

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA**  
per l' Ambiente e il Territorio

*DIPARTIMENTO DICAM*

**TESI DI LAUREA**

in

VALORIZZAZIONE DELLE RISORSE PRIMARIE E SECONDARIE LS

**I MATERIALI INERTI RICICLATI:  
SOSTENIBILITÀ DEL RICICLAGGIO E QUALITÀ**

CANDIDATO  
Patrizio Rambelli

RELATORE:  
Chiar.ma Prof.ssa Ing. Alessandra Bonoli

CORRELATORI  
Chiar.mo Prof. Ing. Cesare Sangiorgi  
Direttore C.A.R. SRL Giorgio Laghi

Anno Accademico 2009/10

Sessione I



**Parole chiave:**

*Materiali riciclati*

*Fondazioni*

*Portanza*

*LFWD*

*CCC*



# INDICE

<b>INTRODUZIONE</b>	p.	1
<b>CAPITOLO 1</b>		
<b>GLI INERTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE</b>	p.	3
1.1 Premessa	p.	3
1.2 Aspetti quali/quantitativi della produzione di rifiuti inerti	p.	3
1.3 Implementazione delle tecniche di demolizione selettiva	p.	5
1.4 Gli impianti di trasformazione	p.	7
1.5 Incentivazione all'uso di aggregati riciclati e scenari di mercato	p.	8
1.6 Conclusioni	p.	9
<b>CAPITOLO 2</b>		
<b>IL QUADRO NORMATIVO SUI RIFIUTI CDW</b>	p.	11
2.1 Premessa	p.	11
2.2 Definizioni	p.	11
2.3 Direttiva 75/442/Cee	p.	12
2.4 Decreto Ronchi	p.	13
2.5 D.M. 8 maggio 2003 n. 203	p.	14
2.6 Circolare 15 luglio 2005, n. 5205 - Indicazioni per l'operatività nel settore edile, stradale e ambientale, ai sensi del D. M. 8 maggio 2003, n. 203	p.	16
2.7 La marcatura CE	p.	19
2.8 Direttiva 2008/98/CE del 19 novembre 2008	p.	21
2.9 Sintesi e considerazioni	p.	23
<b>CAPITOLO 3</b>		
<b>C.A.R. - CENTRO AUTORIZZATO RICICLAGGIO</b>	p.	27
3.1 Premessa	p.	27
3.2 Materiali in ingresso	p.	27
3.3 Lavorazioni presenti	p.	28
3.4 La frantumazione: caratteristiche	p.	30
3.5 Peculiarità dei frantoi	p.	32
3.6 Frantoio fisso	p.	38
3.7 Gruppo di frantumazione semifisso	p.	39
3.8 La vagliatura: caratteristiche	p.	43

3.9	Vaglio vibrante VTL 1500x5000 IIIA	p.	45
3.10	Vaglio vibrante VTL 1000x3000 III ½ A	p.	47
3.11	Cicli di lavorazione usuali: frantumazione del cemento armato	p.	48
3.12	Cicli di lavorazione usuali: la demolizione mista	p.	49
3.13	Macchinari	p.	49

## CAPITOLO 4

<b>MERCEOLOGIA E MARCATURA CE DEI PRODOTTI</b>	p.	51	
4.1	Premessa	p.	51
4.2	Materiali fresati	p.	51
4.3	Pietra di Firenzuola	p.	52
4.4	Calcestruzzo	p.	52
4.5	Traversine ferroviarie	p.	54
4.6	Demolizione mista	p.	55
4.7	Gres	p.	56
4.8	Materiali esterni	p.	57
4.9	La certificazione CE	p.	57
4.10	Granulometria	p.	57
4.11	Massa volumica	p.	58
4.11.1	<i>Metodo con cestello a rete per aggregato 31,5 – 63 mm</i>	p.	59
4.11.2	<i>Metodo picnometrico per aggregato 4 – 31,5 mm</i>	p.	60
4.12	Determinazione della forma dei granuli: indice di forma	p.	61
4.12.1	<i>Caso <math>D \leq 2d</math></i>	p.	61
4.12.2	<i>Caso <math>D &gt; 2d</math></i>	p.	62
4.13	Determinazione della forma dei granuli: indice di appiattimento	p.	62
4.14	Valutazione dei fini: prova dell'equivalente in sabbia	p.	63
4.15	La resistenza alla frammentazione: prova Los Angeles	p.	65
4.16	Determinazione della percentuale di superfici frantumate negli aggregati grossi	p.	66
4.17	La resistenza all'usura: prova micro-Deval	p.	67
4.18	Conclusioni	p.	68

## CAPITOLO 5

<b>UTILIZZO DEI CDW NELLE SOVRASTRUTTURE STRADALI</b>	p.	69	
5.1	Premessa	p.	69

5.2	Capitolati d'appalto di riferimento	p.	69
5.3	La sovrastruttura stradale	p.	69
5.4	Strati di fondazione non legati	p.	71
5.4.1	<i>Autostrade per l'Italia</i>	p.	71
5.4.2	<i>A 22 - Autostrada del Brennero</i>	p.	73
5.4.3	<i>Capitolato A.N.A.S.</i>	p.	75
5.4.4	<i>Capitolato CIRS Ministero</i>	p.	77
5.4.5	<i>Autovie Venete</i>	p.	79
5.5	Strati di fondazione legati: il misto cementato	p.	80
5.5.1	<i>Autostrade per l'Italia</i>	p.	80
5.5.2	<i>A 22 – Autostrada del Brennero</i>	p.	82
5.5.3	<i>A.N.A.S.</i>	p.	84
5.5.4	<i>Capitolato CIRS Ministero</i>	p.	84
5.6	Strati di base, collegamento, usura	p.	85
5.6.1	<i>Autostrade per l'Italia</i>	p.	86
5.6.2	<i>A 22 – Autostrada del Brennero</i>	p.	89
5.6.3	<i>A.N.A.S.</i>	p.	91
5.7	Risultati delle prove di laboratorio	p.	95
5.8	Conclusioni	p.	100

## CAPITOLO 6

<b>IL CAMPO SPERIMENTALE</b>	p.	101	
6.1	Premessa	p.	101
6.2	Finalità di un campo prove	p.	101
6.3	Localizzazione e idoneità dell'area di cantiere	p.	102
6.4	Materiali da sottoporre a prova	p.	105
6.4.1	<i>Materiale campo 1</i>	p.	105
6.4.2	<i>Materiale campo 2</i>	p.	106
6.4.3	<i>Materiale campo 3</i>	p.	106
6.4.4	<i>Materiale campo 4</i>	p.	107
6.5	Caratteristiche progettuali del sito sperimentale	p.	107
6.6	Strumentazione utilizzata	p.	110
6.6.1	<i>La compattazione intelligente</i>	p.	110
6.6.2	<i>Il modulo dinamico vibratorio: <math>E_{vib}</math></i>	p.	114
6.6.3	<i>LFWD – Light Falling Weight Deflectometer</i>	p.	117

6.6.4	<i>Esempio di prova con LFWD: modelli Zorn e Terratest</i>	p. 121
6.6.5	<i>Falling Weight Deflectometer</i>	p. 123
6.6.6	<i>DCP – Dynamic Cone Penetrometer</i>	p. 125
6.7	Schema di rilievo delle prove – fasi di testing	p. 129
6.8	Identificazione del personale necessario e durata delle prove	p. 130
6.9	Fasi costruttive	p. 131
6.9.1	<i>Fase 1: delimitazione dell'area di cantiere</i>	p. 131
6.9.2	<i>Fase 2: tracciamento del campo sperimentale</i>	p. 132
6.9.3	<i>Fasi 3 e 4: scavo dei fossi e sbancamento</i>	p. 132
6.9.4	<i>Riunione preliminare del personale</i>	p. 135
6.9.5	<i>Taratura della strumentazione LFWD</i>	p. 136
6.9.6	<i>Fase 5: testing del sottofondo – rullatura</i>	p. 137
6.9.7	<i>Fase 5: testing del sottofondo - densità</i>	p. 137
6.9.8	<i>Fase 5: testing del sottofondo LFWD</i>	p. 139
6.9.9	<i>Fase 5: testing del sottofondo - DCP</i>	p. 141
6.9.10	<i>Fase 6: Posa delle celle di pressione C1, C2, C3</i>	p. 142
6.9.11	<i>Fase 7: posa dello strato 1 e livellamento dei 4 campi</i>	p. 143
6.9.12	<i>Fase 8: testing dello strato 1- rullatura</i>	p. 144
6.9.13	<i>Fase 8: testing dello strato 1 – LFWD, DCP, densità</i>	p. 144
6.9.14	<i>Fase 9: posa delle celle di pressione C4, C5, C6</i>	p. 145
6.9.15	<i>Fase 10: posa dello strato 2 e livellamento dei 4 campi</i>	p. 146
6.9.16	<i>Fase 11: testing dello strato 2 – compattazione</i>	p. 146
6.9.17	<i>Fase 11: testing dello strato 2 - Prove LFWD, densità</i>	p. 147
6.9.18	<i>Fase 11: testing dello strato 2 - Prove FWD</i>	p. 147
6.9.19	<i>Termine delle prove</i>	p. 148

## CAPITOLO 7

<b>ANALISI PRELIMINARE DEI RISULTATI E CONCLUSIONI</b>	p. 149
7.1 Premessa	p. 149
7.2 Valutazione di $E_{vib}$	p. 149
7.3 Considerazioni	p. 152
7.4 Cenni di Geostatistica: valutazione di $E_{vd}$	p. 152
7.5 Determinazioni di densità e umidità	p. 169

<b>CONCLUSIONI</b>	p. 171
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	p. 175
<b>RINGRAZIAMENTI</b>	p. 179



## INTRODUZIONE

Questo lavoro si è sviluppato con l'obiettivo di fornire un metodo di lavoro concreto per la valorizzazione dei materiali riciclati CDW. Inizieremo la nostra analisi focalizzando l'attenzione sulle ultime indicazioni normative per lo sviluppo del settore del riciclaggio. Questo permetterà di avere ben chiari le linee di tendenza e gli obiettivi di recupero, aspetti importanti per la valorizzazione dei rifiuti CDW. Ci caleremo poi nella dimensione di un impianto adibito al recupero dei rifiuti CDW, C.A.R. srl. Descriveremo i processi industriali per il recupero e il sistema di controlli per la certificazione della qualità dei prodotti in uscita dall'impianto.

Inizieremo poi un percorso di qualificazione dei prodotti ulteriore. Ci porremo l'obiettivo concreto di caratterizzare alcuni materiali prodotti per un possibile impiego nel settore delle strade. A tal fine analizzeremo l'aspetto della portanza e delle tecniche per la sua determinazione.

L'unico modo per caratterizzare in modo rappresentativo la portanza è mettere il materiale in opera e costruire un campo sperimentale. Quindi si descriverà l'esperienza che C.A.R. srl ha acconsentito a mettere in piedi e cioè la costruzione di un rilevato sperimentale in vera grandezza. Lo studio effettuato ha visto l'impiego di quattro materiali C.A.R. differenti per la costruzione di un campo prove. L'Università di Bologna e L'Università di Pisa hanno fornito la strumentazione e le conoscenze necessarie alla conduzione delle prove. Bomag ha fornito un rullo compattatore con sistema CCC.

Durante le giornate di prova sono state condotte misurazioni di portanza con tecnologie all'avanguardia per la misura dinamica della portanza.

Da una preliminare analisi dei dati forniremo poi un giudizio di ammissibilità per l'impiego dei quattro materiali testati in relazione alla costruzione di specifiche opere, in particolare:

- realizzazione di strati di sottofondo;
- realizzazione di rilevati;
- realizzazione di strati di fondazione .



## Capitolo 1

### GLI INERTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE

#### 1.1 PREMESSA

La materia che si affronta in questo lavoro riguarda il recupero e la valorizzazione di quei materiali che fino a pochi anni fa venivano considerati rifiuti, un peso per la società destinato ad essere smaltito in discarica. Stiamo parlando dei cosiddetti rifiuti da costruzione e demolizione, noti anche come CDW o C&D (construction & demolition waste). Il settore del recupero di questi materiali è soggetto a continue evoluzioni, non solo normative ma anche riguardanti l'implementazione delle tecniche di produzione del CDW, come la demolizione selettiva, i metodi per il successivo trattamento e le successive fasi di caratterizzazione del materiale recuperato.

#### 1.2 ASPETTI QUALI-QUANTITATIVI DELLA PRODUZIONE DI RIFIUTI INERTI

Secondo i dati dell'ultimo rapporto ISPRA sulla produzione italiana di rifiuti la percentuale di rifiuti inerti è la voce più rappresentativa. Alcune stime indicano una produzione annua nazionale che si aggira sui 50 milioni di tonnellate e solo il 10% viene avviato al recupero. La differenza con alcune realtà europee è marcata. Alcuni paesi del nord Europa come Olanda e Danimarca, a fronte della scarsità di materie prime naturali hanno da molto tempo puntato sul recupero. Basti pensare che in Danimarca, dove il 90 % degli inerti utilizzati deriva dal riciclo, per avviare alla discarica 1 tonnellata di rifiuto inerte si devono sborsare fino a 50 euro grazie ad una politica di tassazione mirata. In Italia il recupero del CDW è stato notevolmente rallentato da molteplici fattori:

- il territorio nazionale è ricco di cave di inerti che storicamente hanno alimentato la quasi totalità del fabbisogno;
- il costo per il conferimento in discarica del CDW è ridotto, politiche di intervento mirano ad un progressivo aumento della tassazione;
- è sempre stata praticata una politica di abbandono di tali materiali.

Da alcuni anni la produzione di CDW aumenta inesorabilmente. Oltre alla progressiva sensibilizzazione e quindi ad un maggiore conferimento ad impianti autorizzati va ricordato che le costruzioni di bassa qualità degli anni '50 e '60 cominciano ad essere progressivamente smantellate, contribuendo a ridurre la convinzione comune di durabilità illimitata delle costruzioni umane.

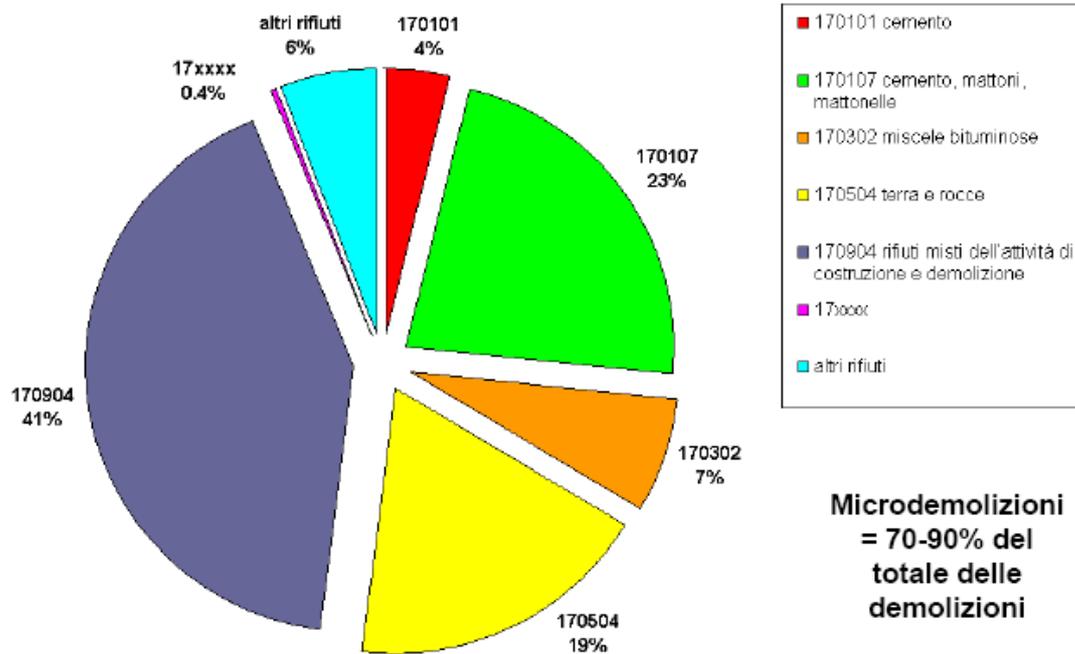


Fig. 1.1 – composizione media dei rifiuti da C&D in Italia (ANPAR 2007)

La natura del CDW è estremamente variabile. È forse questo uno dei problemi più importanti e urgenti da risolvere per una futura implementazione dell'uso di materie prime secondarie: la conoscenza spinta dei materiali recuperati. Partiamo innanzitutto da una considerazione: da Nord a Sud in Italia si utilizzano e si sono utilizzati nel passato materiali differenti. Pensiamo, solo per fare alcuni esempi, ai calcari pugliesi, agli inerti tipici del bacino del Po, alle rocce dure tipiche di altre zone. Impianti diversi, localizzati in aree diverse, avranno quasi sicuramente, bacini di utenza recapitanti materiali molto diversi tra loro. Tra i paesi europei sussistono le medesime differenze. Per questo motivo ogni impianto sarà in grado di fornire un prodotto recuperato con caratteristiche peculiari. Tutto questo rende più difficile l'adozione di similitudini tra impianti molto distanti. Ogni impianto dovrebbe dotarsi di strumenti di conoscenza tesi alla caratterizzazione del proprio prodotto.

La categoria della micro demolizioni può prestarsi ad una suddivisione del materiale inerte come segue in tabella 1: Accanto agli inerti sono inevitabilmente presenti anche altre sostanze come frazione organica o anche materie pericolose (es. vernici, amianto).

<b>FONTE</b>	<b>% in peso</b>
<i>Pavimenti e rivestimenti</i>	57
<i>Pareti e intonaci</i>	17
<i>Tetti e solai</i>	17
<i>Altro</i>	9

Tab. 1

### 1.3 IMPLEMENTAZIONE DELLE TECNICHE DI DEMOLIZIONE SELETTIVA

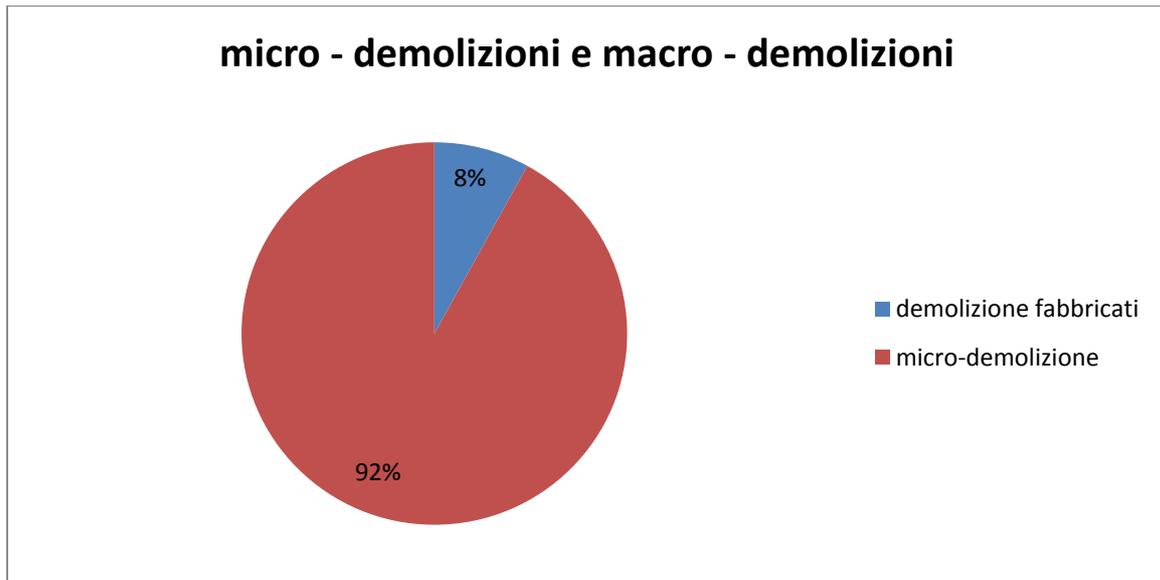
La qualità del CDW è uno dei temi più delicati da affrontare. Naturalmente esistono diversi parametri di giudizio: in base all'utilizzo previsto sono richieste prestazioni diverse. In linea generale però la qualità del prodotto in ingresso ad un impianto di recupero è una buona garanzia sulla qualità del prodotto in uscita. La qualità di un materiale recapitato non riguarda solo le caratteristiche meccaniche che è o è stato in grado di evocare ma un insieme di fattori più ampio:

- assenza di frazioni pericolose: questo punto è decisivo ai fini di un corretto trattamento successivo. I processi di valorizzazione richiedono trattamenti di frantumazione, vagliatura e anche operazioni manuali. La non pericolosità del rifiuto garantisce la salubrità dell'ambiente di lavoro;
- omogeneità del CDW: altro aspetto non trascurabile è il fatto che spesso l'impianto deve trattare un CDW misto, risultato di una demolizione non selettiva. Tale aspetto può rappresentare un ostacolo in quanto è difficile predeterminare la composizione di un CDW misto per avere così indicazioni sul prodotto in uscita. Il prodotto in uscita dal trattamento è anch'esso un misto di diverse componenti e andrà necessariamente caratterizzato meglio rispetto ad altri prodotti.

Il secondo aspetto può essere regolato a monte: una demolizione che preveda la separazione ex ante delle varie frazioni di inerti è sicuramente preferibile. Le demolizioni si inseriscono all'interno di un contesto determinato da molti fattori:

- carattere dell'intervento di demolizione: è dettato fundamentalmente dall'urgenza o meno della demolizione, dalla tipologia di mezzi disponibili e dall'entità della demolizione stessa. Un intervento urgente va completato in breve tempo e con breve permanenza degli addetti sul posto. Quindi le metodologie applicate divengono spesso opportunistiche, tralasciando un criterio standard che invece sta alla base di un intervento selettivo;
- tipologia della struttura: la tipologia e localizzazione all'interno del contesto edificatorio. Le demolizioni selettive richiedono sovente l'ausilio di mezzi meccanici anche ingombranti quali martelli demolitori, pinze e cesoie, segatrici a filo diamantato, wrecking ball.

Spesso a grandi demolizioni possono essere applicati efficaci criteri di demolizione selettiva, gestendo l'intervento con un vero e proprio programma delle lavorazioni. Sui piccoli interventi, gestiti in prevalenza da piccole ditte fatica maggiormente a prendere piede il concetto di selezione. Possiamo fare riferimento alla fig. 2. Le percentuali sono riferite al volume totale di rifiuto CDW aggiornate al 2004.



*Fig. 1.2 – micro e macro-demolizione*

Esiste a tal proposito anche una norma sperimentale UNI (U320145580) che stabilisce le operazioni da eseguire per una corretta demolizione:

- in primis si esegue una valutazione di fattibilità tecnico – economica che permette di effettuare una stima dei materiali in gioco, stabilire quali materiali possano essere reimpiegati direttamente e quali debbano essere valorizzati, senza prescindere dalla valutazione di eventuali vincoli ai processi di trattamento;
- si redige il vero e proprio progetto di demolizione recante la sequenza delle operazioni e i tempi di esecuzione. Nel progetto saranno indicate anche le tecniche di demolizione, la gestione dei flussi in cantiere, l'eventuale modalità di smaltimento per frazioni non recuperabili;
- si procede all'esecuzione dei lavori: la prima fase è sempre l'allontanamento delle frazioni pericolose (es. amianto), della componentistica elettrica e termosanitaria. Possono quindi essere smontati infissi e elementi non portanti utilizzabili nuovamente. Infine si rimuovono le parti strutturali;
- si opera la selezione e il trattamento;
- si smaltisce la frazione non recuperabile.

Una tecnica come quella appena descritta, più lunga e onerosa di quella tradizionale, necessita di un ritorno economico ottenibile soltanto grazie ad uno sviluppo contestuale del mercato dei materiali riciclati.

## 1.4 GLI IMPIANTI DI TRASFORMAZIONE

Il trattamento tipico per un materiale CDW si basa fundamentalmente su due operazioni sequenziali:

- frantumazione: avviene ad opera di impianti di frantumazione solitamente fissi. È frequente trovare anche impianti semi – fissi o mobili;
- vagliatura: è il processo di classificazione diretta del materiale in uscita dai frantoi.

Il processo di riduzione dimensionale può essere affidato a diverse tipologie di frantoi (vedi cap. 3). Esaminiamo le principali differenze intercorrenti tra impianti fissi e impianti mobili. Sicuramente un impianto fisso ha maggiori potenzialità dal punto di vista della qualità del prodotto in uscita. Infatti è possibile fornire all'impianto dotazioni tecnologiche più avanzate quali dispositivi per la separazione della frazione leggera (carta, plastica, legno). La capacità di ottenere in uscita un prodotto pulito è garanzia di qualità. Gli impianti mobili essendo di dimensioni ridotte faticano di più ma possiedono altre importanti peculiarità (fig. 3).



*Fig. 1.3 – frantoio semifisso: impianto di proprietà C.A.R.*

Un impianto di frantumazione non vincolato al terreno può essere spostato non solo all'interno dello stesso sito ma anche in cantieri distanti. Questo si traduce in una vera e propria possibilità di raggiungere i rifiuti là dove sono prodotti, riducendo i costi di trasporto del materiale. Un impianto fisso invece è vincolato al proprio bacino di utenza. Riportiamo nella tabella 2 i principali vantaggi/svantaggi che distinguono impianti fissi e mobili.

<i>IMPIANTO</i>	<i>Vantaggi</i>	<i>Svantaggi</i>
<i>Mobile</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>basso investimento</i></li> <li>- <i>capacità di inseguire il materiale</i></li> <li>- <i>minori spese di trasporto del materiale</i></li> <li>- <i>impianti modulari</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>minore selettività</i></li> <li>- <i>minore produttività</i></li> <li>- <i>minore controllo su polveri e rumore</i></li> <li>- <i>impatto ambientale del trasporto su gomma</i></li> </ul>
<i>Fisso</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>ottime prestazioni</i></li> <li>- <i>abbattimento polveri e rumore</i></li> <li>- <i>buona separazione del materiale indesiderato</i></li> <li>- <i>creazione di un bacino di utenza</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>alto investimento</i></li> <li>- <i>maggiore sensibilità alle discontinuità del flusso di macerie all'ingresso</i></li> </ul>

Tab. 2 – differenze tra impianti fissi e mobili

### 1.5 INCENTIVAZIONE ALL'USO DI AGGREGATI RICICLATI E SCENARI DI MERCATO

Per fare fronte all'incremento della produzioni di CDW la Comunità europea ha emanato direttive tese al raggiungimento di obiettivi di recupero molto ambiziosi (vedi cap. 2). L'Italia purtroppo è ancora collocata in posizione arretrata sotto il profilo del riciclo. Nel grafico di fig. 1.4 si vede

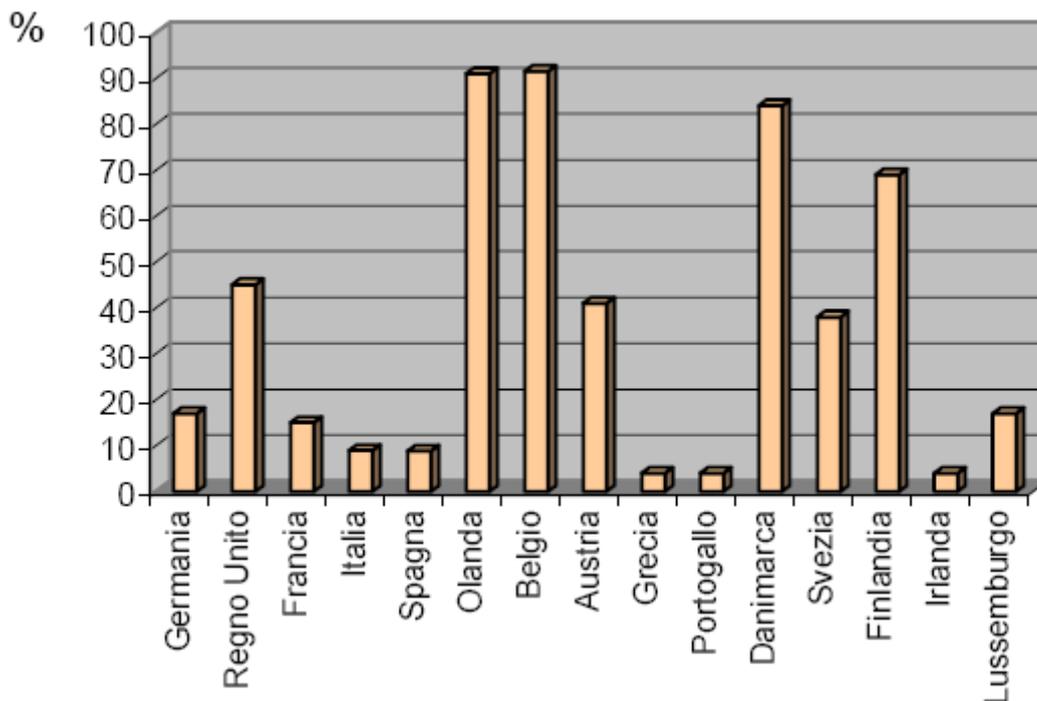


Fig. 1.4 – percentuali di riciclo di CDW nei paesi europei

come a fronte di una percentuale di recupero molto alta di alcuni paesi già ricordati in precedenza l'Italia sia invece in posizione piuttosto arretrata (ANPA 1999 – primo rapporto sui rifiuti speciali). Inoltre è proprio l'elevato volume di rifiuti prodotti a richiedere una gestione rigorosa in

termini di raccolta, trasporto, trattamento, recupero o smaltimento definitivo. Le politiche attuali sono volte a modificare i modelli di produzione, consumo e smaltimento dei rifiuti.

Gli inerti provenienti dalle demolizioni assieme a quelli prodotti dai processi di produzione degli elementi, componenti e manufatti prefabbricati rappresentano una fonte secondaria molto importante per la realizzazione di nuove opere, nel rispetto della tutela ambientale.

La normativa nazionale a tal riguardo prevede anche la stipula di accordi di programma con i soggetti interessati. In Toscana ad esempio, dopo fasi di concertazione, sono state stipulate “Intese Ambientali” per favorire l’utilizzo di materiali raccolti in forma differenziata, tra cui i CDW.

Passiamo brevemente in rassegna i precursori italiani dell’utilizzo degli aggregati riciclati:

- Comune di Pisa: nel capitolato d’appalto per il piano urbano di realizzazione dei parcheggi prevede la possibilità di impiego, in alternativa alle terre rispondenti alle specifiche CNR – UNI 10006, l’impiego di aggregati riciclati. L’impiego è ovviamente previsto solo previo trattamento in impianti autorizzati;
- Ferrovie dello Stato: una specifica tecnica prevede l’impiego di materiali di riciclo all’interno del corpo dei rilevati ferroviari, nel corpo dei rilevati stradali delle strade di pertinenza FS e delle strade da consegnare ad enti terzi, qualora l’Ente gestore ne dia possibilità. Possono altresì essere utilizzati nella realizzazione dello strato di bonifica dei rilevati stradali e ferroviari e nella realizzazione di opere in terra quali dune, ritombamenti, sistemazioni ambientali ecc..
- Provincia di Modena: all’interno del capitolato d’appalto per la costruzione di rilevati sono state inserite prescrizioni particolari per l’uso di aggregati riciclati;
- Regione Toscana: con Delibera del 28/7/1998 n. 265 si prescrive che all’interno dei bandi di gara per l’assegnazione di lavori, le offerte dei concorrenti debbano prevedere una percentuale minima di materiali da costruzione riciclati pari al 15%.

### **1.6 CONCLUSIONI**

In passato le pubbliche amministrazioni, dovendo far fronte al problema dei rifiuti urbani, hanno sempre sottovalutato il problema dei rifiuti CDW. A fronte di una sempre più scarsa capacità di reperimento di materiali di cava e sotto la spinta delle recenti indicazioni normative anche questo settore muove importanti passi in avanti.

La fase di sperimentazione tuttora in corso è volta alla caratterizzazione del materiale ottenuto dagli impianti di trattamento con la duplice finalità di ottimizzare i campi di impiego per queste materie e di migliorare le operazioni di trattamento dei CDW.

Anche se l’atteggiamento di molti esponenti del settore è piuttosto conservativo ogni singolo

passo è importante affinché da risorsa marginale questi materiali possano divenire materiali tradizionali e di uso codificato.

Un confronto continuo tra pubblico e privato, tra pubbliche amministrazioni e imprese di produzione è l'unico modo per gestire in modo virtuoso le opportunità e le prospettive del mercato.

## Capitolo 2

### IL QUADRO NORMATIVO SUI RIFIUTI CDW

#### 2.1 INTRODUZIONE

Si analizza ora il percorso di formazione della normativa sui materiali inerti riciclati. Partendo dalle linee guida del diritto comunitario europeo vedremo l'evolversi del diritto nazionale a partire dagli anni '70, il cambiamento di atteggiamento nei confronti di questa tipologia di materiali e gli obiettivi che lo sviluppo sostenibile richiede e auspica per la corretta gestione di questi rifiuti/risorse.

#### 2.2 DEFINIZIONI

Daremo adesso alcune definizioni utili. Partiremo da qui per analizzare il quadro normativo.

Gli inerti provenienti da demolizioni di edifici o da scavi di manti stradali erano e continuano ad essere considerati rifiuti speciali anche in base al decreto legislativo n. 152 del 2006, trattandosi di materiale espressamente qualificato come rifiuto dalla legge, del quale il detentore ha l'obbligo di disfarsi avviandolo o al recupero o allo smaltimento.

**Rifiuto:** *qualsiasi sostanza od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia deciso o abbia l'obbligo di disfarsi.*

**Rifiuti inerti:** *i rifiuti solidi che non subiscono alcuna trasformazione fisica, chimica o biologica significativa; i rifiuti inerti non si dissolvono, non bruciano né 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.*

Spesso si fa confusione tra smaltimento e recupero. Si tratta di due operazioni nettamente distinte. Lo smaltimento di un rifiuto avviene quando per esso non si riscontri utilità effettiva futura e si rende necessario avviarlo alla discarica.

**Discarica:** *area adibita a smaltimento dei rifiuti mediante operazioni di deposito sul suolo o nel suolo, compresa la zona interna al luogo di produzione dei rifiuti adibita allo smaltimento dei medesimi da parte del produttore degli stessi, nonché qualsiasi area ove i rifiuti sono sottoposti a*

*deposito temporaneo per più di un anno. Sono esclusi da tale definizione gli impianti in cui i rifiuti sono scaricati al fine di essere preparati per il successivo trasporto in un impianto di recupero, trattamento o smaltimento, e lo stoccaggio di rifiuti in attesa di recupero o trattamento per un periodo inferiore a tre anni come norma generale, o lo stoccaggio di rifiuti in attesa di smaltimento per un periodo inferiore a un anno;*

Il recupero è un vasto insieme di operazioni di natura diversa a seconda della tipologia di rifiuto e avviene quando per il rifiuto si prospetta utilità futura. Per una definizione esaustiva del concetto di recupero rimandiamo a quella data dalla nuova normativa 2008/98/CE, riportata più avanti. La direttiva 75/442/Cee all'art. 4 stabilisce che il recupero/smaltimento debbano avvenire senza pericoli per la salute dell'uomo e senza usare metodi o procedimenti che possano arrecare danno all'ambiente e in particolare:

- senza creare rischi per l'acqua, l'aria, il suolo, la fauna e la flora;
- senza causare inconvenienti da rumori e odori;
- senza danneggiare il paesaggio e i siti di particolare interesse.

### **2.3 DIRETTIVA 75/442/CEE**

La direttiva del 15/07/1975 n. 442 focalizza obiettivi ampiamente ritrattati nella normativa successiva. In particolare si delineano i concetti di "recupero" e "smaltimento".

*[...] considerando l'importanza di favorire il recupero dei rifiuti e l'utilizzazione del recupero per preservare le risorse naturali [...], si favoriscono politiche di azione comune, quali ad esempio l'armonizzazione delle legislazioni.*

#### *Art. 3*

*Gli Stati membri adottano le misure appropriate per promuovere:*

*a) in primo luogo la prevenzione o la riduzione della produzione e della nocività dei rifiuti, in particolare mediante:*

- lo sviluppo di tecnologie pulite, che permettano un maggiore risparmio di risorse naturali;*

*[...]*

*b) in secondo luogo*

*[...]*

*1) il recupero dei rifiuti mediante riciclo, reimpiego, riutilizzo o ogni altra azione intesa ad ottenere materie prime secondarie [...]*

Quindi la prevenzione della produzione di rifiuti è da anteporre e preferire sempre alle altre

operazioni di recupero.

Per quanto riguarda il recupero dei materiali inerti all'allegato IIB troviamo la categoria R5: *riciclo/recupero di altre sostanze inorganiche*.

Di fatto la direttiva 75/442 viene modificata dalla direttiva 91/156/CEE sui rifiuti, recepita dalla legislazione italiana dal D.lgs 5 febbraio 1997 n. 22, noto come Decreto Ronchi.

## 2.4 DECRETO RONCHI

Il decreto Ronchi, considerato una tappa storica nella gestione dei rifiuti in Italia, recepisce i contenuti delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/36/CEE sugli imballaggi e rifiuti di imballaggio introducendo principi, finalità e disposizioni innovativi nell'intero settore. Entra nella legislazione italiana il **principio della gerarchia dei rifiuti** adottato a livello europeo, per cui la prevenzione della produzione dei rifiuti deve avere un ruolo prioritario rispetto alle forme di gestione. In particolare all'art. 3 il decreto elenca una serie di strumenti di supporto per attuare la **prevenzione**: dallo sviluppo di tecnologie pulite alla promozione di strumenti economici, dalle azioni di informazione e comunicazione agli accordi di programma. Stabilita la necessità della prevenzione, con il successivo art. 4 si impone la riduzione della mole dei rifiuti destinati allo smaltimento attraverso il recupero.

### *Art. 4 - Recupero dei rifiuti*

*1. Ai fini di una corretta gestione dei rifiuti le autorità competenti favoriscono la riduzione dello smaltimento finale dei rifiuti attraverso:*

- a) il reimpiego ed il riciclaggio;*
- b) le altre forme di recupero per ottenere materia prima dai rifiuti;*
- c) 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;*
- d) l'utilizzazione principale dei rifiuti come combustibile o come altro mezzo per produrre energia.*

*2. Il riutilizzo, il riciclaggio e il recupero di materia prima debbono essere considerati preferibili rispetto alle altre forme di recupero.*

*3. Al fine di favorire e incrementare le attività di riutilizzo, di riciclaggio e di recupero le autorità competenti ed i produttori promuovono analisi dei cicli di vita dei prodotti, ecobilanci, informazioni e tutte le altre iniziative utili.*

*4. Le autorità competenti promuovono e stipulano accordi e contratti di programma con i soggetti economici interessati al fine di favorire il riutilizzo, il riciclaggio ed il recupero dei rifiuti, con*

*particolare riferimento al reimpiego di materie prime e di prodotti ottenuti dalla raccolta differenziata con la possibilità di stabilire agevolazioni in materia di adempimenti amministrativi nel rispetto delle norme comunitarie ed il ricorso a strumenti economici.*

Non ci si limita più a preferire le forme di prevenzione e di recupero ma si promuovono esplicitamente le attività finalizzate al recupero, al riutilizzo, al riciclaggio mediante accordi, contratti di programma, agevolazioni economiche, quasi preannunciando il tema delle GPP (Green Public Procurement - Acquisti pubblici verdi), ripreso dalla normativa successiva.

L'allegato A fornisce una lista delle categorie di rifiuti oggetto del decreto, in particolare:

***17 00 00 Rifiuti di costruzioni e demolizioni (compresa la costruzione di strade)***

*17 01 00 cemento, mattoni, mattonelle, ceramiche e materiali in gesso*

*17 01 01 cemento*

*17 01 02 mattoni*

*17 01 03 mattonelle e ceramica*

*17 01 04 materiali da costruzione a base di gesso*

*[...]*

*17 03 01 asfalto contenente catrame*

*17 03 02 asfalto (non contenente catrame)[...]*

Il decreto Ronchi è stato abrogato dall'art. 264 , c.1 lett. i) del Decreto legislativo 152/06.

## **2.5 D.M. 8 MAGGIO 2003 N. 203**

Il decreto ministeriale 203/2003, meglio noto come “Decreto 30%” è stato promosso dal Ministero dell'Ambiente e della tutela del territorio in concerto con i Ministri delle Attività Produttive e della Salute. Esso intende fornire misure chiare e di impulso al settore del riciclaggio.

*[...] considerato che la creazione di un mercato per i prodotti derivanti dalle operazioni di riciclaggio rappresenta un obiettivo fondamentale della normativa comunitaria e che l'ampliamento del mercato dei manufatti e beni ottenuti da materiale riciclato e' una componente fondamentale delle attività di gestione dei rifiuti [...]*

I destinatari del Decreto sono enti pubblici e società a prevalente capitale pubblico, anche di gestione dei servizi.

*Art. 3 - Obbligo e metodologia di calcolo*

1. I destinatari, in ciascun anno solare e per ciascuna categoria di prodotto, sono tenuti a coprire almeno il trenta per cento del fabbisogno annuale di manufatti e beni appartenenti a ciascuna delle citate categorie, con manufatti e beni ottenuti con materiale riciclato. Per ciascuna categoria di prodotto il quantitativo rappresentante il fabbisogno annuale di manufatti e beni viene espresso nell'unità di misura atta ad identificare l'unità di prodotto; per quelle categorie di prodotto per le quali non è possibile individuare un'unità di misura identificativa dell'unità di prodotto, il termine quantitativo impiegato per la definizione del fabbisogno annuale di manufatti e beni fa riferimento all'importo annuo destinato all'acquisto di manufatti e beni in quella categoria di prodotto.

2. L'acquisto dei singoli prodotti per un quantitativo superiore al trenta per cento in una categoria non va a compensare il mancato acquisto in altre categorie.

3. I destinatari adottano in sede di formulazione di una gara per la fornitura e l'installazione di manufatti e beni, e nella formulazione di capitolati di opere pubbliche, le disposizioni di cui ai commi 1 e 2. I relativi capitolati non possono prevedere caratteristiche tecniche dei manufatti e beni più restrittive rispetto a quelle previste dalle norme vigenti nazionali e comunitarie.

4. Le disposizioni previste al comma 1, 2 e 3 si applicano ai prodotti elencati nel repertorio del riciclaggio e relativamente ai manufatti e beni di cui sia verificata la disponibilità e la congruità di prezzo; tale congruità si ritiene rispettata se l'eventuale incremento di prezzo non supera quello dei corrispondenti manufatti e beni contenenti materie prime vergini di una percentuale definita dal gruppo di lavoro di cui all'articolo 5.

Viene introdotto il **Repertorio del Riciclaggio (RR)**: si tratta di un vero e proprio catalogo dei beni oggetto del Decreto aggiornato dall'Osservatorio Nazionale sui Rifiuti (ONR).

#### *Art. 4 - Repertorio del riciclaggio*

1. E' istituito il repertorio del riciclaggio (RR) contenente:

a) l'elenco dei materiali riciclati;

b) l'elenco dei manufatti e beni in materiale riciclato, indicante l'offerta, la disponibilità e la congruità del prezzo.

2. Il repertorio del riciclaggio è tenuto e reso pubblico a cura dell'Osservatorio nazionale dei rifiuti (ONR), di cui all'articolo 26 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22.

#### *Art. 6 - Ammissione al repertorio del riciclaggio*

1. *Il soggetto che intende richiedere l'iscrizione di un manufatto o bene al repertorio del riciclaggio inoltra una richiesta di inserimento nel repertorio del riciclaggio [...]*
2. *La richiesta per i materiali riciclati, oltre ai dati identificativi dell'azienda, deve riportare:*
  - a) *i codici dell'elenco europeo dei rifiuti con cui viene realizzato il materiale riciclato;*
  - b) *la percentuale di rifiuti nel materiale riciclato, il cui valore dovrà rispettare i limiti minimi definiti per detti materiali ed essere documentato tramite dichiarazione di un soggetto certificatore professionalmente abilitato, sulla base di analisi di processo, tramite una perizia giurata;*
  - c) *indicazione di un tecnico responsabile..*
  - d) *una relazione tecnica indicante le eventuali differenze prestazionali tra il bene o manufatto in materiale riciclato e analogo bene o manufatto realizzato con materiali vergini, evidenziando la conformità qualitativa del prodotto;*
  - e) *ogni altra informazione utile.*
3. *La richiesta per i manufatti e beni ottenuti con materiale riciclato, oltre ai dati identificativi dell'azienda, dovrà riportare i dati specificati nell'allegato A.*

Abbiamo quindi visto come grazie a tale Decreto le Regioni individuino le disposizioni affinché enti pubblici e società a prevalente capitale pubblico, anche di gestione dei servizi, garantiscano che almeno il 30% del fabbisogno annuale di manufatti e beni sia derivante da materiale riciclato. L'articolo 56 della legge finanziaria 2002, n. 448/2001, da cui nasce il Decreto 203/2003, imponeva infatti tale obbligo in riferimento però alla sola fornitura di beni, quali mobilio per uffici, divise per vigili e operatori ecologici, impiego di carta riciclata per uffici e tipologie affini di prodotti.

È quindi affidato alle regioni il compito di adottare le misure necessarie a favorire ed ampliare l'uso dei materiali riciclati.

## **2.6 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.**

Si tratta della diretta promanazione del D.M. 203/2003 in cui sono gettate le basi concrete per il settore del riciclaggio dei rifiuti inerti da costruzione e demolizione (CDW). Riportiamo la definizione di materiale riciclato fornita dalla direttiva

**Materiale riciclato:** *materiale realizzato utilizzando rifiuti post-consumo da costruzione e demolizione.*

*Materiali riciclati ammissibili alla iscrizione nel Repertorio del riciclaggio. Sono ascrivibili, a titolo di esempio e in maniera non esaustiva, nel Repertorio del riciclaggio:*

*A. aggregato riciclato risultante dal trattamento di rifiuti inorganici post-consumo derivanti dalla demolizione e dalla manutenzione, anche parziale, di opere edili e infrastrutturali;*

*B. conglomerato bituminoso riciclato confezionato con rifiuti post-consumo derivanti dalla scarifica della sovrastruttura stradale.*

Va detto che la condizione essenziale per i materiali riciclati è che siano iscritti al Repertorio del Riciclaggio, inoltre per essi devono esser rispettati i limiti previsti nella medesima circolare per CDW, che riportiamo di seguito:

*[...] La tecnologia impiegata per la produzione dell'aggregato riciclato non impone particolari limiti. Il limite massimo di rifiuti inerti e' pertanto pari al 100%. Il limite minimo di rifiuti inerti negli aggregati riciclati e' del 60%.*

*La tecnologia impiegata per la produzione del conglomerato bituminoso riciclato impone il limite minimo del 20% di rifiuto inerte da scarifica.*

*L'entità effettiva di rifiuti dovrà essere dichiarata nell'ambito della domanda compilata in base allo schema di cui all'allegato A per i conglomerati bituminosi e all'allegato B per gli aggregati riciclati, e della perizia giurata di cui all'art. 6, comma 2, lettera b) del decreto ministeriale 8 maggio 2003, n. 203.*

Nella circolare sono quindi contenuti anche:

- allegato A: modulo per la richiesta di iscrizione al Repertorio del Riciclaggio di conglomerati bituminosi riciclati per il settore edile, stradale e ambientale;
- allegato B: modulo per la richiesta di iscrizione al Repertorio del Riciclaggio di aggregati riciclati per il settore edile, stradale, ambientale.

**SCHEMA PER AGGREGATI RICICLATI PER IL SETTORE EDILE, STRADALE E AMBIENTALE**

All'Ufficio di Gabinetto del Ministro  
dell'Ambiente e Tutela del Territorio  
Commissione Tecnica D.M. 9 ottobre 2003  
via Cristoforo Colombo, 44  
00147 ROMA.

