stabilised Materials for Fills (SMFs)**

This generic group is intended to include materials derived from excavated spoil, virgin, secondary or recycled materials, or any combination thereof, that have been improved by re-processing, re-grading and/or by the inclusion of a cementitious, chemical or hydraulic binder. SMFs are generally non-flowable and shall therefore normally require compaction.

These materials may only be used on a trial basis by prior agreement.

**A9.2 General Requirements for ARMs**

- 1) With the exception of FCRs as described in A9.1.2 (a) (i) above, (which are deemed to be approved for use), ARMs shall only be used with the prior agreement of the Undertaker and the Authority on an approved trial basis. An outline of a trial procedure scheme is described in A9.5.
- 2) ARMs shall be prepared and installed in accordance with the approved mix formulations and procedures proven by prior development and testing.
- 3) Alterations to the proven mix formulations, mix proportions, aggregate type, admixtures, etc. shall not be undertaken without confirmation of their suitability, obtained by further development and testing. The approval of the Authority is required prior to the use of any ARM whose formulation has been changed.
- 4) ARMs used within 450 mm of the road surface shall be non-frost susceptible subject to the exceptions referred to in S5.3.1.
- 5) Where the Authority is aware of areas with drainage or groundwater problems, it should notify the Undertaker. Following such notification the Undertaker shall provide, at backfill and sub-base levels within reinstatements, ARMs that are permeable to a degree not less than the surrounding ground. A backfill layer of single size aggregate 6 mm nominal size, of 100 mm minimum thickness and surrounded by a geotextile filter fabric where appropriate, may be considered to offer equivalent drainage potential.
- 6) Where the Authority is aware of any site where high sulphate levels are known to occur, it should notify the Undertaker. Following such notification, any Ordinary Portland Cement based binders in the ARMs shall be replaced with sulphate resistant Portland Cement based binders.

7) Surfacing materials shall not be reinstated until the ARM has attained sufficient strength to allow adequate compaction of bituminous materials and to sustain adequate traffic loading. A simple penetration or indentation test is recommended to allow confirmation of adequate strength prior to surfacing. Any appropriate standardised test procedure may be used and, with prior experience, will indicate the earliest time at which surfacing should be carried out.

8) Fluid ARMs may flow into damaged drainage or ducting within, or adjacent to, the excavation. Where required, plastic sheeting etc. may provide adequate protection during pouring and curing.

### **A9.3 Structural Materials for Reinstatements (SMRs)**

#### **A9.3.1 Permitted Uses of SMRs**

1) SMRs may be used on a trial basis, by prior agreement, in any combination of the following, regardless of the nature of reinstatement materials used above and below:

- a) At any position within the surround to apparatus and/or backfill as the entire layer or combined with any other permitted backfill materials, in any proportion, within any reinstatement.
- b) As a sub-base within any reinstatement.
- c) As a combined sub-base and base (roadbase) within any reinstatement in Road Types 1, 2, 3 & 4.
- d) As a combined sub-base and binder course, within any reinstatement in footways, footpaths and cycle tracks.

2) SMRs shall not be used in place of surface course materials.

#### **A9.3.2 General Requirements for SMRs**

1) SMRs shall comply with the minimum layer thickness and compressive strength requirements shown in Table A9.1

Table A9.1 SMR Minimum Layer Thickness and Compressive Strength Requirements						
Layer	Road Type					Footway Footpath or Cycle Track
	0	1	2	3	4	
<b>Combined Binder Course &amp; Sub-base</b>	NP	NP	NP	NP	NP	150 mm C2
<b>Base (Roadbase)</b>	NP	NP	NP (see A9.2.1.1)	300 mm C2	200 mm C2	–
<b>Base (Roadbase) &amp; Sub-base</b>	NP (see A9.2.1.1)	450 mm C4	450 mm C4	450 mm C2	350 mm C2	–
<b>Sub-base &amp;/or below</b>	150 mm C2	150 mm C2	150 mm C2	150 mm C2	150 mm C2	100 mm C2
<b>Crushing Strength at 90 days</b>	C4 – 4 N/mm <sup>2</sup> Minimum to 10 N/mm <sup>2</sup> Maximum C2 – 2 N/mm <sup>2</sup> Minimum to 10 N/mm <sup>2</sup> Maximum					
<b>Note to Table A9.1:</b> NP = Not Permitted (see A9.3.1)						

2) Where the total thickness of SMR laid exceeds 1000 mm, any minimum crushing strength requirement of 4 N/mm<sup>2</sup> shall apply to the top 1000 mm only and a minimum of 2 N/mm<sup>2</sup> below this depth.