Ai sensi dell'articolo 6 del decreto recante norme affinché gli uffici pubblici e le società a prevalente capitale pubblico coprano il fabbisogno annuale di manufatti e beni con una quota di prodotti ottenuti da materiale riciclato nella misura non inferiore al 30% del fabbisogno medesimo

la Società/Ditta \_\_\_\_\_ con sede legale \_\_\_\_\_ c.a.p. \_\_\_\_\_  
in \_\_\_\_\_  
prov. \_\_\_\_\_, via/piazza \_\_\_\_\_ cod. fisc. o partita \_\_\_\_\_  
I.V.A. \_\_\_\_\_  
iscritta al registro delle ditte esercenti attività di riciclo della prov. di \_\_\_\_\_  
n. \_\_\_\_\_ (eventuale),

richiede l'iscrizione al Repertorio del riciclaggio del  
**AGGREGATO RICICLATO**

1. Nome commerciale dell'aggregato riciclato (eventuale) \_\_\_\_\_ ;  
2. Codice europeo rifiuto con cui è realizzato il materiale e relativa percentuale contenuta espressa  
in peso:  
codice CER \_\_\_\_\_ da \_\_\_\_\_ a \_\_\_\_\_ %  
\_\_\_\_\_ %  
\_\_\_\_\_ %  
\_\_\_\_\_ %

3. Capacità produttiva annua mc (o t) \_\_\_\_\_ ;  
4. All'atto dell'analisi della presente richiesta potrà essere consultato in qualità di tecnico il sig. \_\_\_\_\_, tel. \_\_\_\_\_, e-mail \_\_\_\_\_ @ \_\_\_\_\_ ;  
indichiamo quale associazione di categoria di riferimento \_\_\_\_\_  
nella persona del sig. \_\_\_\_\_ tel. \_\_\_\_\_  
e-mail \_\_\_\_\_ @ \_\_\_\_\_

Si allega alla presente la perizia giurata e una relazione tecnica di progetto contenente:  
- una descrizione dell'aggregato riciclato e della relativa destinazione d'uso;  
- la composizione dell'aggregato con dichiarazione del peso di rifiuti post-consumo da costruzione e demolizione impiegati per la realizzazione dell'aggregato;  
- le caratteristiche prestazionali e rispondenza agli standards di cui all'allegato C;  
- dichiarazione del rispetto del parametro di congruità del prezzo, di cui al punto 4 della presente circolare;  
- le norme nazionali e comunitarie, anche in tema di sicurezza, salute, qualità, cui è soggetto il prodotto e certificazione delle medesime.

Si dichiara di essere a conoscenza del disposto dell'art.8, comma 3 del decreto recante norme affinché gli uffici pubblici e le società a prevalente capitale pubblico coprano il fabbisogno annuale di manufatti e beni con una quota di prodotti ottenuti da materiale riciclato nella misura non inferiore al 30% del fabbisogno medesimo.

Il tecnico \_\_\_\_\_  
Il legale rappresentante \_\_\_\_\_

Data \_\_\_\_\_

*Fig. 1- Allegato B- schema per aggregati riciclati*

Affinché il bene riciclato sia impiegato dalle pubbliche amministrazioni devono essere verificate due condizioni:

- La congruità del prezzo: essa si ritiene rispettata se il prezzo dei materiali riciclati non supera quello relativo ai materiali corrispondenti che si vanno a sostituire;
- I materiali iscritti al RR devono presentare [...] *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.*

Nell'allegato C vengono fornite invece le caratteristiche prestazionali degli aggregati riciclati in relazione alla tipologia di opera da realizzare, in particolare ci si occupa di:

- aggregato riciclato per la realizzazione del corpo dei rilevati di opere in terra dell'ingegneria civile;
- aggregato riciclato per la realizzazione di sottofondi stradali, ferroviari, aeroportuali e di piazzali civili ed industriali;
- aggregato riciclato per la realizzazione di strati di fondazione delle infrastrutture di trasporto e di piazzali civili ed industriali;
- aggregato riciclato per la realizzazione di recuperi ambientali, riempimenti e colmate;
- aggregato riciclato per la realizzazione di strati accessori (aventi funzione anticapillare, antigelo, drenante, ecc.)
- aggregato riciclato conforme alla norma armonizzata Uni en 12620:2004 per il confezionamento di calcestruzzi con resistenza  $\leq 15$  MPa, secondo le indicazioni della norma Uni 8520-2.

## 2.7 LA MARCATURA CE

I materiali da costruzione sono stati oggetto di interesse da parte degli organismi europei che si occupano di definire i criteri di rispetto (direttive) fin dal 1988. La vastità della direttiva 89/106/CEE è stata il motivo per cui è stata generalmente ignorata.

La direttiva definisce "materiale da costruzione" qualsiasi prodotto che venga incluso in modo stabile nelle costruzioni industriali, commerciali o di uso civile e questo dà un'idea di quanti siano questi prodotti.

Con il passare degli anni e l'aumento della sensibilità nei confronti della sicurezza, specifici prodotti per edilizia sono stati oggetto di normazione (es. i cancelli e le porte, le travi in legno..) Esiste un elenco di tutte le famiglie di materiali che sono soggetti a normative specifiche e che devono riportare il marchio CE e tale elenco si allunga con il passare del tempo dato che vengono emanate sempre nuove normative; per quanto riguarda i prodotti non ancora soggetti a specifiche regole i costruttori devono far riferimento alla direttiva generale.

I principi da rispettare sono quelli della sicurezza al momento dell'uso, della costruzione nel rispetto delle norme, della garanzia che i sistemi di produzione mantengano nel tempo le caratteristiche predefinite per i prodotti.

La marcatura è sostanzialmente l'applicazione del marchio CE e rappresenta, da un lato la formalizzazione di un percorso di produzione preciso e controllato, dall'altro l'evidenza che

l'azienda applica un metodo di produzione che è sempre sotto controllo.

La marcatura CE non è perciò un lavoro episodico che il costruttore esegue o fa eseguire da qualche ente terzo; la marcatura CE è un'attività propria del produttore o importatore che garantisce la conformità del prodotto venduto alle leggi che ne regolano la commercializzazione all'interno della Comunità Europea.

Negli ultimi anni il legislatore ha proseguito nel percorso di approfondimento normativo adottando un criterio assolutamente condivisibile, ovvero tutto ciò che entra nelle costruzioni non solo deve essere oggetto di marcatura CE, ma deve anche essere sottoposto a prove di laboratorio e verifiche di produzione certificate.

La ragione è semplice, mentre nelle macchine e negli altri settori in genere il rapporto tra produttore ed utilizzatore è diretto, nel campo delle costruzioni non è quasi mai così e gli utilizzatori di un immobile di tipo civile o industriale non hanno rapporti diretti con i costruttori, quindi per salvaguardare i primi si impongono regole più vincolanti sui prodotti dei secondi.

In questo panorama il Decreto del Ministero delle Infrastrutture dell'11 aprile 2007 costituisce l'applicazione della direttiva 89/106/CEE sui prodotti da costruzione, recepita con D.P.R. 21/04/93 n. 246.

Il Decreto del 2007 fa riferimento a specifiche categorie di prodotti, in particolare nell'allegato 1 in cui vengono individuati prodotti e relative Norme Armonizzate cui fare riferimento.

Per gli aggregati le norme europee di riferimento sono:

[...]

*EN 13383-1:2002 "Aggregati per opere di protezione (armourstone) – Parte1:specifiche" recepita come UNI EN 13383-1:2003;*

[...]

*EN 13242:2002 "Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l'impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione delle strade" recepita come UNI EN 13242:2004;*

[...]

Nell'allegato 2 si descrive cosa prevede per ogni categoria il sistema di attestazione della conformità, nel caso degli aggregati di cui sopra il sistema di controllo prevede il controllo ciclico della produzione.

Riportiamo infine un estratto dell'allegato 3 del Decreto in questione: nelle tabelle riportate vengono indicati tutti i controlli che un produttore deve periodicamente far eseguire per mantenere la marcatura CE sui propri prodotti.

Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l'impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione di strade (UNI EN 13242)

Caratteristiche armonizzate (secondo appendice ZA)		Dichiarazione
Forma, dimensione e massa volumica delle particelle	Dimensione dell'aggregato	SI
	Granulometria	SI
	Forma dell'aggregato grosso	SI/NPD
	Massa volumica delle particelle	SI/NPD
Purezza	Contenuto di fini	SI
	Qualità dei fini	SI
Percentuale di particelle frantumate	Percentuale di particelle rotte frantumate e di particelle totalmente arrotondate negli aggregati grossi	SI
Resistenza alla frammentazione/frantumazione	Resistenza alla frammentazione dell'aggregato grosso	SI
Stabilità volumetrica	Componenti che alterano la stabilità di volume delle scorie d'altoforno e d'acciaieria per gli aggregati non legati	SI/NPD
Assorbimento/suzione di acqua	Assorbimento di acqua	SI/NPD
	Solfato solubile in acido	SI
Composizione/contenuto	Zolfo totale	SI/NPD
	Componenti che alterano la velocità di presa e di indurimento delle miscele legate con leganti idraulici	SI/NPD
	Resistenza all'usura dell'aggregato grosso	SI
Resistenza all'attrito	Resistenza all'usura dell'aggregato grosso	SI
Sostanze pericolose: Rilascio di metalli pesanti mediante lisciviazione Rilascio di altre sostanze pericolose	Conoscenza delle materie prime Gestione della produzione	(*)
Durabilità agli agenti atmosferici	"Sonnenbrand" del basalto	SI/NPD
Durabilità al gelo/disgelo	Resistenza al gelo/disgelo	SI/NPD

(\*) Per questa caratteristica, le disposizioni della direttiva 89/106/CE si ritengono soddisfatte dal rispetto della normativa nazionale italiana ovvero comunitaria applicabile, vigenti al momento della dichiarazione.

Fig. 2 – allegato 3 del Decreto 11/04/07

Aggregati per opere di protezione (armourstone) (UNI EN 13383-1)

Caratteristiche armonizzate (secondo appendice ZA)		Dichiarazione
Forma, dimensione e massa volumica dei granuli	Forma	SI
	Granulometria	SI
	Massa volumica dei granuli	SI
Resistenza a rottura	Resistenza a rottura	SI
Resistenza allo sfregamento	Resistenza all'usura	SI
Rilascio di sostanze pericolose	Conoscenza delle materie prime Gestione della produzione	(*)
Durabilità delle loppe	Disintegrazione del silicato bicalcico della loppa di altoforno raffreddata in aria	SI
	Disintegrazione del ferro della loppa di altoforno raffreddata in aria	SI
	Disintegrazione della scoria d'acciaio	SI
Durabilità al gelo/disgelo	Resistenza al gelo/disgelo	SI
Durabilità alla cristallizzazione salina	Resistenza alla cristallizzazione salina	SI/NPD
Durabilità al Sonnenbrand del basalto	Sonnenbrand	SI/NPD

(\*) Per questa caratteristica, le disposizioni della direttiva 89/106/CE si ritengono soddisfatte dal rispetto della normativa nazionale italiana ovvero comunitaria applicabile, vigenti al momento della dichiarazione.

Fig. 3 – allegato 3 del Decreto 11/04/07

## 2.8 DIRETTIVA 2008/98/CE DEL 19 NOVEMBRE 2008

Veniamo ora alla discussione della nuova direttiva europea relativa ai rifiuti. Si cerca qui di dare una visione del rifiuto non limitata alla sola fase dello smaltimento e del recupero ma rapportata all'intero ciclo di vita.

Un prima riflessione va fatta sul tentativo di superamento di un limite della normativa precedente. L'intero settore dei rifiuti, afferma la direttiva, dovrebbe essere considerato alla luce della direttiva 96/61/CE sulla prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento (IPPC). In effetti il decreto legislativo del 18 febbraio 2005 n. 59, ossia l'attuazione integrale della direttiva IPPC non ricomprende l'intero settore dei rifiuti nelle attività da sottoporsi al decreto medesimo. Nello specifico il decreto 59/2005 rivolge l'attenzione ai soli impianti definiti nell'allegato IIA della 75/442/CEE ai punti D8 e D9, ossia impianti adibiti ad operazioni di smaltimento che abbiano una capacità superiore a 50 t/giorno. Non si fa riferimento ad impianti per operazioni di recupero.

La rivalutazione del settore del recupero dei rifiuti alla luce dell' IPPC rappresenterebbe un passo avanti se pensiamo che tale direttiva pone l'accento sui temi dell'azione integrata a livello ambientale e della prevenzione, consentendo di analizzare gli aspetti di consumo delle risorse unitamente alla capacità rigenerativa della natura.

Anche in questa nuova direttiva si stabilisce la cosiddetta "gerarchia dei rifiuti".

*[...] La gerarchia dei rifiuti stabilisce in generale un ordine di priorità di ciò che costituisce la migliore opzione ambientale nella normativa e politica dei rifiuti, tuttavia discostarsene può essere necessario per flussi di rifiuti specifici quando è giustificato da motivi, tra l'altro, di fattibilità tecnica, praticabilità economica e protezione dell'ambiente[...]*

#### *Art. 4*

##### *Gerarchia dei rifiuti*

*1. La seguente gerarchia dei rifiuti si applica quale ordine di priorità della normativa e della politica in materia di prevenzione e gestione dei rifiuti:*

- a) prevenzione;*
- b) preparazione per il riutilizzo;*
- c) riciclaggio;*
- d) recupero di altro tipo, per esempio il recupero di energia;*
- e) smaltimento.*

*[...]*

Riportiamo la definizione di "recupero" data al punto 15 dell'art. 3:

**recupero:** *qualsiasi operazione il cui principale risultato sia di permettere ai rifiuti di svolgere un ruolo utile sostituendo altri materiali che sarebbero stati altrimenti utilizzati per assolvere una particolare funzione o di prepararli ad assolvere tale funzione, all'interno dell'impianto o*

*nell'economia in generale. L'allegato II riporta un elenco non esaustivo di operazioni di recupero [...]*

Emergono tra l'altro le differenze tra i concetti di rifiuto, sottoprodotto e prodotto recuperabile. Infatti ogni sottoprodotto è considerato tale se:

- è certo che la sostanza sarà riutilizzata;
- la sostanza o l'oggetto può essere utilizzato direttamente senza alcun intervento diverso dalla normale pratica industriale;
- devono essere soddisfatti i requisiti di protezione ambientale e della salute umana.

Un prodotto recuperabile invece non è da considerarsi rifiuto se viene sottoposto ad operazioni di recupero, come il riciclaggio, e soddisfa criteri specifici come ad esempio l'esistenza di un mercato o il rispetto degli standard prefissati per ogni singolo prodotto.

Ultimi, ma non per importanza, sono gli obiettivi da raggiungere in merito a riutilizzo e riciclaggio dei materiali inerti, riportati all'art. 11:

*[...] Al fine di rispettare gli obiettivi della presente direttiva e tendere verso una società europea del riciclaggio con un alto livello di efficienza delle risorse, gli Stati membri adottano le misure necessarie per conseguire i seguenti obiettivi:*

*[...]*

*entro il 2020 la preparazione per il riutilizzo, il riciclaggio e altri tipi di recupero di materiale, incluse operazioni di colmatazione che utilizzano i rifiuti in sostituzione di altri materiali, di rifiuti da costruzione e demolizione non pericolosi, escluso il materiale allo stato naturale definito alla voce 17 05 04 dell'elenco dei rifiuti, sarà aumentata almeno al 70 % in termini di peso [...]*

## **2.9 SINTESI E CONSIDERAZIONI**

La pubblicazione della circolare n. 5205 rende effettivo l'obbligo di adeguamento da parte delle PP. AA. dei capitolati d'appalto ai nuovi indirizzi normativi. Gli aggregati riciclati, lo ripetiamo, possono concorrere a determinare il 30% del fabbisogno della P.A. solo se iscritti al Repertorio del Riciclaggio. Affinché un materiale sia ammesso al repertorio l'azienda produttrice invia la domanda tramite apposito modello, corredandola con la documentazione tecnica specifica. La circolare stessa fornisce l'elenco dei requisiti tecnici e prestazionali utili alla redazione della documentazione tecnica.

Ritornando al "materiale riciclato" si evidenzia come la definizione data dalla direttiva faccia ricadere in tale categoria solo rifiuti post - consumo da costruzione e demolizione. A rigore, scarti e sfridi di lavorazione non rientrano in tale categoria, in quanto mai messi sul mercato. L'impedimento teorico però viene superato dal momento che la circolare stessa prevede che i

rifiuti da post - consumo possano essere miscelati con altri materiali (terre e rocce da scavo, inerti industriali, ecc.), pur mantenendo una percentuale minima del 60% all'interno della miscela.

L'iscrizione al repertorio non è così onerosa per un'azienda se pensiamo che gli aggregati devono comunque essere marcati CE e questo semplifica molto il processo di successiva iscrizione al RR.

Ciò che deve necessariamente essere dichiarato tramite perizia giurata nella domanda di iscrizione al RR, oltre a ciò che è già contenuto nella dichiarazione di conformità (marcatura CE) sono:

- capacità produttiva annua (t/a);
- entità dei rifiuti da post - consumo (%);
- congruità del prezzo.

Per l'iscrizione al RR è previsto un lotto minimo di materiale in azienda pari a 3000 m<sup>3</sup>.

È d'obbligo infine fare qualche considerazione sulle caratteristiche prestazionali che vengono richieste e stabilire un confronto su:

- caratteristiche di composizione;
- parametri di resistenza;
- indice di forma.

La circolare punta sulla qualità dei materiali presenti nella miscela riciclata. Da notare è la percentuale di materiali plastici cavi e materiali deperibili ridotta allo 0,1% in massa. La percentuale di materiale non strettamente inerte viene ridotta rispetto alla norma UNI 10006/2002. Tale richiesta fa inevitabilmente leva sulle potenzialità dell'impianto di trattamento. Probabilmente gli impianti fissi saranno in grado di far fronte a tale richiesta più efficacemente rispetto ad impianti mobili. Infatti grazie alla maggiore possibilità di montare dispositivi in grado di eliminare la frazione leggera riusciranno a sottostare ai termini normativi senza problemi. Vetro e scorie vetrose, in quanto a percentuali ammesse, si attestano su valori assolutamente raggiungibili.

Per quanto riguarda la resistenza e l'indice di forma ci limiteremo a dare qualche indicazione significativa, rimandando al capitolo 4 per una trattazione più appropriata.

Nel materiale conferito ad un impianto di categoria R5, disomogeneo per natura, si possono incontrare grani litici, laterizi, malte, intonaci ecc.. Dal punto di vista qualitativo nuclei piuttosto compatti sono spesso ricoperti da malte friabili e tendenti allo sfaldamento. Inoltre, partite piuttosto scadenti carenti di elementi litici potrebbero tendere alla polverizzazione. A questo scopo la circolare definisce i valori di perdita in peso per abrasione con apparecchio Los Angeles nel caso sia richiesta una specifica capacità portante:

- $\leq 45$  per sottofondi stradali;
- $\leq 30$  per gli strati di fondazione.

Per quanto riguarda la forma di un elemento frantumato all'interno di una miscela va detto che esso influenza spesso la costipabilità della miscela stessa. Pensiamo per esempio al caso di frammenti di mattoni forati, rotti lungo una linea di fori o lungo un foro, oppure al caso evidente di frammenti di piastrelle. Pertanto, laddove la presenza di elementi piatti e allungati deve essere controllata, come nel caso dei sottofondi stradali e degli strati di fondazione, si prevedono valori limite per gli indici di forma e di appiattimento (vedi cap. 4).



## Capitolo 3

### C.A.R. – CENTRO AUTORIZZATO RICICLAGGIO

#### 3.1 PREMESSA

C.A.R. srl è un impianto sito a Imola, nella zona produttiva compresa tra via Selice, via Lasie e via Laguna. Tutto l'impianto sorge all'interno di una ex cava di inerti alluvionali. In certa parte della proprietà C.A.R. si vede ancora bene il vuoto d'estrazione lasciato dalla precedente attività.

In questo capitolo daremo indicazioni su:

- flussi di materiale in entrata ed uscita dall'impianto;
- organizzazione delle lavorazioni presenti;
- tipologie di lavorazioni e caratteristiche impiantistiche.

#### 3.2 MATERIALI IN INGRESSO

C.A.R. srl è un'azienda di categoria R5, ovvero si tratta di un impianto adibito al recupero e alla valorizzazione di sostanze inorganiche.

L'azienda tratta un volume di materiale di circa 200'000 t/anno. I materiali che l'impianto valorizza sono fondamentalmente:

- materiali prodotti dalla costruzione e manutenzione delle strade tra cui i prodotti della scarifica o fresatura completa del manto stradale;
- calcestruzzi (armati e non) e cementi;
- rifiuti dell'industria ceramica (gres);
- laterizi e calcinacci;
- rocce e terre di scavo;
- loppa d'altoforno.

La funzionalità dell'impianto sarà tanto maggiore quanto più spinta è la separazione dei materiali già in ingresso. Per questo motivo, durante il conferimento, il materiale viene classificato per categoria e avviato a 3 cumuli distinti posti vicino all'entrata, in particolare:

- materiale di tipo misto, proveniente quasi esclusivamente dalle demolizioni e comprendente ad esempio laterizio, calcestruzzo, asfalto, ceramica, gres, gesso ecc.
- materiale fresato;
- calcestruzzi e cementi (fig. 3.1).



*Fig. 3.1 – C.A.R.: cumulo in ingresso del calcestruzzo*

Alla prima categoria vengono sovente avviati i prodotti delle micro - demolizioni; la piccola quantità di materiale conferito unitamente alla necessità di contenere i tempi di lavoro fanno sì che spesso arrivino piccoli carichi di materiale completamente mescolato per tipologia. Al cumulo di demolizione mista viene normalmente addizionata la loppa di fonderia con una percentuale che non supera il 10%. La pala frontale carica la loppa da un cumulo specifico e la scarica sul cumulo di demolizione mista. Le grandi demolizioni invece si adattano teoricamente meglio alle operazioni di selezione e separazione preventiva dei materiali.

La necessità fondamentale di questo tipo di raccolta è la garanzia sulla qualità del materiale in termini di:

- assenza di rifiuti pericolosi (es. prodotti in eternit);
- presenza di terra: quest' ultima dovrebbe essere assente dai materiali conferiti in quanto peggiora le caratteristiche prestazionali finali del prodotto recuperato.

A questo riguardo vengono praticati controlli sistematici sul materiale in ingresso. La normativa per quanto riguarda questo aspetto è data dal DM 186/06 (ex DM 5/02/98). Il test di cessione viene effettuato in 24 ore e deve riscontrare l'eventuale presenza e consistenza di sostanza organica, solfati, metalli pesanti e naturalmente amianto.

### **3.3 LAVORAZIONI PRESENTI**

L'obiettivo centrale dell'impianto è conferire utilità futura al CDW. Per questo motivo saranno necessarie fondamentalmente due operazioni:

- riduzione dimensionale del materiale. Molto spesso vengono conferiti grossi blocchi ( $\varnothing \approx 1\text{m}$  talvolta) che necessitano di frantumazione.

- separazione in classi granulometriche. Le norme citate in precedenza definiscono le caratteristiche granulometriche per le classi finali di prodotto recuperato.

La riduzione dimensionale è molto importante per svariate ragioni:

- la lavorabilità del materiale si traduce spesso in requisiti di palabilità, cioè buona capacità di un materiale di essere trasportato;
- la riduzione dimensionale, assieme a svariate altre caratteristiche di forma e assortimento del materiale, assicura una capacità maggiore di compattazione da parte dell'operatore durante un uso successivo del materiale, poter abbassare il più possibile l'indice dei vuoti è garanzia di maggiore stabilità futura;
- la riduzione dimensionale opera creando inevitabilmente assortimento del materiale: un buon assortimento interviene, come detto al punto precedente, nell'abbassamento dell'indice dei vuoti.

Sono presenti due gruppi di frantumazione. Il primo frantoio, di tipo fisso, è collocato in modo da servire essenzialmente i tre grandi cumuli in ingresso. Da essi una pala gommata caricherà il materiale ed alimenterà direttamente il frantoio. Per la preventiva parziale frantumazione di blocchi troppo grandi ci si serve di un escavatore munito di martello demolitore (fig. 3.2).



*Fig. 3.2 – escavatore con martello demolitore*

In linea è presente una torre di vagliatura per la separazione dimensionale. Al secondo frantoio, di tipo mobile, solitamente sono destinate funzioni più specifiche, come la frantumazione delle traversine ferroviarie. Anche in questo secondo frantoio è presente una fase di vagliatura. Vedremo nella parte successiva, oltre alle caratteristiche ingegneristiche di un generico processo di frantumazione anche le caratteristiche dei principali tipi di frantoio, giustificando la scelta di uno o dell'altro tipo di macchina in merito alla specificità funzionale richiesta.

### 3.4 LA FRANTUMAZIONE: CARATTERISTICHE

La frantumazione è un insieme di operazioni tese alla suddivisione di corpi solidi in frammenti di dimensione minore, grazie ad azioni fisiche esterne. Vogliamo innanzitutto definire gli aspetti che riguardano in generale la riduzione dimensionale di un materiale. Un parametro di caratterizzazione immediata per la fase di comminuzione di un materiale è il rapporto di riduzione. Definiamo:

$$n = \frac{D_{max}}{d_{max}}$$

$n$  è definito come rapporto di riduzione e s'intende con esso quante volte riduciamo il materiale nel passaggio in una macchina di comminuzione. È il rapporto tra il diametro massimo  $D$  del materiale fornito dalla curva granulometrica prima della frantumazione e il diametro massimo  $d$  del materiale fornito dalla curva granulometrica dopo la frantumazione.

Spesso  $n$  viene definito in modo leggermente diverso, probabilmente con più coerenza:

$$n = \frac{D_{80max}}{d_{80max}}$$

In pratica ci si rende conto che l'andamento di una curva granulometrica muovendosi verso il 100% del passato ha un andamento asintotico. Per piccole variazioni di percentuale si potrebbero quindi avere grosse oscillazioni di diametro con incertezza sulla valutazione esatta del diametro. Quindi si prende il diametro corrispondente all'80% del passato e si fa il rapporto di questi due nuovi valori.

Il rapporto di riduzione ci da un'idea immediata del tipo di processo con cui abbiamo a che fare. Abbiamo definito tale parametro per poter definire la differenza teorica tra “frantumazione” e “macinazione”. Si parla di frantumazione quando i rapporti di riduzione del processo si aggirano intorno a 2÷20 mentre la macinazione riguarda processi di comminuzione più spinti, con rapporti di riduzione attorno a 15÷200. La frantumazione avviene con un frantoio, la macinazione con un mulino. Non si tratta di valori assoluti, spesso nella pratica tali valori oscillano e non di rado si sente parlare di frantoi con rapporti di riduzione anche attorno a 20÷30. In generale sono la macchina stessa e le forze agenti che distinguono un processo di frantumazione da uno di macinazione.

La frantumazione può avvenire a livelli diversi secondo il rapporto di riduzione; in generale parliamo di:

- frantumazione primaria: riguarda solitamente la riduzione dimensionale dei grandi blocchi naturali. Possiamo pensare che da una dimensione massima del blocco in entrata  $\approx 1$  m si possa passare ad una dimensione massima del prodotto  $\approx 10$  cm. Si parla generalmente di

- frantumazione primaria quando i rapporti di riduzione in gioco sono bassi ( $n = 3 \div 4$ );
- frantumazione secondaria: la riduzione dimensionale è più spinta. Possiamo definire  $n = 4 \div 8$ . Indicativamente definiamo le dimensioni massime in ingresso  $\approx 10$  cm e in uscita dal processo  $\approx 25$  mm;
- frantumazione terziaria - granulazione: arriviamo con questa fase alle dimensioni del pietrischetto  $\approx 6 \div 25$  mm.

Oltre che in base ai rapporti di riduzione la frantumazione si caratterizza anche per le finalità cui deve assolvere. Sappiamo che un processo industriale deve tener conto per forza delle finalità di un processo eventuale di frantumazione in quanto una maggior frammentazione, quando non richiesta, è inutile spreco di energia. Anche in questo caso possiamo distinguere in:

- frantumazione semplice: si tratta dell'operazione di frammentazione al di sotto di un calibro predefinito senza considerazioni sulla granulometria del prodotto. È l'operazione che si esegue quando ad esempio pure necessità di trasporto impongono una riduzione dimensionale;
- frantumazione spinta: si rivolge l'attenzione alla percentuale di fini. In questo caso si cerca di avere una percentuale di materiale più fine del limite superiore imposto maggiore possibile. È il caso che si presenta quando si cerca di avere una superficie specifica del prodotto molto elevata;
- frantumazione ridotta: si cerca stavolta di ridurre il più possibile la sur - frammentazione per ragioni di inutilità (si cerca quindi di rendere più economico il processo) o per ragioni di dannosità. Esistono casi infatti in cui troppo fine causa perdita di valore o difficoltà di recupero;
- frantumazione differenziale: quando un materiale si presenta eterogeneo dal punto di vista delle caratteristiche geo - meccaniche si può operare con una frammentazione che privilegi i costituenti più friabili rispetto ai più duri;
- frantumazione di forma: sovente avviene che l'utilità di un materiale dipenda anche dalla sua forma. Processi di frantumazione differenti creano frammenti di forma diversa. Accade nella pratica che la forma richiesta possa essere quella di grani cubici (per esempio per le materie termoplastiche) o che la forma dei frammenti influenzi la resistenza finale (materiali stradali, inerti per il calcestruzzo);
- crio - frantumazione: ci si serve di temperature molto basse per la frantumazione;
- frantumazione combinata: in questo caso le operazioni di frantumazione sono combinate nella stessa macchina con operazioni più o meno complementari.

Da quanto detto emerge la necessità di porsi alcune domande. I processi di frantumazione di inerti

CDW quindi sono da considerarsi alla luce di una totalità di esigenze finali. Abbiamo ricordato come la percentuale di fini sia un parametro di interesse per noi. Da essi, come vorremmo chiarire nei capitoli successivi, dipenderà, in misura da determinare, la resistenza di un'opera. Ovviamente non si tratta dell'unica esigenza che abbiamo. Quali considerazioni potremmo fare sulla forma di un frammento, sulla resistenza che un insieme di frammenti della stessa forma potrebbero garantire piuttosto che frammenti di altra forma o di natura differente rimescolati?

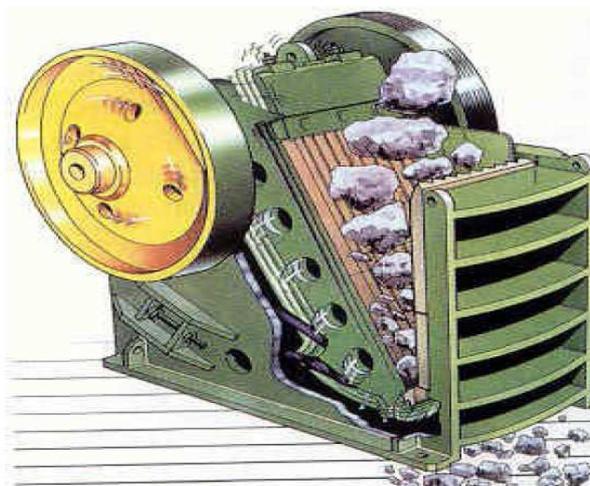
Inoltre, come si può eventualmente agire per controllare quest'ultimo parametro? Nel prossimo paragrafo daremo qualche indicazione sui principali tipi di frantoi per riuscire a verificare la coerenza delle scelte impiantistiche effettuate.

### 3.5 PECULIARITÀ DEI FRANTOI

Rivolgiamo la nostra attenzione ai meccanismi che regolano la frantumazione di un materiale. Abbiamo detto che un primissimo parametro, non sempre sufficiente, per la caratterizzazione di un processo di comminazione, è il rapporto di riduzione. Un frantoio però, può essere riconosciuto anche in base alle forze che mette in gioco. Nella pratica esistono svariati tipi di frantoio, ognuno dei quali mette in campo azioni o somme di azioni specifiche, in particolare ricordiamo:

- frantoi a mascelle a semplice o doppio effetto;
- frantoi rotativi;
- cilindraie;
- frantoi ad urto – frantoi a martelli.

La prima categoria è quella dei macchinari più antichi. L'inventore di questo tipo di macchine operanti per compressione lenta fu Blake.



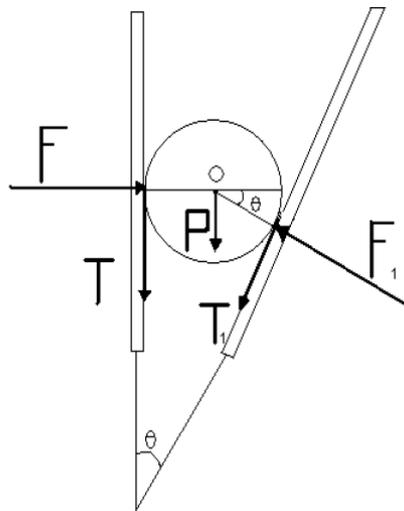
*Fig. 3.3 – frantoio a mascelle*

La macchina a compressione Blake è sostanzialmente costituita da due mascelle, una fissa e una

mobile, all'interno delle quali viene rovesciato il materiale da frantumare. La mascella mobile è azionata dal movimento oscillatorio attorno ad un asse orizzontale; è l'albero di comando che trasmette il moto, direttamente o con sistemi di demoltiplicazione. Se il moto è trasmesso direttamente parliamo di frantoi a semplice effetto, nel caso contrario si parla di frantoi a doppio effetto; sono proprio questi ultimi quelli inventati da Blake. Abbiamo detto che il materiale da frantumare viene caricato dall'alto. Possiamo definire la condizione di presa:

$$\theta \leq 2\varphi$$

L'angolo che sussiste tra le due mascelle è indicato con  $\theta$  mentre  $\varphi$  è l'angolo di attrito del materiale. Se tale condizione viene sottovalutata potrebbe non aversi una frantumazione corretta in quanto non si avrebbe una presa efficace del materiale all'interno delle mascelle.

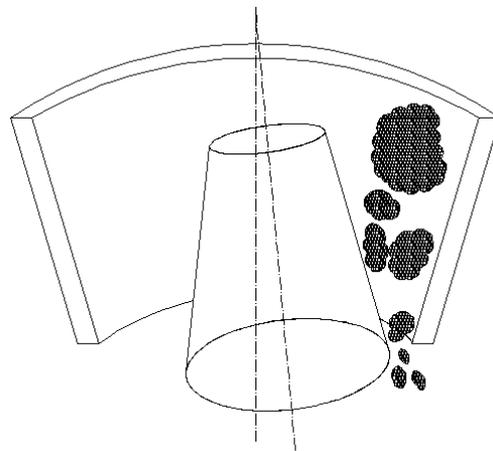


*Fig. 3.4 – angolo di presa e forze in gioco in un frantoio a mascelle*

I blocchi caricati nel frantoio quindi vengono sottoposti dalle mascelle ad uno sforzo di compressione che, superato il limite elastico, provoca la rottura per schiacciamento. Il materiale così ridotto di dimensioni può avanzare e scendere tra le mascelle. Riuscirà infine ad uscire dal frantoio se la sua dimensione sarà inferiore o al limite paragonabile alla distanza inferiore tra le mascelle.

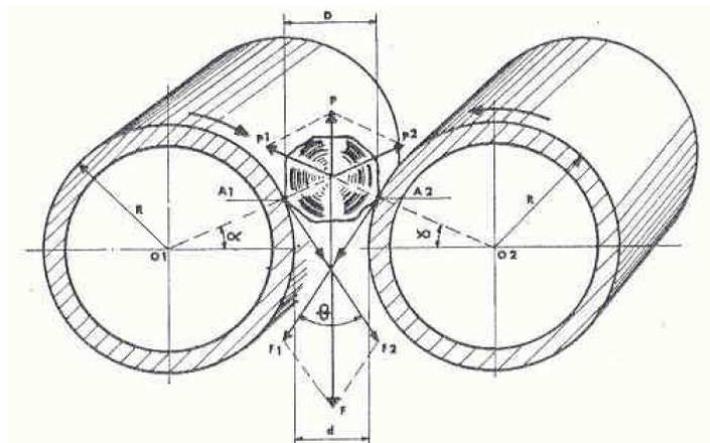
Problemi da non sottovalutare sono i rischi di colmatura e di bloccaggio: con l'aumentare del grado di finezza si deve provvedere ad un'alimentazione molto regolare, con un alimentatore specifico. Diciamo che man mano che il materiale scende nella camera di frantumazione il grado di finezza aumenta mentre la percentuale dei vuoti presenti nel materiale diminuisce. La macchina si bloccherebbe se tale percentuale di vuoti venisse totalmente riempita. Tale situazione rappresenta un limite alla capacità di tale macchina. Per questo motivo le mascelle possono essere conformate opportunamente, in modo da non far diminuire il volume a disposizione o da farlo aumentare verso l'uscita.

Passiamo ad analizzare i frantoi rotativi. Sono noti anche col nome di idroconi e sono schematizzabili in una carcassa tronco – conica all’interno della quale un corpo conico dotato di movimento eccentrico schiaccia il materiale contro le pareti. Si tratta quindi di parenti stretti dei frantoi a mascelle se rivolgiamo la nostra attenzione esclusivamente alle forze in gioco. Infatti il cono mobile interno si avvicina alle generatrici della parete concava fissa, permettendo poi al materiale frantumato di scivolare in basso per gravità quando se ne allontana. Ad una primissima analisi risulta evidente che uno dei possibili problemi di questa macchina è l’intasamento: si tratta infatti di una macchina cui sono destinate solitamente funzioni di frantumazione secondaria. Esiste un sistema di scarico automatico del materiale controllato da una centralina di pressione. Se il cono si blocca la pressione sale, l’albero quindi automaticamente si abbassa scaricando direttamente il materiale e ripristinando la situazione iniziale.



*Fig. 3.5 – meccanismo di frantumazione all’interno di un frantoio rotativo*

Per quanto riguarda le cilindraie possiamo schematizzarne il funzionamento mediante due rulli che, ruotando intorno ai loro assi disposti in parallelo, esercitano una compressione lenta sul materiale immesso fra essi, provocandone la rottura (fig. 3.6).



*Fig. 3.6 – forze in gioco in una cilindraia*

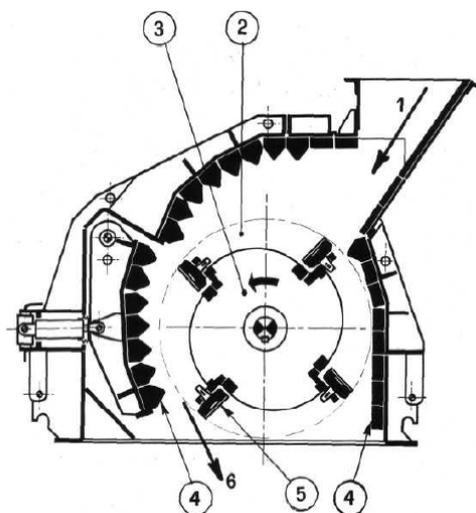
Il principio di funzionamento è immediatamente comprensibile, vogliamo però dimostrare

brevemente quale sia la condizione di presa, cioè di non slittamento del materiale all'interno dei due rulli.

Definite le due componenti di attrito  $F_1$  ed  $F_2$ , tangenziali al rullo e al blocco nei loro punto di contatto, possiamo definirne la risultante  $F$ , che sarà diretta verso il basso e contribuirà a far avanzare il blocco verso il basso. Però possiamo definire anche le due azioni di compressione  $P_1$  e  $P_2$ , che sono invece perpendicolari al blocco e quindi rivolte verso l'alto. La risultante  $P$  di queste ultime due azioni sarà rivolta verso l'alto. Ovviamente se  $P > F$  il blocco tenderà ad essere rigettato verso l'alto, più o meno violentemente a seconda della differenza tra le risultanti  $P$  ed  $F$ . Quindi vorremmo definire una condizione di presa, alla stessa maniera in cui la definimmo per i frantoi a mascelle, geometricamente intuibile come  $\theta = 2\alpha \leq 2\varphi$ .

Esiste una larga gamma di frantoi a cilindri. Ricordiamo che la sperimentazione ha portato alla costruzione di frantoi a cilindri dentati. Il funzionamento è il medesimo, se non che le condizioni di presa sono nettamente aumentate e il prodotto che risulta dalla frantumazione ha ugualmente caratteristiche di sovra - macinazione limitate. Va detto infatti che i frantoi a cilindri di solito si impiegano per frantumazioni secondarie o terziarie, con la caratteristica di avere scarsità di materiale fine prodotto e una buona regolarità sulla forma dei frammenti.

Veniamo infine alla descrizione dei frantoi ad urto (fig. 3.7). La macchina, fondamentalmente è composta dalle seguenti parti principali:



*Fig. 3.7 – schema di frantoio a martelli*

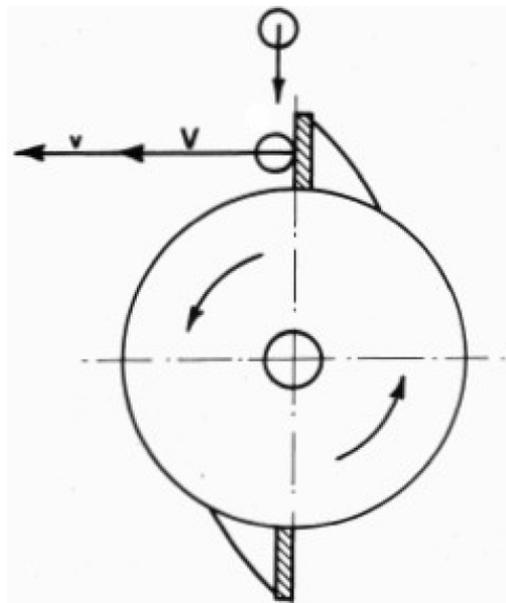
- la carcassa: è il telaio portante della macchina costituito da due fiancate che fanno da supporto per il rotore e sono internamente protette da parti d'usura sostituibili;
- i porta corazze (figura 5, n. 4): possono essere fissi o registrabili. Costituiscono la zona di impatto secondario del materiale avvolgendo a mantello il rotore. Anch'essi sono rivestiti con parti d'usura sostituibili e sono accessibili a macchina aperta e carter smontati.

- Il rotore (figura 5, n. 3): possiede un'elevata velocità angolare e ruota all'interno della carcassa.

Non esistono più gli effetti di frantumazione dovuti alla lenta compressione, come negli altri casi ma il meccanismo di frantumazione è dovuto ad un effetto di choc prodotto dalla rapida applicazione di energia d'urto. Sul rotore sono fissate alcune pale rigide chiamate martelli fissi (figura 5, n. 5), rivestiti da piastre di usura. Il materiale al solito entra dalla parte superiore tramite la bocca di carico (figura 5, n. 1) all'interno della camera di frantumazione (figura 5, n. 2) ove si frantumerà mediante:

- impatto diretto contro ai martelli fissati al rotore in movimento: in questo caso la frantumazione è detta diretta poiché si suppone che i corpi da frantumare siano fermi o dotati di velocità trascurabile rispetto a quella dei martelli, dai quali vengono colpiti;
- urto con altro materiale;
- impatto contro le corazze che rivestono la carcassa della camera di frantumazione: stavolta la frantumazione è detta indiretta siccome sono i materiali a possedere una elevatissima velocità andando a colpire le piastre d'urto fissate alla carcassa.

Facciamo una breve trattazione semplificata di quanto avviene nella camera di frantumazione dal punto di vista delle velocità in gioco e della forza d'urto. Introduciamo innanzitutto il coefficiente di restituzione.



*Fig. 3.8 – rotore del frantoio a martelli*

Definite la velocità periferica del rotore  $V$ , la velocità della particella scagliata  $v$ , ammesso che il blocco da frantumare prima dell'urto possedesse una componente orizzontale della velocità nulla posso definire il coefficiente di restituzione come:

$$r = - \frac{V-v}{V-0} \quad (1)$$

si tratta quindi del rapporto tra la differenza delle velocità dopo l'urto e la differenza delle velocità prima dell'urto, ammesso che il rotore non perda velocità dopo il contatto. Si deduce dalla relazione che:

$$v = V(r+1) \quad (2)$$

Se abbiamo a che fare con un urto ideale completamente anelastico, cioè con un corpo da frantumare a comportamento perfettamente plastico, allora la sua velocità  $v$  dopo l'urto sarà uguale alla velocità periferica del rotore  $V$  e sarà trascinato con la medesima velocità. In questo caso  $r = 0$ . Nel caso altrettanto ideale di urto completamente elastico  $r = 1$  e il blocco acquisterà quindi dopo l'urto una velocità doppia rispetto a quella del rotore. Nella realtà i coefficienti di restituzione tipici sono dell'ordine di  $0,5 \div 0,7$  e dipendono dalla natura intrinseca del materiale.

Passiamo a considerazioni sulla forza d'urto. Sappiamo la forza  $F$  essere il prodotto di massa  $M$  e accelerazione, quest'ultima a sua volta esprimibile come  $v/t$ :

$$F = M \frac{v}{t} \quad (3)$$

Il tempo di applicazione varia. Assumiamo che per materiali perfettamente elastici si possa parlare di  $10^{-3}$  secondi e per materiali decisamente più plastici sia  $2 \cdot 10^{-3}$  secondi. Sostituendo (2) nella relazione precedente (3) otterremo:

$$F = (1+r) V \frac{M}{t} \quad (4)$$

Quindi possiamo affermare che tanto più elastico è il materiale da frantumare tanto maggiore sarà la velocità acquisita. dunque l'energia di frantumazione sarà legata alla velocità, all'elasticità della roccia e alla sua massa.

Da quanto detto finora emerge che alcune delle limitazioni all'efficacia della macchina sono:

- abrasività del materiale: se il contenuto di silice  $\text{SiO}_2$  è alto i martelli vengono usurati molto velocemente. Solitamente corazze e martelli sono di acciaio arricchito al 12 – 14 % di Manganese; la resistenza all'abrasione così viene notevolmente incrementata. Potremmo definire il 6% come il limite al contenuto di silice oltre il quale sarebbe il caso di prendere in considerazione altri tipi di frantoio;
- attenuazione dell'effetto di frantumazione dovuto a rocce umide ad alto contenuto argilloso. Per materiali agglomeranti infatti l'urto risulta meno efficace e più attenuato.

È importante sottolineare altri due aspetti importanti del funzionamento di queste macchine:

- elevato rapporto di riduzione (fino a  $n=30$ ) e notevoli capacità;

- risposta del materiale di tipo fragile.

Sono due aspetti fondamentali per noi poiché in relazione alle finalità del nostro impianto la scelta è automaticamente orientata su quest'ultima tipologia di macchine. Abbiamo detto che l'alimentazione, a causa della natura spesso disomogenea del materiale, non è molto regolare. Spesso il frantoio è alimentato con blocchi di varia natura per dimensioni e tipologia. Un elevato rapporto di riduzione consentirà buona capacità di riduzione dimensionale con un solo ciclo di frantumazione. Il pericolo di intasamento, grazie alla notevole capacità, è davvero scarso. L'applicazione di una forza d'urto inoltre genera una risposta più fragile. Quest'ultimo aspetto è da sottolineare. Uno degli scopi principali della frantumazione di materiale inerte derivante dalle demolizioni è la separazione più efficace possibile del ferro dal calcestruzzo. Non sarebbe ammissibile infatti che il ferro rimanesse "sporco" perché ciò richiederebbe un ulteriore trattamento prima di poterlo finalmente avviare all'acciaieria. Ebbene i frantoi ad urto sono da questo punto di vista molto efficienti, generando un'ottima separazione dei due elementi. Sono questi i motivi che hanno reso i frantoi a martelli le macchine più idonee alla preparazione dei materiali stabilizzati per il settore delle costruzioni stradali.

### 3.6 FRANTOIO FISSO

La macchina è progettata per la frantumazione di materiale inerte allo stato lapideo o tondo, nei limiti di potenza, velocità, pezzatura e portata elencati di seguito. Al solito una corretta alimentazione significa:

- evitare di immettere argille o fanghi assieme al materiale da frantumare onde evitare possibili intasamenti della macchina;
- evitare il più possibile di inserire metalli o cascami metallici, legno o parti legnose, vetro o assimilabili, plastiche e materiali corrosivi a carattere acido o alcalino.

Riportiamo in tabella 1 le caratteristiche tecniche principali.

<i>Caratteristica</i>	<i>Valore</i>
Potenza motrice richiesta ( min. – max.)	110 – 160 kW
Velocità rotazione del rotore	500 - 650 giri/min
Pezzatura di alimentazione con materiali naturali ( min. – max.)	50÷300 mm
Pezzatura di alimentazione con conglomerati ( min. – max.)	50÷500 mm
Alimentazione (min. – max.)	45÷90 t/h

Rumorosità a vuoto a 1 m	76 db(A)
Rumorosità in funzionamento a 1 m	84 db(A)
Spessore piastre protezione fiancate	20 mm
Corazze/martelli	Acciaio Mn
Protezioni rotore	Acciaio Mn

*Tab. 1 – caratteristiche del frantoio fisso*

Le misure della pezzatura di alimentazione sono indicative. Ci si riferisce a materiale tondo; per materiali di forma diversa si può far riferimento al corrispondente volume. Per le misure di rumorosità si è testato un calcare di media durezza.