### A9.3.3 Particular Requirements for FCRs and FSMRs

- 1) The compressive strength shall be determined in accordance with the principles of BS1881: Part 116 or Part 120, with the following exceptions or options:
  - a) Test specimens may be prepared at the time of placement by casting within a test mould, or recovered from site after placement by the extraction of cores from the reinstatement.
  - b) Specimens may be cast in conventional steel test cubes with a nominal side length of 150 mm, or they may be cylindrical with a diameter in the range 150 - 300mm and an aspect ratio of 1.0. Moulds may also be manufactured from cellular foam (preferably polystyrene) and include a cellular foam lid. The samples shall not be compacted, except for minimal tamping to allow the mould to be filled without leaving excessive areas of voids.
  - c) Core test specimens shall be cylindrical, with a diameter in the range 150 - 300mm and an aspect ratio of 1.0. The top and bottom surfaces of the test specimen may be grouted to ensure flat, parallel loading surfaces.
  - d) Following preparation or recovery, the test samples shall be stored upright, at ambient temperature until 90 days have elapsed from the placement of the material on site. Accelerated curing at temperatures exceeding 25°C is not permitted.
- 2) Experience suggests that results obtained from 150 mm test cubes in moulds with cellular foam lids, stored at ambient temperature, are most representative of in-ground conditions.

- 3) FCRs and FSMRs should not normally be tamped or compacted.
- 4) FCRs and FSMRs of density less than 1000 kg/m<sup>3</sup> may not displace standing water. In excavations containing water, the minimum recommended density for foam concretes is 1050 kg/m<sup>3</sup>. FCRs may flow into, and block, damaged drainage or ducting within, or adjacent to, the excavation. Where required, plastic sheeting etc. may provide adequate protection during pouring and curing.
- 5) FCRs and FSMRs are unlikely to provide significant load bearing capacity for several hours after placement, depending on the ambient temperature. During this time, unguarded reinstatements may be a hazard to children and animals etc and should be protected.

#### **A9.3.4 Particular Requirements for NFSMRs**

- 1) The compressive strength of NFSMRs shall be determined in accordance with the principles of BS1881: Part 116 or Part 120, with the following exceptions or options:
  - a) Test specimens may be prepared at the time of placement by compaction of a sample of material within a test mould or preferably recovered from site after placement by the extraction of cores from the reinstatement.
  - b) Specimens prepared on site may be placed in conventional steel test cube moulds with a nominal side length of 150 mm, or in cylindrical steel moulds with a diameter in the range 150 - 300 mm and an aspect ratio of 1.0. Compaction shall be applied in order to achieve a specimen density between 100% ± 5% of that achieved on site.
  - c) Core test specimens shall be cylindrical, with a diameter in the range 150 - 300 mm and an aspect ratio of 1.0. The top and bottom surfaces of the test specimen may be grouted to ensure flat, parallel loading surfaces.
  - d) Following preparation or recovery, the test samples shall be stored upright, at ambient temperature until 90 days have elapsed from the placement of the material on site. Accelerated curing at temperatures exceeding 25°C is not permitted.
- 2) NFSMRs shall normally require compaction to ensure adequate strength. The compaction regime (i.e. details of plant type, weight category, lift/layer thickness and number of passes) shall be specified before the NFSMR is used, and should be obtained by prior development and testing.

#### **A9.3.5 SMR Material Production**

##### **A9.3.5.1 FCR Material Production**

- 1) FCRs will generally be produced from virgin aggregates. Aggregates from other sources may be used with the written approval of the Authority (see S1.6 Alternative Options). Approval may require supporting information relating to the properties of the aggregate.

2) The wet density of the FCRs should be checked prior to placement. Depending on the method of manufacture, the quality of the foaming agent added at site should be checked prior to being incorporated in the mix. Any on-site addition of a foaming agent must be in accordance with the approved mix design.

#### **A9.3.5.2 FSMR and NFSMR Material Production**

1) FSMRs and NFSMRs shall be prepared in accordance with the procedures set out in the Approval Trial Agreement (see A9.5), to the approved mix formulation(s) (obtained by prior development and testing), in order to achieve the required compressive strength. Binders, additives and admixtures may be included based on prior development and testing.

2) FSMRs and NFSMRs may be delivered to site as ready-made materials or be prepared partly or wholly on site.

3) Mixing may be carried out using any equipment, adapted as necessary for the manufacture of FSMRs and NFSMRs in quantities appropriate to the intended use, provided the approved mixing procedure is used throughout. Mixing equipment should be maintained in accordance with the manufacturer's recommendations and checked regularly. All metering or weighing apparatus should be calibrated regularly.

4) All binders, additives and admixtures, including diluted solutions thereof, should be stored according to the manufacturer's recommendations and used within the recommended shelf life.

5) NFSMRs shall be compacted in accordance with the manufacturer's recommendations or an agreed compaction regime obtained by prior development and testing.

### **A9.4 Stabilised Materials for Fill (SMFs)**

#### **A9.4.1 Permitted Use of SMF Materials**

1) SMFs may be used in place of other materials on a trial basis by prior agreement, in the layers appropriate to their strength classification as defined by Table A9.2, and regardless of the nature of reinstatement materials used above and below, in any combination of the following:

- a) At any position within the surround to apparatus and/or backfill, as the entire layer or combined with any other permitted backfill materials, in any proportion, within any reinstatement.
- b) As a sub-base within any reinstatement.
- c) As a combined surround to apparatus and/or backfill and/or sub-base within any reinstatement.

2) SMFs shall not be used in place of the permanent binder course or surface course.

#### A9.4.2 Overall Requirements for SMFs

1) Each stabilisation method and formulation shall be classified as yielding SMF materials equivalent to one of the four defined classes of backfill material permitted in Appendix A1, as follows:

a) Class A SMF Material - equivalent to Class A Graded Granular Backfill Material

or b) Class B SMF Material - equivalent to Class B Granular Backfill Material

or c) Class C SMF Material - equivalent to Class C Cohesive/Granular Backfill Material

or d) Class D SMF Material - equivalent to Class D Cohesive Backfill Material.

2) Stabilised materials that achieve CBR values in excess of 30% are designated class 'S' SMF materials and may be used as a combined backfill and sub-base.

3) The SMF material classification shall be based on the "soaked" %CBR or equivalent value proven during the development and laboratory testing, in accordance with Table A9.2.

**Table A9.2 SMF Strength Requirements**

<b>SMF Class</b>	<b>% CBR</b>
S	Over 30
A	15 to 30
B	7 to 15
C	4 to 7
D	2 to 4

4) The %CBR value shall be determined by laboratory testing in accordance with the principles of BS1377, with the following requirements:

- i) Conventional test moulds may be unsuitable for some SMF materials and in-situ testing may need to be considered. The preparation of SMF test samples is not restricted and may include test cores extracted from site, provided that the samples are not excessively damaged or disturbed during extraction. CBR samples prepared off site shall be compacted so as to yield a density in the range  $100\% \pm 5\%$  of the site density.
- ii) Following preparation, the test samples shall be stored at ambient temperature until a period of 90 days has elapsed from the placement of the material on site.
- iii) The laboratory CBR test shall be performed on samples in a soaked condition.
- iv) A UKAS accredited laboratory shall verify the test results unless agreed otherwise.
- v) When testing in-situ, a recognised appropriate direct or indirect test method shall be used.



### **A9.4.3 SMF Material Production**

- 1) SMFs shall be prepared in accordance with the procedures set out in the Approval Trial Agreement (see A9.5), to the approved mix formulation(s) obtained by development and testing, to achieve the required strength classification. Binders, additives and admixtures may be included as agreed from prior development and testing.
- 2) SMFs will normally be prepared on site from basic constituents or delivered to site as a ready-mixed fill material. However, subject to experience gained by prior development testing, the SMF mix may, by prior agreement, be transported. SMF mixes may be prepared, wholly or partially, remote from the site.
- 3) Mixing may be carried out using any equipment, adapted as necessary for the manufacture of SMFs in quantities appropriate to the intended usage, providing the approved mixing procedure is used throughout. Mixing equipment should be maintained in accordance with the manufacturer's recommendations and checked regularly. All metering or weighing apparatus should be calibrated regularly.
- 4) All binders, additives and admixtures, including diluted solutions should be stored according to the manufacturer's recommendations and used within the recommended shelf life.
- 5) SMFs shall be compacted in accordance with the manufacturer's recommendations or an agreed compaction regime obtained by prior development and testing.

## **A9.5 Scheme for Approval Trials**

### **A9.5.1 Introduction**

An Undertaker or Authority may wish to undertake or permit Approval Trials of ARMs for the purposes of development and/or performance assessment. Trials may be carried out by formal agreement between an Undertaker and Authority, only under an Approval Trial Agreement. The requirements of a scheme, under which trials of ARMs should be carried out, are outlined in the following sections.

- 1) Section A9.5.2.1 gives general guidance relating to the organisation of an Approval Trial.
- 2) Section A9.5.2.2 describes conditions relating to the scale of an Approval Trial and its effect on organisational and reporting matters.
- 3) Section A9.5.2.3 outlines the intended duties of each party within the Approval Trial.
- 4) Section A9.5.3 comprises a list of headings that describe the key requirements and stages of an Approval Trial and which are considered to represent the minimum essential information required to ensure that an Approval Trial is carried out in a controlled and agreed manner. The additional information under each heading given in parentheses is for guidance only. The parties to an Approval Trial (normally an Undertaker and an Authority) may, by agreement with the other party, add, amend or omit any details that do not affect the legal standing of the Agreement.