I rischi maggiori derivanti dall'uso di una macchina del genere sono:

- emissione di polveri: a tale riguardo si raccomanda di non immettere nel frantoio materiali che per loro natura o per effetto di inquinanti presenti nel materiale vergine diano origine durante la frantumazione a polveri od aerosol nocivi per ingestione o inalazione;
- rumore: ricordiamo che l'esposizione personale quotidiana ad un livello di pressione sonora superiore a 85 db(A) può provocare deficit uditivo. Nell'utilizzo corrente del frantoio non è raro che i livelli di rumore nominali vengano superati. Sarà quindi necessario indicare tale pericolo e fornire al personale gli appositi dispositivi di protezione individuale;
- proiezione di schegge: dalla bocca infatti possono uscire schegge di materiale frantumato. Queste ultime saranno intercettate tramite catene poste all'entrata della tramoggia di carico o da paratie di gomma antiabrasiva.

Il rendimento della macchina in termini di curva granulometrica è influenzabile da svariati parametri. Innanzitutto dalla portata di alimentazione, subordinata alla potenza del motore; velocità del rotore e stato di usura dei martelli concorrono a loro volta alla frantumazione più o meno spinta del materiale. Da ultimo va ricordato che nella macchina è presente un porta corazze mobile, regolabile. Di conseguenza la distanza tra questo e il rotore potrà essere variata modificando la curva granulometrica in uscita.

### **3.7 GRUPPO DI FRANTUMAZIONE SEMIFISSO**

Si tratta di un frantoio mobile dotato di slitte e ad esso solitamente si ricorre per la frantumazione delle traversine ferroviarie. L'alimentazione è elettrica: con una potenza installata complessiva di 132 kW esso può rifornirsi dalla rete o da un gruppo elettrogeno. Nel nostro caso l'alimentazione è assicurata da un gruppo di potenza.

Tutte le parti sono state ottimizzate per lo specifico utilizzo relativo alle traversine, ovviamente nulla vieta di utilizzarlo anche per materiali di natura diversa. Vedremo nei paragrafi successivi le caratteristiche funzionali principali delle varie parti.

Un escavatore gommato dotato di ragno idraulico preleva le traversine e le deposita direttamente nella tramoggia di alimentazione di capacità pari a circa 15 m<sup>3</sup> (fig. 3.9).



*Fig. 3.9 – specifica forma della tramoggia del frantoio semi - fisso*

La tramoggia di questo tipo di frantoio non è molto inclinata sull'orizzontale ed è sagomata in modo da accogliere facilmente le traversine. Per una corretta alimentazione del frantoio è presente anche un alimentatore vibrante che assolve sostanzialmente a due importanti funzioni:

- il materiale non è omogeneo. Nella maggior parte dei casi sarà sviluppato maggiormente in una dimensione. Tale discorso è ancor più valido nel caso delle traversine. L'alimentazione sarà tanto più efficace quanto più il materiale entrerà “di punta” e non di “fianco”. A tale scopo la vibrazione di tale alimentatore consente al materiale di disporsi con la dimensione maggiore tangenziale al senso di scorrimento, evitando intasamenti e ottimizzando il lavoro dei martelli;
- si riesce preventivamente a scartare gli elementi minuti tramite un elemento sgrossatore. Il rendimento della macchina quindi sarà incrementato. Tale sgrossatore a barre seleziona preventivamente la frazione 0-40 mm, consentendo di stoccarla direttamente a cumulo o di immetterla nuovamente nel ciclo a valle della frantumazione per mezzo di un canale.

L'alimentatore è sostanzialmente costituito da un canale vibrante in carpenteria elettrosaldata. Un piano cieco ha la funzione di ricevere il materiale dall'alto attutendo i colpi dovuti alla caduta mediante corpi elastici. La vibrazione è data da una coppia di motovibratori.

Il frantoio è dotato di un impianto interno di abbattimento delle polveri. Durante la frantumazione

infatti si cerca di abbattere l'uscita delle polveri mediante invio di acqua atomizzata. Gli ugelli sono collocati sulla bocca di carico del frantoio e sulla cappottatura che racchiude la zona di scarico del frantoio.

Il materiale appena frantumato viene quindi raccolto da un estrattore vibrante. La presenza di questo apparato è necessaria in quanto la proiezione a forte velocità del materiale rischierebbe di usurare eccessivamente o lacerare il tappeto del nastro di evacuazione. L'estrattore è costituito da un canale a sezione trapezoidale. Anche in questo caso corpi elastici provvedono ad isolare l'elemento dal telaio di sostegno e una coppia di motovibratori conferisce il moto.

Questa tipologia di impianto prevede l'utilizzo di 6 nastri trasportatori. In uscita dall'estrattore quindi è presente un nastro NT 1600 x 10.00, che trasferisce tutto il materiale al separatore magnetico a nastro. La funzione di tale macchina è ovviamente estrarre i materiali ferrosi e recapitarli in apposito contenitore. Il principio su cui tale macchina si basa è la creazione di un campo magnetico mediante una calamita.



*Fig. 3.10 – separatore magnetico*

Il montaggio avviene in sospensione longitudinale in corrispondenza del nastro NT 1600 x 10.00 ad una distanza compatibile con la curva magnetica specifica del separatore.

I due nastri successivi NT 650 x 3.70 e NT 650 x 9.60 mandano il materiale in testa al gruppo di selezione per la classificazione granulometrica e la separazione degli elementi leggeri. Nelle traversine è infatti presente un'anima in gomma, che deve essere separata.

Un vaglio vibrante consente di ottenere due pezzature in uscita. Nel caso si frantumino traversine avremo i due prodotti:

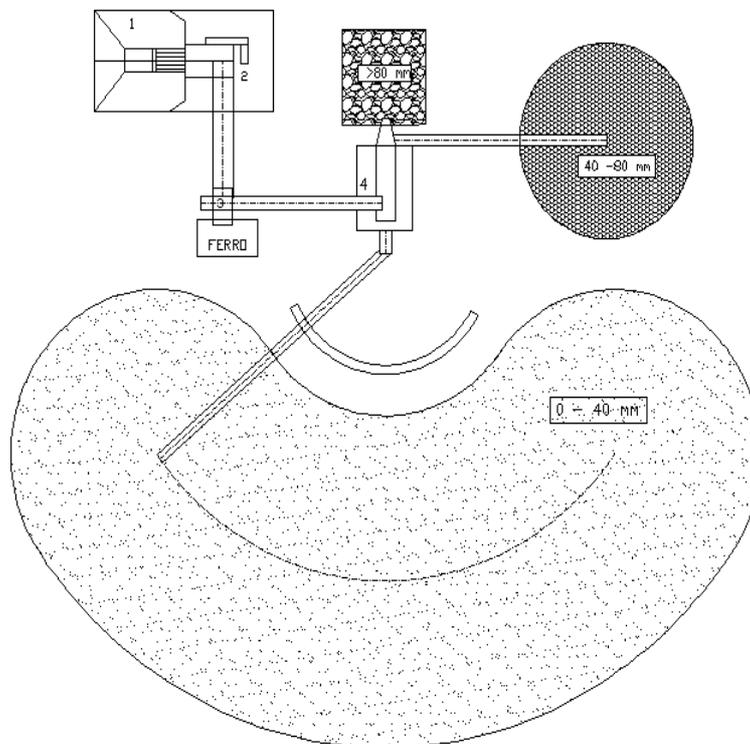
- breccia di traversine 40 – 70 mm;
- stabilizzato di traversine 0 – 30 mm.

La classe granulometrica minore viene recapitata al cumulo mediante i nastri NT 500 x 3.50 e il nastro brandeggiante NT 500 x 18.60 mentre l'altra pezzatura è avviata al cumulo tramite un nastro NT 500 x 11.60.

Riportiamo i dettagli costruttivi e quelli relativi alla produttività dell'impianto nella tabella.

<i>Caratteristica</i>	<i>Valore</i>
Capacità tramoggia di alimentazione	15 m <sup>3</sup>
Pezzatura in alimentazione per materiali naturali ( min – max)	50 – 300 mm
Pezzatura in alimentazione per conglomerati ( min – max)	50 – 500 mm
Produzione	60 – 140 t /h
Dimensione bocca camera di frantumazione	808 x 685 mm
Potenza installata	132 kW
Pressione sonora con funzionamento a regime	80 / 85 dbA / 1m

*Tab. 2 – caratteristiche del gruppo semi – fisso*



*Fig. 3.11 – disposizione impiantistica del frantoio mobile*

Nella figura 7 troviamo chiara indicazione della disposizione impiantistica. Le parti principali

sono numerate e precisamente:

1. tramoggia di alimentazione;
2. frantoio a martelli;
3. separatore magnetico;
4. torre di vagliatura.

### **3.8 LA VAGLIATURA: CARATTERISTICHE**

Per consentire ai nostri prodotti di soddisfare le specifiche di tipo granulometrico dovremo ricorrere certamente ad un processo di classificazione dimensionale. Tale processo viene distinto in:

- classificazione diretta o vagliatura: viene effettuata per mezzo di vagli, griglie etc. e permette di suddividere le pezzature in base alle aperture delle maglie di tali apparecchi;
- classificazione indiretta o classificazione: il metodo utilizzato per separare le diverse granulometrie è basato sulla velocità di sedimentazione delle particelle in un fluido (acqua).

Dato che la vagliatura si rivolge normalmente a dimensioni non inferiori al millimetro è proprio questo il processo che l'azienda impiega per la separazione dimensionale.

Un vaglio non è altro che una superficie munita di aperture uguali e calibrate, normalmente di forma quadrata. Il lato di tale quadrato ovviamente è la dimensione della maglia. Il processo di vagliatura quindi non è altro che la separazione del passato, cioè il materiale che attraversa la superficie, dal rifiuto, ossia il materiale che non riesce ad attraversare la superficie forata. Un tempo la superficie dei vagli era inclinata per permettere il moto relativo tra superficie vagliante e materiale da classificare. In questo modo si facilitava anche l'evacuazione del rifiuto. Oggi si conferisce al vaglio, o alla torre di vagliatura (nel caso più superfici vaglianti siano disposte una sopra l'altra) un movimento vibratorio; in tale maniera l'inclinazione delle superfici vaglianti può essere ridotta o assente. Nel caso non vi sia inclinazione sarà il moto particolare della superficie a conferire alle particelle una determinata direzione.

Prendiamo ora in considerazione i due parametri fondamentali per la corretta gestione di una torre di vagliatura:

- efficienza;
- capacità.

L'efficienza  $E$  non è nient'altro che la quantità percentuale di particelle di dimensioni inferiori alla maglia che si trovano nel passato rispetto a quelle presenti in alimentazione.

Indicando con  $A$ ,  $P$ ,  $R$  le portate in alimentazione, passato, rifiuto avremo sicuramente l'equazione

di continuità:

$$A = P + R \quad (5)$$

Indicando inoltre la percentuale di particelle con dimensione inferiore alla maglia rispettivamente nelle portate in alimentazione, passato e rifiuto con  $a$ ,  $p$ ,  $r$  avremo che la (5) si può anche scrivere:

$$a \cdot A = p \cdot P + r \cdot R \quad (6)$$

l'espressione dell'efficienza  $E$  sarà:

$$E = \frac{pP}{aA} \cdot 100 \quad (7)$$

Sostituendo l'espressione ricavata per  $R$  dalla (5) nella (6), raccogliendo e sostituendo infine nella (7) otterremo l'espressione dell'efficienza nella forma solitamente impiegata.

$$a \cdot A = p \cdot P + r \cdot (A - P) \quad \Rightarrow \quad A \cdot (a - r) = P \cdot (p - r) \quad \Rightarrow \quad \frac{P}{A} = \frac{a - r}{p - r}$$

$$\Rightarrow \quad E = \frac{p \cdot (a - r)}{a \cdot (p - r)} \cdot 100$$

Tenendo conto che  $p = 100$  se il vaglio non è rotto e le condizioni sono ottimali otterremo infine:

$$\Rightarrow \quad E = \frac{100 \cdot (a - r)}{a \cdot (100 - r)} \cdot 100$$

Veniamo ora ad una breve discussione della capacità di un vaglio. Indicheremo tale capacità con  $C$ :

$$C = k \cdot m \cdot S$$

dove:

$k$  = parametro indipendente dal modo di funzionare del vaglio

$m$  = lato maglia in mm

$S$  = superficie vagliante in  $m^2$

Capacità ed efficienza sono legate. Il massimo rendimento è ottenibile nella situazione in cui il vaglio abbia un'alimentazione monostrato. Indicheremo la capacità corrispondente a tale soluzione con  $C^*$ . Se alimentiamo con una portata inferiore a  $C^*$  otterremo un fenomeno di rimbalzo del materiale e un conseguente decremento del rendimento  $E$ . Un'alimentazione eccessiva al contrario crea fenomeni di "oscuramento", il materiale fine viene trascinato dal materiale sottostante non riuscendo nel suo percorso a venire a contatto con la tela e ad attraversarla.

In commercio si trovano molte tipologie di superfici vaglianti. Di seguito riportiamo un elenco dei principali tipi, unitamente alle caratteristiche principali:

- sgrassatori a barre: si impiegano per vagliature grossolane. La sezione di ogni barra è

trapezoidale per evitare intasamenti. Le barre sono disposte parallelamente una all'altra e tenute in posizione da barre trasversali;

- lamiere perforate: si tratta di lamiere dimensionate in modo tale da sostenere il peso del materiale in ingresso recanti fori di diversa forma. Le aperture tipiche sono quadrate, rettangolari con lati minori arrotondati o circolari. Possono essere punzionate o stampate e il problema tipico da cui sono affette è l'intasamento dovuto alla percentuale vuoto/pieno, ossia la scarsità della superficie libera di passaggio delle particelle;
- tele tessute: quando non si possono utilizzare griglie fini per motivi di finezza del materiale si utilizzano tele normalmente in acciaio al alto tenore di carbonio ( $C > 0,5 \%$ );
- reti Texo a maglia quadra: sono le classiche reti per vibrovagli in acciaio con  $R = 160/180 \text{ kg/mm}^2$ ;
- filtri Johnson: sono un'evoluzione degli sgrossatori a barre avendo in più la possibilità di effettuare vagliature fini. La struttura è molto rigida e robusta: un filo di sezione trapezoidale viene avvolto e saldato intorno a barre di supporto longitudinali specifiche per tale applicazione. Il rischio di intasamento è annullato poiché l'apertura continua permette alle particelle di avere soltanto due punti di contatto con la superficie filtrante;
- reti in poliuretano (sovalit): sono state introdotte per la loro buona capacità di vagliare materiali intasanti e per la notevole resistenza all'abrasione. Tale resistenza le rende talvolta preferibili alle reti in acciaio che, pur costando meno, durano anche meno. Fondamentalmente sono costituiti da un piano vagliante in poliuretano con anima in acciaio. La flessibilità dell'area di vagliatura riduce i pericoli di intasamento. Altre rimarchevoli qualità di tali reti sono la resistenza alla corrosione e la riduzione del rumore di esercizio;
- reti in gomma: anche in questo caso un inserto metallico protegge e sostiene il vaglio in gomma. Le qualità sono assimilabili a quelle dei vagli in poliuretano. In entrambi i casi va però ricordato che sebbene la flessibilità e l'elasticità del materiale garantiscano un'ottima resistenza all'urto di contro favoriscono inevitabilmente il rimbalzo del materiale.

### **3.9 VAGLIO VIBRANTE VTL 1500X5000 IIIA**

La vagliatura del materiale in uscita dal frantoio fisso è affidata ad una torre (fig. 3.12) in grado di separare 4 classi granulometriche:

- $>80 \text{ mm}$
- $40 - 80 \text{ mm}$
- $0 - 30 \text{ mm}$

- 0 – 9 mm



*Fig. 3.12 – torre di vagliatura del frantoio fisso*

Il materiale passa attraverso le superfici forate fino alla dimensione massima di 80 mm. Oltre tale dimensione si rende necessario un ricircolo all'interno del frantoio.

Riportiamo nella tabella 3 le caratteristiche generali e tecniche principali.

<i>Caratteristica</i>	<i>Valore</i>
Numero piani di vagliatura	3
Dimensioni piano di vagliatura	1500 mm x 5000 mm
Superficie utile di vagliatura per piano	6,8 m <sup>2</sup>
Massimo regime di lavoro	1036 giri/min
Tipo di vagliatura	a secco
Potenza installata	18,5 kW
Alimentazione elettrica	220 – 380 V ÷ 50 Hz

*Tab. 3 – caratteristiche del vaglio vibrante VTL 1500x5000 IIIa*

La macchina è costituita fondamentalmente da un telaio di sostegno che ha il compito di sorreggere le fiancate e l'intero corpo vaglio. L'isolamento elastico dal telaio di sostegno è affidato a 4 gruppi di sospensioni brevettate. Si tratta di molle elicoidali in acciaio attraverso le quali l'assorbimento delle vibrazioni è garantito. Le fiancate non sono altro che due lamiere in acciaio recanti i fori per il fissaggio dei piani vaglianti e le sedi dei supporti dell'organo vibrante. I piani vaglianti, reti o lamiere forate, collegano rigidamente le due fiancate e vengono messi in tensione da appositi dispositivi.

Il motore è chiuso e stagno con sistema di ventilazione dall'esterno. La trasmissione del moto

avviene con sistemi di pulegge e cinghie protette da carter in lamiera.

Una parte significativa è il davanzale di carico. La sua funzione è quella di evitare usure localizzate della superficie di vagliatura, distribuendo il materiale uniformemente su di essa.

Per quanto riguarda il funzionamento sono pochi e semplici gli accorgimenti da adottare per un funzionamento ottimale della macchina:

- il carico del materiale va eseguito quando la macchina è in regime normale di funzionamento, ossia funziona al un numero di giri nominale ed è quindi in vibrazione stabile;
- la macchina non deve essere avviata se è rimasto materiale sulle tele oppure ferro; questi andranno rimossi manualmente a macchina spenta;
- la prestazione della macchina è ottimizzabile: una portata troppo elevata diminuisce inevitabilmente la qualità di vagliatura (percentuale di materiale fuori pezzatura). Sarà quindi necessario trovare il rapporto portata/qualità di vagliatura adatto alle proprie esigenze.

### 3.10 VAGLIO VIBRANTE VTL 1000X3000 III 1/2 A

In uscita dal frantoio addetto alle traversine è collocata una torre di vagliatura (fig. 3.13).



*Fig. 3.13 – torre di vagliatura del gruppo semi - fisso*

Il suo compito è quello di separare fundamentalmente due classi granulometriche:

- 40 – 70 mm;
- 0 – 30 mm.

Infatti, come abbiamo già detto, la maggior parte del tempo il gruppo di frantumazione e selezione lavora per ottenere la breccia di traversine 40 – 70 mm e lo stabilizzato di traversine 0 – 30 mm.

Riportiamo nella tabella seguente le caratteristiche generali e tecniche principali.

<i>Caratteristica</i>	<i>Valore</i>
Numero piani di vagliatura	3 e ½
Dimensioni piano di vagliatura	1000 mm x 3000 mm
Superficie utile di vagliatura per piano	2,6 m <sup>2</sup>
Massimo regime di lavoro	1250 giri/min
Tipo di vagliatura	Con docce
Potenza installata	5,5 kW
Alimentazione elettrica	220 – 380 V ÷ 50 Hz

*Tab. 4 - caratteristiche del vaglio vibrante VTL 1000X3000 III ½ A*

Sono state sperimentate le note tele in gomma, ottenendo l'attutimento del rumore ma creando al contempo il problema di rimbalzo del materiale.

Succede spesso che per esigenze di mercato alcune pezzature non vengano prodotte. Non si fa altro quindi che chiudere le relative uscite, mandare i materiali più fini assieme ai più grossolani e inviare nuovamente in testa al frantoio quelli di pezzatura troppo elevata.

### **3.11 CICLI DI LAVORAZIONE USUALI: FRANTUMAZIONE DEL CEMENTO ARMATO**

Il cemento armato in entrata può avere blocchi di dimensione ragguardevole (~1m) . Per tale motivo un escavatore cingolato munito di martello demolitore provvede alla preventiva demolizione dei blocchi troppo grandi.

In questo caso la sola pezzatura producibile economicamente è la 0-30 mm. Abbiamo detto che la torre di vagliatura è composta da 3 tele e separerà quindi 4 pezzature. Nel nostro caso le dimensioni in uscita sono:

>80 mm

40 – 80 mm

0 – 30 mm

0 – 9 mm

La frazione > 80 mm non attraversa nessuna tela. Si accumula in una tramoggia e verrà rimandata in testa al frantoio. La frazione 40 – 80 mm ha un mercato limitato; solitamente un nastro la riporta direttamente in testa al frantoio. La frazione 0 – 30 viene portata dal nastro al cumulo specifico di destinazione “stabilizzato di cemento 0-30 mm” .

Anche la frazione di sabbietta di cemento in questo caso viene avviata al cumulo 0 – 30 mm.

La separazione del ferro avviene tramite calamita.

### 3.12 CICLI DI LAVORAZIONE USUALI: LA DEMOLIZIONE MISTA

Come si è già detto, nel cumulo di demolizione mista viene aggiunto il 10% di loppa di fonderia. Una pala gommata carica la loppa e raggiunge la sommità del cumulo di demolizione mista. Qui scarica e il meccanismo di frana, che si instaura a seguito del caricamento alla base, provvede alla miscelazione tra la loppa e il materiale di demolizione mista. Indicativamente servono 4 benne loppa/ora durante il funzionamento a regime del frantoio.

Le frazioni separate in questo caso sono 3: la frazione 40 – 80 mm (breccia di pietra CAR 40 – 80mm), la frazione 0 – 30 mm (macinato di pietra CAR 0 – 30 mm) e la sabbietta CAR ( 0 – 9 mm)

La sabbietta (fig. 3.14) che si ottiene possiede colori variabili in funzione ovviamente del materiale in entrata: la loppa conferisce un colore tenderà a diventare bruno - nerastro mentre un colore rossiccio viene dato dall'abbondanza di laterizio in ingresso.



*Fig. 3.14 – sabbietta C.A.R.*

Proprio per questo motivo è necessaria sempre una corretta miscelazione per limitare fenomeni di segregazione dei materiali.

Ricordiamo che la sabbietta proviene esclusivamente dalla frantumazione del materiale di demolizione mista.

### 3.13 MACCHINARI

Facciamo una rapida carrellata dei macchinari e impianti ulteriormente presenti in azienda:

- 2 escavatori cingolati: oltre che per la funzione di scavo e movimentazione abbiamo già ricordato che utilizzano anche pinza e martello demolitore;
- 1 escavatore gommato: dotato di pinza viene solitamente impiegato per alimentare il frantoio piccolo con le traversine;
- 1 pala gommata VOLVO 120 C: alle pale sono destinate le funzioni di movimentazione e carico degli automezzi;
- 1 pala gommata VOLVO 120 D
- 1 pala gommata VOLVO 150 E
- 1 miniescavatore KUBOTA : solitamente impiegato per la pulizia sotto ai frantoi;
- 1 carrello elevatore GIOVANNINI 4000 da 4 t;
- impianto di abbattimento polveri per automezzi.

## Capitolo 4

### MERCEOLOGIA E MARCATURA CE DEI PRODOTTI

#### 4.1 PREMESSA

In questo capitolo daremo indicazioni sui prodotti in uscita. Faremo alcune considerazioni sui flussi di materiali prodotti a partire dai relativi materiali in ingresso per analizzare le potenzialità dei frantoi. Daremo inoltre riferimenti normativi e tecnici per inquadrare le prove necessarie alla certificazione CE di ogni materiale in uscita. Riporteremo alcuni risultati forniti dalle prove necessarie alla marcatura dei materiali.

#### 4.2 MATERIALI FRESATI

In ingresso vi è un cumulo dedicato. Grande attenzione è rivolta alla qualità di tale materiale in ingresso che non deve riportare tracce evidenti di materiali della sovrastruttura stradale (es. ghiaia, sabbia, elementi litici). Il trattamento prevede al solito la frantumazione per restituire le pezzature desiderate in uscita

- macinato d'asfalto 0 – 80 mm;
- macinato d'asfalto 0 – 30 mm (fig. 4.1).



*Fig. 4.1 – macinato d'asfalto*

Alcune prove di produzione oraria hanno fornito un dato di circa 144 t/h di materiale fresato trattato.

### 4.3 PIETRA DI FIRENZUOLA

L'arenaria viene recapitata da Firenzuola (FI) e anch'essa stoccata in un cumulo specifico. Si tratta di blocchi scartati provenienti da cave che utilizzano prevalentemente perforazione e sparo. La dimensione quindi di tali blocchi, laddove non sia stata ridotta a monte spesso supera il metro. Per essi si renderà necessaria una demolizione con martello demolitore prima dell'introduzione nel frantoio. Le classi di prodotto in uscita sono due:

- breccia di roccia e arenaria 40 – 80 mm (fig. 4.2);
- stabilizzato di roccia e arenaria 0 – 30 mm.



*Fig. 4.2 – breccia di roccia e arenaria*

Nella tabella 1 riportiamo il test di produttività per tale materiale.

<i>Caratteristica</i>	<i>Valore (t/h)</i>	<i>%</i>
Portata in alimentazione	140 t/h	
Breccia 40 – 80 mm	54,5 t/h	38,9 %
Stabilizzato 0 – 30 mm	59 t/h	42,1 %
Sabbiella 0 – 9 mm	15,5 t/h	11,1 %
Scarto di macinato misto	11 t/h	7,9 %
TOTALE	140 t/h	100%

*Tab. 1 – test di produttività roccia*

### 4.4 CALCESTRUZZO

Il calcestruzzo viene separato in ingresso e avviato al cumulo dedicato. Va detto che la

disomogeneità del materiale che arriva all'impianto per quanto riguarda forma e dimensioni rendono il suo trattamento più oneroso. Abbiamo già ricordato come blocchi molto grandi (~1m) non siano rari, così come la presenza di elementi a prevalente sviluppo longitudinale quali ad esempio:

- pali per viticoltura;
- travature;
- pali illuminazione (fig. 4.3)



*Fig. 4.3 – pali per illuminazione*

Durante il ciclo di lavorazione del calcestruzzo si rende quindi necessaria la presenza costante di un escavatore munito di martello demolitore. Altro problema da non sottovalutare è la presenza del ferro. Larga parte del materiale infatti è armato. Il metallo costituisce un grosso problema per gli elementi di usura dei frantoi quali martelli e portacorazze; infatti è raccomandato dai costruttori di non introdurre nella camera di frantumazione metalli o cascami metallici e di dotarsi di impianti di segnalazione e arresto dell'impianto se esiste il ragionevole rischio che questo possa avvenire. In uscita dal frantoio è presente una calamita per l'intercettazione del materiale ferroso. Tuttavia capita spesso che il ferro, specie se non pulito, continui il percorso senza essere captato andando così a danneggiare il processo di vagliatura. Sarà quindi necessario che un operatore prenda grande cura alla manutenzione in piena efficienza delle superfici vaglianti, liberandole da eventuali fonti di intasamento. Ricordiamo che l'accesso alla torre di vagliatura può avvenire solo a macchina ferma; un dispositivo di fermo - impianto garantisce l'arresto del motore quando il cancello di accesso alla torre viene aperto.

Riportiamo nella tabella 2 i risultati dei test di produttività.

<i>Caratteristica</i>	<i>Valore (t/h)</i>	<i>%</i>
Portata in alimentazione	70 t/h	
Stabilizzato 0 – 30 mm	40 t/h	57,1 %
Sabbiella 0 – 9 mm	28 t/h	40 %
Ferro	0,1 t/h	0,14 %
TOTALE	68,1 t/h	97,2 %

*Tab. 2 – test di produttività del cemento di demolizione*

Innanzitutto notiamo come la produttività, verosimilmente anche per le motivazioni addotte, sia nettamente diminuita. Le pezzature in uscita sono quelle classiche, anche se solitamente si produce soltanto stabilizzato:

- stabilizzato di cemento (calcestruzzo) 0 -30 mm;

Come abbiamo già ricordato l'impianto è in grado di separare almeno tre classi granulometriche ma ragioni di mercato spingono ad avviare la sabbiella direttamente al cumulo 0 -30 mm e a non produrre in continuo la classe 40 – 80 mm.

#### **4.5 TRAVERSINE FERROVIARIE**

Si tratta di calcestruzzo di ottima qualità che ragioni di manutenzione infrastrutturale obbligano a sostituire ciclicamente nelle reti ferroviarie. La qualità del materiale in ingresso garantisce la qualità dei prodotti recuperati:

- stabilizzato di traversine 0 - 30 mm;
- breccia di traversine 40 – 70 mm (fig. 4.4).



*Fig. 4.4 – breccia di traversine*

Un prodotto recuperato costituito soltanto da traversine andrebbe incontro a problemi di natura granulometrica. L'assortimento di un aggregato è alla base di una corretta gestione della sua compattazione, della sua futura stabilità e del grado di portanza raggiungibile. Per questo motivo il prodotto della frantumazione delle traversine viene miscelato allo stabilizzato di roccia e arenaria in parti uguali. La frantumazione delle traversine è affidata al frantoio di dimensioni minori. La produttività sarà quindi inferiore rispetto ad altre categorie di materiali, in particolare:

<i>Caratteristica</i>	<i>Valore (t/h)</i>	<i>%</i>
Portata in alimentazione	46 t/h – 220 pezzi	
Breccia 40 – 80 mm	13,5 t/h	29,3 %
Stabilizzato 0 – 30 mm	23 t/h	50 %
Ferro	4 t/h	8,7 %
Scarto di recupero	5,5 t/h	11,9 %
TOTALE	46 t/h	100%

*Tab. 3 – test di produttività per traversine*

#### 4.6 DEMOLIZIONE MISTA

Il cumulo del materiale misto è quello precedentemente descritto unitamente al ciclo di lavorazione usuale per esso. Ricordiamo che gli aggregati riciclati in uscita sono:

- breccia di pietra CAR 40 – 80 mm;
- macinato di pietra CAR 0 – 80 mm;
- macinato di pietra CAR 0 – 30 mm;
- sabbietta CAR 0 – 9 mm (fig. 4.5).



*Fig. 4.5 – sabbietta C.A.R.*

Esiste una ricetta particolare per il confezionamento del prodotto misto. Nella pratica usuale vengono miscelati:

- 65% CDW misto vero e proprio;
- 10 – 20 % loppa di fonderia;
- 15% gres.

Vediamo infine la potenzialità oraria dell'impianto.

<i>Caratteristica</i>	<i>Valore (t/h)</i>	<i>%</i>
Portata in alimentazione	230 t/h	
Macinato 0 – 30 mm	130 t/h	56,5 %
Macinato 40 – 80 mm	75 t/h	32,6 %
Sabbiella 0 -9 mm	19 t/h	8,3 %
Ferro	2 t/h	0,87 %
Scarto recuperato >80 mm	4 t/h	1,74 %
<b>TOTALE</b>	<b>230 t/h</b>	<b>100 %</b>

*Tab. 4 – test di produttività per demolizione mista*

#### 4.7 GRES

L'industria ceramica recapita in un cumulo apposito il gres di scarto (fig. 4.6). Tali piastrelle saranno ridotte in una categoria unica:

- macinato di gres 0 - 30 mm.



*Fig. 4.6 – cumulo in ingresso del gres*

Questo materiale viene richiesto allorché le caratteristiche di resistenza da esplicitare non siano eccessivamente elevate e non si debbano soddisfare particolari requisiti sugli indici di forma e coefficienti di appiattimento. Viene anche miscelato al prodotto della demolizione mista come detto prima.

#### **4.8 MATERIALI ESTERNI**

Alcune categorie di materiali vengono solo commercializzati all'interno dell'azienda e sono:

- stabilizzato di porfido 0 -30 mm;
- stabilizzato di Puglia;
- pietrisco 5 - 10 mm (prodotto lavato);
- pietrisco 10 -18 mm (prodotto lavato);
- sabbia di Puglia;
- sabbia di mare.

#### **4.9 LA CERTIFICAZIONE CE**

La marcatura di ogni prodotto impone al produttore uno sforzo teso al mantenimento di uno standard merceologico prefissato, oltre ad una gestione efficiente e corretta degli impianti di produzione. È quindi necessario effettuare prove con cadenza stabilita, al fine di verificare con continuità le caratteristiche di interesse per i vari materiali, in particolare:

- analisi granulometrica – frequenza settimanale;
- determinazione del contenuto di fini < 0,063 mm – frequenza settimanale;
- prova dell'equivalente in sabbia e blu di metilene – frequenza settimanale;
- indice di forma SI e coefficiente di appiattimento FI – frequenza mensile;
- resistenza alla frammentazione: indice Los Angeles LA – frequenza semestrale;
- massa volumica apparente e grado di assorbimento – frequenza annuale;
- massa volumica in mucchio e indice dei vuoti – frequenza annuale;
- resistenza al gelo e disgelo – frequenza biennale.

Di seguito faremo un resoconto sulle tipologie di prove utilizzate, cercando di evidenziare eventuali criticità di ogni materiale unitamente ai punti di forza.

#### **4.10 GRANULOMETRIA**

Le specifiche della prova di analisi granulometrica sono contenute nella norma UNI EN 933-1, recepimento a livello nazionale della norma europea EN 933-1 (agosto 1997) e dell'aggiornamento A1 (ottobre 2005) e stabiliscono in generale un metodo per la determinazione

della distribuzione granulometrica degli aggregati mediante setacciatura. I materiali cui si può applicare sono naturali e artificiali, anche aggregati leggeri, fino ad una dimensione nominale di 90 mm.

Come è intuibile, si tratterà di suddividere il campione di prova in numerose classi granulometriche di dimensioni decrescenti. La dimensione delle maglie e il numero dei setacci sono stabiliti in base alla precisione richiesta ed alla natura del campione. La procedura di setacciatura prevede il preventivo lavaggio del campione di prova con eliminazione della frazione  $\leq 63$  micron e successivo essiccamento in stufa del resto del campione. Si procederà quindi alla setacciatura a secco. Il processo consiste nel versare il materiale lavato ed essiccato di peso  $M_1$  nella colonna di setacci sovrapposti. Il setaccio al fondo deve comunque essere quello da 63 micron, avendo l'esperienza dimostrato che il lavaggio non consente in ogni caso di eliminare la totalità della frazione finissima.

La colonna viene agitata per dividere le frazioni e in seguito ogni singola frazione separata dovrà essere pesata. In particolare si peserà il materiale trattenuto da ogni setaccio, indicando ogni pesata con  $R_i$  (rifiuto  $i$ -esimo) e partendo dal setaccio più in alto, ossia quello a maglia maggiore. L'eventuale peso del passante al setaccio da 63 micron verrà indicato con  $P$ . Le masse trattenute saranno quindi espresse come percentuali riferite alla massa essiccata iniziale  $M_1$ .

La validità della prova si ha quando la somma delle masse  $R_i$  e di  $P$  non differisce di più dell'1% dalla massa essiccata dal trattenuto al setaccio da 63 micron, ossia quando  $P$  è trascurabile.

#### 4.11 MASSA VOLUMICA

La massa volumica non è nient'altro che la massa di un determinato volume (es.  $Mg/m^3$ ). La prova per la determinazione della massa volumica è descritta nella norma UNI EN 1097-6. Si tratta del recepimento della EN 1097-6 (settembre 2000 + errata corrige AC:2002) e dell'aggiornamento A1 (ottobre 2005). La prova consente di determinare massa volumica e assorbimento d'acqua per gli aggregati. I due metodi che vengono descritti sono:

- metodo con cestello a rete per aggregati passanti allo staccio da 63 mm ma trattenuti da quello da 31,5 mm;
- metodi con picnometro per aggregati passanti allo staccio da 31,5 mm ma trattenuti dal setaccio da 63 micron.

Diamo alcune definizioni che useremo nel seguito:

- massa volumica con essiccazione in stufa: rapporto tra la massa di campione essiccato e il suo volume occupato in acqua, comprensivo di vuoti accessibili e non all'acqua;
- massa volumica apparente dei granuli: rapporto tra la massa di campione essiccato e il suo

volume occupato in acqua, compreso ogni vuoto interno non accessibile all'acqua ma esclusi i pori accessibili all'acqua;

- massa volumica del grano saturo a superficie asciutta: rapporto tra la massa complessiva del campione di aggregato e dell'acqua nei pori accessibili e il volume occupato in acqua, compresi i vuoti non accessibili sia gli eventuali vuoti accessibili all'acqua;
- massa volumica dei grani pre-essiccati: rapporto tra la massa pre-essiccata del campione e il volume occupato in acqua, compresi vuoti non accessibili all'acqua ma escludendo le porosità accessibili;
- assorbimento d'acqua: aumento della massa del campione essiccato in stufa a causa dell'assorbimento d'acqua nelle porosità accessibili.

Il principio della prova è semplice: si pesa il campione nelle condizioni di saturazione a superficie asciutta e dopo l'essiccazione in stufa. Il volume si determina a partire dal volume di acqua spostata, o col metodo della riduzione della massa immersa in acqua col metodo del cestello a rete oppure mediante pesata diretta con metodo picnometrico.

Se un aggregato è costituito da più frazioni granulometriche bisognerà suddividerlo in frazioni tra 63 micron e 4 mm, tra 4 mm e 31,5 mm, tra 31,5 mm e 63 mm.

#### 4.11.1 Metodo con cestello a rete per aggregato 31,5 – 63 mm

Useremo tale metodo laddove le caratteristiche granulometriche siano quelle su indicate. Occorrerà scartare i frammenti trattenuti al setaccio da 63 mm e lavare tutto il campione per rimuovere il materiale più fine di 31,5 mm. La porzione di prova viene messa nel cestello a rete e il tutto è immerso in acqua ( $T = (22 \pm 3)^\circ\text{C}$ ) con un battente di almeno 5 cm sopra il cestello. Si eliminano le particelle d'aria intrappolate sollevando il cestello e lasciandolo cadere 25 volte sul fondo del recipiente da un'altezza di 2,5 cm. Il campione viene poi lasciato immerso per  $24 \pm 0,5$  h. Trascorso tale tempo si effettua la pesata in acqua alla temperatura indicata previo scuotimento ulteriore del cestello, ottenendo  $M_2$ . Bisognerà quindi estrarre cestello ed aggregato e lasciarli scolare per qualche minuto. Si versa l'aggregato su un panno asciutto e il cestello vuoto viene immerso nuovamente per la determinazione del suo peso in acqua  $M_3$ , previo ulteriore scuotimento. L'aggregato deve ora essere lasciato asciugare in disposizione mono - strato fino a quando ogni film visibile di acqua sia scomparso ma mantenga ancora un aspetto umido. Si pesa l'aggregato ( $M_1$ ). Ora l'aggregato può essere trasferito in stufa fino al raggiungimento della massa costante per poi essere pesato ( $M_4$ ). L'espressione dei risultati avviene nel modo seguente:

- massa volumica apparente dei granuli  $\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$ ;

- massa volumica dei grani saturi a superficie asciutta:  $\rho_{\text{ssd}} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$ ;
- assorbimento d'acqua (come % di massa essiccata) dopo 24 h:  $WA_{24} = \frac{100(M_1 - M_4)}{M_4}$ .

Ricordiamo che  $\rho_w$  è la massa volumica dell'acqua alla temperatura di misurazione di  $M_2$ .

#### 4.11.2 Metodo picnometrico per aggregato 4 – 31,5 mm

Al solito il campione di prova verrà lavato per eliminare frammenti minori di 4 mm ed il materiale trattenuto allo staccio da 31,5 mm verrà allontanato anch'esso. Innanzitutto si immette il campione nell'acqua ( $T = (22 \pm 3)^\circ\text{C}$ ) contenuta nel picnometro cercando di eliminare l'aria intrappolata scuotendo e ruotando il picnometro. Si pone il picnometro nel bagno d'acqua mantenendolo alla temperatura indicata sopra per  $24 \pm 0,5$  h. Trascorso tale tempo si rimuove il picnometro, cercando di far fuoriuscire ogni particella d'aria e si riempie fino a traboccamento sistemando il tappo. Si pesa determinando la massa  $M_2$ . L'aggregato deve essere tolto dall'acqua e deve essere ripristinato il livello con acqua, prima di effettuare la seconda pesata del picnometro  $M_3$ . L'aggregato deve essere sottoposto alla medesima procedura riportata nel paragrafo precedente per eliminare l'acqua in eccesso prima di effettuarne la pesata ( $M_1$ ). Dopo l'essiccamento in stufa del campione faremo la pesata  $M_4$ . L'espressione dei risultati avviene nel modo seguente:

- massa volumica apparente dei granuli  $\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$ ;
- massa volumica dei grani saturi a superficie asciutta:  $\rho_{\text{ssd}} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$ ;
- assorbimento d'acqua ( come % di massa essiccata) dopo 24 h:  $WA_{24} = \frac{100(M_1 - M_4)}{M_4}$ .

Per gli aggregati di dimensioni comprese tra 63 micron e 4 mm il procedimento è leggermente diverso. Fino alla determinazione di  $M_3$  il processo è il medesimo ma le cose cambiano per il trattamento del campione imbibito, una volta tolto dal picnometro. La porzione di prova infatti, una volta messa nella bacinella, deve essere frequentemente mescolata ed esposta ad una corrente d'aria per favorire l'evaporazione dell'umidità superficiale. Il processo è da interrompere quando non sia più visibile umidità libera superficiale e i granuli non aderiscano più l'uno all'altro. Una prova della condizione da raggiungere può eseguirsi con uno stampo metallico tronco-conico. Quest'ultimo, una volta appoggiato al fondo della bacinella, va riempito col materiale alla rinfusa attraverso la base minore. Il materiale con cui è stato riempito va leggermente pestellato per 25 volte. Se, una volta sollevato con cautela lo stampo, il cono di aggregato non collassa, bisogna

continuare il processo di essiccazione fino a che la prova non garantirà il collasso. Si pesa quindi la porzione di prova a superficie asciutta così ottenuta ( $M_1$ ). Dopo l'essiccazione in stufa avremo al solito  $M_4$ . Le formule di calcolo delle quantità ricercate sono le medesime.

#### **4.12 DETERMINAZIONE DELLA FORMA DEI GRANULI: INDICE DI FORMA**

La norma UNI EN 933-4 costituisce il recepimento della EN 933-4 (marzo 2008) e descrive un metodo di determinazione dell'indice di forma degli aggregati grossi di origine naturale o artificiale, compresi gli aggregati leggeri. Questo tipo di prova è applicabile alle frazioni granulometriche comprese tra 4 mm e 63 mm.

Diamo alcune definizioni che serviranno:

- lunghezza granulare  $L$ : si tratta della dimensione massima di un granulo definita come la distanza massima tra due piani paralleli tangenti alla superficie del granulo;
- spessore granulare  $E$ : dimensione minima di un granulo definita come la distanza minima tra due piani paralleli tangenti alla superficie del granulo.

I granuli contenuti in un campione di prova vengono classificati in base al rapporto esistente tra  $L$  ed  $E$ , se necessario ricorrendo all'utilizzo di un calibro a cursore. L'indice di forma viene calcolato come la massa dei granuli aventi rapporto  $L/E > 3$ , espresso come percentuale della massa totale a secco dei granuli sottoposti alla prova.

Passiamo a descrivere le modalità di prova. Innanzitutto bisogna essiccare il campione in stufa a  $T = (110 \pm 5)^\circ\text{C}$  fino al raggiungimento della massa costante. Una setacciatura idonea consentirà di scartare la frazione  $< 4\text{mm}$  e quella  $> 63\text{ mm}$ . La massa del campione di prova viene annotata come  $M_0$ .

La nostra porzione di prova ora deve essere analizzata dal punto di vista dimensionale. In particolare seguiremo due vie leggermente diverse se il campione ha dimensione massima minore o al limite uguale al doppio della dimensione minima ( $D \leq 2d$ ) oppure se la dimensione massima eccede il doppio della minima ( $d > 2d$ ).

Il primo caso fa riferimento ad un campione meno assortito, il secondo ad un campione dotato di maggiore variabilità dimensionale.

##### **4.12.1 Caso $D \leq 2d$**

Dal campione si separerà la frazione  $d_i/D_i$  dove  $D_i \leq 2d_i$  mediante setacciatura. I granuli eccedenti  $D_i$  o minori di  $d_i$  saranno scartati. La massa di tale frazione  $d_i/D_i$  sarà annotata come  $M_1$ . Ogni granulo che, previa misurazione con calibro, abbia un rapporto  $L/E > 3$  andrà separato. Questi granuli sono detti non cubici. Non è necessario affidarsi esclusivamente al calibro: laddove la

determinazione sia immediata e visiva si può separare preventivamente. I granuli non cubici vanno quindi pesati ( $M_2$ ).

$$SI \text{ (shape index)} = \frac{M_2}{M_1} \cdot 100$$

#### 4.12.2 Caso $D > 2d$

In questo caso il campione di prova è piuttosto assortito e sarà necessario ridurlo preventivamente in classi granulometriche che posseggano un rapporto  $D_i \leq 2d_i$ . Le classi dovrebbero essere create a partire da aperture dei setacci di 4 mm; 5,6 mm; 8 mm; 10 mm; 11,2 mm; 12,5 mm; 16 mm; 22,4 mm; 31,5 mm; 45 mm; 63 mm. La massa  $M_i$  di ogni frazione granulometrica viene annotata ed espressa come percentuale rispetto ad  $M_0$ , ottenendo  $V_i$ . Le frazioni granulometriche con  $V_i < 10\%$  possono essere eliminate; possono altresì essere ridotte le frazioni granulometriche con un numero di granuli eccessivo, mantenendo però un numero minimo di granuli per ogni classe pari a 100.

La massa di ogni frazione granulometrica è annotata come  $M_{1i}$ . Si procede come prima per determinare la massa  $M_{2i}$  dei granuli non cubici per ogni classe.

L'espressione del risultato avviene così:

$$SI \text{ (shape index)} = \frac{\sum M_{2i}}{\sum M_{1i}} \cdot 100 \quad \text{per frazioni granulometriche non ridotte}$$

$$SI \text{ (shape index)} = \frac{\sum (V_i \cdot SI_i)}{\sum V_i} \quad \text{per frazioni granulometriche ridotte}$$

dove  $SI_i$  è la percentuale di granuli non cubici per ogni classe granulometrica

$SI$  è espresso come arrotondamento al numero intero più prossimo.

### 4.13 DETERMINAZIONE DELLA FORMA DEI GRANULI: INDICE DI APPIATTIMENTO

La determinazione dell'indice di appiattimento si rivolge agli aggregati di origine naturale o artificiale, inclusi quelli leggeri. Non si applica a granulometrie inferiori a 4 mm o maggiori di 80 mm. La norma di riferimento è la UNI EN 933-3, recepimento della EN 933-3 (gennaio 1997) e dell'aggiornamento A1 (settembre 2003).

La prova consiste nel dividere inizialmente il campione in varie classi granulometriche  $d_i/D_i$  ognuna delle quali verrà stacciata usando stacci a barre che abbiano aperture parallele pari a  $D_i/2$ .

Il coefficiente di appiattimento globale sarà espresso tenendo conto della massa dei granuli che passano attraverso le barre riferita alla massa totale secca del campione. Volendo si può riferire il

coefficiente di appiattimento ad una specifica classe granulometrica  $d_i/D_i$  esprimendo il rapporto tra passante e massa totale della specifica classe.

Gli stacci di prova che serviranno a suddividere il campione in frazioni granulometriche avranno le seguenti dimensioni: 80 mm; 63 mm; 50 mm; 31,5 mm; 25 mm; 20 mm; 16 mm; 12,5 mm; 10 mm; 8 mm; 6,3 mm; 5 mm; 4 mm.

Prima di tutto il campione di prova verrà essiccato in stufa a  $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ . Si determina quindi la massa  $M_0$ . Si passa quindi alla fase di stacciatura con gli stacci descritti sopra. La frazione trattenuta allo staccio da 80 mm e quella passante a 4 mm verranno scartate. Le masse di ogni singola frazione granulometrica verranno determinate prima di passare alla stacciatura a mano con staccio a barre. L'operazione di stacciatura manuale si considererà conclusa quando la massa non varierà più dell'1% dopo un minuto di setacciatura. Si peserà quindi il passante per ogni frazione granulometrica.

Indicando infine la sommatoria delle masse passanti alle barre con  $M_2$  e la sommatoria delle masse di ogni frazione granulometrica con  $M_1$  potremo esprimere direttamente l'indice globale di appiattimento FI:

$$\text{FI} = \frac{M_2}{M_1} \cdot 100$$

#### **4.14 VALUTAZIONE DEI FINI: PROVA DELL'EQUIVALENTE IN SABBIA**

La norma UNI EN 933-8 stabilisce un metodo di determinazione del valore di equivalenza in sabbia della classe granulometrica 0 - 2 mm negli aggregati fini e in quelli misti. La norma costituisce il recepimento della EN 933-8 (marzo 1999).

Definiamo in primis cosa intendiamo per "fine". Si tratta formalmente del materiale che passa allo staccio da 0,063 mm.

In linea del tutto generale la prova consisterà nel versare in un cilindro una porzione di prova di sabbia e di agente flocculante, per poi agitarli adeguatamente al fine di separare la componente argillosa. La sabbia verrà ulteriormente irrigata utilizzando ancora soluzione flocculante che forzi il materiale fine ad andare in sospensione sulla sabbia. Dopo 20 minuti il valore di equivalente in sabbia SE è calcolato come altezza del sedimento, espressa a sua volta come percentuale dell'altezza complessiva del materiale flocculato nel cilindro.

Inizieremo quindi col preparare il nostro campione di prova secondo la EN 932-2 ottenendone al solito una porzione di prova. Abbiamo detto che la prova va eseguita sulla frazione 0 - 2 mm che abbia un contenuto di umidità inferiore al 2% e che si trovi alla temperatura di  $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$ . La massa della porzione di prova va ridotta in due campioni la cui massa espressa in grammi sia:

$$M_i = \frac{120(100+w)}{100}$$

dove  $w$  è il contenuto di umidità della sabbia ( % massa secca).

Si tratta ora di utilizzare una soluzione detta “di lavaggio” precedentemente preparata e sifonarla all’interno di due cilindri graduati e opportunamente dimensionati fino a raggiungere la tacca di riferimento dei 100 mm. la soluzione di lavaggio non è che la diluizione di 125 ml di soluzione concentrata in 5 l di acqua. La soluzione concentrata è preparata a partire da:

- cloruro di calcio cristallino  $\text{Ca Cl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ;
- glicerina al 99% di glicerolo;
- soluzione di formaldeide al 40% vol;
- acqua distillata o demineralizzata.

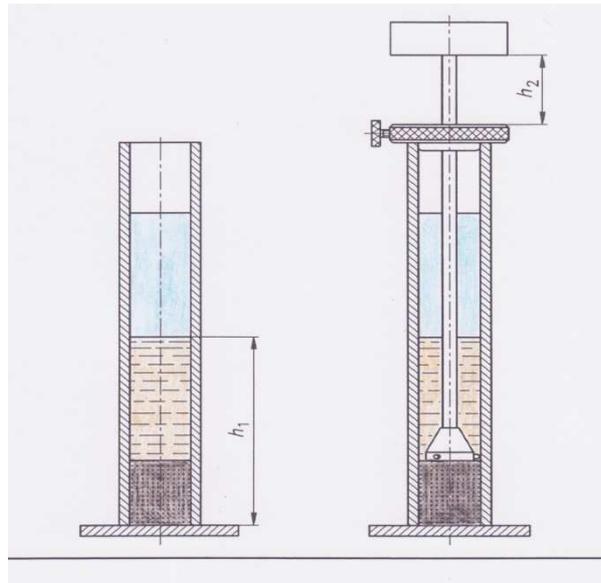
Si disciolgono  $(219 \pm 2)$  g di cloruro di calcio cristallino in  $(350 \pm 50)$  ml di acqua demineralizzata, lasciando raffreddare a temperatura ambiente. Si diluisce fino ad 1l di soluzione solo dopo aver aggiunto  $(480 \pm 5)$  g di glicerina e  $(12,5 \pm 0,5)$  g di soluzione di formaldeide. Si mescola accuratamente la soluzione concentrata così preparata.

Nei due cilindri versiamo i due campioni di prova e, dopo aver eliminato le eventuali bolle d’aria, lasciamo riposare per 10 minuti.

Al termine dei 10 minuti sigilleremo ed agiteremo meccanicamente per 30 secondi entrambi i cilindri. Terminata tale fase deve essere effettuato un lavaggio: consiste essenzialmente nel ripulire adeguatamente i tappi di gomma e le pareti dei cilindri avendo cura che il materiale lavato con soluzione di lavaggio ritorni all’interno del cilindro. Sempre adoperando il tubo in gomma e la soluzione di lavaggio ci spingeremo all’interno del sedimento per agitare bene e indurre i componenti argillosi a salire. Avremo molta cura di raggiungere ma non superare, aggiungendo soluzione di lavaggio, la tacca superiore all’interno del cilindro, pari a 380 mm. Si lascia riposare ogni cilindro per 20 minuti.

Si misurano infine le altezze  $h_1$  e  $h_2$ . La prima grandezza rappresenta l’altezza totale di sedimento e di materiale flocculato all’interno del cilindro, la seconda invece la distanza tra la faccia inferiore della testa di uno specifico stantuffo e il relativo collare, quando la base dello stantuffo è appoggiata allo strato di sedimento (vedi figura 4.7)

Per ogni cilindro si calcolerà il rapporto  $(h_2/h_1) \cdot 100$ . Se i due valori ottenuti differiscono di oltre 4 unità la prova non è valida e va ripetuta. L’equivalente in sabbia SE è espresso come media dei rapporti  $(h_2/h_1) \cdot 100$  per ogni cilindro, arrotondando all’intero più vicino.



*Fig. 4.7 – prova dell'equivalente in sabbia*

#### **4.15 LA RESISTENZA ALLA FRAMMENTAZIONE: PROVA LOS ANGELES**

La UNI 1097-2 è il recepimento della EN 1097-2 (aprile 1998) e del suo aggiornamento A1 (luglio 2006) e fornisce due schemi di prova per la determinazione della resistenza alla frammentazione degli aggregati grossi:

- prova Los Angeles (metodo di riferimento);
- prova d'urto.

Introduciamo la nozione di coefficiente Los Angeles LA: si tratta della percentuale di campione di prova passante attraverso uno staccio da 1,6 mm a prova completata.

Il campione da cui estrarre la porzione di prova è di almeno 15 kg di particelle con granulometria compresa tra 10 mm e 14 mm. Quindi una stacciatura iniziale è necessaria per eliminare le particelle fuori da tale intervallo. Inoltre almeno uno dei seguenti due requisiti è richiesto:

- percentuale di materiale passante allo staccio da 12,5 mm compresa tra 60% e 70%;
- percentuale di materiale passante allo staccio da 11,2 mm compresa tra 30% e 40%.

Per soddisfare tale ulteriore requisito bisogna vagliare il materiale con stacci da 10 mm, 11,2 mm (o 12,5 mm), e 14 mm per ottenere le relative frazioni granulometriche 10 – 11,2 mm (oppure 10 – 12,5 mm) e 11,2 – 14 mm (oppure 12,5 – 14 mm). Il materiale viene lavato ed essiccato in stufa a  $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$  fino a massa costante, quindi miscelato nuovamente. La EN 932-2 ci darà indicazioni su come ridurre il campione fino alla porzione di prova pari a  $5000 \pm 5$  g di materiale.

La porzione di prova deve essere introdotta all'interno di uno specifico cilindro cavo in acciaio profilato chiuso ad entrambe le estremità. Il cilindro internamente possiede una mensola sporgente di lunghezza pari a quella del cilindro stesso, collocata su un piano diametrale lungo una

generatrice e fissata saldamente. Allorché l'usura ne riduca le dimensioni in modo apprezzabile e stabilito, tale mensola deve essere sostituita. All'interno del cilindro, che dovrà ruotare su un asse orizzontale, assieme al materiale verranno immesse 11 sfere di acciaio dal peso complessivo compreso tra i 4690 g e i 4860 g. Una volta verificato che il cilindro sia pulito internamente e inseriti materiale e carica macinante si fanno compiere alla macchina 500 giri. Il numero di giri del cilindro è pari a  $31 \div 33$  giri/min. Terminata questa fase l'aggregato viene versato su un vassoio in prossimità dell'apertura inferiore della macchina; tutti i fini dovranno essere rimossi con cura. Dal vassoio si procederà ad eliminare le sfere. Il materiale risultante verrà lavato e vagliato con uno staccio da 1,6 mm. Il trattenuto verrà essiccato a  $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$  fino a massa costante espressa in grammi.

Possiamo quindi esprimere il coefficiente LA come:

$$LA = \frac{5000 - m}{50}$$

LA sarà arrotondato all'intero più prossimo.

#### **4.16 DETERMINAZIONE DELLA PERCENTUALE DI SUPERFICI FRANTUMATE NEGLI AGGREGATI GROSSI**

La prova determina la percentuale di particelle con superficie frantumata o spezzata in un campione di aggregato naturale o artificiale grosso. Le dimensioni dell'aggregato da sottoporre alla prova sono comprese tra 4 mm e 63 mm. Tale metodo di prova è contenuto nella UNI EN 933-5, recepimento della EN 933-5 (gennaio 1998) e del suo aggiornamento A1 (novembre 2004).

Introduciamo i concetti di particella totalmente frantumata o spezzata e di particella frantumata o spezzata: nel primo caso più del 90% della superficie di tale particella sarà frantumata o spezzata (tc); nel secondo caso avremo una particella con oltre il 50% della superficie frantumata o spezzata (c). Definiamo anche le particelle arrotondate, dotate del 50% o meno di superficie frantumata o spezzata (r) e particelle totalmente arrotondate (tr), ossia con oltre il 90% della superficie arrotondata. Dovremo definire per chiarezza anche il concetto di superficie frantumata: si tratta fondamentalmente di una superficie piuttosto piatta prodotta dalla frantumazione o rottura contornata da bordi ben marcati. Se il bordo di tale superficie piatta fosse alterato, eroso, usurato, a rigore la particella andrebbe considerata arrotondata.

Innanzitutto il campione andrà essiccato a  $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$  fino a massa costante per poi essere vagliato eliminando il materiale  $< 4$  mm e quello  $> 63$  mm. Se necessario, la massa del campione può essere ridotta producendo una porzione di prova, senza un valore predeterminato, ma

superiore ad un valore minimo tabulato. La nostra porzione di prova potrà essere costituita da un'unica classe granulometrica in cui  $D \leq 2d$  o più frequentemente si renderà necessario suddividere la porzione di prova in frazioni granulometriche ciascuna delle quali avrà  $D_i \leq 2d_i$ . Gli intervalli granulometrici sono definiti. Riferendo la descrizione di prova e il calcolo degli indici al caso di più frazioni granulometriche separate nell'intervallo 4 – 63 mm riusciremo per induzione ad ottenere il caso più semplice. La massa dell'intera porzione di prova è  $M_1$ . Per ogni frazione granulometrica separare le particelle totalmente frantumate, frantumate, arrotondate, totalmente arrotondate e indicare la massa di ciascuna ulteriore frazione come  $M_{tc}$ ,  $M_c$ ,  $M_r$ ,  $M_{tr}$ . L'espressione del risultato avverrà tramite i coefficienti C ( $C_c, C_r, C_{tc}, C_{tr}$ ):

$$C_{(c,r,tc \text{ o } tr)} = \frac{\sum M_{(ci,ri,tci \text{ o } tri)}}{\sum M_{1i}}$$

dove  $M_{1i}$  è la somma delle masse nella classe dimensionale sottoposta a prova, in grammi.

Se una classe dimensionale è stata ridotta opereremo così: calcoliamo le percentuali in massa di particelle in ognuno dei gruppi ( ci, ri, tci, tri) in ogni classe granulometrica  $d_i/D_i$ . poi faremo il valore ponderato medio

$$C_{(c,r,tc \text{ o } tr)} = \frac{\sum V_i C_{(ci,ri,tci \text{ o } tri)}}{\sum V_i}$$

dove:

$V_i$  è la percentuale in massa della classe granulometrica i nel campione sottoposto a prova

$C_{(ci,ri,tci \text{ o } tri)}$  sono le percentuali in massa delle particelle frantumate o spezzate, arrotondate, totalmente frantumate o spezzate e totalmente arrotondate nella classe granulometrica i.

#### 4.17 LA RESISTENZA ALL'USURA: PROVA MICRO-DEVAL

La UNI EN1097-2, che recepisce la EN 1097-1 (luglio 1996) e l'aggiornamento A1 (settembre 2003) specificano una procedura volta alla determinazione della resistenza all'usura di un campione di aggregato. La norma si applica ad aggregati naturali o artificiali e può essere condotta sia a secco che per via umida. Noi descriveremo il processo ad umido.

In linea generale si tratterà di sottoporre un campione di prova alla rotazione all'interno di uno o più tamburi opportunamente dimensionati, generando così una frizione tra le particelle di aggregato e una carica macinante, e di verificare, al termine della prova, la percentuale di materiale che viene trattenuta allo staccio da 1,6 mm. Tale valore si usa per calcolare il coefficiente micro-Deval  $M_{de}$ .

Il nostro campione da laboratorio dovrà essere costituito da particelle con una dimensione

compresa tra 10 mm e 14 mm. Inoltre deve soddisfare almeno uno dei requisiti seguenti:

- percentuale di materiale passante allo staccio da 12,5 mm compresa tra 60% e 70%;
- percentuale di materiale passante allo staccio da 11,2 mm compresa tra 30% e 40%.

Il nostro campione da laboratorio andrà stacciato con stacci da 10 mm, 11,2 mm (o 12,5 mm), 14 mm in modo da ottenere frazioni separate 10 mm – 11,2 mm e 11,2 mm – 14 mm (oppure 10 mm – 12,5 mm e 12,5 mm – 14 mm). Laveremo quindi le nostre frazioni secondo il punto 7.1 della EN 933-1 e le faremo essiccare in forno. Ora dovremo quindi miscelare le frazioni per ottenere un campione conforme ai requisiti granulometrici descritti sopra. Il campione di prova iniziale, di almeno 2 kg, sarà quindi ridotto in due provini di massa pari a  $(500 \pm 2)$ g ciascuno.

Ogni provino andrà quindi collocato in uno dei tamburi della macchina descritta di seguito. Si tratta di un'apparecchiatura costituita da tamburi cavi, da uno a quattro. Le dimensioni interne del tamburo sono stabilite; inoltre l'acciaio inossidabile di cui è costituito ogni tamburo deve avere uno spessore di almeno 3 mm e non riportare grossolane saldature o asperità al proprio interno. I coperchi dei tamburi sono a tenuta di polvere.

All'interno dei tamburi, assieme ai provini saranno inserite sfere di acciaio con diametro di  $(10 \pm 0,5)$  mm per raggiungere la massa di  $(5000 \pm 5)$  g. In ogni tamburo avremo cura di aggiungere  $(2,5 \pm 0,05)$  l di acqua. A questo punto, dopo aver collocato i tamburi sull'albero, avvieremo il motore ad una velocità di  $(100 \pm 5)$  giri/min per  $(12000 \pm 10)$  giri.

Terminato il tempo raccoglieremo su un vassoio il contenuto di ogni tamburo; verseremo quindi il materiale e l'acqua di lavaggio su uno staccio da 1,6 mm protetto da uno staccio da 8 mm. Laveremo quindi il materiale con un getto di acqua pulita. Il materiale trattenuto ad entrambi gli stacci verrà messo su un vassoio ed essiccato a  $(110 \pm 5)$  °C. Determineremo infine la massa  $m$  del trattenuto, arrotondandola al grammo. L'espressione del risultato avverrà arrotondando a  $10^{-1}$ :

$$M_{de} = \frac{500 - m}{5}$$

Avremo quindi due valori del coefficiente  $M_{de}$  da mediare per ottenere il valore finale.

#### 4.18 CONCLUSIONI

Alla luce di quanto detto emerge la necessità da una parte di caratterizzare tutti i materiali prodotti, dall'altra di avere solidi parametri di confronto per una valutazione obiettiva della bontà o meno di ogni materiale in relazione ad una specifica opera. È per questo motivo che nel prossimo capitolo rivolgeremo specificamente l'attenzione ai capitolati per la costruzione di strade e quindi ai requisiti richiesti per i materiali stradali in relazione ai risultati delle prove di laboratorio dei materiali descritti.

## Capitolo 5

### UTILIZZO DEI CDW NELLE SOVRASTRUTTURE STRADALI

#### 5.1 PREMESSA

Abbiamo visto nel capitolo 2 come le linee guida europee e la normativa nazionale prevedano il riciclaggio di materiale dalle costruzioni e dalle demolizioni e pongano obiettivi sempre più ambiziosi per aumentare il recupero. In questo capitolo rivolgeremo la nostra attenzione alla costruzione di strade; dopo aver brevemente analizzato per chiarezza le parti fondamentali di una sovrastruttura stradale, vedremo se e come i nostri materiali riciclati possano trovare impiego nei diversi strati che compongono la sovrastruttura. Tale analisi sarà necessariamente supportata da alcuni Capitolati d'appalto, citati di seguito. Le domande a cui vorremmo trovare risposta sono:

- Si prevede già la possibilità di utilizzare inerti riciclati per la costruzione di strade?
- Se tale possibilità esiste, quali prove devono essere effettuate sui materiali riciclati affinché possano trovare impiego nella sovrastruttura?
- Che differenza intercorre tra un materiale riciclato e un materiale standard naturale?

#### 5.2 CAPITOLATI D'APPALTO DI RIFERIMENTO

Per lo studio dei capitolati ci si è riferiti a:

- AUTOSTRADE PER L'ITALIA: manutenzione e costruzione delle pavimentazioni – norme tecniche d'appalto prestazionali;
- AUTOSTRADA DEL BRENNERO: capitolato speciale d'appalto - prescrizioni tecniche;
- ANAS: capitolato speciale d'appalto sezione 15 – pavimentazioni;
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - Capitolato Speciale d'Appalto Tipo per Lavori Stradali;
- S.p.A. AUTOVIE VENETE: capitolato speciale d'appalto – norme tecniche;
- S.P. n. 144 DI COIMO: capitolato speciale d'appalto per lavori di allargamento e sistemazione incrocio con la S.S. 337.

#### 5.3 LA SOVRASTRUTTURA STRADALE

In riferimento alle istruzioni del C.N.R. B.U. n. 169/1994 si riportano le seguenti definizioni:

**Sovrastruttura:** *con tale termine si indica la parte del corpo stradale costituita da un insieme di strati sovrapposti, di materiali e di spessori diversi, aventi la funzione di sopportare complessivamente le azioni del traffico e di trasmetterle e distribuirle, opportunamente attenuate, al terreno d'appoggio (sottofondo) o ad altre idonee strutture.*

**Sottofondo:** *terreno costituente il fondo di uno scavo o la parte superiore di un rilevato, avente caratteristiche atte a costituire appoggio alla sovrastruttura.*

Passiamo a descrivere gli strati fondamentali che compongono la sovrastruttura:

**Strato di fondazione:** *è lo strato della parte inferiore della sovrastruttura a contatto con il terreno di appoggio (sottofondo).*

**Strato di base:** *è lo strato intermedio tra lo strato superficiale e lo strato di fondazione.*

**Strato superficiale:** *questo è lo strato immediatamente sottostante al piano viabile.*

Nelle sovrastrutture flessibili lo strato superficiale viene suddiviso in due strati:

**Strato di usura:** *strato disposto ad immediato contatto con le ruote dei veicoli, destinato ad assicurare adeguate caratteristiche di regolarità e condizioni di buona aderenza dei veicoli alla superficie di rotolamento, a resistere prevalentemente alle azioni tangenziali di abrasione, nonché a proteggere gli strati inferiori dalle infiltrazioni delle acque superficiali.*

**Strato di collegamento:** *strato, spesso chiamato "binder", sottostante al precedente, destinato ad integrarne le funzioni portanti e ad assicurarne la collaborazione con gli strati inferiori; normalmente esso è costituito da materiale meno pregiato, e quindi più economico del sovrastante.*

Inoltre ricordiamo la presenza eventuale di strati accessori, con funzioni specifiche:

**Strato anticapillare:** *è lo strato di materiale di moderato spessore interposto fra lo strato di fondazione ed il terreno di sottofondo, destinato ad interrompere, negli strati della sovrastruttura, l'eventuale risalita capillare di acqua proveniente da falda acquifera.*

**Strato antigelo:** *è lo strato di opportuno materiale, steso al di sotto dello strato di fondazione in adeguato spessore, avente la funzione di impedire che la profondità di penetrazione del gelo raggiunga un sottofondo gelivo.*

**Strato drenante:** *è lo strato di materiale poroso impermeabile, posto a conveniente altezza nella sovrastruttura, per provvedere alla raccolta ed allo smaltimento di acque di falda o di infiltrazione verso le cunette laterali o altro dispositivo drenante.*

Descriviamo infine le principali tipologie di sovrastrutture:

**Sovrastruttura flessibile:** *si indica come flessibile una sovrastruttura formata da strati superficiali ed eventualmente di base, costituiti da miscele di aggregati lapidei con leganti idrocarburi e da strati di fondazione non legati.*

**Sovrastruttura rigida:** *tradizionalmente, si indica come rigida una sovrastruttura formata da uno strato superficiale costituito da una lastra in calcestruzzo di cemento armato o non armato, e da uno o più strati di fondazione. La lastra in calcestruzzo assume in sé anche la funzione dello strato di base. Lo strato di fondazione può essere costituito da miscele di aggregati non legati, ovvero legati con leganti idraulici o idrocarburici e suddiviso in più strati di materiali differenziati. Poiché le funzioni portanti sono svolte dalla lastra in calcestruzzo, la funzione precipua dello strato di fondazione è quella di assicurare alla lastra un piano di appoggio di uniforme portanza e deformabilità, nonché quella di evitare che la eventuale parte fine del terreno di sottofondo risalga in superficie attraverso i giunti o le lesioni della lastra creando dei vuoti e rendendo disomogenee le condizioni di appoggio della lastra. Esso infine può essere chiamato a svolgere anche una funzione drenante.*

**Sovrastruttura semirigida:** *con dizione tradizionale, si indica come semirigida una sovrastruttura formata da strati superficiali costituiti da miscele legate con leganti idrocarburici, strati di base costituiti da miscele trattate con leganti idraulici, ed eventualmente strati di fondazione trattati anch'essi con leganti idraulici o non legati. Nelle sovrastrutture di questo tipo, nei casi più frequenti in Italia, gli strati di base sono due: uno strato sottostante trattato con leganti idraulici ed uno sovrastante con leganti bituminosi, onde evitare il riprodursi in superficie della fessurazione di ritiro e igrotermica, dello strato di base cementato sottostante.*

### 5.4 STRATI DI FONDAZIONE NON LEGATI

Esistono indicazioni di varia natura per la scelta dei materiali idonei alla costituzione di uno strato di fondazione stradale non legato. Nella parte seguente analizzeremo le indicazioni fornite dai vari capitolati analizzati.

#### 5.4.1 AUTOSTRADE PER L'ITALIA

*[...] La fondazione in oggetto è costituita da una miscela di terre stabilizzate granulometricamente; la frazione grossa di tale miscela (trattenuta al setaccio UNI 2 mm) può essere costituita da ghiaie, frantumati, detriti di cava, scorie o anche altro materiale ritenuto idoneo.*

*La fondazione potrà essere formata da materiale di apporto idoneo oppure da correggersi con adeguata attrezzatura in impianto fisso di miscelazione o altri sistemi. Lo spessore da assegnare alla fondazione è fissato dal progetto o, in carenza, dalla D.L. [...].*

*[...] Il materiale in opera, dopo l'eventuale correzione e miscelazione, risponderà alle caratteristiche seguenti:*

A) l'aggregato non deve avere dimensioni superiori a 71 mm, né forma appiattita, allungata o lenticolare;

B) granulometria compresa nel seguente fuso e avente andamento continuo ed uniforme praticamente concorde a quello delle curve limite:

Serie crivelli e setacci UNI	Passante totale in peso %
Crivello 70	100
" 40	75-100
" 25	60-87
" 10	35-67
" 5	25-55
Setaccio 2	15-40
" 0,4	7-22
" 0,075	2-10

C) rapporto tra il passante al setaccio UNI 0,075 mm ed il passante al setaccio UNI 0,4 mm inferiore a 2/3;

D) perdita in peso alla prova Los Angeles eseguita sulle singole pezzature inferiore al 30% in peso;

E) equivalente in sabbia misurato sulla frazione passante al setaccio ASTM n. 4 compreso tra 25 e 65 (la prova va eseguita con dispositivo di scuotimento meccanico). Tale controllo deve anche essere eseguito per materiale prelevato dopo costipamento. Il limite superiore dell'equivalente in sabbia .65. potrà essere modificato in funzione delle provenienze e delle caratteristiche del materiale. Per tutti i materiali aventi equivalente in sabbia compreso tra 25 e 35 la D.L. richiederà in ogni caso all'atto del progetto (anche se la miscela contiene più del 60% in peso di elementi frantumati) la verifica dell'indice di portanza C.B.R. di cui al successivo comma;

F) indice di portanza C.B.R. (CNR-UNI 10009 - Prove sui materiali stradali; indice di portanza C.B.R. di una terra) dopo quattro giorni di imbibizione in acqua (eseguito sul materiale passante al crivello UNI 25 mm) non minore di 50. È inoltre richiesto che tale condizione sia verificata per un intervallo di  $\pm \pm 2\%$  rispetto all'umidità ottimale di costipamento. Se le miscele contengono oltre il 60% in peso di elementi frantumati a spigoli vivi, l'accettazione avverrà sulla base delle sole caratteristiche indicate ai precedenti commi A, B, D, E, salvo nel caso citato al comma E) in cui la miscela abbia un equivalente in sabbia compreso tra 25 e 35.

[...]

I valori di PORTANZA costituiscono il dato prestazionale. La misura della portanza consiste nella valutazione del MODULO ELASTICO DINAMICO REALE dello o degli strati di supporto sopra descritti, effettuata con una macchina a massa battente (Falling Weight Deflectometer -

*FWD) dotata di misuratori di abbassamento (deflessione) operanti su 9 punti di una linea a distanza prefissata dalla piastra di carico, nel modo qui di seguito descritto :*

*A) la massa battente da usare e l'altezza di caduta verranno stabilite, mediante prove da effettuare prima della misura, in modo da non lasciare deformazioni permanenti sotto la piastra; l'altezza di caduta o la massa battente, se ciò succede, dovranno essere ridotte fino ad avere una deformazione di tipo elastico;*

*B) le misure verranno effettuate nelle condizioni stabilite al punto precedente, controllando che comunque anche in altre zone di prova non si abbia deformazione plastica; il MODULO ELASTICO DINAMICO dello strato di FONDAZIONE verrà calcolato interpretando le misure con un modello costituito da un multi strato elastico indefinito (programma BACAN della Committente);*

*C) la media dei valori di modulo dinamico ottenuto, espresso in  $\text{daN/cm}^2$ , elaborata su tronchi omogenei ottenuti con misure effettuate ogni 50 metri (o con cadenza più fitta per lavori di lunghezza ridotta, oppure su superfici di aspetto variabile) (vedi art. 11.1.1.), deve risultare maggiore o uguale a quello di progetto e comunque superiore a  $1850 \text{ daN/cm}^2$ . [...]*

#### **5.4.2 A22 – AUTOSTRADA DEL BRENNERO**

*[...] I materiali utilizzati per la formazione della fondazione stradale dovranno soddisfare i requisiti stabiliti dalla Norma armonizzata 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”.*

*I materiali riciclati dalle demolizioni dovranno essere conformi alle seguenti norme:*

- *Decreto Ministeriale (Ambiente) 8 maggio 2003, n. 203 (Utilizzo di materiale riciclato);*
- *Decreto Ministeriale 5 febbraio 1998, n. 22 (Procedure di recupero dei rifiuti non pericolosi).*

*[...] Il misto granulare non legato è costituito da una miscela di aggregati ottenuti mediante trattamento di materiali naturali, artificiali o riciclati.*

*Il prodotto dovrà essere conforme alla norma UNI EN 13285 “Miscele non legate - specifiche” e sarà designato secondo la seguente dicitura:*

#### **MISTO GRANULARE NON LEGATO 0 / 31,5**

*I requisiti di accettazione degli aggregati lapidei impiegati, qualora non specificato diversamente, dovranno essere conformi alle seguenti prescrizioni:*

- *UNI EN 932-3 “Procedura e terminologia per la descrizione petrografica semplificata”;*

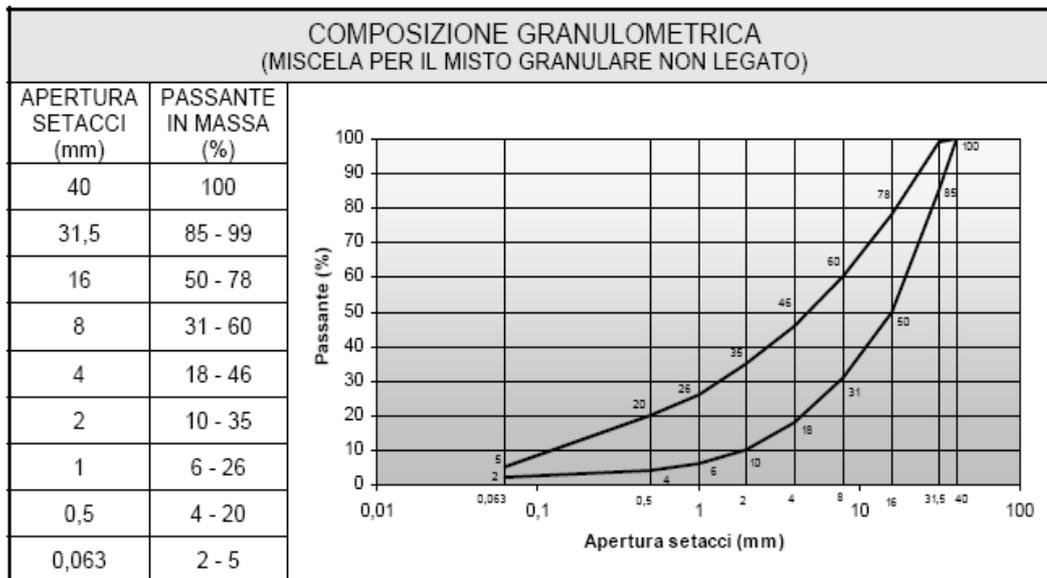
- *Direttiva Prodotti da Costruzione 89/106 CEE;*
- *Allegato ZA della Norma armonizzata UNI EN 13242 “Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l’impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione di strade”.*

*Il prelievo dei campioni da sottoporre ad analisi deve essere effettuato in conformità alla norma UNI EN 932-1 “Metodi di campionamento degli aggregati”.*

*Gli aggregati lapidei utilizzati dovranno soddisfare i requisiti riportati nella tabella seguente.*

CARATTERISTICHE DEGLI AGGREGATI (MISCELA PER IL MISTO GRANULARE NON LEGATO)					
REQUISITO	METODO DI PROVA	SIMBOLO	UM	VALORE LIMITE	CATEGORIA (UNI EN 13242)
Dimensione massima	UNI EN 933-1	D <sub>max</sub>	mm	≤40	-
Requisito di granulometria (per ogni classe utilizzata)	UNI EN 933-1	G <sub>C</sub>	%	-	G <sub>C</sub> 85-15
Resistenza alla frammentazione	UNI EN 1097-2	LA	%	≤30	LA <sub>30</sub>
Resistenza al gelo/disgelo	UNI EN 1367-1	F	%	≤1	F <sub>1</sub>
Percentuale di superfici frantumate	UNI EN 933-5	C	%	≥70	C <sub>70</sub>
Coefficiente di appiattimento	UNI EN 933-3	FI	%	≤35	FI <sub>35</sub>
Coefficiente di forma	UNI EN 933-4	SI	%	≤35	SI <sub>35</sub>
Equivalentente in sabbia	UNI EN 933-8	ES	%	≥50	-
Limite liquido	UNI CEN ISO/TS 17892-12	W <sub>L</sub>	%	≤15	-
Indice di plasticità	UNI CEN ISO/TS 17892-12	I <sub>p</sub>	%	N.P.	-
Componenti idrosolubili	UNI EN 1744-3			ASSENTI	-
Sostanze organiche	UNI EN 1744-1			ASSENTI	-

*[...] La composizione granulometrica, determinata in conformità alla norma UNI EN 13285 utilizzando i setacci appartenenti al gruppo base + 2, dovrà essere compresa nei limiti del fuso riportato nella tabella seguente.*



L'Impresa dovrà inoltre effettuare uno studio preliminare sulla miscela che intende utilizzare per la formazione della fondazione stradale. Tale studio dovrà comprendere la determinazione della curva di costipamento con energia Proctor Modificata (UNI EN 13286-2) e l'indice di portanza CBR in condizioni di saturazione (UNI EN 13286-47).

Lo studio della miscela, la fonte di approvvigionamento e le modalità di produzione dovranno essere documentate e presentate alla Direzione Lavori entro quindici giorni dall'inizio dei lavori per l'approvazione.

L'Indice di portanza CBR sul materiale passante al setaccio 45, dopo 4 giorni di imbibizione in acqua, dovrà essere superiore a 50. E' inoltre richiesto che tale condizione sia verificata per un intervallo di +2% rispetto all'umidità ottimale di costipamento. Non saranno ammesse variazioni sulla composizione ottimale della miscela validata ed accettata dalla Direzione Lavori, eccedenti le tolleranze massime riportate nella tabella seguente.

TOLLERANZE AMMESSE RIFERITE ALLA COMPOSIZIONE OTTIMALE VALIDATA (MISCELA PER IL MISTO GRANULARE NON LEGATO)	
MATERIALE COSTITUENTE	TOLLERANZE AMMESSE
Aggregato grosso (trattenuto al setaccio 2 mm)	± 5%
Aggregato fine (passante al setaccio 2 mm e trattenuto al setaccio 0,063 mm)	± 2%

Il misto granulare non legato costipato in opera dovrà avere le caratteristiche di addensamento e di portanza conformi ai requisiti riportati nella seguente tabella.

CARATTERISTICHE DELLO STRATO DI FONDAZIONE (MISCELA PER IL MISTO GRANULARE NON LEGATO)				
REQUISITO	METODO DI PROVA	SIMBOLO	UM	VALORE LIMITE
Densità in situ (rispetto alla densità massima Proctor)	DIN 18125 – UNI EN 13286-2	-	%	> 95
Modulo di deformazione (portanza su piastra con intervallo fra 0,15 e 0,25 MPa)	CNR 146 DIN 18134	$M_E$	MPa	> 80
Modulo di deformazione dinamica (con rapporto $E_{v2} / E_{v1} < 2,15$ )	DIN 18134	$E_{v2}$	MPa	>130

### 5.4.3 CAPITOLATO A.N.A.S.

[...] La fondazione è costituita da miscele di terre stabilizzate granulometricamente; la frazione grossa di tali miscele (trattenuto al setaccio 2 UNI) può essere costituita da ghiaie, frantumati,

*detriti di cava, scorie o anche altro materiale ritenuto idoneo dalla Direzione Lavori.*

*La fondazione potrà essere formata da materiale idoneo pronto all'impiego oppure da correggersi con adeguata attrezzatura in impianto fisso di miscelazione o in sito.*

*Lo spessore della fondazione sarà conforme alle indicazioni di progetto e/o dalla Direzione Lavori, e verrà realizzato mediante sovrapposizione di strati successivi.*

*Il materiale da impiegare, dopo l'eventuale correzione e miscelazione in impianto fisso, dovrà rispondere alle caratteristiche seguenti:*

- *dimensioni non superiori a 71 mm, né forma appiattita, allungata o lenticolare;*
- *granulometria compresa nel seguente fuso e avente andamento continuo e uniforme praticamente concorde a quello delle curve limite;*

Serie crivelli e setacci UNI	Passante totale in peso %
Crivello 70	100
" 40	75-100
" 25	60-87
" 10	35-67
" 5	25-55
Setaccio 2	15-40
" 0,4	7-22
" 0,075	2-10

- *rapporto tra il passante al setaccio 0,075 mm ed il passante al setaccio 0,4 mm inferiore a 2/3;*
  - *perdita in peso alla prova Los Angeles (CNR 34 - 1973) eseguita sulle singole pezzature inferiore al 30%*
  - *equivalente in sabbia (CNR 27 - 1972) misurato sulla frazione passante al setaccio n. 4 compreso tra 25 e 65 (la prova va eseguita con dispositivo meccanico di scuotimento). Tale controllo dovrà essere eseguito anche sul materiale prelevato dopo costipamento. Il limite superiore dell'equivalente in sabbia -65- potrà essere variato dalla Direzione Lavori in funzione delle provenienze e delle caratteristiche del materiale.*
- Per tutti i materiali aventi equivalente in sabbia compreso fra 25-35, la Direzione Lavori richiederà in ogni caso (anche se la miscela contiene più del 60% in peso di elementi frantumati) la verifica dell'indice di portanza CBR (CNR - UNI 10009) di cui al successivo comma.*
- *indice di portanza CBR (CNR - UNI 10009) dopo quattro giorni di imbibizione in acqua (eseguito sul materiale passante al crivello 25) non minore di 50. È inoltre richiesto che tale condizione sia verificata per un intervallo di  $\pm 2\%$  rispetto all'umidità ottima di costipamento. Se le miscele contengono oltre il 60% in peso di elementi frantumati a*

*spigoli vivi, l'accettazione avverrà sulla base delle sole caratteristiche indicate ai precedenti commi a), b), d), e), salvo nel caso citato al comma e) in cui la miscela abbia equivalente in sabbia compreso tra 25 – 35;*

*Le caratteristiche suddette dovranno essere accertate a cura dell'Impresa, sotto il controllo della Direzione Lavori, mediante prove di laboratorio sui campioni prelevati in contraddittorio con la Direzione Lavori a tempo opportuno, prima dell'inizio delle lavorazioni.*

*L'Impresa dovrà indicare per iscritto il tipo di lavorazione che intende adottare ed il tipo e la consistenza dell'attrezzatura di cantiere che verrà impiegata.*

*I requisiti di accettazione verranno accertati dalla Direzione Lavori con controlli sia preliminari che in corso d'opera.*

*In quest'ultimo caso verrà prelevato il materiale in sito già miscelato, prima e dopo il costipamento [...].*

#### 5.4.4 CAPITOLATO CIRS MINISTERO

*[...] Il misto granulare è costituito da una miscela di aggregati lapidei di primo impiego (per misti confezionati con aggregati riciclati si farà riferimento a studi specifici) eventualmente corretta mediante l'aggiunta o la sottrazione di determinate frazioni granulometriche per migliorarne le proprietà fisico-meccaniche.*

*[...] Gli aggregati grossi (trattenuti al crivello UNI n.5) e gli aggregati fini sono gli elementi lapidei che formano il misto granulare.*

*L'aggregato grosso può essere costituito da elementi ottenuti dalla frantumazione di rocce di cava massive o di origine alluvionale, da elementi naturali a spigoli vivi o arrotondati.*

*Tali elementi possono essere di provenienza o natura petrografica diversa purché, per ogni tipologia, risultino soddisfatti i requisiti indicati nelle Tabelle seguenti.*

AUTOSTRADE ED EXTRAURBANE PRINCIPALI				
Indicatori di qualità			Strato pavimentazione	
Parametro	Normativa	Unità di misura	Fondazione	Base
Los Angeles	UNI EN 1097/2	%	≤ 30	(*)
Micro Deval umida	CNR 109/85	%	-	(*)
Quantità di frantumato	-	%	≥ 60	(*)
Dimensione max	UNI EN 933/1	mm	63	(*)
Sensibilità al gelo <sup>2</sup>	CNR 80/80	%	≤ 20	(*)
(*) Materiale non idoneo salvo studi particolari				

EXTRAURBANE SECONDARIE E URBANE DI SCORRIMENTO				
Indicatori di qualità			Strato pavimentazione	
Parametro	Normativa	Unità di misura	Fondazione	Base
Los Angeles	CNR 34/73	%	≤ 30	(*)
Micro Deval Umida	CNR 109/85	%	-	(*)
Quantità di frantumato	-	%	>30	(*)
Dimensione max	CNR 23/71	mm	63	(*)
Sensibilità al gelo <sup>3</sup>	CNR 80/80	%	≤ 20	(*)

STRADE URBANE DI QUARTIERE E LOCALI				
Indicatori di qualità			Strato pavimentazione	
Parametro	Normativa	Unità di misura	Fondazione	Base
Los Angeles	CNR 34/73	%	≤ 40	≤ 30
Micro Deval Umida	CNR 109/85	%	-	≤ 25
Quantità di frantumato	-	%	-	≥ 60
Dimensione max	CNR 23/71	mm	63	63
Sensibilità al gelo <sup>3</sup>	CNR 80/80	%	≤ 30	≤ 20

L'aggregato fino deve essere costituito da elementi naturali o di frantumazione che possedano le caratteristiche riassunte nelle tabelle seguenti.

AUTOSTRADE ED EXTRAURBANE PRINCIPALI				
Passante al crivello UNI n. 5				
Indicatori di qualità			Strato pavimentazione	
Parametro	Normativa	Unità di misura	Fondazione	Base
Equivalentente in sabbia	CNR 27/72	%	≥ 50	(*)
Indice Plasticità	CNR-UNI 10014	%	N.P.	(*)
Limite liquido	CNR-UNI 10014	%	≤ 25	(*)
Passante allo 0.075	CNR 75/80	%	≤ 6	(*)

(\*) Materiale non idoneo salvo studi particolari

EXTRAURBANE SECONDARIE E URBANE DI SCORRIMENTO				
Passante al crivello UNI n. 5				
Indicatori di qualità			Strato pavimentazione	
Parametro	Normativa	Unità di misura	Fondazione	Base
Equivalentente in Sabbia	CNR 27/72	%	≥ 40	(*)
Indice Plasticità	CNR-UNI 10014	%	N.P.	(*)
Limite Liquido	CNR-UNI 10014	%	≤ 25	(*)
Passante allo 0.075	CNR 75/80	%	≤ 6	(*)

STRADE URBANE DI QUARTIERE E LOCALI				
Passante al crivello UNI n. 5				
Indicatori di qualità			Strato pavimentazione	
Parametro	Normativa	Unità di misura	Fondazione	Base
Equivalentente in Sabbia	CNR 27/72	%	≥ 40	≥ 50
Indice Plasticità	CNR-UNI 10014	%	≤ 6	N.P.
Limite Liquido	CNR-UNI 10014	%	≤ 35	≤ 25
Passante allo 0.075	CNR 75/80	%	≤ 6	≤ 6

*Ai fini dell'accettazione, prima dell'inizio dei lavori, l'Impresa è tenuta a predisporre la qualificazione degli aggregati tramite certificazione attestante i requisiti prescritti. Tale certificazione deve essere rilasciata da un Laboratorio riconosciuto dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.*

*La miscela di aggregati da adottarsi per la realizzazione del misto granulare deve avere una composizione granulometrica contenuta nei fusi riportati.*

Serie crivelli <sup>3</sup> e setacci UNI		Passante (%)	
Crivello	70	100	-
Crivello	30	70 - 100	100
Crivello	15	-	70 - 100
Crivello	10	30 - 70	50 - 85
Crivello	5	23 - 55	35 - 65
Setaccio	2	15 - 40	25 - 50
Setaccio	0.4	8 - 25	15 - 30
Setaccio	0.075	2 - 15	5 - 15

*La dimensione massima dell'aggregato non deve in ogni caso superare la metà dello spessore dello strato di misto granulare ed il rapporto tra il passante al setaccio UNI 0.075 mm ed il passante al setaccio UNI 0.4 mm deve essere inferiore a 2/3.*

*L'indice di portanza CBR (CNR-UNI 10009) dopo quattro giorni di imbibizione in acqua (eseguito sul materiale passante al crivello UNI 25 mm) non deve essere minore del valore assunto per il calcolo della pavimentazione ed in ogni caso non minore di 30. È inoltre richiesto che tale condizione sia verificata per un intervallo di  $\pm 2\%$  rispetto all'umidità ottimale di costipamento.*

*Il modulo resiliente ( $M_R$ ) della miscela impiegata deve essere quello inserito nel progetto della pavimentazione e viene determinato applicando la norma AASHTO T294 o altra metodologia indicata dal progettista.*

*Il modulo di deformazione ( $M_d$ ) dello strato deve essere quello inserito nel progetto della pavimentazione e viene determinato impiegando la metodologia indicata nella norma (CNR 146/92)*

*Il modulo di reazione ( $k$ ) dello strato deve essere quello inserito nel calcolo della pavimentazione e viene determinato impiegando la metodologia indicata nella norma (CNR 92/83)*

*[...] La misura della portanza deve accertare che le prestazioni dello strato finito soddisfino le richieste degli elaborati di progetto e siano conformi a quanto dichiarato prima dell'inizio dei lavori nella documentazione presentata dall'Impresa, ai sensi di quanto previsto al punto 2.2. La metodologia di indagine impiegata dovrà essere tale da fornire, parametri di controllo identici, o comunque direttamente confrontabili, con quelli utilizzati nel calcolo della pavimentazione. A tale*

*scopo, sono ammesse sia prove puntuali (Prove di carico con piastra o misure di deflessione) sia prove ad elevato rendimento.*

*Al momento della costruzione degli strati di pavimentazione sovrastanti, la media dei valori di portanza del misto granulare su ciascun tronco omogeneo, non dovrà essere inferiore a quella prevista in progetto.[...]*

#### **5.4.5 AUTOVIE VENETE**

Le caratteristiche richieste allo strato di fondazione sono le medesime dei punti A), B), C), D), E), F), del Capitolato Autostrade per l'Italia. Inoltre:

*[...] Il valore del modulo di deformazione  $M_d$ , misurato con il metodo di cui all'art. 7.1.7., ma nell'intervallo compreso fra 1,5 e 2,5 Kg/cm<sup>2</sup>, non dovrà essere inferiore a 1.000 Kg/cm<sup>2</sup>.*

*In ogni caso è possibile ricavare il modulo elastico dinamico reale calcolato tramite valori rilevati in opera con prove dinamiche tipo F.W.D. effettuate sullo strato di fondazione. La media dei valori di modulo in daN/cm<sup>2</sup> ricavata da misure effettuate ogni 100 m e riferite a tratti omogenei del lavoro di almeno 400 metri di lunghezza dovrà risultare superiore a 1.850 daN/cm<sup>2</sup>. [...]*

#### **5.5 STRATI DI FONDAZIONE LEGATI: IL MISTO CEMENTATO**

Analizzando i capitolati emerge come non sia da escludere la possibilità di confezionare un misto cementato con materiali riciclati. Vediamo ora le indicazioni principali che vengono fornite per la scelta dell'aggregato.

##### **5.5.1 AUTOSTRADE PER L'ITALIA**

*[...] Il misto cementato per fondazione (sottobase) deve essere costituito da una miscela di inerti lapidei, impastata con cemento ed acqua in impianto centralizzato con dosatori a peso o a volume, da stendersi in un unico strato dello spessore di 25 cm.*

*Altri spessori potranno essere richiesti purché non inferiori a 20 cm e non superiori a 30 cm.*

*Saranno impiegate ghiaie e sabbie di cava e/o di fiume con percentuale di frantumato complessiva compresa tra il 30 ed il 60% in peso sul totale degli inerti. A discrezione della D.L. potranno essere impiegate quantità di materiale frantumato superiori al limite stabilito, in questo caso la miscela di progetto finale deve essere tale da presentare le stesse resistenze a compressione e a trazione a 7 giorni prescritte nel seguito, salve comunque le prestazioni richieste in opera; questo risultato potrà ottenersi aumentando la percentuale delle sabbie*

presenti nella miscela e/o la quantità di passante allo 0,075 mm. Per le granulometrie possibili, detti materiali potranno anche essere integrati con ceneri volanti.

Gli inerti avranno i seguenti requisiti:

A) Aggregato di dimensioni non superiori a 40 mm, né di forma appiattita, allungata o lenticolare;

B) Granulometria compresa nel seguente fuso ed avente andamento continuo ed uniforme (CNR B.U. n. 23 del 14.12.1971);

Serie crivelli e setacci UNI	Passante totale in peso %
Crivello 40	100
" 30	80-100
" 25	72-90
" 15	53-70
" 10	40-55
" 5	28-40
Setaccio 2	18-30
" 0,4	8-18
" 0,18	6-14
" 0,075	5-10

C) Perdita in peso alla prova Los Angeles (CNR B.U. n. 34 del 28.3.73) non superiore al 30% in peso;

D) Equivalente in sabbia (CNR B.U. n. 27 del 30.3.1972) compreso fra 30 e 60;

E) Indice di plasticità (CNR UNI 10014) uguale a zero (materiale non plastico).