## A9.5.2 Requirements for Approval Trials

### A9.5.2.1 General

- 1) No Approval Trial shall be undertaken within a Type 0 or 1 road or high amenity or high duty footway, footpath or cycle track, or a site of Special Engineering Difficulty.
- 2) Approval trials in carriageways should be conducted on a minimum of three separate sites, representing a range of traffic conditions. A range of positions within the carriageway (i.e. within and outside of a wheeltrack, longitudinal and transverse orientation (for reinstatements)) should also be considered.
- 3) The duration of all Approval Trials shall be two years - the final inspection shall be completed within one month following the end of the two-year test period. The Undertaker shall notify the Authority of the inspection date at least seven working days in advance. The Authority shall confirm their intention to attend, or otherwise, within seven working days of receipt of such notification. The inspection measures should be carried out on the notified date at an agreed time or an agreed alternative date. Where the Authority does not attend the final inspection, the Undertaker shall provide the Authority with a summary of the investigation within 28 days of the inspection. The Undertaker should keep a photographic record of the Approval Trial sites at the time of inspection and send copies to the Authority.
- 4) Core sampling and interim inspections of any type may be carried out on Approval Trial reinstatements at any time. Where required, as part of the Approval Trial Agreement, the Undertaker shall notify the Authority at least five working days in advance of such works. Any holes created during these activities should be reinstated in accordance with the relevant requirements of this Specification.
- 5) Approval Trial reinstatements may be accidentally damaged during the trial and rendered unsuitable for accurate assessment. It is therefore recommended that trials should include duplicate sites for each road type, category, position, orientation, etc.
- 6) Where an Approval Trial site requires remedial action, regardless of the reason, the Undertaker shall provide the Authority with details of the remedial measures within one month of completion. Where practicable, records of surface measurements, photographs etc taken before and after the remedial work should be kept by the Undertaker and copies provided to the Authority.
- 7) On completion of an Approval Trial, and by agreement between the parties involved, some or all of the details of the trials may be forwarded to Regional HAUC and/or National HAUC for information.
- 8) Further use of the ARMs under trial may be permitted on or before completion of the Approval Trial in accordance with S1.6 Alternative Options but only with written approval of the relevant Authority. Such approval shall apply to works carried out within the boundary of the Authority.

9) It is recognised that the scope, extent and duration of ARM Approval Trials may vary widely.

#### **A9.5.2.2 Special Considerations**

1) For small-scale Approval Trials intended to take place on a small number of sites and over a fixed time period (e.g. for specially prepared Approval Trial excavations), the Undertaker shall notify the Authority at least one month in advance of the start of the Trials. Specially prepared excavations should be of similar depth and plan dimensions to the Undertaker's routine excavations, and generally be not less than 500 mm by 500 mm in plan, or not less than 200 mm wide for trench excavations. The total combined surface area of all Approval Trial sites should not be less than 2 square metres. The location and position of the Approval Trial sites should represent as wide a range as possible (see A9.5.2.1 (2)). If specially prepared sites are to be used, the site locations may be jointly selected.

2) Approval Trials of a larger extent, (e.g. trials that use an Undertaker's routine excavation sites as Approval Trial sites) may take place over a longer time period and the Undertaker shall notify the Authority at least one month in advance of the start of a Trial. Arrangements for notification and attendance at these Approval Trials should be included in the Trial Agreement.

3) Any restrictions as to the size, location and position, total number of Approval Trial sites and/or the period, during which the Approval Trials may be carried out, should also be included in the Approval Trial Agreement.

4) A two-year Approval Trial period shall apply to each Approval Trial site, commencing on its date of installation. An interim report on the Approval Trial should be provided within six months of the start date of the Trial. The final review or reporting need not be carried out until the final Approval Trial site has reached an age of two years.

#### **A9.5.2.3 Duties of Parties**

1) The initiator (usually the Undertaker) of an Approval Trial shall document the development work to ensure a high level of confidence in the proposed process before the commencement of any Approval Trial.

2) The Undertaker shall provide details of the Approval Trial operation(s) (e.g. location, road category, date/time, excavation, mixing, reinstatement, sampling, post-construction activities etc) as far, as is practicable, in accordance with the requirements of A9.5.3.1 of the Approval Trial Agreement.

3) The Undertaker shall not unreasonably withhold information relating to any aspect of the Approval Trial from the Authority.

4) The Authority shall not unreasonably obstruct the commencement, progress, or cause the termination of an Approval Trial provided it is carried out in accordance with the terms of the Approval Trial Agreement.

5) Each party shall have the right to request confidentiality on any matter relating to the Approval Trial.

### **A9.5.3 Information for inclusion in an Approval Trial Agreement**

Prior to the commencement of an Approval Trial, all parties should consider the details of the general, procedural and technical aspects for inclusion in an Approval Trial Agreement.

#### **A9.5.3.1 General**

The following information should be recorded and copies kept by all parties to the Approval Trial.

- 1) **Parties to trial** – names of the Undertaker and Authority agreeing to Approval Trial
- 2) **Confidentiality** - parties (if any) to whom trial information may be divulged
- 3) **Geographical extent of trial** - county or district border, utility region or area boundary
- 4) **Scope of trial** - total number of trial reinstatements or maximum number of sites
- 5) **Time limit for trial** – agreed start/end dates
- 6) **Termination criteria** - conditions under which an Approval Trial Agreement may be terminated and notice period of termination
- 7) **Signatories/witnesses** - approved officers of appropriate seniority who are permitted to commit their organisation to the execution of an Approval Trial and who can approve the terms and conditions of the trial.