[...]

L'Impresa dovrà proporre la composizione granulometrica da adottare e le caratteristiche della miscela.

La percentuale di cemento e delle eventuali ceneri volanti, come la percentuale di acqua, saranno stabilite in relazione alle prove di resistenza eseguite sui provini cilindrici confezionati entro stampi C.B.R. (CNR UNI 10009)[...].

Operando ripetutamente nel modo suddetto, con l'impiego di percentuali in peso d'acqua diverse (sempre riferite alla miscela intera, compreso quanto eliminato per vagliatura sul crivello da 25 mm) potranno essere determinati i valori necessari al tracciamento dei diagrammi di studio. Lo stesso dicasi per le variazioni della percentuale di legante.

I provini devono avere resistenze a compressione a 7 giorni non minori di 25 daNkg/cm<sup>2</sup> e non superiori a 45 daNkg/cm<sup>2</sup>, ed a trazione secondo la prova .brasiliana. non inferiori a 2,5 daNkg/cm<sup>2</sup> [...].

Le miscele saranno confezionate in impianti fissi automatizzati, di idonee caratteristiche, mantenuti sempre perfettamente funzionanti in ogni loro parte.

*Gli impianti devono comunque garantire uniformità di produzione ed essere in grado di realizzare miscele del tutto rispondenti a quelle di progetto.*

*La zona destinata all'ammannimento degli inerti deve essere preventivamente e convenientemente sistemata per annullare la presenza di sostanze argillose e ristagni di acqua che possono compromettere la pulizia degli aggregati. Inoltre i cumuli delle diverse classi devono essere nettamente separati tra di loro e l'operazione di rifornimento nei predosatori eseguita con la massima cura.*

[...]

### 5.5.2 A22 – AUTOSTRADA DEL BRENNERO

*[...] Il misto granulare cementato per fondazione è costituito da una miscela di aggregati lapidei (misto granulare) impastata con cemento ed acqua.*

*Il prodotto dovrà essere conforme alla norma UNI EN 14227-1 “Miscele legate con cemento per fondi e sottofondi stradali” e sarà designato secondo la seguente dicitura:*

#### **MISTO GRANULARE LEGATO CON CEMENTO 0/31,5**

*I requisiti di accettazione degli aggregati lapidei impiegati, qualora non specificato diversamente, dovranno essere conformi alle seguenti prescrizioni:*

- UNI EN 932-3 “Procedura e terminologia per la descrizione petrografica semplificata”;
- Direttiva Prodotti da Costruzione 89/106 CEE;
- Allegato ZA della Norma armonizzata 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”.

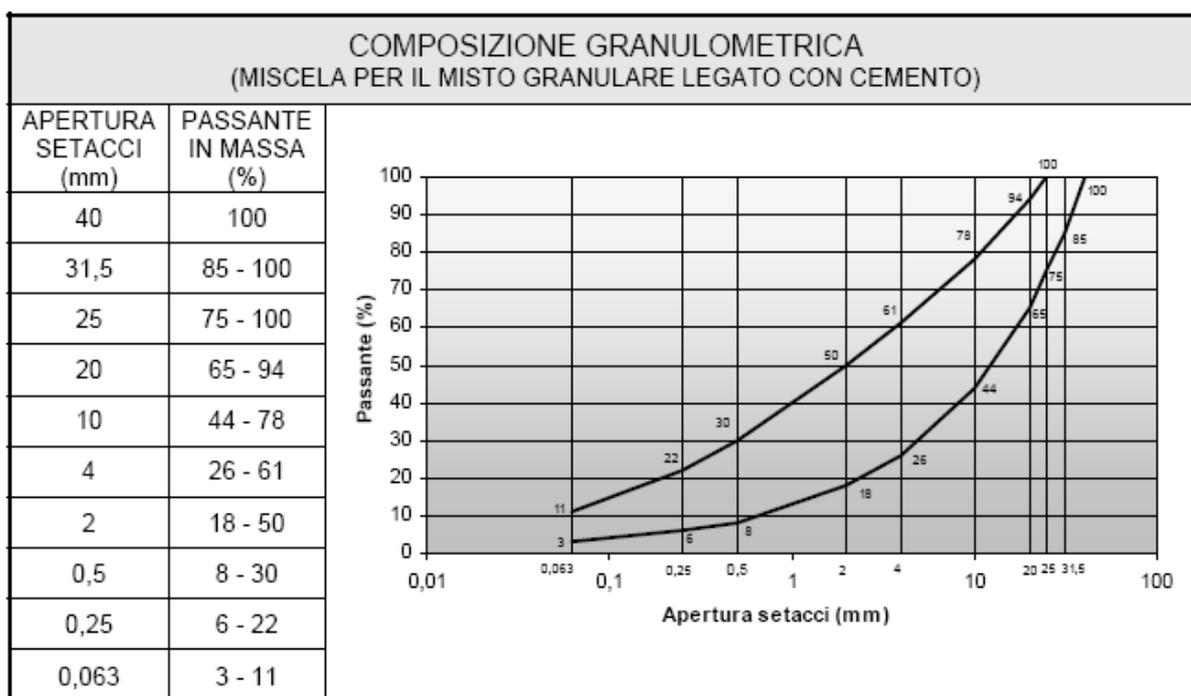
*Il prelievo dei campioni da sottoporre ad analisi deve essere effettuato in conformità alla norma UNI EN 932-1 “Metodi di campionamento degli aggregati”.*

*Gli aggregati utilizzati dovranno soddisfare i requisiti riportati nella tabella seguente:*

CARATTERISTICHE DEGLI AGGREGATI (MISCELA PER IL MISTO GRANULARE LEGATO CON CEMENTO)					
REQUISITO	METODO DI PROVA	SIMBOLO	UM	VALORE LIMITE	CATEGORIA (UNI EN 13242)
Dimensione massima	UNI EN 933-1	D <sub>max</sub>	mm	≤40	-
Requisito di granulometria (per ogni classe utilizzata)	UNI EN 933-1	G <sub>C</sub>	%	-	G <sub>C</sub> 85-15
Resistenza alla frammentazione	UNI EN 1097-2	LA	%	≤30	LA <sub>30</sub>
Resistenza al gelo/disgelo	UNI EN 1367-1	F	%	≤1	F <sub>1</sub>
Percentuale di superfici frantumate	UNI EN 933-5	C	%	≥70	C <sub>70</sub>
Coefficiente di appiattimento	UNI EN 933-3	FI	%	≤35	FI <sub>35</sub>
Coefficiente di forma	UNI EN 933-4	SI	%	≤35	SI <sub>35</sub>

Equivalente in sabbia	UNI EN 933-8	ES	%	≥60	-
Limite liquido	UNI CEN ISO/TS 17892-12	W <sub>L</sub>	%	≤25	-
Indice di plasticità	UNI CEN ISO/TS 17892-12	I <sub>p</sub>	%	N.P.	-
Componenti idrosolubili	UNI EN 1744-3			ASSENTI	-
Sostanze organiche	UNI EN 1744-1			ASSENTI	-

[...] La miscela degli aggregati impiegati per il confezionamento del misto granulare legato con cemento per lo strato di fondazione dovrà avere la composizione granulometrica, determinata in conformità alla norma UNI EN 14427-1, compresa nei limiti del fuso riportato nella tabella seguente.



TOLLERANZE AMMESSE RIFERITE ALLA COMPOSIZIONE OTTIMALE VALIDATA (MISCELA PER IL MISTO GRANULARE LEGATO CON CEMENTO)	
MATERIALE COSTITUENTE	TOLLERANZE AMMESSE
Aggregato grosso (trattenuto al setaccio 2 mm)	± 5%
Aggregato fine (passante al setaccio 2 mm e trattenuto al setaccio 0,063 mm)	± 2%

La miscela di misto granulare legato con cemento dovrà avere le caratteristiche conformi ai requisiti riportati nella tabella seguente.

CARATTERISTICHE DELLA MISCELA (MISTO GRANULARE LEGATO CON CEMENTO)				
REQUISITO	METODO DI PROVA	SIMBOLO	UM	VALORE LIMITE
Resistenza a compressione a 7 gg	UNI EN 13286-41	Rc	MPa	da 2,5 a 4,5
Resistenza a trazione indiretta a 7 gg	UNI EN 13286-42	Rit	MPa	≥ 0,25

*Il misto granulare legato con cemento e costipato in opera dovrà avere le caratteristiche di portanza conformi ai requisiti riportati nella tabella seguente.*

CARATTERISTICHE DELLO STRATO DI FONDAZIONE (MISTO GRANULARE LEGATO CON CEMENTO)				
REQUISITO	METODO DI PROVA	SIMBOLO	UM	VALORE LIMITE
Modulo di deformazione (portanza su piastra con intervallo fra 0,15 e 0,25 MPa)	CNR 146 DIN 18134	M <sub>E</sub>	MPa	> 150

### 5.5.3 A.N.A.S.

*[...] Il misto cementato per fondazione o per base sarà costituito da una miscela di aggregati lapidei, impastata con cemento ed acqua in impianto centralizzato con dosatori a peso o a volume, da stendersi in unico strato dello spessore indicate in progetto e comunque non dovrà mai avere uno spessore finito superiore ai 20 cm o inferiore ai 10 cm.*

*Saranno impiegate ghiaie e sabbie di cava e/o di fiume con percentuale di frantumato complessiva compresa tra il 30% ed il 60% in peso sul totale degli aggregati.*

Le caratteristiche degli inerti sono le medesime riportate ai punti A), B), C), D), E) del capitolato citato in precedenza “Autostrade per l’Italia”.

### 5.5.4 CAPITOLATO CIRS MINISTERO

*[...] Gli aggregati sono gli elementi lapidei miscelando i quali si ottiene il misto granulare che costituisce la base del misto cementato.*

*Essi risultano composti dall’insieme degli aggregati grossi (trattenuti al crivello UNI n.5) e dagli aggregati fini.*

*L’aggregato grosso deve essere costituito da elementi ottenuti dalla frantumazione di rocce lapidee, da elementi naturali tondeggianti, da elementi naturali tondeggianti frantumati, da elementi naturali a spigoli vivi. Tali elementi potranno essere di provenienza o natura*

petrografica diversa purché, per ogni tipologia, risultino soddisfatti i requisiti indicati nella tabella seguente.

Parametro	Normativa	Unità di misura	Valore
Los Angeles	CNR 34/73	%	≤ 30
Quantità di frantumato	-	%	≥ 30
Dimensione max	CNR 23/71	mm	40
Sensibilità al gelo <sup>3</sup>	CNR 80/80	%	≤ 30
Passante al setaccio 0.075	CNR 75/80	%	≤ 1
Contenuto di:			
- Rocce reagenti con alcali del cemento		%	≤ 1

L'aggregato fino deve essere costituito da elementi naturali o di frantumazione che possiedano le caratteristiche riassunte nella tabella seguente:

Parametro	Normativa	Unità di misura	Valore
Equivalente in sabbia	CNR 27/72	%	≥ 30; ≤ 60
Limite Liquido	CNR-UNI 10014	%	≤ 25
Indice Plastico	CNR-UNI 10014	%	NP
Contenuto di:			
- Rocce tenere, alterate o scistose	CNR 104/84	%	≤ 1
- Rocce degradabili o solfatiche	CNR 104/84	%	≤ 1
- Rocce reagenti con alcali del cemento	CNR 104/84	%	≤ 1

La miscela di aggregati (misto granulare) da adottarsi per la realizzazione del misto cementato deve avere una composizione granulometrica contenuta nel fuso riportato:

Serie crivelli <sup>4</sup> e setacci UNI		Autostrade e strade extraurbane principali	Extraurbane secondarie ed Urbane di scorrimento	Urbane di quartiere extraurbane e urbane locali
		Passante (%)		
Crivello	40	100	100	
Crivello	30	80 - 100	-	
Crivello	25	72 - 90	65 - 100	
Crivello	15	53 - 70	45 - 78	
Crivello	10	40 - 55	35 - 68	
Crivello	5	28 - 40	23 - 53	
Setaccio	2	18 - 30	14 - 40	
Setaccio	0.4	8 - 18	6 - 23	
Setaccio	0.18	6 - 14	2 - 15	
Setaccio	0.075	5 - 10	-	

## 5.6 STRATI DI BASE, COLLEGAMENTO, USURA

Generalmente per strato di base, collegamento e usura indichiamo strati separati composti da inerti lapidei di pezzatura definita impastati a caldo con bitume. Ovviamente le prestazioni che i conglomerati di base, binder e usura dovranno garantire saranno nettamente maggiori rispetto allo strato di fondazione. Nella parte che segue al solito forniremo per ogni strato alcune indicazioni

relative agli aggregati e alla possibilità di utilizzare C&D come il fresato di riciclo.

### 5.6.1 AUTOSTRADE PER L'ITALIA

*[...] I conglomerati sono costituiti da una miscela di inerti naturali freschi, riciclati, artificiali, sintetici (argilla espansa, scorie siderurgiche, loppe ecc.) ovvero dalla loro combinazione percentuale, impastati a caldo con bitume, in impianti automatizzati a volte dotati di sistemi di riscaldamento indiretto degli inerti provenienti da fresature di pavimentazioni ammalorate, di tipo continuo (Drum Mixer) o discontinuo (sistema a vagliatura), doppio tamburo ecc.*

*I cumuli delle diverse classi di inerti devono essere nettamente separati tra di loro, in zone prive di ristagni ed acqua e di sostanze argillose.*

*Il conglomerato per i vari strati (base, collegamento, usura) è posto in opera mediante macchina vibrofinitrice e costipato con idonei rulli [...].*

*Gli inerti devono essere costituiti da elementi sani, duri, di forma poliedrica, puliti esenti da polvere e da materiali estranei secondo le norme CNR fasc. IV/1953, cap. 1 e 2. Gli elementi litoidi non devono mai avere forma appiattita, allungata o lenticolare.*

*La miscela degli inerti è costituita dall'insieme degli aggregati grossi e dagli aggregati fini ed eventuali additivi (filler) secondo la definizione delle norme CNR art. 1 del fascicolo IV/1953, con la possibilità di impiegare inerti provenienti da fresature, artificiali e/o sintetici (argilla espansa, scorie siderurgiche, loppe ecc).*

*Viene considerato inerte di I categoria un materiale omogeneo che abbia  $C.L.A. \geq 0,45$ ,  $LA < 18$  e coefficienti di forma rispettivamente  $CF < 3$ ,  $CA < 1,58$  e  $CL < 1,9$ .*

*L'aggregato grosso e fine deve essere costituito da inerti che potranno essere di provenienza o natura petrografica diversa, purché alle prove di seguito elencate eseguite su campioni rispondenti alla miscela che si intende formare, dia i risultati richiesti.*

*[...]*

#### **Percentuale di frantumato nella miscela inerti superiore a 2 mm**

*Strato di base : minimo 65% di inerte frantumato.*

*Strato di collegamento : 100% di inerte frantumato (\*), escluso quello proveniente da eventuali integrazioni.*

*Strato di usura : 100% di inerte frantumato (\*\*) escluso inerti non naturali.*

*(\*) Per inerte frantumato si intende un inerte che non abbia nessuna faccia arrotondata.*

*(\*\*) Considerata l'eterogeneità della natura mineralogica di provenienza (silicea, calcarea, ecc.) dei materiali alluvionali, la percentuale di impiego nelle miscele superficiali sarà definita di volta in volta nelle curve di progetto con la funzione SRC/MCL.*

**Percentuale di frantumato nella miscela inerti superiore a 2 mm.**

Strato di base : minimo 60%

Strato di collegamento : minimo 65%

Strato di usura : minimo 80%

Le sabbie di frantumazione devono provenire da sabbie naturali, artificiali o sintetiche.

**Los Angeles**

La perdita in peso alla prova Los Angeles eseguita sulle singole pezzature (CNR 34/73) deve essere:

Strato di base : < 25% in peso.

Strato di collegamento : < 25% in peso.

Strato di usura : da definire nella fase di progetto in funzione della natura degli inerti utilizzati ; la funzione SRC/MCL si riserva la facoltà, a suo insindacabile giudizio, di decidere l' idoneità degli inerti in base alle caratteristiche prestazionali richieste dalla miscela.

**Coefficiente di forma**

I coefficienti di forma  $C_f$  e di appiattimento  $C_a$  (CNR 95/84) dovranno essere per tutti gli Strati < 3 e < 1,58.

**Equivalente in sabbia**

L'equivalente in sabbia determinato sulle singole pezzature devono essere per tutti gli Strati >70% (CNR 27/72).

[...] Le miscele dei conglomerati devono avere una composizione granulometrica compresa nei fusi di seguito elencati e una percentuale di bitume riferita al peso totale degli inerti, compresa tra i sotto indicati intervalli per i diversi tipi di conglomerato.

Composizioni granulometriche indicative (fusi da usare come limiti nelle curve di progetto).

Serie crivelli e setacci UNI	Passante totale % in peso			
	STRATO DI BASE	STRATO DI COLLEGAMENTO	STRATO DI USURA TIPO "A"	STRATO DI USURA TIPO "B"
Crivello 30	100			
" 25	70 - 95	100		
" 20			100	
" 15	45 - 70	65 - 85	90 - 100	100
" 10	35 - 60	55 - 75	70 - 90	70 - 90
" 5	25 - 50	35 - 55	40 - 55	40 - 60
Setaccio 2	18 - 38	25 - 38	25 - 38	25 - 38
" 0,4	6 - 20	10 - 20	11 - 20	11 - 20
" 0,18	4 - 14	5 - 15	8 - 15	8 - 15
" 0,075	4 - 8	4 - 8	6 - 10	6 - 10

Fuso A - usure da 4 - 6 cm

*Fuso B - usure da 3 cm*

**Utilizzo del materiale fresato**

Nella tavola che riportiamo di seguito sono indicate le percentuali di aggregati e di materiale fresato riciclato che possono essere impiegati per i vari strati. Si fa riferimento a tre diversi tipi di bitume: un bitume di base, uno a modifica “Medium” e uno a modifica “Hard” .

COMPOSIZIONE				
Tipi di Conglomerato	Strati di impiego	Materiali freschi (% di impiego nella miscela)	Materiali fresati (% di impiego nella miscela)	Attivanti Chimici Funzionali [A.C.F.] (% in peso riferita al bitume totale)
CB “Normali”	Base	> 75	< 25	3 – 5 (*)
	Collegamento	≥ 85	≤ 15	-----
	Usura	≥ 90	≤ 10	-----
CBM “Medium”	Base	> 70	< 30	3 – 5 (*)
	Collegamento	≥ 75	≤ 25	-----
	Usura	≥ 80	≤ 20	-----
CBH “Hard”	Base	≥ 80	≤ 20	3 – 5 (*)
	Collegamento	≥ 85	≤ 15	-----
	Usura	≥ 90	≤ 10	-----

*[...] Per ogni lavorazione, le percentuali in peso di materiale fresato definito di “integrazione” riferite al totale della miscela degli inerti, devono essere comprese nei limiti riportati nella tavola riportata sopra.*

*Per conglomerato bituminoso preesistente fresato, denominato “materiale da integrazione” deve intendersi quello proveniente dalla frantumazione in frantoio di lastre o blocchi di conglomerati demoliti con sistemi tradizionali, oppure dalla fresatura in sito eseguita con idonee macchine (preferibilmente a freddo).*

*Per l’ottimizzazione della curva granulometrica del fresato e del legante presente e per consentire lavorazioni uniformi, nel caso di utilizzo di materiali provenienti da fresature diverse sia per provenienza che per natura, potrebbe essere necessaria, prima del suo impiego, una ulteriore granulazione; occorre tener presente che tale operazione determina un ulteriore aumento delle parti fini nel materiale.*

*Il restante materiale deve essere costituito da inerti freschi con i requisiti di accettazione previsti per i conglomerati. (vedi sopra)*

*Si deve usare materiale fresato di qualsiasi provenienza per impieghi negli strati di base e collegamento; materiali provenienti da strati superficiali (usura, microtappeto, drenante ecc) per lo strato di usura [...].*

## 5.6.2 A22 – AUTOSTRADA DEL BRENNERO

### *Strato di base*

*Lo strato di base è costituito da una miscela di aggregati lapidei di primo impiego, bitume modificato a bassa viscosità, filler ed eventuali additivi; è consentito l'utilizzo di conglomerato bituminoso riciclato in percentuale massima del 30%. La miscela è prodotta a caldo, previo riscaldamento degli aggregati e del legante.*

*Il materiale viene steso in opera mediante idonea macchina vibrofinitrice assistita da meccanismi di autolivellamento e munita di rasatore per la precompattazione ed è costipato con rulli gommati e/o metallici vibranti. Lo spessore dello strato è determinato dal Progettista.*

*Il conglomerato bituminoso utilizzato per lo strato di base deve essere caratterizzato in conformità ai requisiti delle miscele utilizzate per uso stradale specificati nella norma UNI EN 13108-1 e viene designato secondo la seguente dicitura:*

<b>CB</b>	<b>31,5</b>	<b>base</b>	<b>bm 50 - 70</b>
-----------	-------------	-------------	-------------------

*Gli aggregati lapidei costituiscono la struttura portante del conglomerato bituminoso e comprendono gli aggregati grossi, gli aggregati fini e l'aggregato filler.*

*I requisiti di accettazione degli aggregati lapidei impiegati, qualora non specificato diversamente, dovranno essere conformi alle seguenti prescrizioni:*

- *UNI EN 932-3 “Procedura e terminologia per la descrizione petrografica semplificata”;*
- *Direttiva Prodotti da Costruzione 89/106 CEE;*
- *Allegato ZA della Norma armonizzata UNI EN 13043 “ Aggregati per miscele bituminose e trattamenti superficiali per strade, aeroporti ed altre aree soggette a traffico”.*

*L'Aggregato grosso appartiene alla classe granulometrica compresa tra  $d > 2 \text{ mm}$  e  $D \leq 45 \text{ mm}$ ; dovrà essere ottenuto da frantumazione di rocce dure e dovrà essere costituito da pietrischetti e graniglie privi di elementi in fase di alterazione, polvere o materiali estranei. I materiali dovranno soddisfare i requisiti riportati nella tabella seguente.*

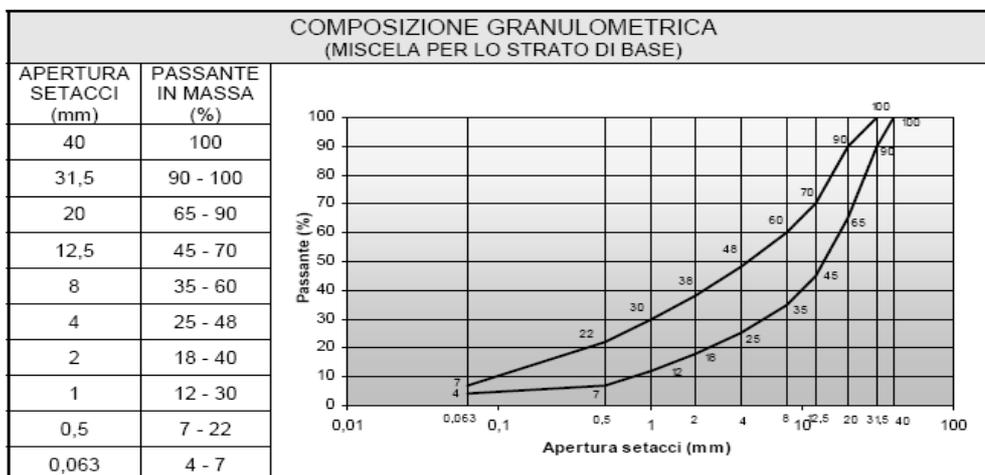
CARATTERISTICHE DELL'AGGREGATO GROSSO (MISCELA PER LO STRATO DI BASE)					
REQUISITO	METODO DI PROVA	SIMBOLO	UM	VALORE LIMITE	CATEGORIA (UNI EN 13043)
Dimensione massima	UNI EN 933-1	$D_{max}$	mm	40	-
Requisito di granulometria	UNI EN 933-1	$G_C$	%		$G_C90-10$
Resistenza alla frammentazione	UNI EN 1097-2	LA	%	$\leq 25$	LA <sub>25</sub>
Resistenza al gelo/disgelo	UNI EN 1367-1	F	%	<1	F <sub>1</sub>
Percentuale di superfici frantumate	UNI EN 933-5	C	%	$\geq 70$	C <sub>95/11</sub>
Affinità ai leganti bituminosi	UNI EN 12697-11	-	%	<5	-
Coefficiente di appiattimento	UNI EN 933-3	FI	%	<20	FI <sub>20</sub>

[...] Per il confezionamento della miscela, oltre agli aggregati lapidei di primo impiego ed al bitume modificato, è consentito l'utilizzo di conglomerato bituminoso di recupero (riciclato) proveniente dalla fresatura, a freddo, di pavimentazioni.

Questo materiale, denominato "fresato", potrà essere impiegato nella quantità massima del 30% in peso riferito alla miscela degli aggregati lapidei nel pieno rispetto delle caratteristiche tecniche previste dalle presenti Prescrizioni tecniche.

Le caratteristiche del conglomerato bituminoso di recupero devono essere determinate in conformità alla norma UNI EN 13108-8. In particolare il cumulo deve essere privo di materie estranee ed il materiale, prima dell'impiego, deve essere opportunamente vagliato per evitare l'inserimento di elementi delle dimensioni superiori a quelle massime della miscela finale. Devono essere accertate il tipo, la quantità e le proprietà del legante e degli aggregati costituenti[...].

La miscela ottimale degli aggregati lapidei impiegati per il confezionamento del conglomerato bituminoso per lo strato di base dovrà avere una composizione granulometrica, determinata in conformità alle norme UNI EN 933-1 ed UNI EN 12697-2 utilizzando i setacci appartenenti al gruppo base + 2, compresa nei limiti del fuso riportato nella tabella seguente.



### **Strato di collegamento**

*Lo strato di collegamento è costituito da una miscela di aggregati lapidei di primo impiego, bitume modificato a bassa viscosità, filler ed eventuali additivi; è consentito l'utilizzo di conglomerato bituminoso riciclato in percentuale massima del 10%.*

*[...] Il conglomerato bituminoso utilizzato per lo strato di collegamento deve essere caratterizzato in conformità ai requisiti delle miscele utilizzate per uso stradale specificati nella norma UNI EN 13108-1 e viene designato secondo la seguente dicitura:*

<b>CB</b>	<b>16</b>	<b>binder</b>	<b>bm 50 - 70</b>
-----------	-----------	---------------	-------------------

Anche nel caso dello strato di collegamento gli aggregati sono costituiti da aggregato grosso, fine e filler. Nel caso dell'aggregato grosso la richiesta specifica è che il prodotto derivi dalla frantumazione di rocce ignee (porfido quarzifero o andesite).

*[...] Per il confezionamento della miscela, oltre agli aggregati lapidei di primo impiego ed al bitume modificato, è consentito l'utilizzo di conglomerato bituminoso di recupero (riciclato) proveniente dalla fresatura, a freddo, di pavimentazioni.*

*Questo materiale, denominato "fresato", potrà essere impiegato nella quantità massima del 10% in peso riferito alla miscela degli aggregati lapidei nel pieno rispetto delle caratteristiche tecniche previste dalle presenti Prescrizioni tecniche. I requisiti degli aggregati costituenti il materiale riciclato dovranno essere conformi alle medesime prescrizioni previste per gli aggregati di primo impiego descritti[...].*

### **Strato di usura**

Per gli strati di collegamento ad alto modulo e gli strati di usura non sono previste percentuali di utilizzo di materiale fresato riciclato.

### **5.6.3 A.N.A.S.**

#### **Strato di base**

*[...] Lo strato di base è costituito da un misto granulare di frantumato, ghiaia, sabbia ed eventuale additivo normalmente dello spessore di 15 cm, impastato con bitume a caldo, previo preriscaldamento degli aggregati, steso in opera mediante macchina vibrofinitrice e costipato con rulli gommati, vibranti gommati e metallici.*

*[...] L'aggregato grosso sarà costituito da frantumati (nella misura che di volta in volta sarà stabilita a giudizio della Direzione Lavori e che comunque non potrà essere inferiore al 30% della miscela degli inerti) e da ghiaie che dovranno rispondere al seguente requisito:*

- perdita di peso alla prova Los Angeles eseguita sulle singole pezzature inferiore al 25%.

*In ogni caso gli elementi dell'aggregato dovranno essere costituiti da elementi sani, duri, durevoli, a superficie ruvida, puliti ed esenti da polvere e da materiali estranei, inoltre non dovranno mai avere forma appiattita, allungata o lenticolare.*

*L'aggregato fino sarà costituito in ogni caso da sabbie naturali e di frantumazione (la percentuale di queste ultime sarà prescritta di volta in volta dalla Direzione Lavori in relazione ai valori di scorrimento delle prove Marshall, ma comunque non dovrà essere inferiore al 30% della miscela delle sabbie) che dovranno rispondere al seguente requisito:*

- *equivalente in sabbia (C.N.R. 27 -1972) superiore a 50.*

*Gli eventuali additivi, provenienti dalla macinazione di rocce preferibilmente calcaree o costituiti da cemento, calce idrata, calce idraulica, polveri d'asfalto, dovranno soddisfare ai seguenti requisiti:*

- *setaccio UNI 0,18 (ASTM n. 80): passante in peso: 100%;*
- *setaccio UNI 0,075 (ASTM n. 200): passante in peso: 90%.*

*La granulometria dovrà essere eseguita per via umida.*

*La miscela degli aggregati da adottarsi dovrà avere una composizione granulometrica contenuta nel seguente fuso:*

<b>Serie crivelli e setacci UNI</b>	<b>Passante: % totale in peso</b>
Crivello 40	100
Crivello 30	80 ÷ 100
Crivello 25	70 ÷ 95
Crivello 15	45 ÷ 70
Crivello 10	35 ÷ 60
Crivello 5	25 ÷ 50
Setaccio 2	20 ÷ 40
Setaccio 0,4	6 ÷ 20
Setaccio 0,18	4 ÷ 14
Setaccio 0,075	4 ÷ 8

### **Strati di collegamento e usura**

*[...] La parte superiore della sovrastruttura stradale sarà, in generale, costituita da un doppio strato di conglomerato bituminoso steso a caldo, e precisamente: da uno strato inferiore di collegamento (binder) e da uno strato superiore di usura, secondo quanto stabilito dalla Direzione Lavori.*

*Il conglomerato per ambedue gli strati sarà costituito da una miscela di pietrischetti, graniglie, sabbie ed additivi.*

*[...] L'aggregato grosso (pietrischetti e graniglie) dovrà essere ottenuto per frantumazione ed essere costituito da elementi sani, duri, durevoli, approssimativamente poliedrici, con spigoli vivi, a superficie ruvida, puliti ed esenti da polvere o da materiali estranei.*

*L'aggregato grosso sarà costituito da pietrischetti e graniglie che potranno anche essere di provenienza o natura petrografica diversa, purché alle prove appresso elencate, eseguite su campioni rispondenti alla miscela che si intende formare, risponda ai seguenti requisiti.*

**Per strati di collegamento (BINDER)**

- *perdita in peso alla prova Los Angeles eseguita sulle singole pezzature secondo le norme ASTM C 131 - AASHO T 96, inferiore al 25% (C.N.R. 34-1973);*
- *indice dei vuoti delle singole pezzature, secondo C.N.R., fascicolo 4/1953 - (“Norme per l'accettazione dei pietrischi, dei pietrischetti, delle graniglie, delle sabbie e degli additivi per costruzioni stradali”), inferiore a 0,80;*
- *coefficiente di imbibizione, secondo C.N.R., fascicolo 4/1953 - (“Norme per l'accettazione dei pietrischi, dei pietrischetti, delle graniglie, delle sabbie e degli additivi per costruzioni stradali”) inferiore a 0,015 (C.N.R. 137-1992);*
- *materiale non idrofilo, secondo C.N.R., fascicolo 4/1953 - (“Norme per l'accettazione dei pietrischi, dei pietrischetti, delle graniglie, delle sabbie e degli additivi per costruzioni stradali”).*

**Per strati di usura:**

- *perdita in peso alla prova Los Angeles eseguita sulle singole pezzature secondo le norme ASTM C 131 - AASHO T 96, inferiore od uguale al 20% (C.N.R. 34 -1973);*
- *almeno un 30% in peso del materiale dell'intera miscela deve provenire da frantumazione di rocce che presentino un coefficiente di frantumazione minore di 100 e resistenza a compressione, secondo tutte le giaciture, non inferiore a 140 N/mm<sup>2</sup>, nonché resistenza alla usura minima 0,6;*
- *indice dei vuoti delle singole pezzature, secondo C.N.R., fascicolo n. 4/1953 - (“Norme per l'accettazione dei pietrischi, dei pietrischetti, delle graniglie, delle sabbie e degli additivi per costruzioni stradali”), inferiore a 0,85;*
- *coefficiente di imbibizione, secondo C.N.R., fascicolo 4/1953 - (“Norme per l'accettazione dei pietrischi, dei pietrischetti, delle graniglie, delle sabbie e degli additivi per costruzioni stradali”), inferiore a 0,015 (C.N.R 137-1992);*

[...] L'aggregato fino sarà costituito in ogni caso da sabbie naturali o di frantumazione che dovranno soddisfare ai requisiti dell' Art. 5 delle norme C.N.R. fascicolo n. 4 del 1953;

ed in particolare:

- equivalente in sabbia, determinato con la prova AASHO T 176, (e secondo la norma C.N.R. B.U. n. 27 del 30-3-1972) non inferiore al 55%;
- materiale non idrofilo

[...] La miscela degli aggregati da adottarsi per lo strato di collegamento dovrà avere una composizione granulometrica contenuta nel seguente fuso:

<i>Serie crivelli e setacci U.N.I</i>	<i>Passante: % totale in peso</i>
Crivello 25	100
Crivello 15	65 ÷ 100
Crivello 10	50 ÷ 80
Crivello 5	30 ÷ 60
Setaccio 2	20 ÷ 45
Setaccio 0,4	7 ÷ 25
Setaccio 0,18	5 ÷ 15
Setaccio 0,075	4 ÷ 8

(...) La miscela degli aggregati da adottarsi per lo strato di usura dovrà avere una composizione granulometrica contenuta nei seguenti fusi:

<i>Serie crivelli e setacci U.N.I</i>	<i>Passante: % totale in peso</i>	
	<i>Fuso tipo "A"</i>	<i>Fuso tipo "B"</i>
Crivello 20	100	--
Crivello 15	90 – 100	100
Crivello 10	70 – 90	70 – 90
Crivello 5	40 – 55	40 – 60
Setaccio 2	25 – 38	25 – 38
Setaccio 0,4	11 – 20	11 – 20
Setaccio 0,18	8 – 15	8 – 15
Setaccio 0,075	6 – 10	6 – 10

Il fuso tipo “A” dovrà comprendere le curve per strati di usura dello spessore compreso tra 4 e 6 cm.

Il fuso tipo “B” dovrà comprendere le curve per strati di usura dello spessore di 3 cm.

### 5.7 RISULTATI DELLE PROVE DI LABORATORIO

Alla luce dei capitolati introdotti e delle opere descritte si ritiene opportuno presentare in forma schematica alcuni risultati delle prove di laboratorio descritte nel capitolo 4 per avere idea immediata dei materiali potenzialmente concorrenti alla costruzione di strade. A parte riporteremo le curve granulometriche di alcuni materiali specifici.

<i>Prova</i>	<i>Stabilizzato di traversine 0/30</i>	<i>Stabilizzato di cemento 0/30</i>
Coeff. Los Angeles LA	27	
Equivalente in sabbia SE	42	
Indice forma SI	6	
Indice appiattimento FI	9	
% superfici frantumate C%	99	76
Contenuto fini < 0,063 mm	3,3%	4,1%

*Tab. 1 – risultati delle prove per la marcatura CE*

<i>Prova</i>	<i>Macinato di pietra C.A.R. 0/30</i>	<i>Sabbietta 0/9</i>
Coeff. Los Angeles LA	34	
Equivalente in sabbia SE	47	44
Indice forma SI	24	
Indice appiattimento FI	28	
% superfici frantumate C	93%	
Contenuto fini < 0,063 mm	5,1 %	11,4%

*Tab. 2 – risultati delle prove per la marcatura CE*

<i>Prova</i>	<i>Breccia di pietra C.A.R. 0/80</i>	<i>Macinato d’asfalto 0/30</i>
Coeff. Los Angeles LA		24
Indice forma SI	31	3
Indice appiattimento FI	36	5
% superfici frantumate C	93%	82
Contenuto fini < 0,063 mm	3,1 %	0,3%

*Tab. 3 – risultati delle prove per la marcatura CE*

<i>Prova</i>	<i>Stabilizzato di roccia 0/30</i>	<i>Macinato gres 0/30</i>
Coeff. Los Angeles LA	33	32
Equivalente in sabbia SE	16	
Indice forma SI	13	25
Indice appiattimento FI	23	66
% superfici frantumate C	99	100
Contenuto fini < 0,063 mm	5,8 %	2,8 %

Tab. 4 – risultati delle prove per la marcatura CE

Riportiamo ora per i materiali proposti il fuso granulometrico: sarà molto importante verificare l'assortimento dei materiali oltre alle dimensioni massime e al contenuto di fini.

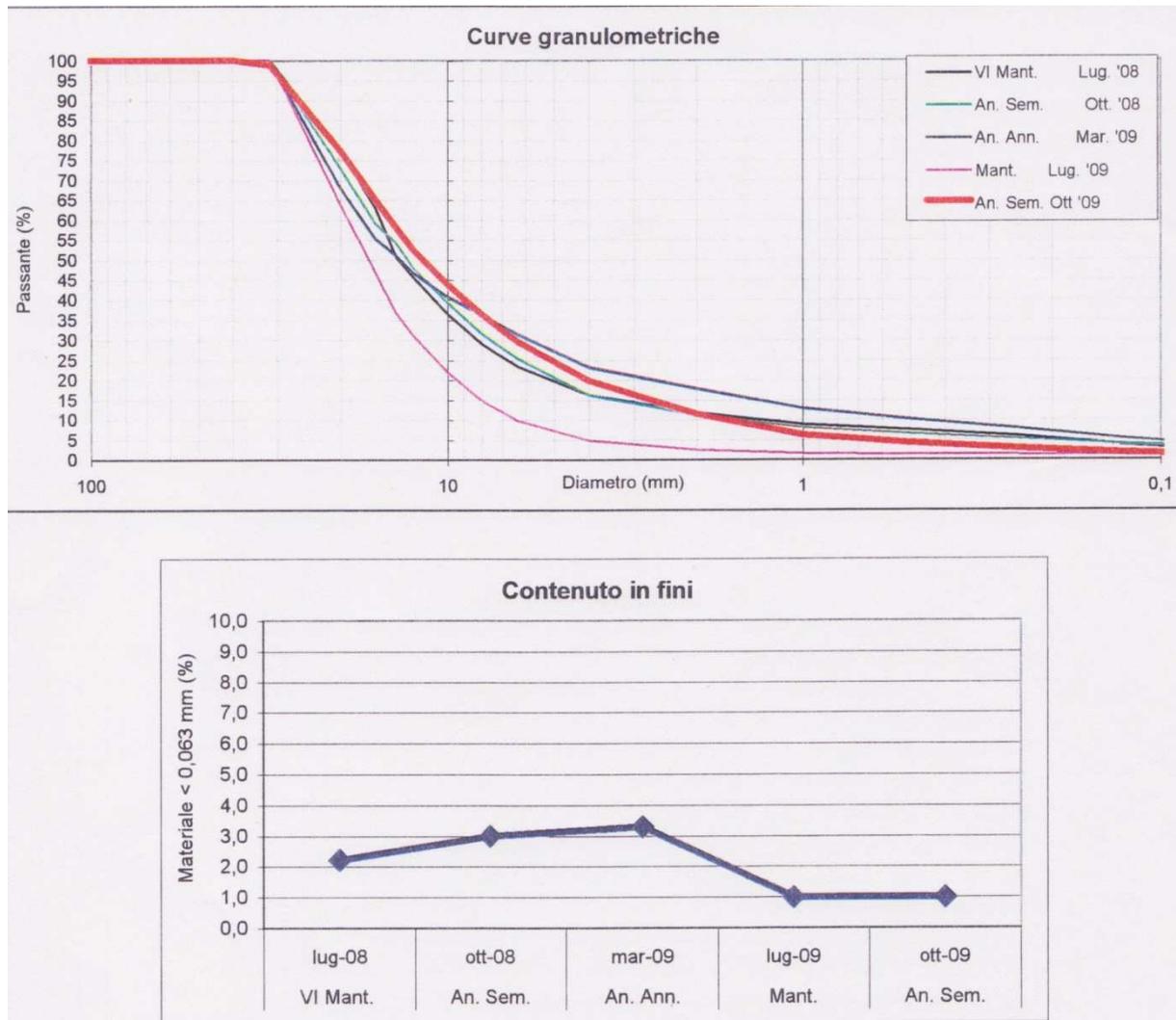


Fig. 5.1 – fuso granulometrico e contenuto di fini dello stabilizzato di traversine 0/30 mm

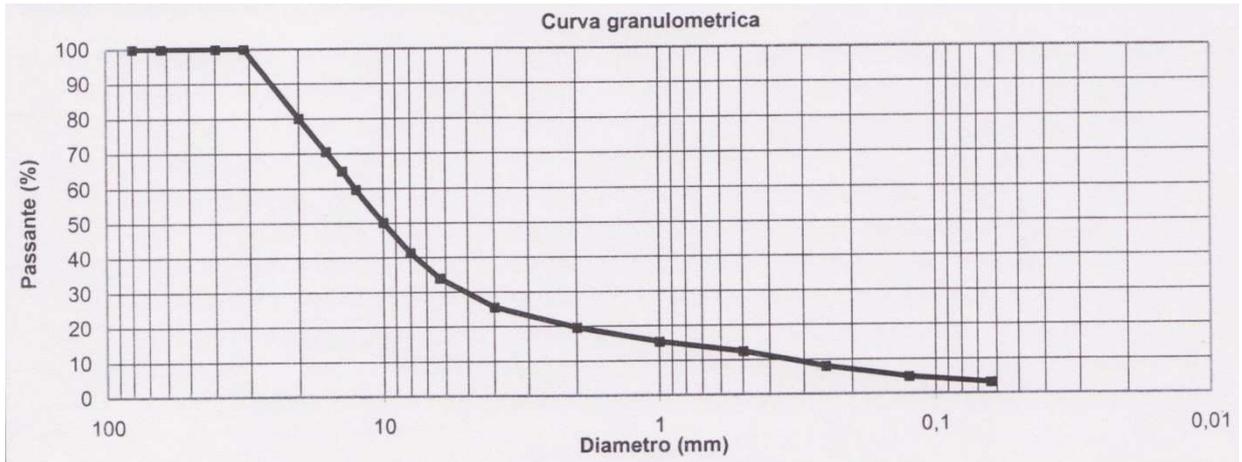


Fig. 5.2 - curva granulometrica dello stabilizzato di cemento 0/30 mm

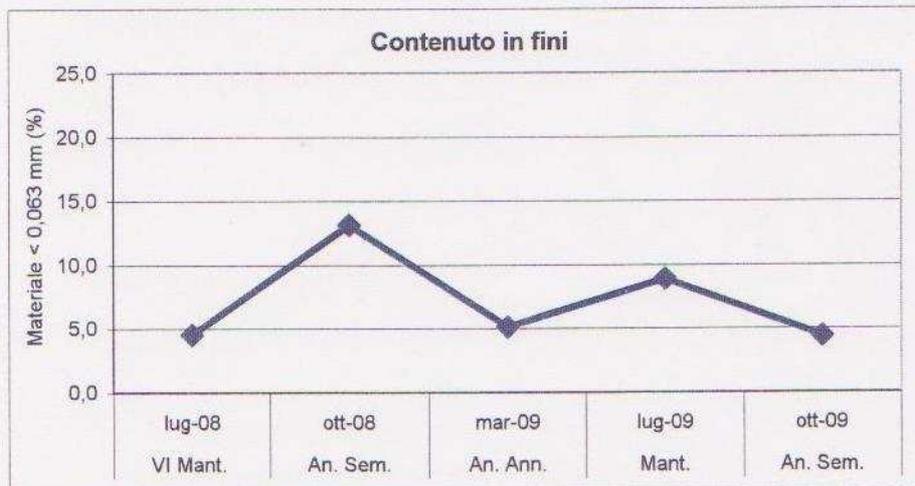
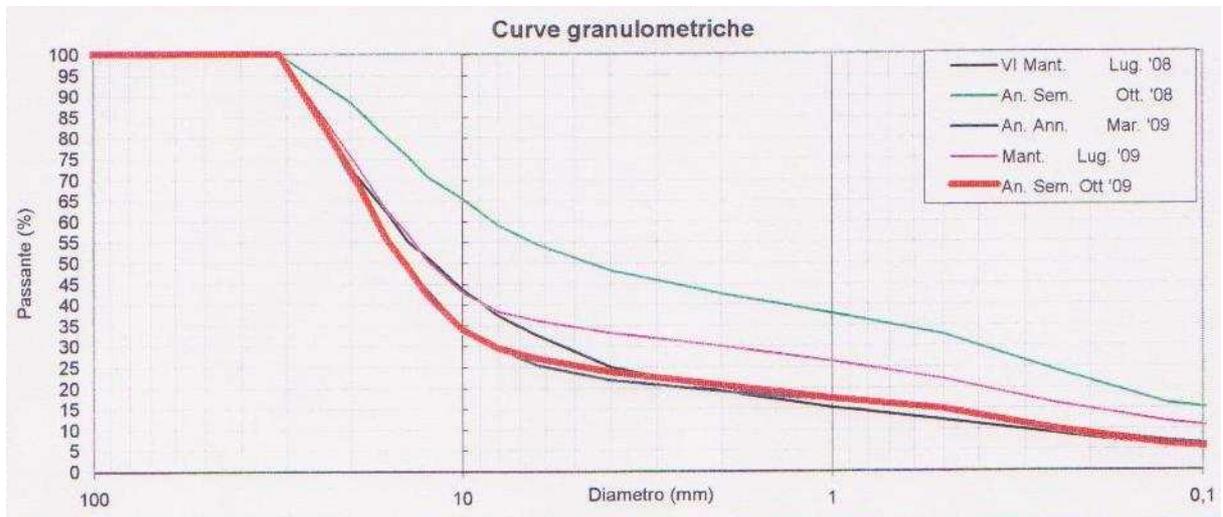


Fig.5. 3 – fuso granulometrico e contenuto di fini del macinato di pietra C.A.R. 0/30 mm