#### **A9.5.3.2 Procedural**

- 1) **Contemporary records** – agreement to the details of records required, the responsibility for record-keeping and the sharing of information
- 2) **Notification details** - notice periods, arrangements for contacting relevant parties to an Approval Trial
- 3) **Attendance at trials** - parties who may attend an Approval Trial
- 4) **Review periods/meetings** - dates, attendees, procedures for calling ad hoc meetings
- 5) **Post-construction assessment** – test methods to be employed and arrangements for periodic surveying, sampling, etc

#### **A9.5.3.3 Technical**

- 1) **Type of trial site** - routine utility excavations or specially excavated Approval Trial sites
- 2) **Location of trial site** – non high-amenity or non high-duty footway, cycle track, (including road classification Type 2 to 4) etc.

- 3) **Positioning of trial site** - “as excavated”, within wheeltrack, etc
- 4) **ARMs to be trialled** - SMR or SMF materials
- 5) **ARMs details** - Mix design, binder details, additives, dependencies on site conditions or excavated/base material type and condition, details of prior development work.
- 6) **ARMs preparation** - batching, mixing and placement procedures.
- 7) **Quality control on site** - any tests to be applied in order to ensure that an ARM has been prepared to the required design
- 8) **Compaction regime** - NFSMRs and SMFs only
- 9) **Sampling requirements** - types of samples and sampling frequency
- 10) **Testing laboratories** - contact details of accredited laboratories or otherwise
- 11) **Remedial measures for “failed” sites** – agree replacement of failed material with an alternative SMR or SMF material or other approved material or remove site from the Approval Trial Agreement
- 12) **Future of trial sites** - remove after trial completion or leave in place, future monitoring and/or testing

# Annex 1 Backfill materials

## General information



### Backfill categories

All excavated materials that meet the Specification requirements can be reused as backfill in trenches. Backfill materials are classified into five categories:

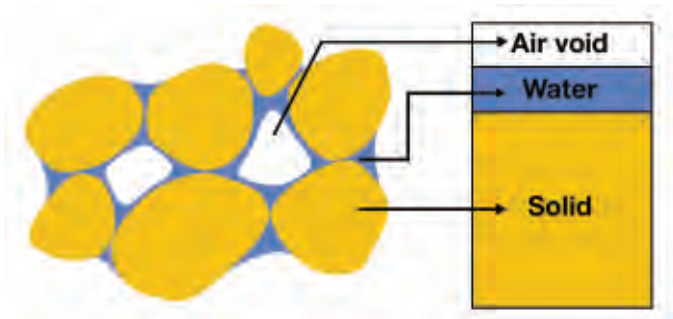


- Class A Graded granular materials
- Class B Granular materials
- Class C Cohesive/granular materials
- Class D Cohesive materials
- Class E Unacceptable materials

Ideally, the Class of backfill material should have been established before backfilling starts. Even if a material does not meet the Specification requirements, simple methods can be used to produce a material condition that is acceptable. These include removal of large lumps or foreign material, and increasing or reducing the moisture content.

### Composition of backfills

All backfills are made up of three parts:



**Solids** – the natural soil or rock particles. The solid component of the material cannot be made much denser by compaction.

**Water** – coating the solid particles and filling voids. The water or moisture content of a material cannot be made denser by compacting.

**Air voids** – up to 20% of a loose backfill is made up of air. Compaction removes air from the loose soil, and reduces the air content to between 5 and 10%.

# Annex 1 Backfill materials

## General information (continued)

### Moisture content

Moisture content is very important because moisture acts as a lubricant and helps compaction of backfill materials. If there is **not enough moisture**, the material:

- will not compact well
- will have a high air content
- may have high settlements

If the **moisture is correct**, the material will:

- compact well
- have high strength
- have minimum settlement

If there is too **much moisture**, the material:

- will be too wet to compact well
- will have low strength
- may not support traffic loads

Moisture content can be checked on site using the most appropriate of the simple tests. For each Class of backfill, the tests are described in the following pages.

# Annex 1 Backfill materials Identification



## Identifying materials

The following pages include basic descriptions of the backfill classes in the Specification. For full details, you must refer to NG5 in the Specification.



## Class A: Graded Granular

Full identification of Class A on site is difficult (not possible without the help of laboratory backup). For this reason, material excavated from a trench which looks like Class A should be treated as Class B. Granular sub-base (GSB 1) or Type 1 will normally meet the Class A requirements.

## Class B: Granular materials

Materials:	Can be crushed rock, sand and gravel or mixtures of these materials.
Sampling:	Select representative samples from beneath the outer surface of the stockpile or from the excavated material.
Size:	Size should generally range from fine sand up to coarse lumps of 50mm. Some 75mm lumps are allowed, but this size should be avoided if possible.
Moisture content:	<b>Too dry:</b> No sheen, and fines will be dry and dusty. <b>Target moisture:</b> Material has a dull (wet) sheen, fines stick to larger material, and no surplus water runs off the larger aggregate. <b>Too wet:</b> Fines will be saturated and water will run off the larger aggregate.
Compaction:	Treat as Granular Material in Table A8.1 (see Annex 6 of this Guide).



Too dry



Target moisture



Too wet



# Annex 1 Backfill materials

## Identification (continued)



### Class C: Cohesive/granular materials

**Materials:** Can be mixtures of fine and coarse aggregates, gravel, sand, silt and clay, or mixtures of these materials.



**Sampling:** Select representative samples of the excavated material.

**Size:** The granular content should range from less than 5mm up to 50mm. Some 75mm lumps are allowed, but this size should be avoided if possible

**Moisture content:** If the granular content of the material is more than half, check for moisture content as though it was Class B material.  
If the clay content of the material is more than half, check for moisture content as though it was Class D material.

**Compaction:** If the granular content of the material is **less than 20% (a fifth)**, treat as Cohesive Material in Table A8.1 (see Annex 6 of this Guide).

If the granular content of the material is **20% or more**, treat as Granular Material in Table A8.1 (see Annex 6 of this Guide).



**Cohesive granular**

# Annex 1 Backfill materials

## Identification (continued)



### Class D: Cohesive materials

- Materials:** Clay, silt or mixed fine grained material.
- Sampling:** Select representative samples of excavated material.
- Size:** The clay must be broken into lumps of 75mm or less and particles should not all be the same size.



- Moisture content:**
- Too dry:** Take a sample and squeeze together in one hand. If the material crumbles and fails to stay together, it is too dry.
- Target moisture:** If you can roll the material between your hands (or on the back of a shovel) to the diameter of a pencil before it starts to break up, the moisture content is in the target range.
- Too wet:** When forming a ball of the material in your hand, if the material squeezes easily between your fingers, it is too wet.
- Compaction:** Treat as Cohesive Material in Table A8.1 (see Annex 6 of this Guide).



Too dry



Target



Too wet

# Annex 1 Backfill materials Identification (continued)



## Class E: Unacceptable material

Class E materials **shall not be used** in the reinstatement.

Examples of Class E materials include:



- peat and materials from swamps, marshes or bogs
- logs, stumps or perishable materials (organic matter)
- frozen materials
- materials liable to frost heave (when placed at a depth within 450mm of the pavement surface)
- materials liable to spontaneous combustion
- materials with hazardous chemical or physical properties
- materials which do not meet the requirements for Classes A to D. Some of the materials which fail to meet the requirements of Classes A to D may be suitable for use as Alternative Reinstatement Materials (ARMs), and may be used in the reinstatement after treatment (see Appendix A9 of the Specification)

Class E materials should be stockpiled safely and separate from acceptable materials (to avoid contamination), and removed from site as soon as convenient.

# Annex 2    Compaction equipment – Standard



There are many different types of compactors available on the market. Each type is able to compact materials with different amounts of energy, and is more effective on certain materials. A brief description of the characteristics and the calculations required for the different compactors is presented in this Annex.



## Vibrotamper



Typical use:

- mainly used for trench reinstatement (often called a trench rammer)
- qually capable of compacting cohesive and granular materials
- not preferred for applications involving a layer thickness of 50mm or less

Specification weight category:

- Mass (in kilograms, kg) [\[see Calculation 1\]](#)

Comments:

- often supplied with different shoe sizes
- for best compaction, the shoe must hit the ground flat, not on its toe or heel
- for cohesive materials, may be operated at reduced speed for the first pass only

## Vibrating plate



Typical use:

- mainly used for trench compaction
- equally capable of compacting cohesive and granular materials

Specification weight category:

- Mass per square metre (in kilograms per square metre, kg/m<sup>2</sup>) [\[see Calculation 2\]](#)

Comments:

- often supplied with different plate sizes
- largest plates may be too wide for narrow reinstatements
- vibrating plates should be operated in the lowest available gear/speed (except for the first pass, which should be at maximum forward speed)

## Annex 2 Compaction equipment - Standard (continued)



### Vibrating roller – single drum



#### Typical use:

- mainly used for compaction of bituminous surfacing
- capable of compacting cohesive and granular materials (better for granular)
- often supplied with breaker attachment

#### Specification weight category:

- Mass per metre width (in kilograms per metre, kg/m) [see **Calculation 3**]

#### Comments:

- vibrating rollers should be operated in the lowest available gear and:
  - with NO vibration for the first pass (in order to prevent uneven displacement of material within the layer)
  - with FULL vibration for following passes

### Vibrating roller – twin drum



#### Typical use:

- mainly used for compaction of bituminous surfacings
- capable of compacting cohesive and granular materials (better for granular)

#### Specification weight category:

- Mass per metre width (in kilograms per metre, kg/m) [see **Calculation 4**]

#### Comments:

- see lowest gear comment above
- a twin drum compactor is more effective than single drum (requires fewer compactor passes), but is more difficult to control in small working areas