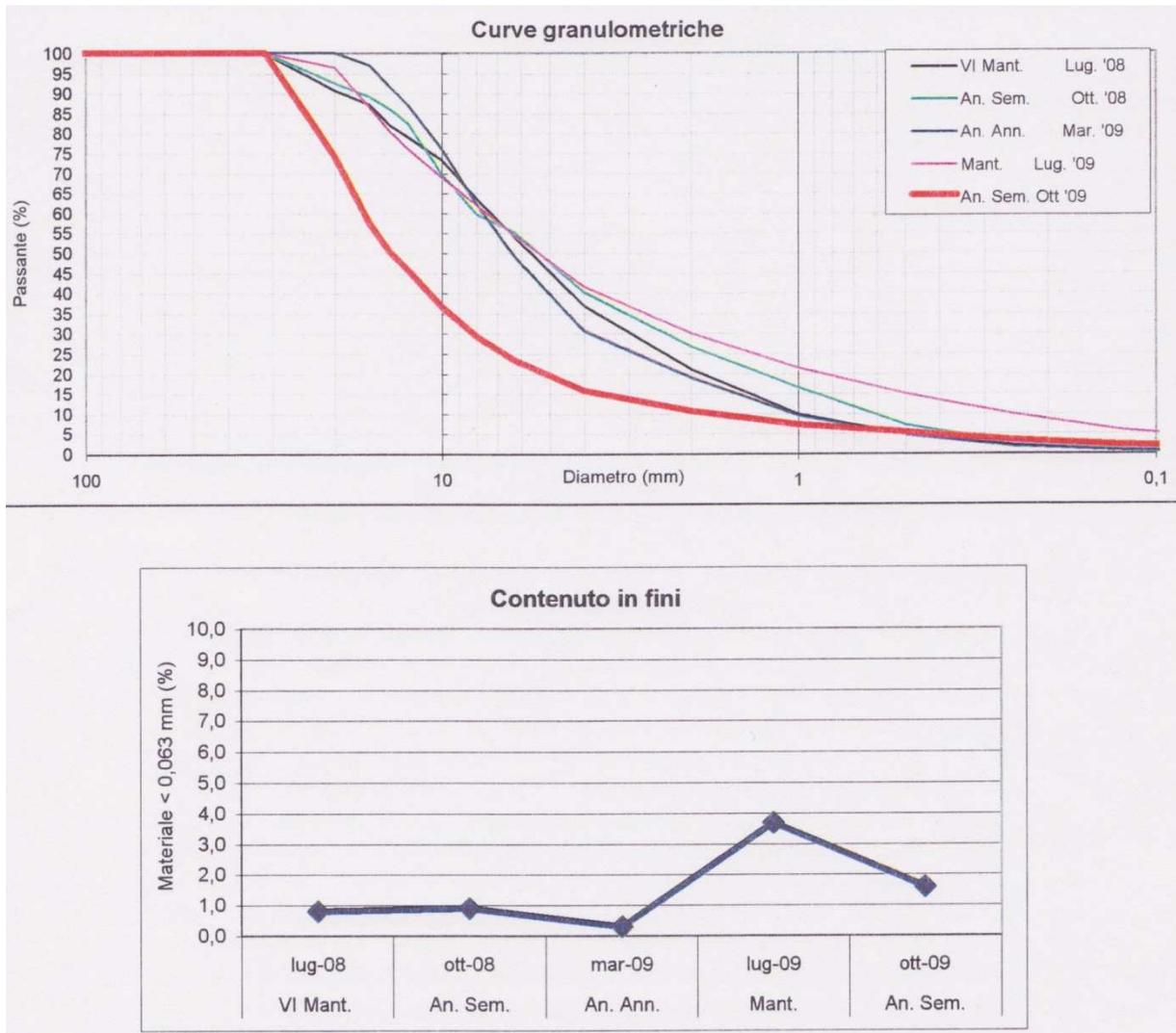


Fig. 5.4 – fuso granulometrico e contenuto di fini del macinato d'asfalto

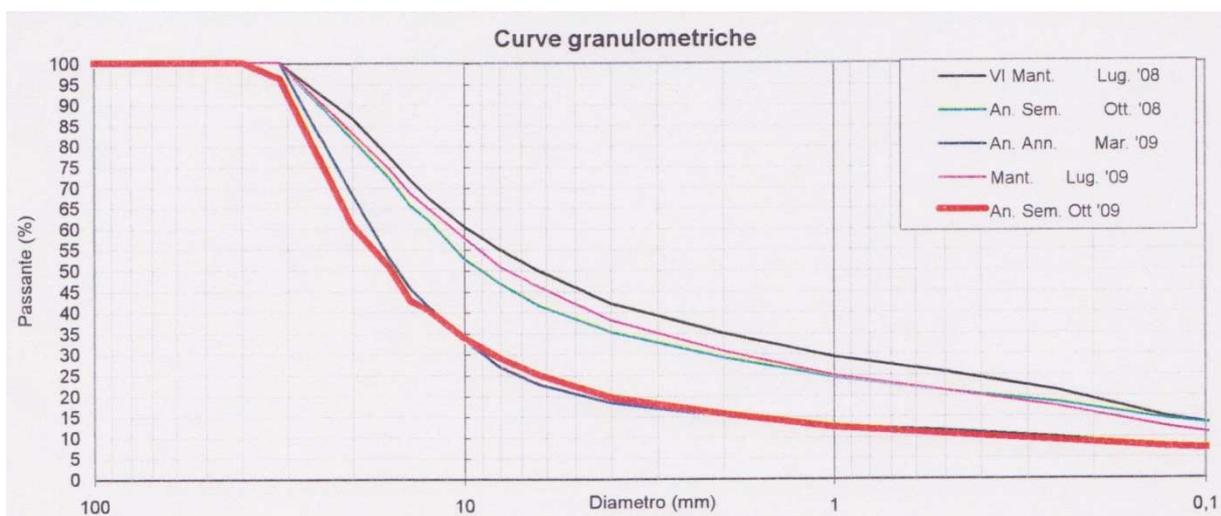


Fig. 5.5 – fuso granulometrico del misto stabilizzato di roccia e arenaria 0/30 mm

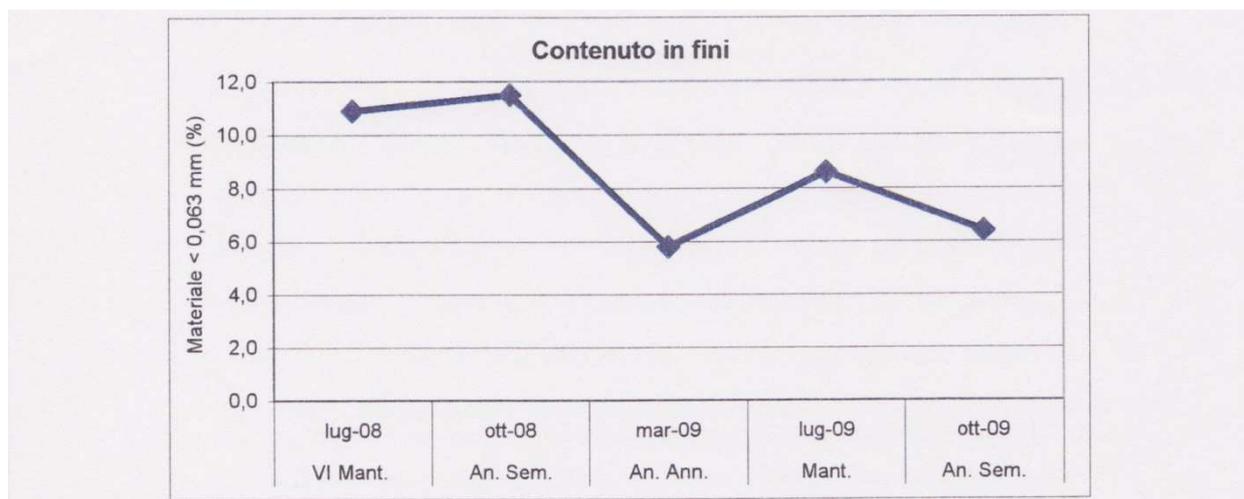


Fig. 5.5 – contenuto in fini del misto stabilizzato di roccia e arenaria 0/30 mm

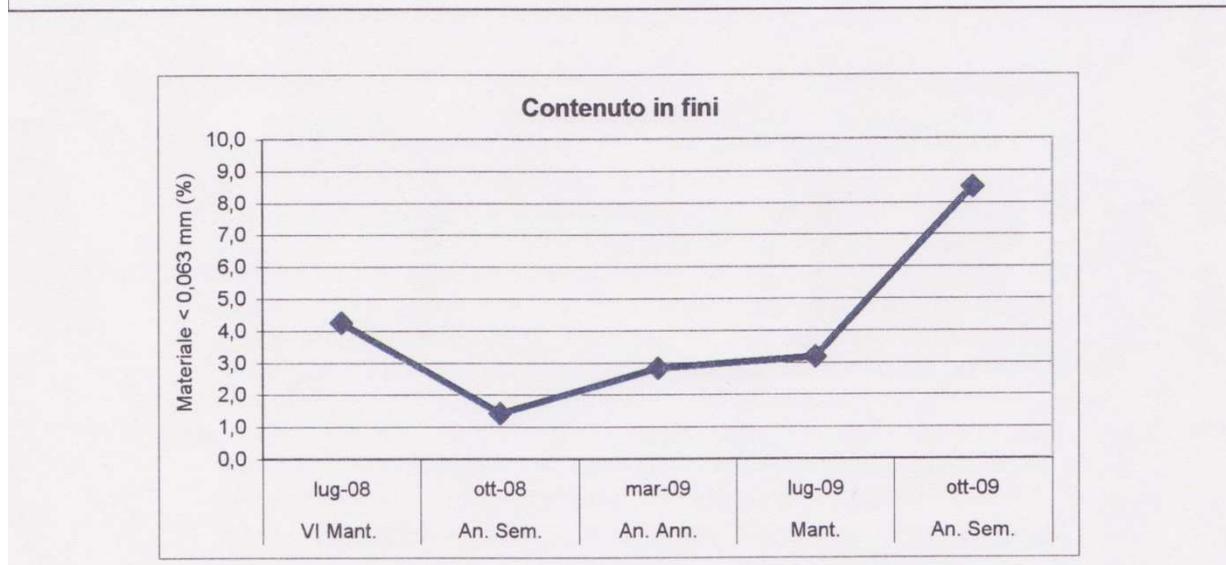
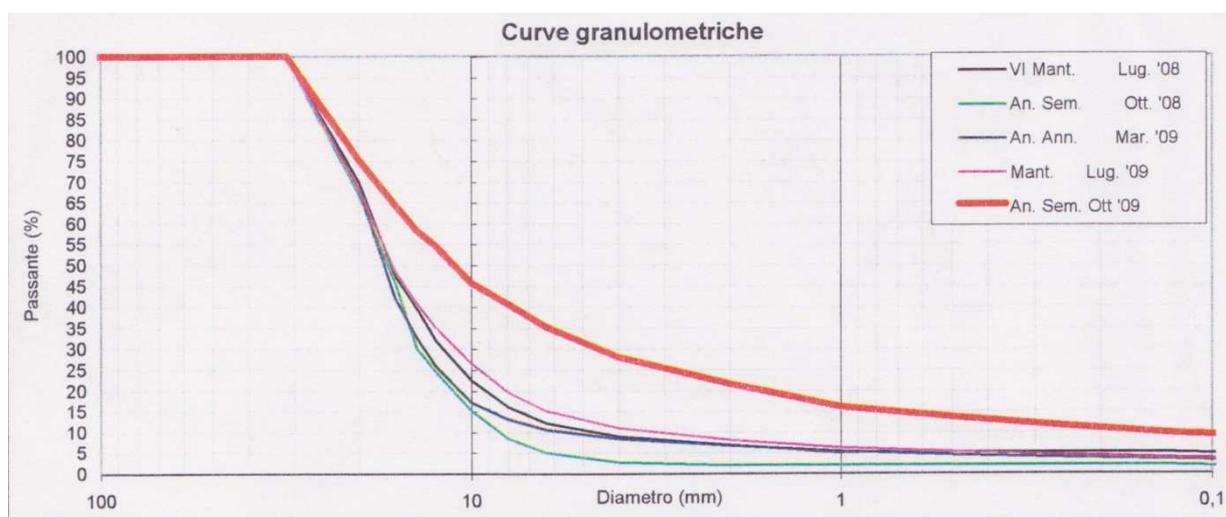


Fig. 5.6 – fuso granulometrico e contenuto in fini del macinato di gres 0/30 mm

## 5.8 CONCLUSIONI

A questo punto è ovvio trarre alcune conclusioni sulla possibilità di utilizzare un materiale riciclato all'interno di una sovrastruttura stradale. Da considerazioni esclusivamente granulometriche possiamo affermare che tutti i materiali con dimensione massima degli aggregati < 30 mm possono trovare impiego per:

- fondazioni non legate o frazione intermedia per strati di fondazione non legati;
- misto cementato;
- conglomerati bituminosi di base.

Gli aggregati con dimensione massima pari a 80 mm possono essere impiegati efficacemente per:

- strati di fondazione non legati.

Tratteremo i materiali fresati separatamente, poiché questi hanno uno spettro di impiego maggiore. Un conglomerato bituminoso riciclato può essere reimpiegato per:

- strati di fondazione non legati;
- strati di base
- strati di collegamento (binder);
- strati di usura.

Solitamente si usa l'accortezza di impiegare un materiale fresato nel medesimo strato da cui proviene poiché gli inerti utilizzati per il confezionamento del conglomerato bituminoso sono di natura e durezza differenti per i diversi strati della sovrastruttura.

Fermo restando che l'adozione di un nuovo materiale all'interno di un capitolato d'appalto è un'azione che deve partire da un livello centrale è del tutto lecita, poiché espressamente prevista, la sperimentazione volta alla conoscenza delle caratteristiche prestazionali di nuovi materiali. A tale proposito nel prossimo capitolo si descriverà la realizzazione di un campo sperimentale per valutare la portanza di alcuni materiali sopracitati.

## Capitolo 6

### IL CAMPO SPERIMENTALE

#### 6.1 PREMESSA

In questo capitolo, come precedentemente accennato, verranno descritte tutte le fasi di realizzazione di un campo sperimentale. Il campo simula in vera grandezza un rilevato stradale ed è realizzato con materiali riciclati C.A.R.. Per lo sviluppo di questo capitolo partiremo da riferimenti normativi per poi descrivere gli elementi caratterizzanti del progetto e delle fasi di realizzazione nonché le caratteristiche dei materiali impiegati e delle fasi di testing.

#### 6.2 FINALITÀ DI UN CAMPO PROVE

La scelta di realizzare un campo sperimentale trae le proprie motivazioni nell'esigenza di definire le caratteristiche prestazionali di portanza dei materiali oggetto di prova. Il capitolato del *Centro Sperimentale Interuniversitario di Ricerca Stradale (CIRS)* prevede a tale proposito che anche durante l'esecuzione di lavorazioni stradali l'impresa possa proporre materiali e prodotti di tipo innovativo, anche non espressamente previsti dal progetto, purché essi vengano sottoposti, prima del loro impiego, ad adeguate verifiche tese ad accertarne l'idoneità alla particolare utilizzazione. L'impresa avrà quindi cura di presentare, per l'approvazione della Direzione Lavori, un programma dettagliato sulle modalità di esecuzione dei lavori basato su sperimentazione o prove in vera grandezza. Lo scopo sarà definire, sulla scorta dei risultati delle prove preliminari di laboratorio e con l'impiego dei mezzi effettivamente disponibili, gli spessori di stesa ed il numero di passaggi dei compattatori che permettono di raggiungere le prestazioni (grado di addensamento e/o portanza) prescritte.

Nel caso la sperimentazione avvenga durante l'esecuzione di lavorazioni stradali gli oneri delle prove e delle verifiche sono a totale ed esclusivo carico dell'impresa. Tali oneri sono compresi nel prezzo d'appalto. Il sito della prova può essere compreso nell'area d'ingombro del corpo stradale, anche in corrispondenza di un tratto di rilevato: in questo caso dopo la sperimentazione è fatto obbligo all'Impresa di demolire le sole parti del manufatto non accettabili, sulla base delle prestazioni ad esse richieste nella configurazione finale.

La sperimentazione in vera grandezza deve riguardare ogni approvvigionamento omogeneo di materiale che si intende utilizzare per la costruzione del corpo stradale e va completata prima di iniziare l'esecuzione dei rilevati. Se le prove vengono condotte su materiali diversi, queste

dovranno essere completate per ognuno di essi prima del relativo impiego nell'opera. Anche in caso di variazione del parco macchine e delle modalità esecutive è necessario ripetere la sperimentazione.

Riportiamo le caratteristiche fondamentali previste dal Capitolato CIRS per un generico campo prove:

- *l'area prescelta per la prova in vera grandezza deve essere perfettamente livellata, compattata e tale da presentare caratteristiche di deformabilità analoghe a quelle dei materiali in esame;*
- *la larghezza del rilevato deve risultare almeno pari a tre volte quella del rullo;*
- *i materiali vanno stesi in strati di spessore costante (o variabile qualora si voglia individuare lo spessore ottimale), provvedendo a compattarli con regolarità ed uniformità e simulando, durante tutte le fasi di lavoro, le modalità esecutive che poi saranno osservate nel corso dei lavori;*
- *per ciascun tipo di materiale e per ogni modalità esecutiva, occorre mettere in opera almeno 2 o 3 strati successivi; per ciascuno di essi vanno eseguite prove di controllo dopo successive passate (ad esempio, dopo 4, 6, 8, passate).*

I risultati delle prove si riportano su un apposito verbale redatto dalla Direzione Lavori, che trarrà le conclusioni sull'accettabilità dei materiali e delle modalità di posa in opera.

### 6.3 LOCALIZZAZIONE E IDONEITÀ DELL'AREA DI CANTIERE

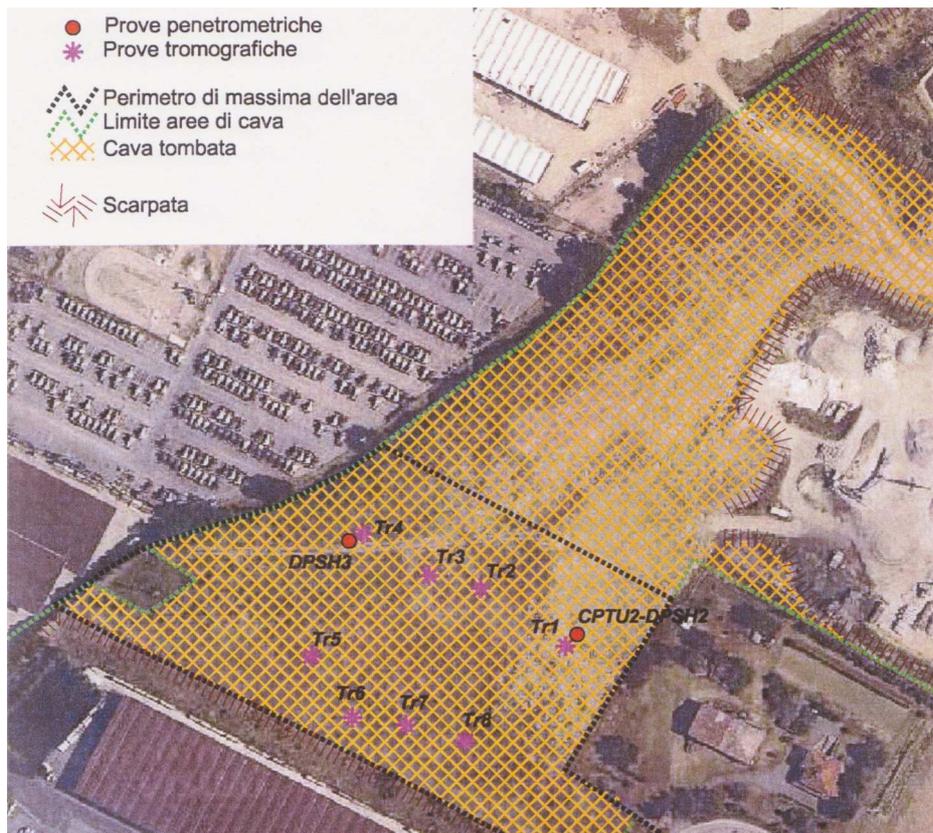


Fig. 6.1 – localizzazione preliminare dell'area

L'area dedicata alla sperimentazione viene identificata in una zona al limitare del confine aziendale (fig. 6.1), compresa nella zona produttiva situata tra la via Selice e la via Laguna. Attualmente si trova inserita nel piano regolatore come nuovo comparto di espansione per attività produttive, l'ambito "N40". Su richiesta di C.A.R. s.r.l. è stato effettuato uno studio geologico di massima (ottobre 2008) teso a valutare l'idoneità edificatoria per tale ambito.

Tale area risulta dal tombamento di una ex cava di inerti alluvionali avvenuto circa 15 anni fa. L'estrazione ha riguardato, oltre allo strato limoso argilloso superficiale, un primo spessore di ghiaie insature. La profondità del piano di scavo ha raggiunto livelli variabili e generalmente comprese tra 8,5 m e 10 m dal piano campagna.

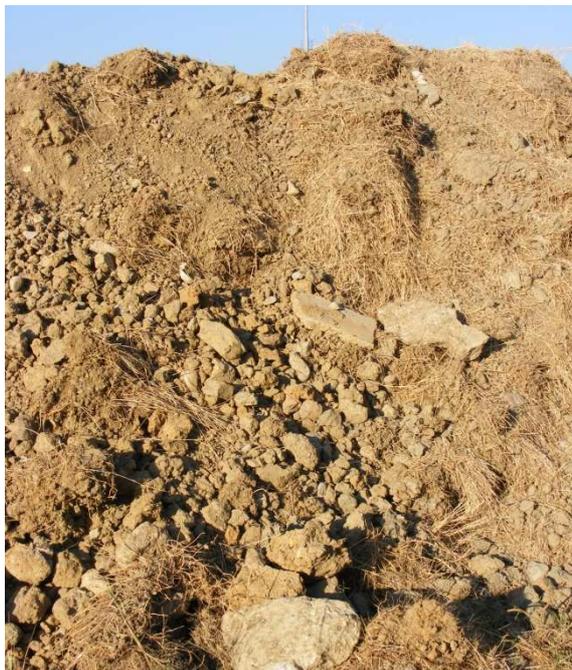
Le due penetrometrie effettuate nell'area di interesse hanno attraversato spessori variabili del terreno di riporto (per l'ubicazione delle prove vedi fig. 6.2). La prova localizzata vicino al ciglio di cava evidenzia uno spessore del riporto pari a 4,6 m, la penetmetria identificata dalla sigla CPTU- DPSH2 invece attraversa 10 m di terreni di riporto.



*Fig. 6.2 – localizzazione delle prove geognostiche*

Le caratteristiche del materiale di riempimento rivestono grande importanza poiché tale materiale andrà a costituire il sottofondo per il nostro rilevato. Fondamentalmente ricordiamo:

- omogeneità del materiale riportato e dello spessore dello strato di riporto;
- presenza localizzata di acqua.



*Fig. 6.3 – blocchi di calcestruzzo e arenaria rinvenuti durante lo scavo*

Il primo dei due aspetti è sicuramente l'aspetto più critico per questo contesto. Il materiale di riempimento infatti si presenta come terreno fondamentalmente argilloso. Si individuano abbastanza frequentemente anche blocchi di roccia (fig. 6.3) che possono raggiungere anche dimensioni di 50 cm, frammenti di calcestruzzo e C&D generico.

Ricordiamo che la disomogeneità del sottofondo, unitamente alla presenza di grosse pietre e materiali estranei, è una caratteristica che può sensibilmente modificare la risposta del sottofondo e dei successivi strati di fondazione ai nostri mezzi di indagine.

Per quanto riguarda lo spessore dello strato di riporto abbiamo già detto come esso, una volta allontanati dall'ex ciglio di cava sia piuttosto regolare. Avremo quindi l'accortezza, per il posizionamento definitivo del rilevato, di collocarlo piuttosto lontano dal ciglio di cava, parallelamente alla scarpata affinché le condizioni al contorno siano più omogenee possibile.

Per quanto riguarda la presenza di acqua abbiamo potuto constatare come non vi fossero venute localizzate o zone di accumulo superficiale. Anche in questo caso lo studio geologico effettuato precedentemente ha confermato come la falda locale più superficiale sia completamente esaurita ormai da anni. Alcune indagini svolte in prossimità della proprietà C.A.R. nel 2003 e 2004 non hanno intercettato la falda in tutto l'intervallo terebrato (circa 21 m dal p.c.). Per quanto riguarda invece le acque superficiali non si riscontrano criticità particolari. Le acque bianche derivanti dal comparto produttivo limitrofo all'area vengono recapitate nello "Scolo Fossetta", a N-O dell'area di progetto. Un intervento di risistemazione e rettifica del corso a valle dell'area interessata dovrebbe aver risolto anche gli ultimi modesti problemi di allagamenti dovuti ad un possibile rigurgito in prossimità del ponte sulla via Lasie.

## 6.4 MATERIALI DA SOTTOPORRE A PROVA

La direzione C.A.R. ha provveduto alla scelta di 4 materiali diversi da sottoporre alle prove. Il criterio di scelta tiene conto, oltre ad esigenze di maggior caratterizzazione di alcuni prodotti, anche di indicazioni normative. La sperimentazione vedrà la costruzione di un rilevato ma sarà tesa anche alla valutazione di idoneità per i 4 materiali nei confronti dell'utilizzo per strati di fondazione stradale. Per questo motivo la prima scelta è stata orientata sulla granulometria di riferimento. Viene quindi assunto come Capitolato di riferimento per la preliminare identificazione della granulometria di interesse "AUTOSTRADA DEL BRENNERO: capitolato speciale d'appalto - prescrizioni tecniche". Tutti i materiali proposti avranno quindi dimensione riportata nel fuso del paragrafo 5.4.2.

I materiali scelti sono elencati di seguito (si veda il paragrafo 5.7 per la caratterizzazione di laboratorio dei materiali).

### 6.4.1 MATERIALE CAMPO 1

Nome: *MACINATO MISTO DI PIETRA C.A.R. 0/30 mm*

Composizione: *65% demolizione mista*

*20% loppa di fonderia*

*15% gres*



*Fig. 6.4 – macinato misto di pietra C.A.R. 0/30 mm: materiale in mucchio*

## 6.4.2 MATERIALE CAMPO 2

Nome: *STABILIZZATO DI TRAVERSINE 0/30 mm*

Composizione: *50% traversine*  
*50% roccia arenaria*



*Fig. 6.5 - stabilizzato di traversine 0-30 mm: materiale in mucchio*

## 6.4.3 MATERIALE CAMPO 3

Nome: *STABILIZZATO DI CEMENTO (CALCESTRUZZO) 0/30 mm*

Composizione: *100% calcestruzzo*



*Fig. 6.6 - stabilizzato di cemento 0-30 mm: materiale in mucchio*

#### 6.4.4 MATERIALE CAMPO 4

Nome: MISCELA CEMENTO (CLS) E ASFALTO 0/30 mm

Composizione: 50% fresato

50% stabilizzato di cemento (cls) 0/30 mm



Fig.6. 7 – stabilizzato di cemento 0/30 + fresato 0/30

#### 6.5 CARATTERISTICHE PROGETTUALI DEL SITO SPERIMENTALE

In relazione al numero di materiali da testare, alla disponibilità effettiva del rullo compattatore e della strumentazione di prova per il sito sperimentale è stata proposta la configurazione riportata nella tavola A1 allegata. Nella tavola vengono riportati, oltre alle caratteristiche geometriche del rilevato, anche le indicazioni per raggiungere la C.A.R. destinate al personale.

Come accennato all’inizio la sperimentazione ha previsto la costruzione di un vero e proprio rilevato. Nella figura 6.8 riportiamo la strutturazione di base del rilevato con l’indicazione dei materiali e le dimensioni fondamentali.

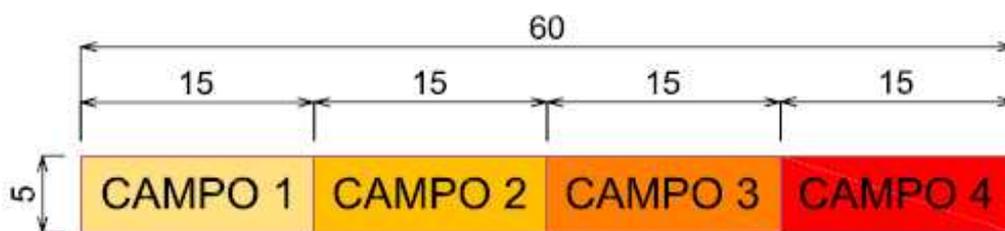


Fig. 6.8 – pianta quotata del rilevato (allegato A1)

Nella tabella 1 vengono riportate le caratteristiche geometriche fondamentali dello scavo di sbancamento.

<b>SCAVO DI SBANCAMENTO</b>	
<i>Distanza ciglio di scavo – scarpata</i>	5 m
<i>Lunghezza scavo</i>	60 m
<i>Larghezza al fondo scavo</i>	5 m
<i>Profondità scavo</i>	0,4 m
<i>Inclinazione della scarpata</i>	2:3
<i>Pendenza del fondo scavo</i>	2 %

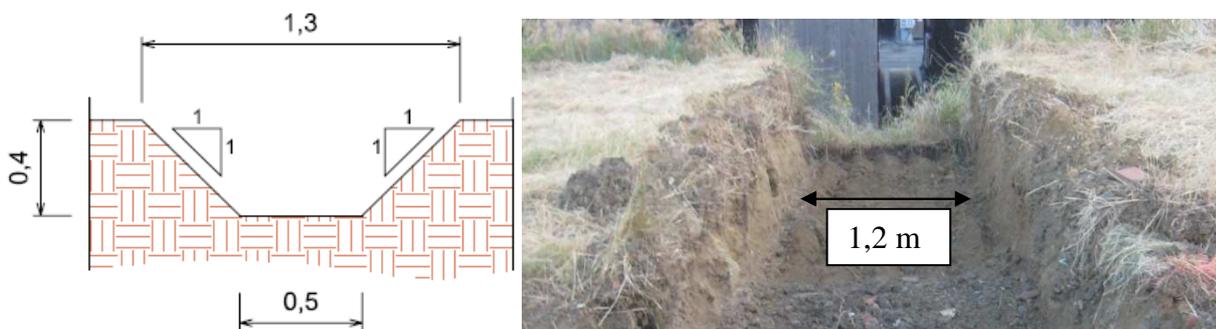
*Tab. 1 – scavo di sbancamento*

La vicinanza del rilevato alla scarpata deriva, oltre che dalla razionalizzazione degli spazi di cantiere, anche dalla possibilità di garantire uno scolo ottimale in caso di pioggia diminuendo al contempo la lunghezza dei fossi di scolo. Vediamo allora le caratteristiche del sistema di scolo:

<b>SISTEMA DI SCOLO</b>	
<i>Lunghezza fossi</i>	5 m
<i>Interdistanza fossi</i>	5 m
<i>Inclinazione della scarpata</i>	1:1
<i>Pendenza</i>	2 %

*Tab. 2 – sistema di scolo*

Le dimensioni dei fossi, nonché il loro numero hanno subito modifiche in sede di esecuzione dalla Direzione Lavori per una scelta di praticità e velocizzazione dei tempi di realizzazione. Nella figura 6.9 si riporta la sezione dei fossi di scolo prevista dal progetto e l'effettiva realizzazione sul campo.



*Fig. 6.9 – sezione C-C da progetto e realizzazione effettiva*

Infine riportiamo le caratteristiche del rilevato:

<b>RILEVATO</b>	
Lunghezza	60 m
Larghezza sul piano di calpestio finale	5 m
n. strati di stesa	2
Spessore di stesa per ogni strato	0,4 m
Inclinazione della scarpata	2:3

Tab. 3 - rilevato

Il rilevato quindi viene ad essere costituito dalla sovrapposizione di due strati successivi dello stesso materiale. La scelta di sovrapporre due strati del medesimo materiale trova le proprie motivazioni nella semplificazione dell'interpretazione dei risultati. Nella figura 6.10 (estratto Tav. A1) si vede l'effettiva sezione trasversale così come è stata realizzata:

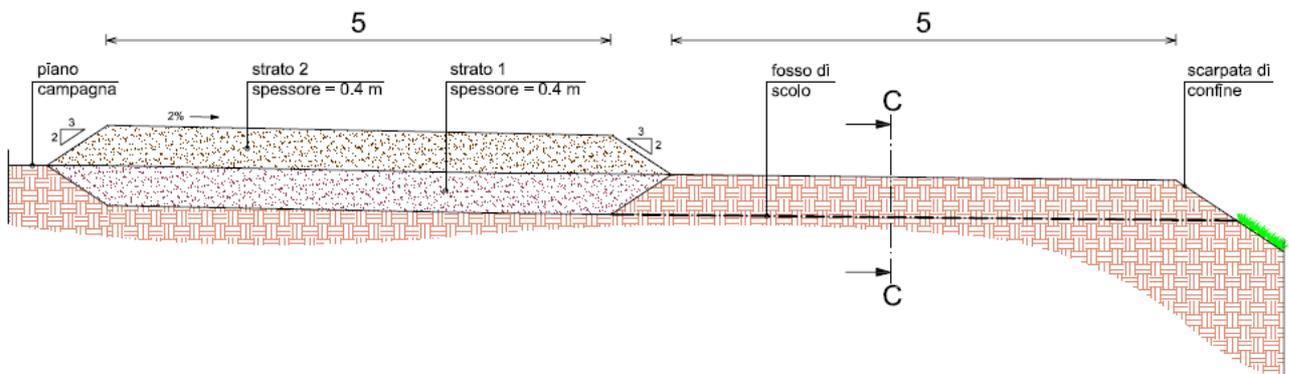


Fig. 6.10 – sezione trasversale del rilevato

Riportiamo infine il computo dei volumi di materiale necessario alla realizzazione dell'opera.

<b>RILEVATO</b>			
Materiale 1 - strato 1	34,8 m <sup>3</sup>	<b>Materiale 1</b>	70 m <sup>3</sup>
Materiale 1 - strato 2	35,6 m <sup>3</sup>		
Materiale 2 - strato 1	33,6 m <sup>3</sup>	<b>Materiale 2</b>	70 m <sup>3</sup>
Materiale 2 - strato 2	33,6 m <sup>3</sup>		

Materiale 3 - strato 1	33,6 m <sup>3</sup>	<b>Materiale 3</b>	70 m <sup>3</sup>
Materiale 3 - strato 2	33,6 m <sup>3</sup>		
Materiale 4 - strato 1	34,8 m <sup>3</sup>	<b>Materiale 4</b>	70 m <sup>3</sup>
Materiale 4 - strato 2	35,6 m <sup>3</sup>		

Tab. 4 – computo dei volumi di materiale

## 6.6 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

In questa parte si descriveranno le caratteristiche fondamentali della strumentazione utilizzata in relazione al tipo di informazione desiderata. Il progetto, come descritto di seguito, consta fondamentalmente di 3 fasi di testing. Ogni fase di testing inizia con prove di rullatura mediante sistema di compattazione intelligente. Dopo la compattazione si può procedere alla valutazione delle caratteristiche di portanza ottenuta con sistemi di tipo PFWD e FWD, unitamente alla determinazione delle caratteristiche del mezzo indagato in termini di densità e umidità, parametri fondamentali laddove si ricerchino poi correlazioni tra i risultati differenti forniti dalle varie tipologie di strumentazione.

### 6.6.1 LA COMPATTAZIONE INTELLIGENTE



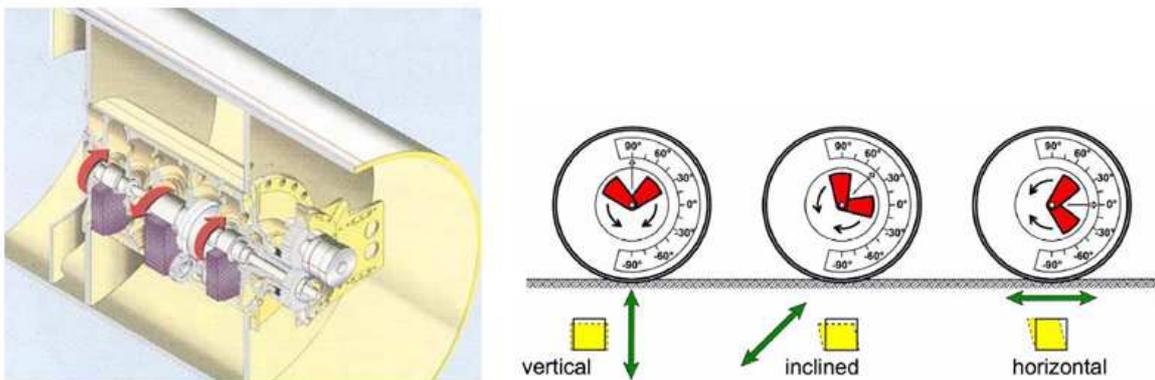
Fig. 6.11 – rullo con sistema Variocontrol utilizzato presso C.A.R.

La metodologia della compattazione intelligente tramite l'utilizzo di un compattatore Bomag con apparecchiatura integrata Variocontrol, permette di ottenere risultati soddisfacenti, in breve tempo, con un numero limitato di passate.

Il Bomag Variocontrol è un sistema di compattazione intelligente che può essere installato su

alcuni rulli Bomag monotamburo per l'adattamento continuo automatico dell'energia di compattazione trasferita al terreno. I rulli vibranti della serie BVC (Bomag VarioControl) sono dotati del sistema di vibrazione Bomag Vario che genera una vibrazione orientata del tamburo, adattando continuamente ed in automatico le ampiezze di vibrazione, e quindi l'energia di compattazione. In questo modo la forza compattante può essere incrementata se necessario, aumentando la produttività della macchina. Il Variocontrol è abbinabile ai sistemi di misurazione e documentazione della compattazione *BTM plus*, *BTM prof*, *BCM 05*. Il valore di misura, denominato modulo di vibrazione,  $E_{vib}$  misurato in  $MN/m^2$  (MPa), viene rilevato e visualizzato in continuo unitamente ad altri parametri (valore minimo di compattazione preimpostato, ampiezza e frequenza di vibrazione utilizzate al momento, velocità della macchina), consentendo di verificare in tempo reale il risultato del lavoro ed eventualmente stampare i dati di misura raccolti. Il dispositivo è collegabile anche a sistema GPS per una maggior precisione nel rilevamento dei dati di compattazione. Il numero di passate dipende dal grado di compattazione che si raggiunge al termine di ogni passaggio.

Con i normali metodi di compattazione si incorreva spesso in problemi relativi al raggiungimento di un grado di costipazione del sito non omogeneo, o a problemi di sovra compattazione; la metodologia “intelligente”, variando in automatico i valori di ampiezza dell'oscillazione della massa eccentrica che trasferisce energia al terreno e rilevando con continuità ed in maniera istantanea i moduli di rigidità del terreno, riduce al minimo tali rischi permettendo di raggiungere un ottimo grado di compattazione, con il numero strettamente necessario di passate.



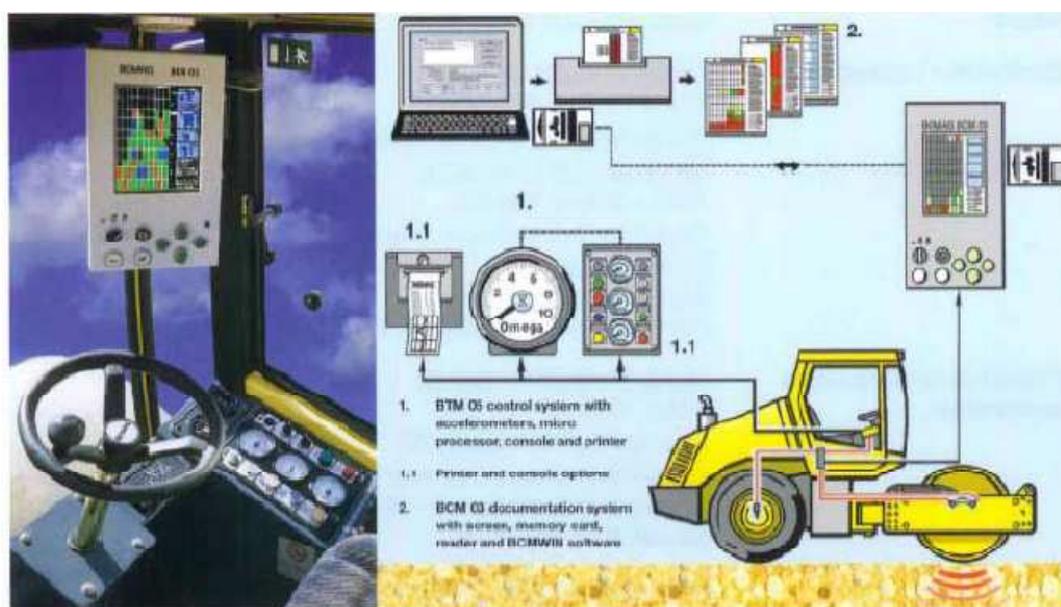
*Fig. 6.12 – sistema Variocontrol: impostazione dell'ampiezza di vibrazione*

Il sistema di registrazione permette di determinare il valore della portanza del terreno raggiunta a seguito della compattazione rilevando il modulo di deformazione  $E_{vib}$ .

Il rullo Bomag riesce a compattare il terreno sia in modalità automatica, sia in modalità manuale (proof-rolling).

Se si lavora in modalità automatica, si imposta il valore di  $E_{vib}$  che ci si prefigge di raggiungere. L'operatore può preselezionare sei valori minimi ( $E_{vib} = 45, 80, 100, 120, 150 \text{ MN/m}^2$  e massimi) che variano a seconda delle caratteristiche del terreno e del grado di compattazione che si vuole raggiungere.

Durante la compattazione il modulo dinamico e la velocità vengono misurati continuamente, i loro valori vengono registrati e visualizzati sul display. Quando viene raggiunto il valore minimo o quello massimo della compattazione, il sistema Variocontrol aumenta o riduce l'ampiezza delle vibrazioni e sul display dell' $E_{vib}$  si accende una luce verde che indica l'avvenuta fine della compattazione.



*Fig. 6.13 - rullo Bomag*

Laddove si decida di operare in modalità manuale si impostano invece i valori dell'ampiezza vibratoria.

Lavorare in modalità manuale, ovvero impostando a priori un valore dell'ampiezza dell'oscillazione e mantenendolo inalterato, unitamente alla registrazione della risposta del materiale in termini di  $E_{vib}$ , significa testare la capacità del materiale di essere compattato oltre a determinare il numero di passaggi minimo per ottenere un risultato soddisfacente.

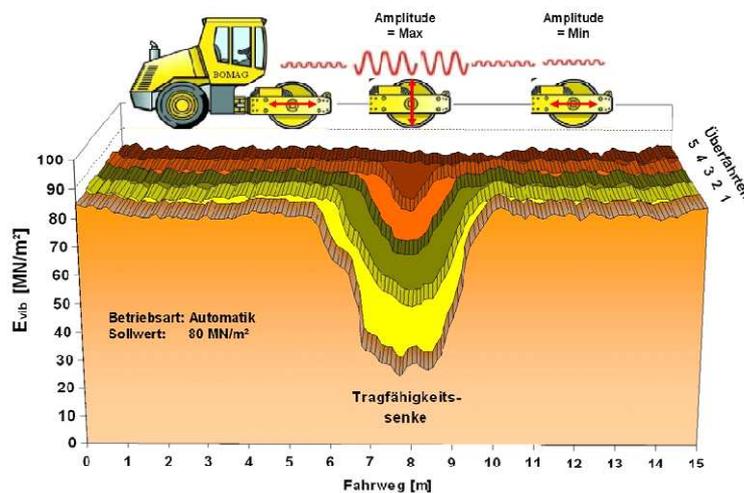
In cabina è presente una stampante per una visualizzazione immediata della risposta del materiale in termini di  $E_{vib}$ . In un grafico viene visualizzato il valore di  $E_{vib}$  in relazione alla progressiva metrica.

Il rullo misura una rigidità coinvolgendo anche gli strati profondi. Dove non ci sono cedimenti, compluvi o umidità, il sottofondo risponde e lo strato si compatta, in altri punti questo non avviene ed il rullo misura la scarsa capacità portante di tutto ciò che compone gli strati sottostanti.

Si utilizzano grandi ampiezze e basse frequenze per compattare suoli cedevoli mentre per compattare strati profondi di terreno e suoli rigidi si utilizzano ampiezze minori e alte frequenze.

In Fig. 6.14 mettendo in ascissa la progressiva misurata in [m] relativa alla lunghezza del campo da compattare ed in ordinata i valori del modulo vibratorio misurato in [ $\text{MN}/\text{m}^2$ ], si nota come per compattare terreni cedevoli il rullo utilizzi ampiezze molto elevate, raggiungendo in alcuni casi valori massimi ottenuti quando la massa eccentrica si trova in posizione verticale.

Al contrario, il macchinario, fa uso di ampiezze molto basse per la costipazione di terreni rigidi, raggiungendo valori minimi quando la massa eccentrica si trova in posizione orizzontale.



*Fig. 6.14 – variazione automatica dell'ampiezza di vibrazione in relazione al tipo di terreno*

Iniziando con grandi ampiezze e basse frequenze i sistemi di controllo automatici assicurano un buon effetto di compattazione degli strati più profondi. Quando il grado di compattazione aumenta, le frequenze aumentano e le ampiezze si riducono automaticamente, questi comportamenti permettono di ottenere un ottimo grado di compattazione. Trasduttori di accelerazione, sono utilizzati per misurare la vibrazione del tamburo. Questi trasduttori misurano le accelerazioni assolute della massa vibrante in funzione del tempo. Con la disposizione dei trasduttori di accelerazione possono essere analizzate tutte le oscillazioni.

Ovviamente il modulo vibratorio raggiunge valori differenti a seconda del tipo di terreno. Per terreni cedevoli il valore di  $E_{vib}$  risulta essere molto più basso rispetto a quello registrato durante la compattazione dei materiali ricchi di inerti, ghiaiosi o rocciosi, visto che questi ultimi sono caratterizzati da una rigidità molto maggiore rispetto a quella di sabbie o argille.

In fig. 6.15 si nota come all'aumentare delle passate si assista ad un considerevole aumento di  $E_{vib}$  che denota l'aumento del grado di compattazione raggiunto dal terreno. Ogni incremento di  $E_{vib}$  viene rappresentato aumentando il gradiente della retta ottenuta mettendo in relazione la forza di

contatto terreno-rullo e il corrispondente abbassamento del terreno.

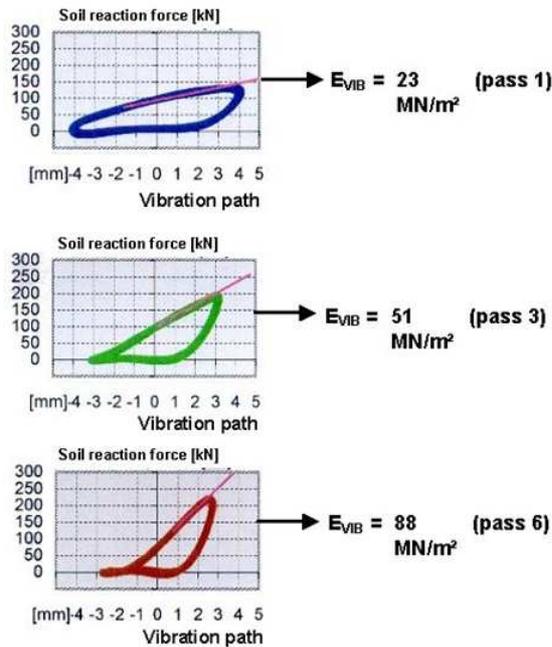


Fig. 6.15 - relazione tra  $E_{vib}$  e l'energia trasferita al terreno durante la compattazione

### 6.6.2 IL MODULO DINAMICO VIBRATORIO: $E_{VIB}$

La determinazione del modulo  $E_{vib}$  si basa puramente su un'analisi di tipo verticale, attraverso relazioni tra forza e spostamento (fig. 6.16). Il modulo di vibrazione  $E_{vib}$  considera parametri di vibrazione concentrati ed il cilindro (tamburo) che si muove su un mezzo elastico (Teoria dello spazio).

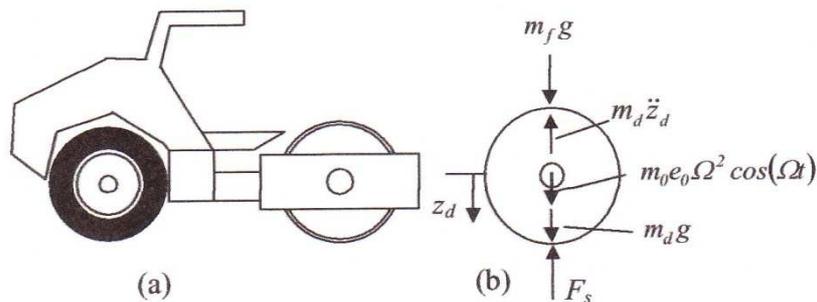


Fig. 6.16 – sistema di forze per la determinazione di  $E_{vib}$

Oltre alla massa del rullo, ci sono altre forze che hanno influenza in senso verticale:

- La forza centrifuga del sistema vibrante;
- La massa del telaio prevalentemente statica;
- L'intero carico statico per asse;
- La forza di contatto con il terreno.