**To ensure acceptable compaction, always follow the manufacturers' operating instructions.**

# Annex 2    Compaction equipment – Alternatives



## Alternative compaction plant for areas of restricted access

### Vibrotamper

Typical use:

- see previous section on vibrotampers

Specification weight category:

- mass (in kilograms, kg)
- minimum mass 25kg

### Hand tampers

Typical use:

- used for manual compaction in areas larger compactors cannot access
- hand rammers may be used for initial tamping of fine fill material

Specification weight category:

- no minimum mass specified

### Percussive rammer (pole tamper)



Typical use:

- minimum mass 10kg
- capable of hundreds of blows per minute
- requires a separate compressor

Specification weight category:

- mass (in kilograms, kg)

Comments:

- In general, lightweight vibrotampers and pole tampers are capable of achieving the same degree of compaction as larger items of compaction plant. However, alternative compaction plant are usually not self-advancing and therefore can be more difficult to operate effectively
- Hand tampers may also be used immediately adjacent to street furniture, around standpipes and other isolated fixed features, and at reinstatement edges

# Annex 2    Compaction equipment

## Calculating weight categories

Calculation	Method
1	<p><b>To find the operating mass of vibrotamper (in kg):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>no calculation is necessary</li> <li>the model name often gives the mass e.g. the Wacker BS65Y has a mass of 65kg (but the operating mass, including fuel, may be slightly higher)</li> <li>for information on mass, check the ID plate on the vibrotamper and on the foot</li> </ul> <p>As an alternative, look up the machine specification in the manual</p>
2	<p><b>To calculate mass per square metre of a vibrating plate (in kg/m<sup>2</sup>).</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>measure the width of the plate which is in contact with the ground in metres = A</li> <li>measure the length of the plate which is in contact with the ground in metres = B</li> <li>multiply A times B to get the plate area in square metres = C</li> <li>check the ID plate on the plate for the mass in kg = D</li> <li>divide D by C to get the mass per square metre</li> </ul> <p>As an alternative, look up the machine specification in the manual. The value required is often called the static load (must be in kg/m<sup>2</sup>).</p>
3	<p><b>To calculate the mass per metre width of a vibrating single drum compactor (in kg/m):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>measure the width of the drum in metres = A</li> <li>check the ID plate on the compactor for the total mass in kg = B</li> <li>divide B by A to get the mass per metre width</li> </ul> <p>As an alternative, look up the machine specification in the manual. The value required is often called the static linear load (must be in kg/m).</p>
4	<p><b>To calculate the mass per metre width of a vibrating twin drum compactor (in kg/m):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>measure the width of one of the drums in metres = A</li> <li>check the ID plate on the compactor for the total mass in kg = B</li> <li>divide B by 2 to get the mass resting on one drum in kg = C</li> <li>divide C by A to get the mass per metre width</li> </ul> <p>As an alternative, look up the machine specification in the manual. The value required is often called the static linear load (must be in kg/m).</p>

## Annex 2 Compaction equipment

### Guidance on use



#### General advice

Once acceptable backfill has been identified, a suitable compactor has to be selected for the work. When compacting, you must think of four important factors:

1. The type and size of the compactor to suit the work.
2. The thickness of each compacted layer.
3. The number of passes required to achieve the required compaction of each layer.
4. The tolerances of the compacted layers.

#### Compactor selection



In general, the heavier a vibrating compactor is, the more compaction energy it puts into a soil when operating. If the compactor is too small, then the amount of compaction energy is too low and the soil will not be compacted to the correct density. This will result in:

- high air voids
- long term settlement
- need to redo the reinstatement at a later date

If the compactor is **too large**, then the amount of compaction energy is too high. This will result in:

- crushing of soil particles in granular soils,
- less stable backfill
- risk of damage to buried apparatus

#### Operation of compactors

To ensure acceptable compaction:

- always follow the manufacturers' operating instructions



**It is important to select the correct compactor for the job.**



## Annex 3 Alternative Reinstatement Materials (ARMs)

Alternative Reinstatement Materials (ARMs) permit rapid reinstatements to be carried out. ARMs are also environmentally friendly, as they:

- often use recycled material
- can make use of poor quality materials
- are produced using less energy
- can be self levelling

The most commonly used ARM is foamed concrete. Details of this and other types of ARMs can be found in Appendix A9 of the Specification.

Foamed concrete is:

- very easy to place (is poured directly into the reinstatement)
- self levelling and requires no compaction
- made up of sand and cement (often called a foamed mortar), and sometimes aggregate is also added to the mixture (a foamed lean concrete)
- a lightweight material due to the formation of air bubbles in the mixture. The air bubbles can be introduced into the foamed concrete by adding a pre-formed foam or an air-entraining agent. This can be carried out at the batching plant or on site
- a material that takes between 12 and 15 hours to cure. Curing can be speeded up by the addition of an accelerator



## Annex 3 Alternative Reinstatement Materials (ARMs) (continued)



When working with foamed concrete, you must take the following precautions:

- Always place protective sleeves around other utilities apparatus in the trench
- In the first 3–6 hours, all types of foamed concrete could present a hazard in terms of drowning. The use of temporary covering or an accelerated setting material would minimise this danger. Use secure guarding to prevent anyone from falling into a reinstatement that has recently been backfilled with foamed concrete. Those at risk include site workers, the general public and animals
- Always wear the correct personal protection. Cement and air-entraining agents can be harmful to the skin and eyes. If the eyes are affected, they should be immediately washed with clean water and medical attention sought
- You must refer to your Company's risk assessments, method statements and Health and Safety Plans

### Notes on foamed concrete



1. Can be used:
  - at any position within the surround to apparatus and/or backfill as the entire layer or combined with any other backfill materials, in any proportion, within any reinstatement
  - as sub-base within any reinstatement
  - as a combined sub-base and base (roadbase) layer in Road Types 1, 2, 3, and 4
  - as a combined sub-base and binder course, within any reinstatement in footways, footpaths and cycle tracks
2. Must not be used as a substitute for permanent surface course materials and **must never** be used within 100mm of the finished reinstatement surface for carriageways. Foamed concrete is suitable for backfilling narrow openings. (e.g. around plastic chambers).
3. Can be excavated using a wide-bladed chisel and breaker (lower strength materials tend to break down into powder, while the higher strength materials break down into small lumps).
4. Should not come into contact with plastic utility pipes.

## Annex 3 Alternative Reinstatement Materials (ARMs) (continued)



### *Checks for foamed concrete*

---

1. On delivery, check the batch note/delivery ticket to make sure the material is what has been ordered. Check the following:
  - Has the quantity ordered been delivered?
  - Is it the required strength?
  - Does it have the correct water/cement ratio?
  - Does it have the correct cement and aggregate content?
  - If an additive has been specified, has it been added?
2. Inspect the material:
  - if the mix looks very grey, it may contain too much cement
  - if the mix looks very yellow, it may have too little cement
3. Checks:
  - Density – fill a container of known volume (e.g. a bucket) and weigh it. You must weigh the container first, and subtract this weight from your final result. To work out the density divide the measured mass of the foamed concrete (i.e. total weight minus weight of bucket) by the volume of the container. (Check with Supervisor for calculation)
  - Quality – If any doubt exists on the quality of the material, three samples should be taken, placed in standard 150mm<sup>3</sup> polystyrene boxes and sent to the laboratory for testing

### *Equipment and materials for foam concrete reinstatements*

---



There are two methods for producing foamed concrete:

- using a ready mix supplier
- using your own materials equipment and plant

Other standard items may include:

- an air-entraining agent
- screed board for levelling
- protective sleeves for other utility apparatus
- container and scales for measuring density
- materials to prevent uncontrolled flow of foamed concrete
- additional guarding equipment

## Annex 3 Alternative Reinstatement Materials (ARMs) (continued)



### Tasks:

1. Check for signs of broken highway drainage channels and/or ducting for other services (foamed concrete acts like a liquid and can flow into openings and cavities and lead to serious blockages).
2. Any openings should be properly sealed before any backfilling begins.
3. Pour foamed concrete into the reinstatement. Contact with the edge of the existing surface should be avoided. This will help you to achieve a good vertical edge bond when finishing the reinstatement at a later stage.
4. Use a screed board to obtain the correct level within a trench. Careful use of a shovel may also be effective.

### Supervisor

There are no restrictions in the Specification on the composition of foamed concretes. The only requirement is that the materials should be:

- approved
- C2 (a compressive strength of between 2 and 10N/mm<sup>2</sup> at 90 days) for all Road Types 0 to 4 sub-base and all layers below binder course in Type 3 and 4 roads
- C4 (a compressive strength of between 4 and 10N/mm<sup>2</sup> at 90 days) for base (roadbase) and sub-base in Road Types 1 and 2

## ***Ringraziamenti***

*Vorrei ringraziare tante persone, ma per non dimenticare nessuno non citerò nessun nome in particolare...*

*Ringrazio il mio “prof. d’Italiano” perché senza di lui non avrei mai potuto intraprendere un’esperienza così bella e importante per il mio futuro...*

*Ringrazio le persone che mi son state vicine, hanno sempre creduto in me e che mi hanno aiutato nella redazione di questa tesi...*

*Ringrazio chi mi ha aiutato standomi sempre vicino nei momenti difficili e che mi vuole tanto bene...*

*Ringrazio quei cretini dei miei amici...*

*Ringrazio chi ogni domenica mattina per sei anni, senza mai tardare, mi ha chiamato, per farmi rigirare nel letto...*

*Ringrazio il mio amico notturno che non mi ha abbandonato neanche il giorno della laurea...*

*Ringrazio chiunque creda di non esser stato citato...*

*p.s. Speriamo non ci siano errori*