In particolare:

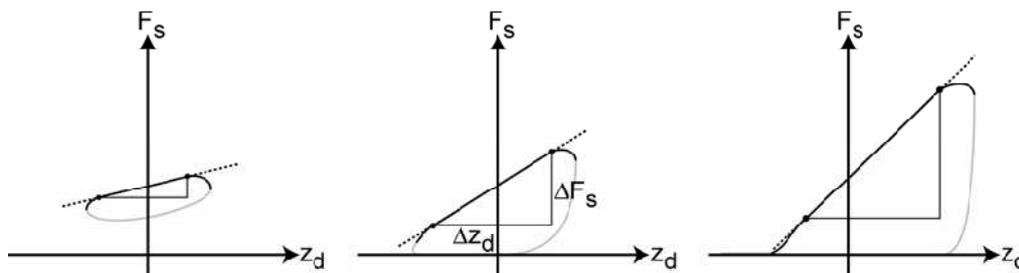
- $m_d$  = massa del tamburo;
- $m_f$  = massa del telaio;
- $z_d$  = spostamento del tamburo;
- $\ddot{z}_d$  = accelerazione tamburo;
- $m_o e_o$  = momento di massa eccentrica;
- $\Omega$  = frequenza eccitatoria (Bomag impiega una costante di frequenza di compattazione  $\Omega = 32$  Hz);
- $F_s$  = forza di contatto tra terreno e compattatore;
- $g$  = accelerazione di gravità.

Vi sono due accelerometri per misurare l'accelerazione verticale del tamburo.

Sappiamo che  $E_{vib}$  è il risultato della compattazione effettuata tramite rullo Bomag, ottenuta tramite propagazione nel terreno di onde vibratorie prodotte da una massa eccentrica posta nel tamburo che variando l'ampiezza e la frequenza ed in funzione della velocità del rullo determina la compattazione.

Oltre ai parametri di ampiezza, frequenza e velocità del rullo è possibile determinare un quarto parametro che è la forza di contatto rullo terreno indicata con  $F_s$ .

Il rapporto tra  $F_s$  e il corrispondente abbassamento del terreno  $z_d$ , dovuto all'avvenuta compattazione, fornisce il valore della rigidità  $k_s$  (Fig. 6.17).



*Fig. 6.17 Curve di deformazione*

La Fig. 6.17 mette in relazione  $F_s$  con  $z_d$ : il gradiente della curva caratteristica forza-spostamento durante la fase di compressione del terreno non è altro che il valore della rigidità  $k_s$ .

La curva evidenziata, e definita curva di deformazione, rappresenta l'energia di compattazione trasferita al terreno.

È interessante notare, come, all'aumentare della rigidità del terreno, individuata dall'aumento della pendenza della retta, aumenti l'area della curva di deformazione, e quindi, l'energia di compattazione trasferita.

Per collegare il comportamento della  $F_s$  misurata, della  $z_d$  e della rigidità  $k$  ad  $E_{vib}$ , si può utilizzare una soluzione teorica di Lundberg, studiata per un cilindro rigido che appoggia su un terreno omogeneo, isotropo.

La teoria di Lundberg è una teoria statica e riguarda  $F_s$ ,  $z_d$ , la lunghezza  $L$  del tamburo,  $R$  il diametro,  $\nu$  il coefficiente di Poisson,  $E$  il modulo di Young:

$$z_d = \frac{2 \cdot (1 - \nu^2)}{\pi \cdot E} \cdot \frac{F_s}{L} \cdot (1,8864 + \ln \frac{L}{b})$$

dove :

$b$  = larghezza di contatto

$$b = \sqrt{\frac{16 \cdot R \cdot (1 - \nu^2)}{\pi \cdot E \cdot L} \cdot F_s}$$

La relazione tra  $k$  ed  $E$  è mostrata in fig. 6.18.

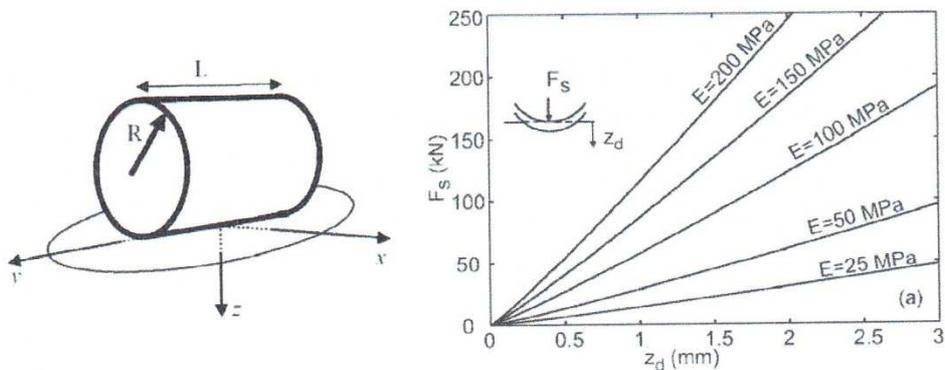


Fig. 6.18 – relazione tra rigidità  $k$  e modulo  $E$

I valori della rigidità che si ottengono, sono direttamente confrontabili con quelli determinati tramite prova di carico su piastra per controllare la compattazione.

Infatti, se ci riferiamo alla fig. 6.19, che indica l'energia di compattazione, è facile distinguere una fase di compressione, durante la quale il rullo è intento a costipare il terreno, e una fase di espansione durante la quale, a compattazione già avvenuta, i grani del terreno si ridistribuiscono e l'energia assorbita durante la compattazione si diffonde in tutti gli strati di terreno.

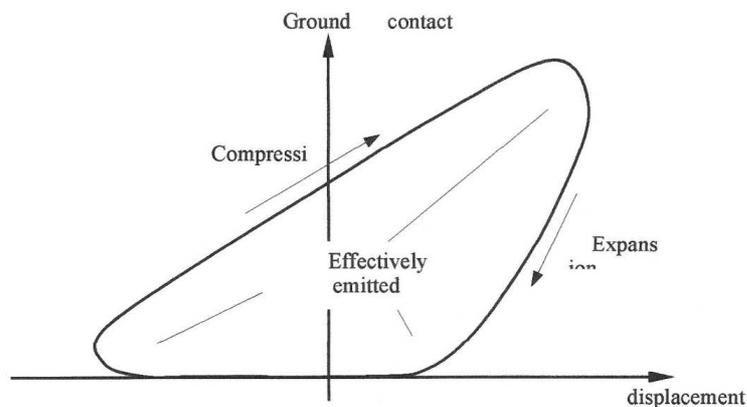


Fig. 6.19 - diagramma indicatore – energia effettivamente trasmessa al terreno

Queste due fasi possono essere associate alle fasi di carico e scarico cui il terreno è soggetto in laboratorio durante la prova di carico su piastra.

Questo è il motivo per cui il modulo vibratorio  $E_{vib}$  può essere messo in relazione al modulo di deformazione  $M_d$  ottenuto durante la prova di laboratorio.

È comunque da evidenziare il fatto che  $E_{vib}$  è un modulo dinamico mentre  $M_d$  è statico. Una ulteriore differenza tra  $E_{vib}$  ed  $M_d$ , è che il modulo vibratorio si ottiene compattando il terreno con un rullo cilindrico, mentre nella prova di carico su piastra, la forma del piatto è circolare per cui si è cercata una valida approssimazione per poter confrontare l'area di contatto rullo-terreno con quella piatto-terreno.

### 6.6.3 LFWD – LIGHT FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER

L'LFWD (noto anche per la sua maneggevolezza e trasportabilità come portable falling weight deflector - PFWD) è uno strumento di misura rapido e funzionale in grado di valutare efficacemente portanza e grado di addensamento di qualunque materiale posato. Tale prova viene chiamata “prova di carico dinamica su piastra”.



*Fig. 6.20 –LFWD usati presso C.A.R.: da sinistra LFWD Dynatest, LFWD Zorn, LFWD Terratest*

Tale metodologia può essere affiancata alle più tradizionali note prove di carico su piastra (PLT), presentando però rispetto a queste ultime alcuni vantaggi. La determinazione della portanza con metodi tradizionali come la PLT limita fortemente il numero di prove/giorno e di conseguenza il numero di prove/superficie rispetto a tecnologie LFWD. Di conseguenza tutto questo si ripercuote sul numero di valutazioni effettuabili e sull'affidabilità della valutazione ultima. È da notare poi che una prova di carico su piastra si avvale di un mezzo di contrasto (es. autocarro) e quindi ha



Fig. 6.21 - LFWD Zorn: componenti

necessità di ingombro notevoli del piano di prova unitamente ad esigenze di buona accessibilità del sito. L'autocarro inoltre durante l'esecuzione delle prove è adibito esclusivamente a tale mansione. Tutte queste motivazioni hanno incoraggiato lo sviluppo di una tecnologia più versatile come il deflettometro portatile a massa battente. Si definisce portanza o capacità portante di un terreno il carico specifico, ricavabile con una precisa metodologia di prova, che provoca un prestabilito cedimento nel terreno indagato; è facile quindi dedurre che le modalità per la determinazione della portanza non sono univocamente fissate, per cui è possibile far ricorso a diversi tipi di test.

Il principio di funzionamento del LFWD è il medesimo del FWD (trattato di seguito): una massa nota viene lasciata cadere più volte su una piastra di carico posizionata sul piano in esame; pressioni e cedimenti sono registrati ad ogni colpo.

In commercio esistono diverse apparecchiature del tipo LFWD che si differenziano sostanzialmente per le 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 del/degli accelerometri (geofoni). In Figura 6.21 sono evidenziati gli elementi meccanici ed elettronici che compongono il dispositivo preso in esame in questa sede: essenzialmente, una piastra di carico rigida, una massa battente e una apparecchiatura elettronica di acquisizione dati.

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 la misurazione dei carichi in gioco e uno smorzatore a molle (buffer) per modulare la forza impattante.

La cella di carico è sostanzialmente un trasduttore di forza dotato di otto estensimetri incorporati; il trasduttore accelerometrico è invece un sensore che fornisce un output proporzionale

all'accelerazione misurata e che, posizionato al centro della piastra di carico e ortogonalmente ad essa, è in grado di fornire per integrazione del segnale captato, l'abbassamento del punto centrale della piastra, nonché la corrispondente velocità di deformazione del suolo. La massa impattante del peso di 10 kg (15 kg nel caso in cui i moduli previsti siano elevati) è libera di scorrere sull'asta di guida che, oltre a garantire la centralità del colpo, consente di uniformare l'altezza di caduta per mezzo della leva di rilascio fissata in corrispondenza dell'impugnatura.

Nel modello appena descritto, un cavo elettrico estensibile permette il collegamento diretto dell'apparecchiatura elettronica per l'acquisizione dei dati dotata di display e stampante. I risultati possono anche essere trasferiti tramite chip-card o porta seriale su personal computer.

<i>Descrizione</i>	<i>LFWD ZFG 2000 Zorn</i>
<i>Peso</i>	10/15 kg
<i>Altezza di caduta</i>	720 mm
<i>Diametro della piastra</i>	300 mm
<i>Spessore della piastra</i>	20 mm
<i>Forza di picco</i>	7.07/10.6 kN
<i>Sensore</i>	Accelerometro
<i>Modulo</i>	$E_{vd} = 22,5/s$

Tab. 5 – Zorn: caratteristiche



fig. 6.22 – LFWD Zorn

Fondamentalmente la componentistica dell'LFWD Terratest è del tutto simile a quella dell'LFWD Zorn.

Altri modelli, come il LFWD Dynatest sono invece dotati di sistema di acquisizione dati wireless. L'assenza del filo che collega il data recorder e lo strumento rappresenta un vantaggio laddove sul piano indagato siano presenti altri operatori e il filo possa andare ad intralciare le altrui lavorazioni. Nella tabella che segue riportiamo le caratteristiche principali dello strumento Dynatest.

<i>Descrizione</i>	<i>DYNATEST LWD 3031</i>
<i>Peso</i>	10/15 kg
<i>Altezza di caduta</i>	variabile
<i>Diametro della piastra</i>	150-200-300 mm

<i>Spessore della piastra</i>	17 mm
<i>Forza di picco</i>	variabile
<i>Sensore</i>	Geofono

*Tab. 6 – Dynatest: caratteristiche*

Le principali differenze sono così riassumibili: Zorn utilizza un accelerometro, collocato tra i suoi buffer e la piastra di carico, per misurare la deflessione della piastra; Dynatest misura invece le deflessioni usando un geofono, direttamente in contatto con la superficie attraverso un piccolo foro al centro della piastra.

Il dispositivo Dynatest presenta un tappetino in gomma per distribuire lo stress di contatto sotto la piastra; una superficie piana di metallo è invece adottata da Zorn. Questa differenza può in qualche modo influenzare le misure, come suggerito in White et al. (2007).

Il dispositivo Zorn ha un'altezza di caduta fissa, con una forza nominale di picco (calibrata dal costruttore) pari a 7,07 kN per una massa di 10 kg, che diventa 10,60 kN con una massa 15 kg: queste forze sono quelle riferite al carico applicato al centro della parte superiore della piastra, carico assunto costante per il calcolo delle sollecitazioni verticali sotto la piastra.

Il dispositivo Dynatest, d'altra parte, include una cella di carico per la registrazione delle time histories degli impulsi effettivamente applicati sotto la piastra. Ciò consente di applicare un impulso specifico impostando l'altezza di caduta a seconda del tipo di strato indagato.

L'impulso di carico è applicato con differenti curve di carico: la curva Zorn ha un'onda che cade in un periodo di circa 16-18 ms, mentre quella Dynatest è di 25-30 ms.



*Fig. 6.23 – funzionamento e particolare dei geofoni nel modello LFWD Dynatest*

Nella fig.6.23 si può apprezzare la metodica di prova del dispositivo Dynatest. Sono necessari due operatori per condurre la prova: entrambi appoggiano il proprio peso sulla piastra di carico per contribuire alla stabilità della piastra sul terreno: il primo si occupa dell'assestamento dei colpi, il secondo annota leggendo sul display wireless dove sono rappresentate la curva dei cedimenti e la curva di carico ad ogni colpo. Proprio questo ultimo aspetto rappresenta un'evoluzione rispetto agli strumenti descritti prima. La curva di carico è apprezzabile sul display ad ogni colpo.

#### **6.6.4 ESEMPIO DI PROVA CON LFWD: MODELLI ZORN E TERRATEST**

La funzionalità dello strumento è legata non solo alla sua maneggevolezza, ma anche alla facilità e rapidità di impiego.

In primis occorre posizionare la piastra di carico nel punto da testare dopo aver verificato l'idoneità del peso impiegato e della piastra stessa, in relazione al tipo di materiale presente in sito e alla posizione dello strato. Può succedere che per il posizionamento serva un piccolo quantitativo di sabbia per regolarizzare il piano di appoggio della piastra nel caso in cui siano presenti irregolarità superficiali. Il quantitativo di sabbia non deve comunque compromettere la misurazione. Il passo successivo prevede l'appoggio del dispositivo di carico sulla piastra, avendo cura di controllare l'integrità e la pulizia della semisfera di centraggio posta sulla piastra stessa.

L'operatore può quindi procedere con la prima fase di prova applicando tre colpi di precarico sul punto, senza necessariamente registrarli nel data recorder.

La fase di acquisizione dei dati inizia non appena completato il precarico. E' la stessa apparecchiatura di acquisizione a guidare l'operatore nell'assestamento dei tre colpi necessari al completamento della prova. Dopo l'ultimo impatto il lettore fornisce direttamente i valori del modulo di deformazione dinamico  $E_{vd}$ , dei cedimenti  $s$  e delle velocità  $v$  misurate per ciascun colpo e i rispettivi valori medi. La stampante è in grado di restituire, oltre ai valori dei parametri citati, anche l'andamento delle tre curve cedimenti-tempo registrate nell'intervallo di alcuni millisecondi a partire dall'istante dell'impatto di ciascun colpo. In figura 6.24 è riportato un esempio di tale curva cedimenti-tempo.

Il tempo necessario per completare una prova non supera generalmente due/tre minuti. In termini pratici, l'abilità dell'operatore è richiesta soprattutto per il corretto posizionamento della piastra sul terreno e per la sollecitudine nel recupero della massa battente dopo il primo impatto, onde evitare che questa ricada sullo smorzatore e invalidi il singolo colpo e la prova.

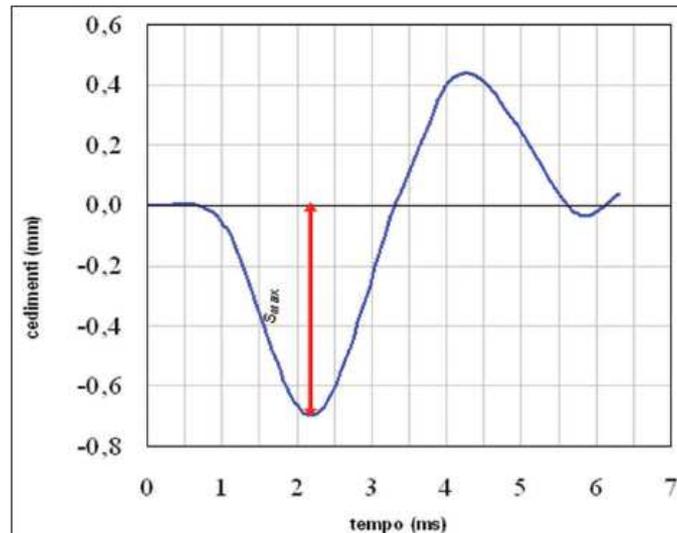


Fig. 6.24 – curva cedimenti-tempo

Veniamo alla discussione del modulo dinamico  $E_{vd}$  ottenuto da ogni singola prova. La piastra di carico (avente un diametro di 300 mm) può essere considerata rigida se paragonata al materiale sottostante e durante il colpo la massa battente applica una forza a tale piastra. Una calibrazione strumentale preventiva fa sì che alla forza di impatto corrisponda una tensione di contatto  $\sigma_{max}$  sotto la piastra pari a 0,1 MPa. Un accelerometro misura i cedimenti  $s$  del terreno in corrispondenza del centro della piastra riportandoli nella curva di fig. 24.

Il dispositivo, individuando il cedimento massimo (in valore assoluto) in corrispondenza del punto di minimo relativo della curva, calcola il modulo di deformazione dinamico  $E_{vd}$  quale parametro indicativo della deformabilità del terreno sotto l'impulso di un carico verticale definito, secondo la formulazione di seguito:

$$E_{vd} = 1,5 \cdot r \cdot (\sigma_{max} / s_{max})$$

dove:

$r$  è il raggio della piastra di carico (espresso in mm).

Tale formula fa riferimento alla teoria dell'elasticità di Boussinesq. Teniamo conto del fatto che modulo elastico e modulo di deformazione sono legati da:

$$M_d = \frac{E}{1-\nu^2}$$

$M_d$  = modulo di deformazione

$E$  = modulo di Young

$\nu$  = coefficiente di Poisson

L'output dello strumento è rappresentato, oltre che dal modulo  $E_{vd}$  mediato sui tre colpi misurati, anche dai rapporti  $s/v$  tra i cedimenti e le velocità massimi per ogni colpo. La funzionalità dell'apparecchiatura è legata anche alla disponibilità immediata del risultato della prova; ai fini

dei controlli di qualità di 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.

### 6.6.5 FWD - FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER

La prova FWD (Falling Weight Deflectometer) è un metodo di indagine non distruttivo che viene impiegato per la misurazione in sito delle proprietà strutturali di un qualsiasi piano viabile.

Il metodo consiste nel misurare la deflessione verticale della pavimentazione prodotta dalla caduta di una massa su una piastra appoggiata al terreno, per mezzo di geofoni posizionati sia al centro dell'area di carico, sia lungo diversi punti su un allineamento orizzontale, così da poter individuare il bacino di deflessione prodotto al momento dell'impatto della massa (fig. 6.25).



*Fig. 6.25 – bacino di deflessione misurato dai geofoni sull'allineamento*

Il valore della deflessione si ottiene poi, integrando il segnale dell'accelerazione con una precisione pari a  $0,5 \pm 1 \mu\text{m}$ .

Poiché i geofoni misurano l'accelerazione dell'abbassamento della superficie della pavimentazione, non è necessario fissare alcun piano di riferimento rispetto al quale calcolare la misura; in questo modo la deflessione può essere determinata con assoluta precisione.

Nel caso sia abbia a che fare con una pavimentazione finita composta da più strati solitamente le deflessioni misurate dai geofoni più lontani dalla piastra di carico, sono usate per valutare il modulo del sottofondo che contribuisce, generalmente, in misura del 60% – 80% al totale delle deflessioni; viceversa, le misurazioni vicino alla piastra rilevano la risposta degli strati più superficiali.



*Fig. 6.26 – allineamento dei geofoni appoggiati direttamente a terra*

Sulla base delle misure del carico applicato e delle deflessioni indotte alle varie distanze e, nota (o assunta) la stratigrafia della pavimentazione, è possibile, attraverso procedure di calcolo a ritroso, determinare il modulo equivalente dei diversi strati della pavimentazione.

Esiste un software apposito per il calcolo dei moduli dei singoli strati che compongono la sovrastruttura

Gli algoritmi di *backanalysis* alla base del software forniscono, attraverso il metodo statistico dei minimi quadrati e utilizzando tutte le deflessioni misurate per caratterizzare i singoli bacini, i valori dei moduli elastici dei vari strati della sovrastruttura.

La *backcalculation* (calcolo a ritroso) è condotta secondo la metodologia ‘Deflection Basin Fit’ che combina la teoria di Odemark con l’equazione di Boussinesq e sfrutta tecniche di integrazione numerica che consentono di calcolare per iterazione i moduli dei singoli strati, in cui è stata schematizzata la sovrastruttura, finché il bacino di deflessione calcolato approssima, con un certo grado di accuratezza, il bacino misurato.

Nel caso di pavimentazioni flessibili, i moduli ricavati dal programma corrispondono naturalmente alle condizioni climatiche (temperatura dell’aria e della pavimentazione) che si sono verificate durante l’esecuzione della prova.

E’ importante evidenziare che i risultati del test FWD sono fortemente influenzati dalle condizioni ambientali ed in particolare da:

- radiazione solare della superficie stradale;
- temperatura dell’aria;
- velocità del vento.

Da tali fattori ambientali dipende il gradiente termico che si instaura nel mezzo indagato. Per ottenere valori significativi, è quindi, necessario riportare i risultati ottenuti dal calcolo a ritroso (backcalculation) a temperature di riferimento per mezzo di formule empiriche disponibili in letteratura.

I valori del modulo elastico sono ricondotti alle temperature di 20°C o 25°C che sono i valori normalmente assunti come riferimento.

### 6.6.6 DCP – DYNAMIC CONE PENETROMETER

Il Dynamic Cone Penetrometer (DCP) è conosciuto anche come Scala Penetrometer, in onore del suo progettista. Una delle principali applicazioni del DCP è quella di identificare punti deboli

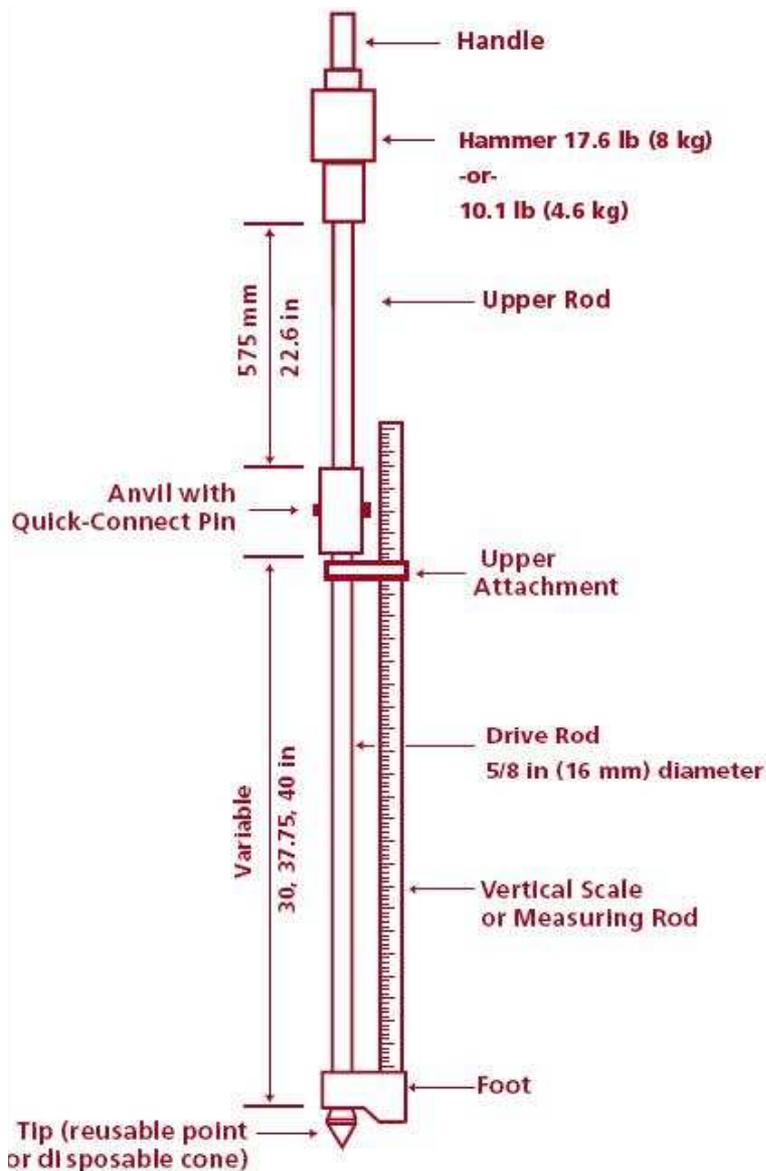


fig. 6.27 - DCP

negli strati compattati. Molti studi volti a determinare delle correlazioni ragionevoli tra l'indice di penetrazione del DCP e la compattazione in sito hanno fallito, poiché i valori ottenuti dalla prova non forniscono degli indici assoluti per determinare una corretta compattazione. Tuttavia presumendo di aver compattato adeguatamente il manufatto possiamo estrarre una mappa dei punti critici.

Un'ulteriore applicazione è quella di identificare lo spessore degli strati permettendo di analizzarli mettendo in relazione l'indice di penetrazione con la profondità.

Lo strumento è costituito da due aste d'acciaio, un peso definito come martello, una piastra su cui batte il martello definita come incudine, una punta, una scala metrica ed infine un estrattore (fig. 6.27).

L'asta superiore ha una lunghezza di 575 mm, in sommità ha un supporto d'attacco per permettere l'impugnatura dello strumento e funziona come guida per il peso che scorrerà su di essa. Quella inferiore invece è l'asta che va ad infingersi nel terreno da analizzare ed ha una lunghezza variabile, l'asta installata dipenderà dal valore della profondità di indagine desiderata. La gamma di dimensioni disponibili in commercio parte da un minimo di 304.8 mm (12") proseguendo con lunghezze da 482.6 mm (19"), 762 mm (30"), fino a raggiungere quella massima di 952.5 mm (37.5"). Sono disponibili anche due misure per le aste di prolungamento di quella primaria, nel caso in cui si vogliano raggiungere profondità più elevate, di lunghezza pari a 304.8 mm (12") e 609.6 mm (24").

L'asta superiore, quella inferiore e l'incudine sono collegate assieme grazie ad un Quick-Connect Pin.

L'asta inferiore, prima che venga montata la punta, viene fatta passare all'interno di due supporti a cui è agganciata la scala metrica verticale. Il supporto inferiore è chiamato piede ed è quello a contatto con il terreno e permette lo scorrimento dell'asta mentre blocca la scala metrica; l'attacco superiore invece è fisso sull'asta ma permette lo scorrimento del metro affinché si possa misurare l'affondamento della punta.

La punta (fig. 6.28) è anch'essa di acciaio inossidabile ed è composta da due parti: la prima comprensiva di filettatura per permettere l'attacco all'asta da una parte, mentre dall'altra possiede un sistema di bloccaggio per la seconda parte, la punta vera e propria. La punta è a forma conica con base di 20 mm (0.790 in) ed una tolleranza d'errore pari a 0.25 mm (0.010 in). L'angolazione è di 60° con una tolleranza di un grado.

L'estrattore (fig. 6.29) è uno strumento separato che serve per estrarre l'asta penetrata nel terreno in modo che tale operazione avvenga in condizioni di sicurezza e senza il rischio di danneggiare la strumentazione.

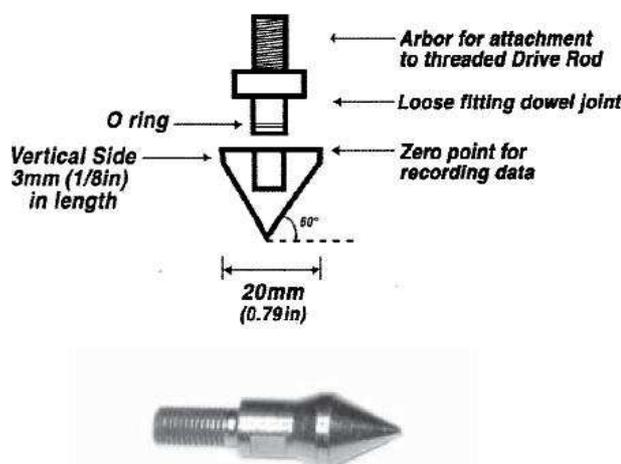


Fig. 6.28 - punta

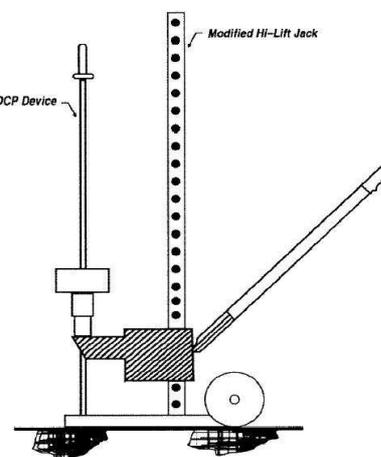


Fig. 6.29 - estrattore

Il primo passo da eseguire, prima di effettuare l'assemblaggio, è quello di fare il check-up delle varie componenti che costituiscono lo strumento, verificando che non ci siano elementi danneggiati; determinata l'idoneità si può procedere con il montaggio dello strumento.

Il componimento del DCP è da effettuare seguendo i seguenti passi :

- prendere l'asta inferiore e farla passare prima all'interno del supporto per l'attacco metrico superiore poi al piede;
- montare la punta;
- avvitare la punta all'asta di infissione, ricordandosi di verificare l'installazione mediante l'utilizzo di pinze idonee;
- selezionare la massa da utilizzare, nel caso in cui si opti per il martello da 8 kg impilare il peso aggiuntivo a quello da 4.6 kg;
- prendere l'asta superiore e lubrificarla per permettere un corretto scivolamento della massa diminuendo gli attriti;
- inserire il martello selezionato;
- mediante l'utilizzo del Quick-Connect Pin unire le due aste, prestando attenzione alla massa mobile;
- installare la scala metrica;
- terminata la prova estrarre le aste mediante l'estrattore

Montato lo strumento e scelto il punto del manufatto su cui eseguire la prova si possono descrivere due casistiche per una corretta acquisizione dei dati:

- l'analisi di uno strato di terreno superficiale;
- l'analisi di un terreno sotto altri strati.

Per l'analisi di un terreno superficiale si posiziona il DCP in posizione verticale e si fa affondare la punta finchè il punto di zero(fig. 6.30) non risulta a filo con il terreno.



Fig. 6.30 – indicazione del punto di zero

Disposto così lo strumento l'operatore può sollevare il martello sino a farlo appoggiare, ma non sbattere, all'impugnatura consentendogli successivamente la volata fino all'impatto con l'incudine. Ora è possibile leggere la penetrazione della punta attraverso una semplice lettura al metro e segnare i dati ottenuti in una apposita tabella. Questa semplice operazione di volata e lettura è da effettuare fino al raggiungimento della profondità voluta.

La procedura da seguire quando il terreno da esaminare è vincolato consiste nel forare mediante l'utilizzo di un trapano idoneo la pavimentazione superiore fino al raggiungimento dello strato avendo l'accortezza di non intaccare lo strato da indagare. Successivamente si può procedere come sopra.

Nel caso in cui l'affondamento dopo tre volate sia inferiore o uguale a 2 mm (0.08 in) o ci si trovi in presenza di aggregati con diametro pari a 50 mm la prova è da terminare poiché un suo proseguimento potrebbe danneggiare lo strumento.

Il nuovo punto d'esame non dovrà trovarsi ad una distanza inferiore ai 300mm dalla prima locazione in modo da minimizzare gli errori causati dal disturbo del terreno causato dalla prima sessione di prova.

La procedura di svolgimento della prova può essere sviluppata secondo il metodo tradizionale, ovvero da due operatori: uno si occupa delle volate, il secondo della lettura e trascrizione dei dati.

Terminate le varie prove si costruiscono i

grafici relativi ad esse (fig. 6.31) con in ordinata la profondità raggiunta e in ascissa il Dynamic Cone Penetrometer Index (DCPI).

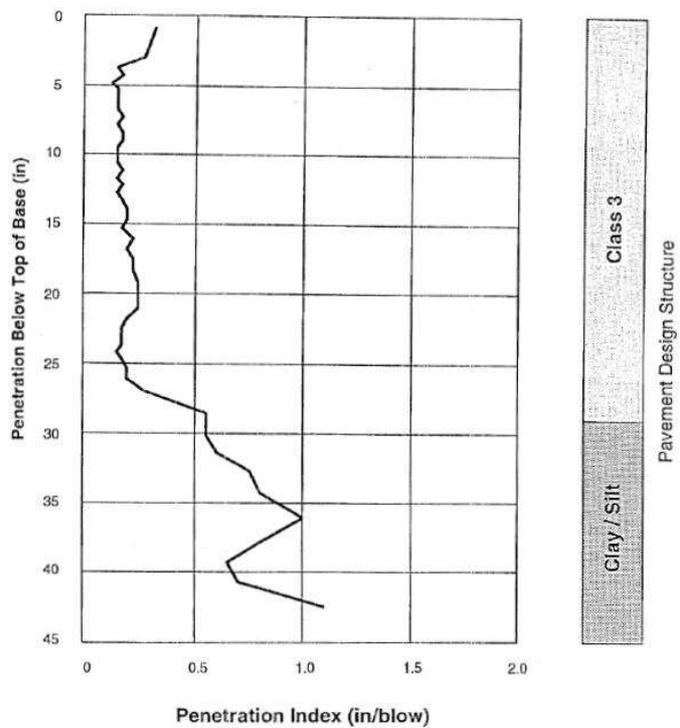


Fig. 6.31 - DCPI index

### 6.7 SCHEMA DI RILIEVO DELLE PROVE – FASI DI TESTING

Lo schema delle prove da effettuare prevede per ogni campo e per ogni strato:

- Prove di rullatura con sistema CCC;
- 2 determinazioni di densità e umidità
- 24 determinazioni di portanza con sistema PFWD (Zorn, Dynatest, Terracontrol);
- 2 prove DCP.

Solamente a rilevato ultimato, quindi sul secondo strato vengono effettuate per ogni campo 8 prove di tipo FWD.

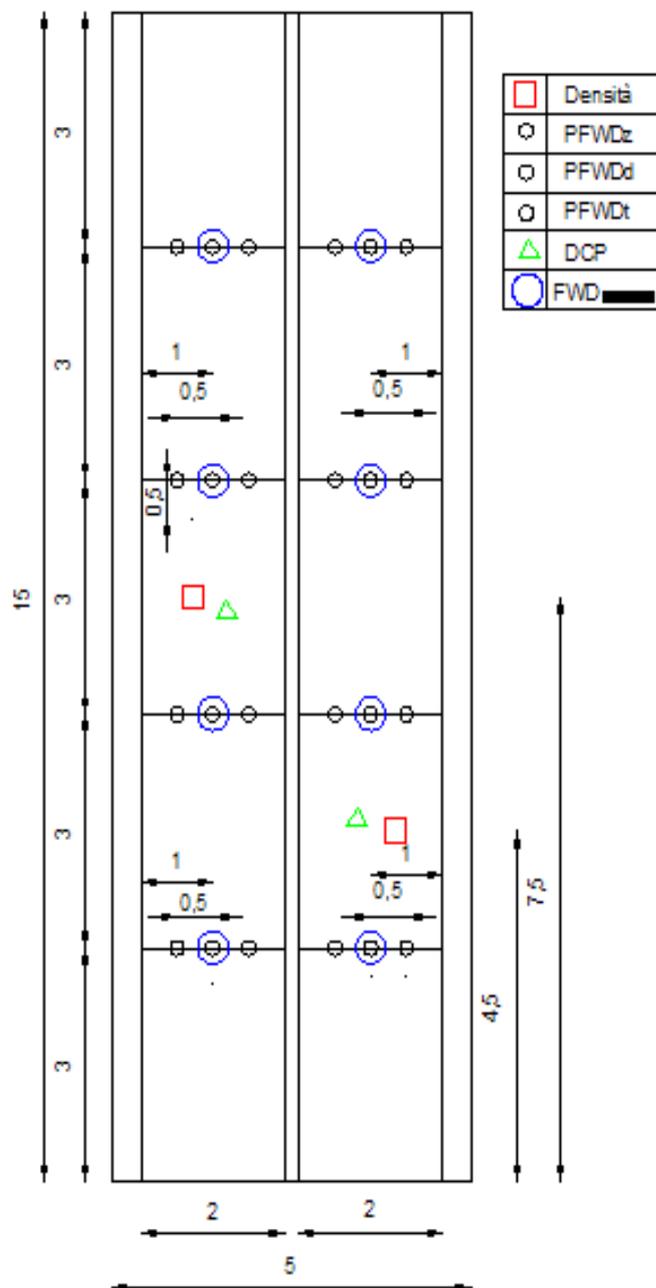


Fig. 6.32 – prove da effettuare per ciascun campo e ciascuno strato (sottofondo - strato 1 - strato 2)

### 6.8 IDENTIFICAZIONE DEL PERSONALE NECESSARIO E DURATA DELLE PROVE

La tipologia e il numero di prove in progetto per la completa ed esaustiva caratterizzazione di ogni strato del rilevato hanno reso necessario un'adeguata previsione del personale necessario e una ripartizione corretta dello stesso durante le giornate di prova. Per le prove sono state scelte le giornate dal 6 all'8 luglio 2010. La ripartizione del personale è avvenuta secondo i seguenti schemi organizzati per giornata.

Giorno 6/07/2010						Giorno 7/07/2010					
Uni	Num. Prove		Prova	Operatori	Num. Oper.	Uni	Num. Prove		Prova	Operatori	Num. Oper.
	Campo	Tot					Campo	Tot			
BO			RULLO	Cesare Sangiorgi Wolfgang Wallrath	1	BO			RULLO	Cesare Sangiorgi Wolfgang Wallrath	1
BO	24	96	PFWDz	Rocco Salome Alessio Montuschi	2	BO	24	96	PFWDz	Riccardo Lamperti Alessandro Labbate	2
PI	24	96	PFWDd	Giacomo Betti	2	PI	24	96	PFWDd	Giacomo Betti Tony Montillo	2
BO	24	96	PFWDt	Claudio Lantieri Alessio Montuschi	2	BO	24	96	PFWDt	Francesco Petretto	1
PI	2	12	DCP	Tony Montillo	1	PI	2	12	DCP	Tony Montillo Alessandro Labbate	2
BO	2	12	Densità	Marco Albicini Patrizio Rambelli	2	BO	2	8	Densità	Marco Albicini Patrizio Rambelli	2

Giorno 8/07/2010					
Uni	Num. Prove		Prova	Operatori	Num. Oper.
	Campo	Tot			
BO			RULLO	Cesare Sangiorgi Wolfgang Wallrath	1
BO	24	96	PFWDz	Claudio Lantieri / A. Lepore Francesco Petretto / R. Ricci	2
PI	24	96	PFWDd	Giacomo Betti Tony Montillo	2
PI	8	32	FWD	Alessandro Marradi	1
PI	2	12	DCP	Tony Montillo Giacomo Betti	2
BO	2	8	Densità	Marco Albicini Patrizio Rambelli	2

Fig. 6.33 – personale necessario

## 6.9 FASI COSTRUTTIVE

La necessità di realizzare la preparazione del campo e le fasi di testing in tempi ridotti hanno imposto la necessità di stabilire un cronoprogramma piuttosto intenso. Nella tabella che segue riportiamo la suddivisione dei lavori per giornate, riservandoci poi di analizzare ogni fase.

<i>Fase</i>	<i>Giorno</i>
1- <i>Delimitazione dell'area di cantiere</i> 2- <i>Tracciamento del campo sperimentale</i> 3- <i>Scavo dei fossi</i> 4- <i>sbancamento</i>	<b>1/07/10</b> <i>A cura di UNIBO e C.A.R.</i>
<b>RIUNIONE PRELIMINARE</b> <i>Ore 19.00 alla C.A.R.</i>	<b>5/07/10</b>
<b>5- TESTING DEL SOTTOFONDO</b> 6- <i>Posa delle celle di pressione C1,C2,C3</i>	<b>6/07/10</b>
7- <i>Posa dello strato 1 e livellamento dei 4 campi</i> <b>8- TESTING DELLO STRATO 1</b> 9- <i>Posa delle celle di pressione C4,C5,C6</i>	<b>7/07/10</b>
10- <i>Posa dello strato 2 e livellamento dei 4 campi</i> <b>11- TESTING DELLO STRATO 2</b>	<b>8/07/10</b>

*Tab. 7 - cronoprogramma*

### 6.9.1 FASE 1 – DELIMITAZIONE DELL'AREA DI CANTIERE



*Fig. 6.34 - accesso al cantiere e dotazioni di sicurezza fornite da C.A.R.*

I lavori di delimitazione dell'area di cantiere iniziano l'1 luglio 2010. Tutta la zona interessata dalle lavorazioni viene segnalata con picchetti ogni 5 m e nastro. La cartellonistica di sicurezza viene affissa ai paletti di recinzione.

### 6.9.2 FASE 2 – TRACCIAMENTO DEL CAMPO SPERIMENTALE

Il tracciamento del campo viene realizzato dal personale UNIBO. La definizione dell'area di scavo è stata realizzata tramite una picchettatura definitiva di due tipologie:

- picchetti da 1,6 m: servono a segnalare il confine tra materiali differenti. Vengono posti a 15 m l'uno dall'altro.
- Picchetti da 0,8 m: vengono posti a 5 m l'uno dall'altro e danno un riferimento pratico per l'apertura dei fossi.



*Fig. 6.35 – Marco Albicini e Cesare Sangiorgi delimitano il campo*

### 6.9.3 FASI 3 E 4 – SCAVO DEI FOSSI E SBANCAMENTO

Il progetto originario per l'apertura dei fossi prevede l'asportazione di circa 22 m<sup>3</sup> di materiale in banco. Lo sbancamento invece riguarda un volume di materiale di circa 137 m<sup>3</sup>. Tale materiale sarà accumulato a bordo scavo per poi essere allontanato successivamente. Il numero dei fossi è stato ridotto rispetto a quello previsto in progetto: si decide di realizzare il primo fosso alla progressiva 5 m scegliendo di non realizzare il fosso previsto al contatto tra un materiale e l'altro. Con l'ausilio di un escavatore cingolato di proprietà della C.A.R. il capocantiere procede con l'apertura dei fossi (fig. 6.36).



*Fig. 6.36 – Davide inizia lo scavo dei fossi di scolo*

I lavori procedono con un preliminare sbancamento ad opera dell'escavatore. Il tipo di benna munita di denti, indispensabile per le lavorazioni usuali della C.A.R., non è invece adatta a restituire una superficie del sottofondo priva di asperità così come richiesto. Scopo di tale preliminare sbancamento sarà quindi allontanare quanto più materiale possibile senza alterare né intaccare sensibilmente la superficie del sottofondo (fig. 6.37).



*Fig. 6.37 - sbancamento*

Al termine della prima giornata il sito si presenta come in figura 6.38: il terreno accumulato a bordo scavo verrà allontanato tramite pala gommata e accumulato in prossimità del confine dell'area di cantiere.



*Fig. 6.38 – vista dello scavo al termine della prima giornata*

Lunedì 5-07-2010 procedono i lavori di sbancamento ad opera di un mini escavatore Hitachi. Una livellazione laser permette di stabilire il dislivello da colmare in senso longitudinale da un estremo all'altro dello scavo: 23 cm. Tale misurazione preliminare farà in modo di restituire uno scavo profondo ovunque all'incirca 40 cm, pur essendo il piano campagna non ben livellato. Oltre alla pendenza longitudinale viene conferita la pendenza di scolo verso la scarpata pari al 2%.



*Fig. 6.39 – livella laser*



*Fig. 6.40 - apertura delle trincee longitudinali*



*Fig. 6.41 - vista finale dello sbancamento*

Lo scavo quindi procede con l'apertura di due trincee longitudinali che tengano conto della pendenza longitudinale imposta e si trovino su piani sfalsati di 10 cm, così che dopo l'allontanamento del materiale che le separa, venga restituita la pendenza trasversale desiderata del 2%. L'allontanamento del materiale che si interpone fra le trincee viene realizzato soprattutto tramite escavatore: con la pala infatti si rischia di intaccare il livello di base se le ruote del mezzo non appoggiano pari.

Il sito prima del meeting preliminare si presenta come in figura 6.41: le geometrie sono

rispettate e la superficie del sottofondo si presenta regolare. La pioggia che cade un paio d'ore dopo l'ultimazione dei lavori viene efficacemente allontanata.

#### **6.9.4 RIUNIONE PRELIMINARE DEL PERSONALE**

La sera prima dell'inizio dei test il personale universitario, i tecnici Bomag e la direzione C.A.R. si sono incontrati in azienda per discutere il piano operativo e verificare la congruenza delle fasi proposte. Dalla discussione emerge la necessità di usare una accortezza per la taratura degli strumenti da utilizzare al mattino del giorno dopo. Quali differenze infatti si possono riscontrare tra le misurazioni fatte da due strumenti differenti nello stesso punto? Per questo motivo si decide di impiegare le 3 tipologie di strumentazione LFWD direttamente sulle celle di pressione (vedi paragrafo seguente).

### 6.9.5 TARATURA DELLA STRUMENTAZIONE LFWD



*Fig. 6.42 – messa in opera di una delle celle di pressione*



*Fig. 6.43 – LFWD Dynatest: prova sulla cella di pressione*

Prima di iniziare ogni operazione sul rilevato si decide di “tarare” la strumentazione LFWD. Wolfgang e Hans approntano un piccolo vaso nel terreno foderandolo con sabbia rinvenuta nello scavo. Una delle 6 celle di pressione a nostra disposizione viene momentaneamente messa in opera facendola aderire bene al terreno (fig. 6.42). La cella viene ricoperta con la medesima sabbia e quest’ultima viene livellata utilizzando una delle piastre dell’LFWD. Successivamente inizia la taratura. Il computer centrale viene approntato per la registrazione dei valori di pressione provenienti dalla cella dopo di che ogni strumento LFWD a nostra disposizione esegue una prova

posizionandosi come in figura 6.43, ossia centrando la piastra di carico sulla cella. Nella figura 6,43 vediamo la prova dell’LFWD Dynatest sulla cella. Il cavo che si diparte dalla strumentazione appartiene alla cella. Va detto infatti che ogni cella necessita di un cavo di trasmissione dati collegato al computer centrale. Questo rappresenta una limitazione per le lavorazioni: bisognerà prestare cura in ogni momento alla posizione di una cella nel rilevato e dei relativi cavi oltre che fare attenzione durante la posa dei materiali. Infatti rappresenterebbe un grosso pericolo eseguire prove di tipo penetrometrico se non fosse conosciuta l’esatta posizione delle celle.

**6.9.6 FASE 5: TESTING DEL SOTTOFONDO - RULLATURA**



*Fig. 6.44 – rullatura del sottofondo*

Subito dopo la taratura strumentale descritta prima si è affrontata la compattazione del sottofondo (BOMAG BTM con strumentazione BW213).

Si effettuano per lato “A14” 12 passate: 7 in modalità manuale (le prime 5 in manuale 3 con ampiezza di vibrazione 1,2 mm, la sesta in manuale 5 con ampiezza 2,4 mm e la settima in manuale 2 con relativa ampiezza di 0,7 mm). 5

passate sono di ritorno statico. Per il lato “Imola” si effettuano le medesime passate con le stesse modalità.

**6.9.7 FASE 5: TESTING DEL SOTTOFONDO - DENSITÀ**

Abbiamo già definito la localizzazione delle prove di densità: nella tabella che segue definiremo le sigle di identificazione di ogni prova con la relativa determinazione di densità e umidità dei campioni prelevati.

	<i>SOTTOFONDO</i>		<i>LAYER 1</i>		<i>LAYER 2</i>	
	Lato “A14”	Lato “Imola”	Lato “A14”	Lato “Imola”	Lato “A14”	Lato “Imola”
CAMPO 1	CS1-1	CS1-2	L1C1-1	L1C1-2	L2C1-1	L2C1-2
CAMPO 2	CS2-1	CS2-2	L1C2-1	L1C2-2	L2C2-1	L2C2-2
CAMPO 3	CS3-1	CS3-2	L1C3-1	L1C3-2	L2C3-1	L2C3-2
CAMPO 4	CS4-1	CS4-2	L1C4-1	L1C4-2	L2C4-1	L2C4-2

*Tab. 8 – denominazione dei campioni per le misure di densità*

La determinazione di densità e umidità di un campione in situ necessita del prelievo di tale campione unitamente al conferimento in un laboratorio attrezzato per tale prova. Il procedimento consiste nel misurare il volume di sabbia occorrente a riempire il cavo lasciato dal campione di

terra prelevato per misurarne il peso e l'umidità. Il metodo utilizzato in cantiere è un'applicazione del "metodo del volumometro a sabbia". I materiali impiegati per la prova sono:

- Sabbia pulita e asciutta monogranulare;
- Una piastra di base con foro circolare al centro pari a 25 cm;
- Attrezzi per lo scavo e fissaggio della piastra di base al suolo;
- Sacchi impermeabili/barattoli a tenuta.
- Cilindri tarati per la determinazione del volume di sabbia utilizzato.



*Fig. 6.45 – prelievo del campione*

Innanzitutto si deve verificare il volume di materiale da prelevare: si possono scegliere anche piastre con fori centrali di diametro inferiore a 25 cm tenendo conto del fatto che la dimensione massima dei granuli di terra non deve essere superiore ad un quinto del diametro del foro della piastra. Un prelievo ridotto si effettuerà quando nel materiale non si prevede la presenza di elementi che possano alterare sensibilmente la densità finale (rocce in mezzo a terreno per esempio). Nel nostro caso, dovendo affrontare il prelievo di porzioni del sottofondo con le caratteristiche descritte in precedenza optiamo per un prelievo più consistente e per la pietra di base con foro da 25 cm. In tal modo avremo maggiore possibilità di una determinazione veritiera, in cui la presenza di rocce e materiali estranei abbia meno peso. La prova consiste nell'appoggiare la piastra metallica dotata di foro centrale al terreno. Dopo averla saldamente fissata si può iniziare ad asportare materiale dal foro (fig. 6.45), avendo cura di riporlo entro sacchi o barattoli non traspiranti. Il foro deve essere eseguito il più possibile cilindrico: ciò avviene perché l'umidità varia lungo la verticale. Se si facesse un foro conico avremmo una determinazione di umidità falsata. Pur essendo la quantità di materiale da prelevare a discrezione dell'operatore si cerca

eseguire un foro cilindrico di profondità indicativamente paragonabile al diametro del foro. L'operazione di scavo deve essere particolarmente accorta: si deve cercare lo stato di addensamento del terreno attorno alla buca stessa. Terminata l'operazione di scavo e sigillatura dei barattoli/sacchi si procede al riempimento del foro con un volume noto di sabbia monogranulare (fig. 6.46).



*Fig. 6.46 – riempimento del foro con sabbia*

Il foro va riempito fino al livello superiore della piastra di appoggio, una semplice sottrazione permetterà di togliere al volume di sabbia inserito il volume riferibile allo spessore della piastra (per la piastra con foro da 25 cm tale volume è  $400 \text{ cm}^3$ ), per ottenere il volume netto del foro. Generalmente si recupera la sabbia dopo averla setacciata e si procede con una nuova prova.

#### **6.9.8 FASE 5: TESTING DEL SOTTOFONDO – LFWD**



*Fig. 6.47 – ubicazione dei punti FWD*

Va ricordato che l'effettuazione di qualunque prova è subordinata all'individuazione esatta del punto di prova sul terreno. con bomboletta spray quindi si è proceduto alla segnalazione sul campo dei punti di prova. La fig. 6.47 individua sul sottofondo e per una strisciata l'ubicazione di prove di tipo LFWD (punti blu), prova di densità (quadrato giallo) e prova DCP (triangolo giallo). Le medesime indicazioni sono state fatte sulla strisciata a fianco. Nella figura 6.48 riportiamo la griglia esatta per i 4 campi oltre ad un particolare della strisciata.

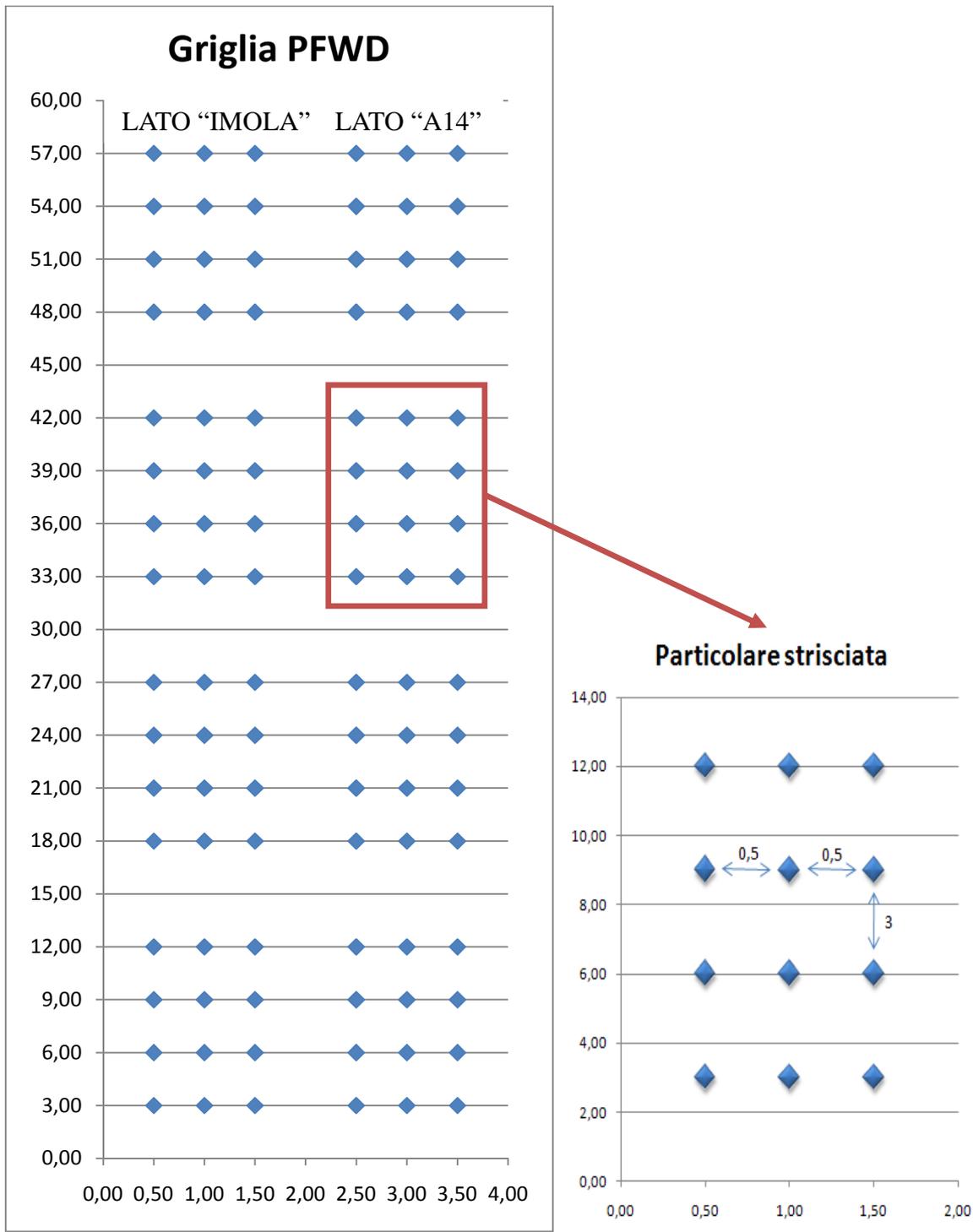


Fig. 6.48 – griglia LFWD



*Fig. 6.49 – ubicazione prove LFWD*

### 6.9.9 FASE 5: TESTING DEL SOTTOFONDO – DCP



*Fig 6.50 – Prova DCP*

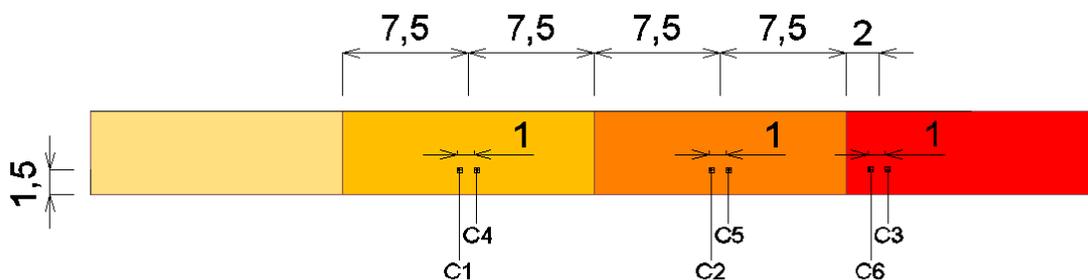
Giacomo Betti e Tony Montillo hanno eseguito prove DCP sul sottofondo sia prima che dopo la rullatura per avere un parametro di giudizio della compattazione. Nella figura 6.50 gli operatori eseguono prove DCP la mattina del 6/07/10 prima della rullatura.

**6.9.10 FASE 6: POSA DELLE CELLE DI PRESSIONE C1, C2, C3**



*Fig. 6.51 – Wolfgang dispone una cella prima del ricoprimento*

Come accennato prima abbiamo avuto a nostra disposizione 6 celle di pressione per verificare la reale entità delle pressioni in gioco durante l'azione del rullo e della strumentazione, oltre che subito prima e dopo il passaggio del mezzo. Rispetto al progetto originale di posa abbiamo scelto la configurazione riportata sotto: si sono indagati 3 campi su 4 e precisamente i campi 2,3 e 4. La lunghezza dei cavi rappresenta una limitazione importante. Se nei campi 2 e 3 riusciamo a disporre le celle in posizione baricentrica (limitando quindi il più possibile effetti di bordo) questo non può avvenire per il campo 4, dove le celle sono piuttosto vicine alla separazione tra i due materiali. Fondamentalmente la posa di una cella è identica a quella descritta prima: si crea un piccolo svasso nel terreno di dimensioni paragonabili al diametro della cella, si foderà con sabbia e si adagia la cella ruotandola per compattare la sabbia. I cavi, se rimanessero scoperti, sarebbero soggetti ad usura. Per questo motivo sono stati inseriti all'interno di un tubo flessibile ( fig. 6.51).



*Fig. 6.52 – disposizione effettiva delle celle*

Occorre però fare chiarezza sul posizionamento delle celle vicine. La posa delle celle nasce dalla volontà di determinare, se possibile, l'entità della pressione in gioco al fondo di uno strato

sottoposto ad azioni di compattazione e di prova. Per questo motivo dovremo posizionare una cella sul sottofondo in modo tale che possa registrare, una volta ricoperta, gli effetti delle lavorazioni del primo strato di 40 cm. Sul piano del primo strato posato verrà posizionata una seconda cella, sfalsata rispetto alla prima di un metro, per limitare effetti di oscuramento della cella sottostante. Dopo la posa del secondo strato tutte le 6 celle funzioneranno e registreranno gli effetti delle lavorazioni rispettivamente 80 cm e 40 cm sotto il piano di calpestio.

#### 6.9.11 FASE 7: POSA DELLO STRATO 1 E LIVELLAMENTO DEI 4 CAMPI



**Fig. 6.53 – posa dello strato 1**

Il 7/07/10 inizia la stesa del primo strato di 40 cm di materiale. L'operazione è piuttosto delicata se pensiamo che l'ubicazione delle celle è piuttosto centrale all'interno dei campi e non è possibile rovesciare il materiale direttamente su di esse. Per tale ragione l'autocarro dovrà usare particolare cura nell'evitare le celle durante le manovre. Sulle celle di pressione il materiale verrà prima adagiato manualmente, una volta creato uno spessore di protezione si potrà usare l'escavatore. Anche la separazione dei 4 materiali deve essere precisa. Nella fig. 6.53 vediamo appunto l'autocarro che scarica il macinato misto a fianco della breccia di traversine. Con l'ausilio dell'escavatore il materiale verrà grossolanamente livellato per poi essere rifinito a mano.



*Fig. 6.54 – grossolano livellamento mediante escavatore*

### 6.9.12 FASE 8: TESTING DELLO STRATO 1 - RULLATURA



*Fig. 6.55 – rullo sullo strato 1*

Il secondo giorno di prova sul primo strato si effettuano per lato “A14” 11 passate di cui 5 vibrato in manuale 3, 6 statiche.

Per il lato “Imola” vengono fatte 10 passate totali di cui 5 vibrato in manuale 3 e 5 statiche.

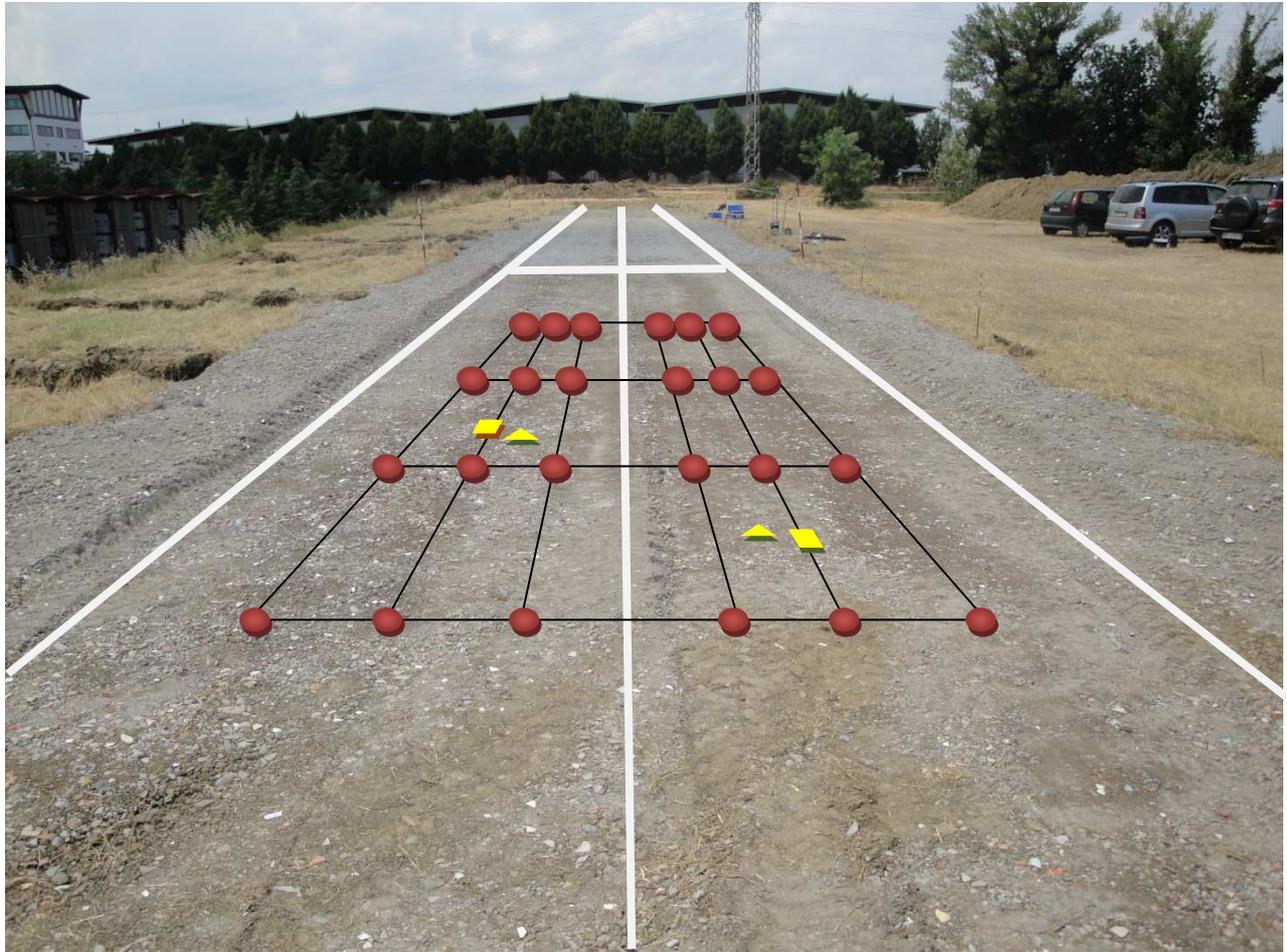
Subito dopo il primo strato è stato umidificato per migliorare l’azione successiva di compattazione e subito

dopo viene eseguita per entrambi i lati una passata in modalità manuale 2. In fig. 6.55 si vede il rullo in azione sullo strato 1.

### 6.9.13 FASE 8: TESTING DELLO STRATO 1 – LFWD, DCP, DENSITÀ

Le successive fasi di testing avvengono con le stesse modalità dello strato di sottofondo. La densità dei punti di prova, l’ubicazione delle prove non cambiano. Nella fig. 6.56 vediamo la griglia con l’ubicazione delle varie tipologie di prove. In rosso sono rappresentati i punti di prova LFWD. I quadrati gialli identificano il punto di prelievo di campioni per la determinazione di densità e umidità. I triangoli gialli sono posizionati sui punti di prova DCP. Le linee bianche delimitano la strisciata del rullo compressore: il rilevato quindi avrà una larghezza tale da

permettere 2 strisciate parallele di rullo. Questa griglia è riferita al primo campo di prova, per ogni materiale è prevista la medesima strutturazione delle prove.



*Fig. 6.56 – disposizione dei punti di prova*

#### **6.9.14 FASE 9: POSA DELLE CELLE DI PRESSIONE C4, C5, C6**

Sul primo layer di materiale avente uno spessore pari a 40 cm vengono posizionate le 3 rimanenti celle di pressione. Per la disposizione si veda sopra. Le accortezze sono le medesime di quelle usate per le celle sottostanti. Si decide però di non utilizzare tubo di protezione per i cavi elettrici. Ricordiamo inoltre che tutte le apparecchiature elettriche utilizzate sono state alimentate tramite gruppo di potenza a benzina.

### 6.9.15 FASE 10: POSA DELLO STRATO 2 E LIVELLAMENTO DEI 4 CAMPI



*Fig. 6.57 - Preliminare regolarizzazione del piano finale tramite escavatore*

La mattina dell'8 luglio termina la posa del secondo strato di materiale. Il rilevato finale quindi si eleva di 40 cm sul piano campagna, ha una lunghezza pari a 60 m e una larghezza sulla sommità pari a 5 m.

### 6.9.16 FASE 11: TESTING DELLO STRATO 2 – COMPATTAZIONE



*Fig. 6.58 – compattazione dello strato 2*

L'ultimo giorno per i lati "A14" e "Imola" sono state fatte in ordine:

- pre – umidificazione;
- 3 passate di cui 2 vibrante in "manuale 3" e una statica;

- ulteriore umidificazione;
- 8 passate: 3 vibrare in “manuale 3”, 1 in modalità “manuale 2” e le rimanenti statiche.

### 6.9.17 FASE 11: TESTING DELLO STRATO 2 - PROVE LFWD, DENSITÀ

Le prove su piastra dinamica si svolgono con le medesime modalità dei due strati sottostanti. Lo stesso vale per il prelievo dei campioni per la misura di densità.

### 6.9.18 FASE 11: TESTING DELLO STRATO 2 - PROVE FWD

A rilevato ultimato è stato possibile avvalersi per la determinazione dei moduli dinamici di portanza anche della strumentazione FWD dell’Università di Pisa.

Rispetto alla configurazione preliminare dei punti di prova, dato l’alto numero di prove/ora eseguibili (circa 30), si è potuta restringere la maglia di indagine. Le determinazioni con questa tipologia di strumento sono subordinate alla viabilità del piano di prova poiché la strumentazione di prova è posizionata su un carrello trainato da un veicolo.

Il guidatore si posiziona in modo tale che la massa posizionata sul carrello possa impattare esattamente sul punto di prova (fig. 6.59).



*Fig. 6.59 – apparecchiatura FWD in fase di posizionamento sul primo punto di prova*

Nella figura 6.60 si vede chiaramente l’indicazione in superficie dell’esatta ubicazione delle celle di pressione C2 e C5 per il campo 3, posizionate come previsto sul lato “A14”. Come detto prima l’aumento dei punti di prova ha permesso anche lo svolgimento di 6 prove FWD sulle celle di pressione. Per lo svolgimento della prova il guidatore deve prestare il massimo impegno nel posizionamento esatto sul punto, avvalendosi ovviamente dell’aiuto di un secondo operatore.



*Fig. 6.60 – ubicazione delle celle di pressione C2 e C5*

#### **6.9.19 TERMINE DELLE PROVE**

Le prove sono terminate l'8 luglio 2010. Non sono state effettuate prove DCP sul rilevato ultimato per mancanza di tempo.

Il sito non verrà smantellato immediatamente. Molto probabilmente verranno eseguiti nuovi test nei mesi autunnali per verificare la “maturazione” dei materiali dopo i mesi estivi. Poiché il campo non è stato distrutto le celle di pressione sono tuttora “annegate” nel materiale. Un intervento di messa in sicurezza effettuato il 9 luglio 2010 ha previsto la protezione dei terminali dei cavi elettrici uscenti dalle celle mediante sacchi in nylon.

## Capitolo 7

### ANALISI PRELIMINARE DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

#### 7.1 PREMESSA

La sperimentazione affrontata da C.A.R., appena conclusa, ha visto l'impiego di svariati mezzi di indagine per la determinazione delle proprietà portanti di 4 materiali riciclati differenti. Il sito di prova tuttavia non ha solo contribuito alla caratterizzazione dei materiali ma servirà anche come elemento di analisi e correlazione fra risultati forniti da strumenti differenti. Verosimilmente occorreranno alcuni mesi per far convergere tutti i dati ottenuti e poter così impostare uno studio coerente e completo. In questa sede si è deciso in ogni caso di affrontare una analisi preliminare dei dati ottenuti dalla strumentazione LFWD Zorn e LFWD Terratest, oltre a riportare e discutere alcuni esempi di scontrini forniti dal rullo. Riporteremo inoltre anche i dati di densità e umidità ottenuti. Tutto questo sarà volto ad una prima importante valutazione di bontà del materiale e di idoneità nei confronti di opere specifiche.

#### 7.2 VALUTAZIONE DI $E_{vib}$

La valutazione immediata di una buona compattazione può essere stimata a partire dalla visualizzazione in un grafico dell'andamento del modulo  $E_{vib}$ . Poiché tutte le passate sono avvenute in modalità manuale, cioè con ampiezza della vibrazione prefissata, possiamo impostare una discussione su eventuali zone che presentano moduli molto alti o molto bassi. Questa modalità di compattazione è detta “modalità di prova” proprio perché l'uniformità della compattazione (dell'ampiezza di vibrazione) lungo una stessa passata garantisce una risposta derivante da una sollecitazione omogenea, quindi non falsata dal fatto che in alcune zone il rullo modifichi l'entità della vibrazione. A titolo esemplificativo riportiamo uno scontrino relativo alla penultima passata in “manuale 5” per il lato “A14” (fig. 7.1).

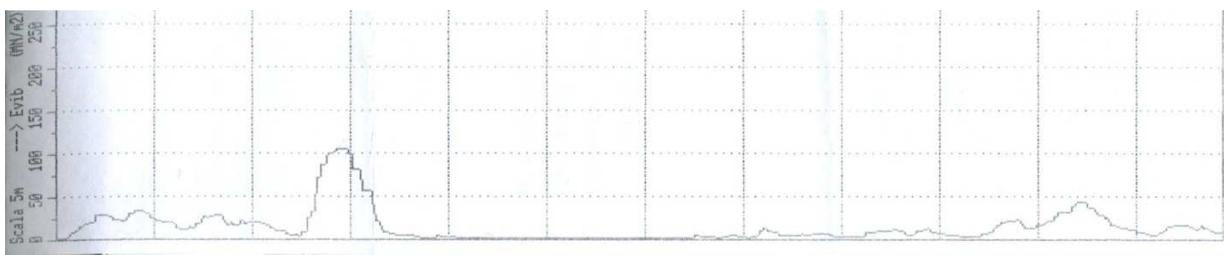
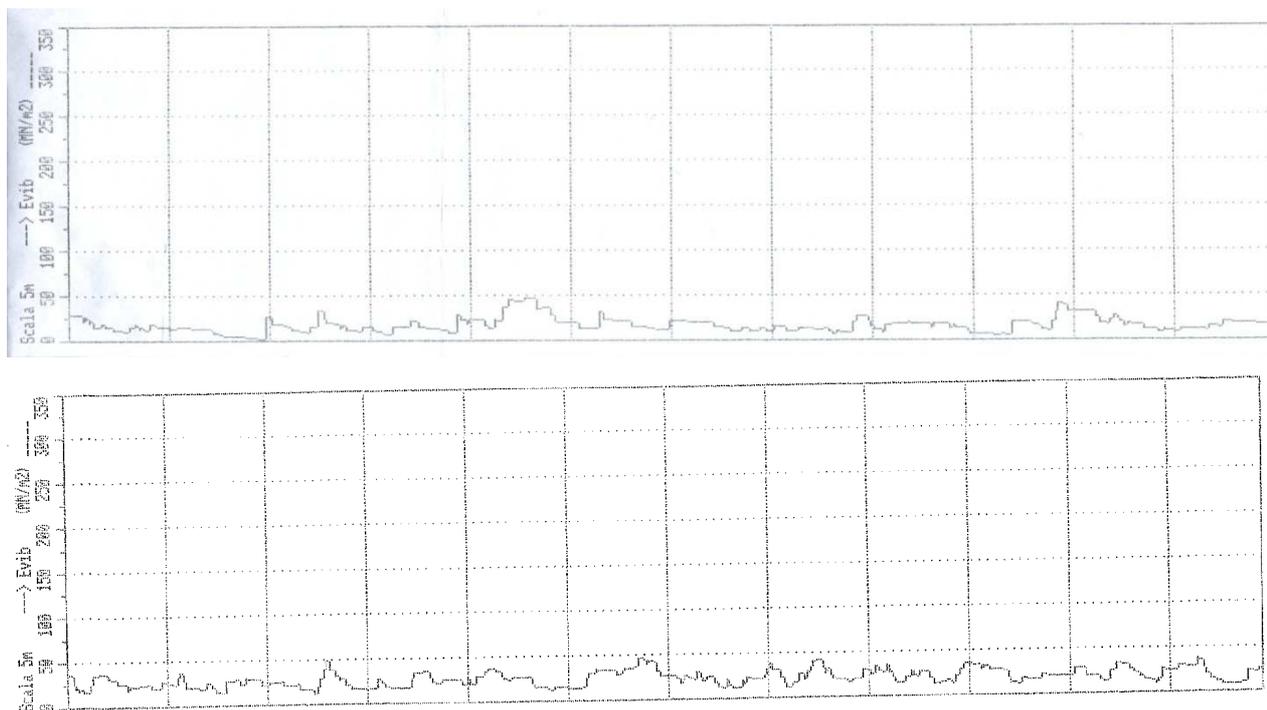


Fig. 7.1 –  $E_{vib}$  registrato lungo la strisciata: penultima passata in manuale 5 per il sottofondo “A14”

Notiamo come in linea di massima si registrino valori bassi. Viene inoltre registrato un picco alla progressiva 15 m che presenta un valore del tutto anomalo intorno ai 100 MPa. Verosimilmente un elemento più rigido di grosse dimensioni (blocco calcestruzzo?, blocco arenaria?) nel sottofondo può aver sensibilmente incrementato la rigidità causando una risposta del genere. Questo tipo di risposta si può ottenere poiché con una ampiezza di vibrazione piuttosto alta si ottiene una profondità di indagine alta e pari in questo caso a circa 1,5 m. Dalla progressiva 20 m fino a 35 m i moduli registrati sono molto bassi. L'ultima passata in "manuale 2" (fig. 7.2) interesserà lo strato più superficiale con una profondità di indagine che potremmo definire intorno ai 50 cm.

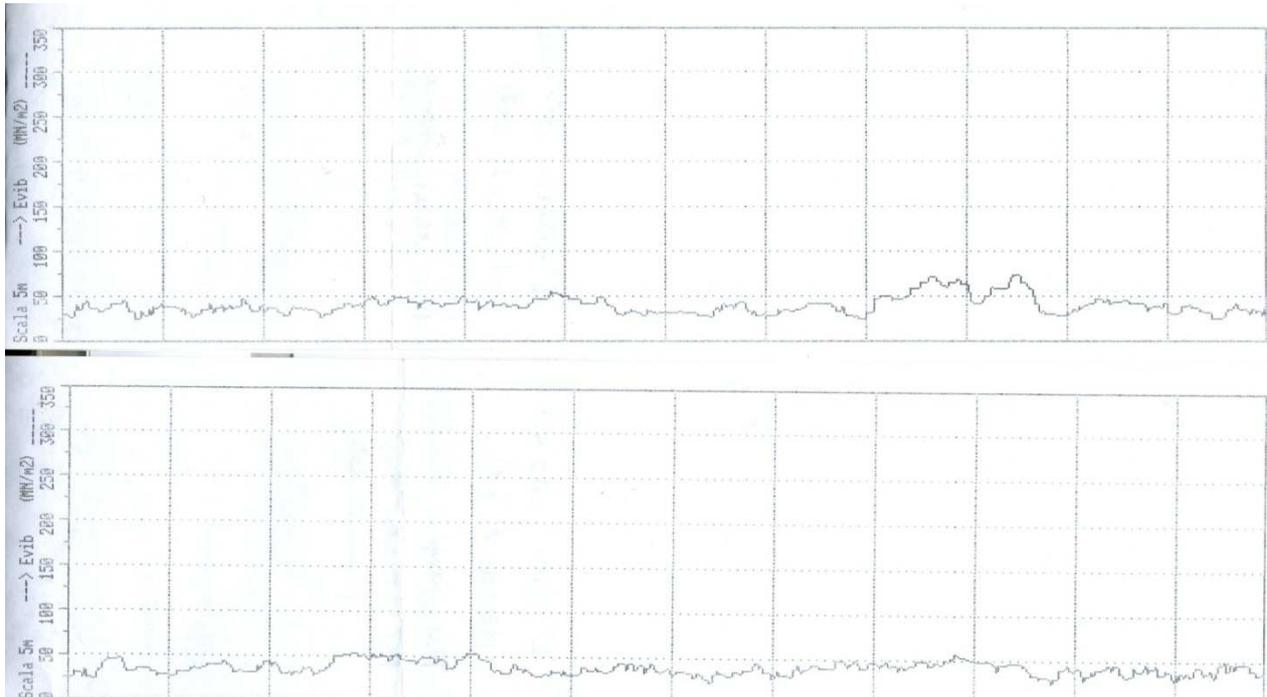


*Fig. 7.2 – Evib registrato lungo la strisciata: ultima passata in manuale 2 per il sottofondo “A14” (sopra) e “Imola” (sotto)*

Il modulo più alto registrato per lato “A14” è pari a 47 MPa, quello più basso è 3 MPa. Il valore medio sulla strisciata “A14” è di 17 MPa.

Il lato “Imola” presenta in linea di massima valori del modulo più alti. Il valore minimo registrato in questo caso è 8 MPa e quello massimo 48 MPa. La media è più alta e pari a 24 MPa. Questa valutazione sulla strisciata può essere confrontata con i valori di piastra dinamica se ci si mette nell’ottica di ragionare sulle profondità di investigazione. Abbiamo detto che il “manuale 2” è una modalità di vibrazione con profondità di investigazione pari a circa 50 cm. Se consideriamo il fatto che la piastra dinamica ha una profondità paragonabile (circa 30 cm), potremmo pensare di utilizzare la piastra dinamica come verifica dei moduli di vibrazione. A questo punto sarebbe lecito aspettarsi valori sulla strisciata “Imola” più alti rispetto al lato “A14”.

Passiamo alle registrazioni dei moduli degli strati 1 e 2. Riportiamo nella fig. 7.3 i grafici relativi all'ultima passata in "manuale 2" per lo strato 1 relativi ad entrambi i lati.



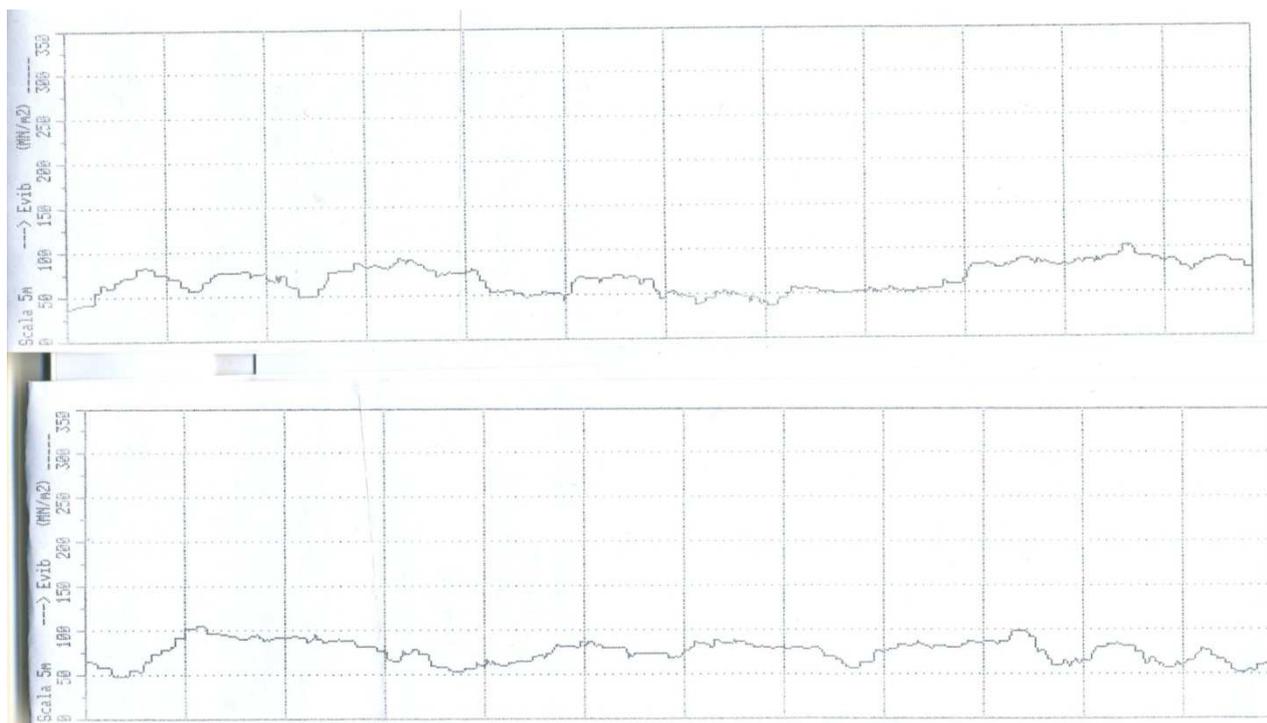
*Fig. 7.3 – Evib registrato per strato 1: ultima passata in manuale 2 per lato "A14" e "Imola"*

La risposta dopo la prima stesa di materiale è incrementata. Quasi ovunque i moduli si attestano intorno a valori prossimi a 50 MPa e in una zona limitata del lato "A14" tra le progressive 40 m e 50 m superano tale valore.

Il lato "A14" presenta una media di 39 MPa con valori massimi che raggiungono i 57 MPa. Il lato "Imola" è coerente con tali valori e presenta una media di 40 MPa con valori massimi di 74 MPa.

Dopo la seconda stesa il modulo viene ulteriormente incrementato (fig. 7.4). Pressoché ovunque il modulo supera i 50 MPa, raggiungendo anche i 100 MPa. Al solito, nella figura riportiamo gli ultimi passaggi vibrati in modalità "manuale 2" per entrambi i lati. Il lato "A14" possiede valori del modulo sistematicamente inferiori e ha una media di 68 MPa con valori massimi registrati di 102 MPa mentre il lato "Imola" ha una media di 76 MPa.

Impostiamo un ragionamento sulle differenze apprezzabili per i 4 materiali. Prendiamo in considerazione proprio l'ultima passata sul secondo strato. L'ultimo campo per il lato "A14" presenta un incremento visibile del modulo. A rigore, questo è esattamente riscontrabile nella striscia "Imola" con l'accortezza di identificare il campo 4 nei primi 15 m (il rullo torna indietro e registra a partire dal fondo). Vedremo anche in questo caso se è possibile stabilire una correlazione con i moduli restituiti dalla strumentazione portatile. Anche nella zona al contatto tra il campo 1 e il campo 2 sono presenti valori più alti, che riscontriamo alla progressiva 45 m per il lato "Imola".



*Fig. 7.4 – Evib registrato per strato 2: ultima passata in manuale per lato "A14" e "Imola"*

### 7.3 CONSIDERAZIONI

È possibile impostare una prima valutazione sulla qualità del materiale in termini di costipabilità e di moduli raggiungibili. Va detto in primis che la risposta del sottofondo si è attestata mediamente intorno ai 20 MPa. È questo il punto di partenza per i materiali. L'incremento del modulo a cui si è assistito dopo la prima stesa e l'ulteriore considerevole aumento ottenuto con la stesa del secondo strato possono costituire in questa sede di analisi una preliminare garanzia sulla portanza che i 4 materiali sono in grado di evocare. Ad ulteriore riprova di quanto appena affermato affronteremo nel paragrafo successivo l'analisi dei moduli dinamici di portanza ottenuti dalla strumentazione portatile LFWD Zorn e Terratest.

### 7.4 CENNI DI GEOSTATISTICA: VALUTAZIONE DI $E_{vd}$

La geostatistica studia le grandezze che si sviluppano su base spaziale a partire dai dati derivanti dal loro campionamento. In particolare, essa analizza la variabilità spaziale dei parametri di interesse, definendo modelli volti alla loro quantificazione probabilistica.

In particolare la funzione variogramma, la cui stima viene effettuata sulla base dei dati provenienti dal campionamento del fenomeno oggetto di studio descrive l'andamento della variabile di interesse nel territorio misurando il grado di variazione dei dati campionari nello spazio. The Experimental Variogram (EV) delinea la dipendenza spaziale nella forma di una funzione che

mette in relazione la semivarianza ( $\gamma$ ) con la distanza vettoriale ( $h$ ) tra coppie di dati sperimentali. La semivarianza è data dalla somma delle differenze quadrate tra i valori sperimentali separati da una determinata distanza, generalmente chiamata Lag ( $h$ ). Questo valore è diviso per il numero di coppie di punti sperimentali separati da una distanza inferiore o uguale al Lag ( $h$ ). The EV, essendo dipendente da una distanza vettoriale, è calcolabile secondo una precisa direzione, fornendo una tolleranza angolare e di distanza, o come media di più direzioni. Per quanto detto, la semivarianza  $\gamma(h)$  è data dall'espressione:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2m(h)} \sum_{i=1}^{m(h)} (Z(x_i + \vec{h}) - Z(x_i))^2$$

Dove:

- $Z(x_i)$  = valore della variabile  $Z$  nel punto  $x_i$ ;
- $Z(x_i+h)$  = valore della variabile  $Z$  in un punto distante  $h$  rispetto a  $x_i$  del piano;
- $m(h)$  = numero di coppie di punti sperimentali separati da una distanza inferiore o uguale ad  $h$ .

The Theoretical Variogram (TV) rappresenta la funzione (esponenziale, gaussiana, lineare, quadratica, etc.) che meglio descrive il trend della semi-varianza ( $\gamma$ ) sulla base della distribuzione dei punti nel EV. Il TV viene stimato coi dati di campionatura attraverso il calcolo, nelle diverse direzioni dello spazio. Il TV è definito da 4 parametri fondamentali, i cui valori sono necessari per una corretta applicazione delle procedure di interpolazione:

- soglia (sill) o altezza del variogramma, individua il valore di  $\gamma(h)$  in corrispondenza del quale la semi-varianza non mostra più apprezzabili variazioni;
- portata (range) è la distanza in corrispondenza della quale il variogramma raggiunge il sill. Il range fornisce un' indicazione sulla distanza di massima correlazione dei dati oltre la quale possono considerarsi statisticamente indipendenti;
- effetto pepita (nugget effect) è una componente strutturale a piccola scala del variogramma legata a potenziali errori nel campionamento e/o di misura della variabile;
- scale è pari a sill - nugget effect.

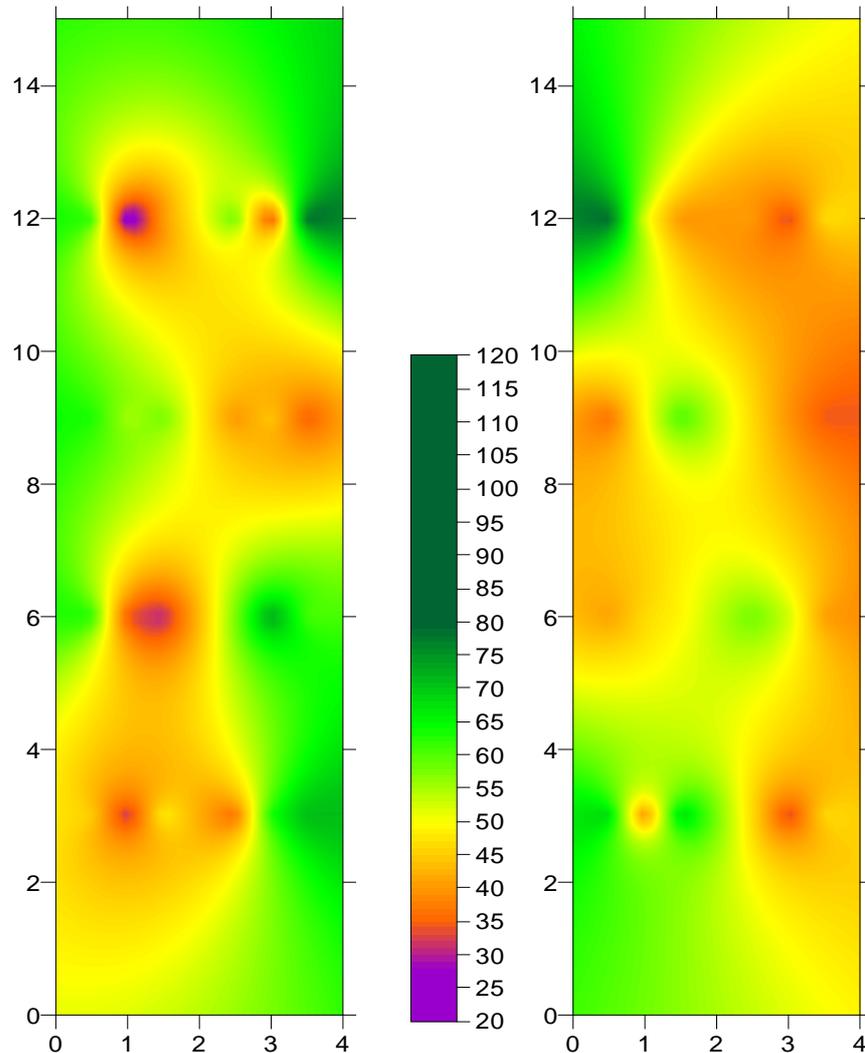
Una volta creato il TV un metodo per valutarne la validità è la Cross-Validation. La C-V è una procedura per cui iterativamente ogni campione viene escluso dal set di dati ed interpolato attraverso il valore dei restanti, utilizzando il modello di variogramma prescelto. Il confronto tra il valore stimato ed il valore reale è detto residuo della C-V.

Al fine di poter restituire i valori stimati per l'area in esame, una volta validato il TV, è necessario interpolare i dati disponibili per stimare i valori dove non si hanno campioni e restituirli

graficamente sulla cosiddetta mappatura. A tal fine si utilizza il metodo del krigaggio (kriging), che fornisce una soluzione al problema della stima basandosi su un modello continuo della variazione spaziale stocastica. Nel kriging, tramite un sistema di equazioni lineari, si pesano i campioni attorno al punto analizzato per minimizzare la varianza totale degli errori. I fattori che più influenzano i pesi sono la posizione del punto di stima rispetto ai restanti ed il TV adottato.

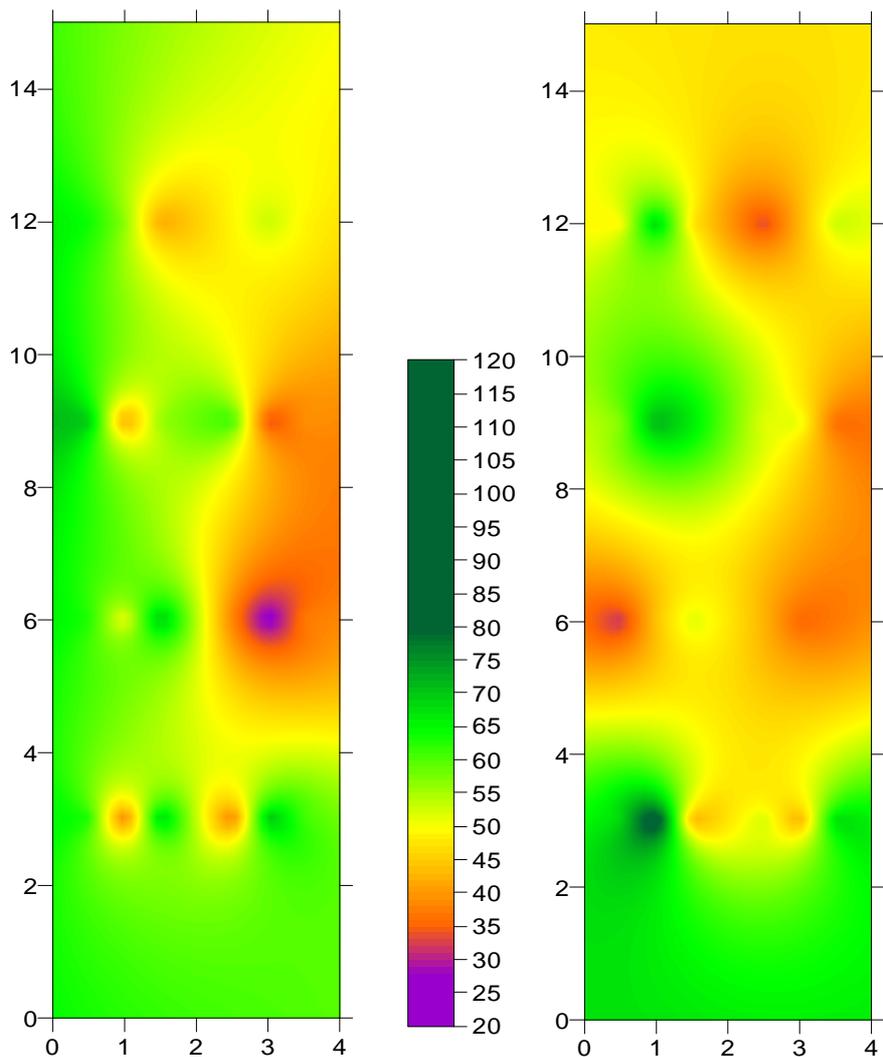
I dati ottenuti dalla strumentazione LFWD citata sopra si sono resi immediatamente disponibili per l'impostazione di un'analisi statistica dei moduli dinamici di portanza. Accanto alla valutazione delle statistiche elementari si è proceduto con l'elaborazione di mappe stimate a partire dai valori misurati con Surfer 8. Procederemo adesso con il medesimo schema: partendo dal sottofondo, per ogni campo e per ogni strato, riporteremo le mappe ottenute unitamente alle statistiche elementari, discuteremo i valori incontrati, ragioneremo su eventuali problemi occorsi durante le misurazioni o di altra natura deducibili dalla modellizzazione.

Inizieremo con la mappatura Zorn, poi ci occuperemo di quella Terratest. In fig. 7.5 analizziamo il sottofondo, campi 1 e 2. La prima cosa che sarebbe utile verificare è proprio la rispondenza in termini di moduli dinamici del comportamento identificato dal rullo; notiamo infatti che per il sottofondo, per tutti i campi il lato "Imola" presenta valori del modulo dinamico maggiori. Solamente per il campo 1 tale comportamento è meno intuibile.



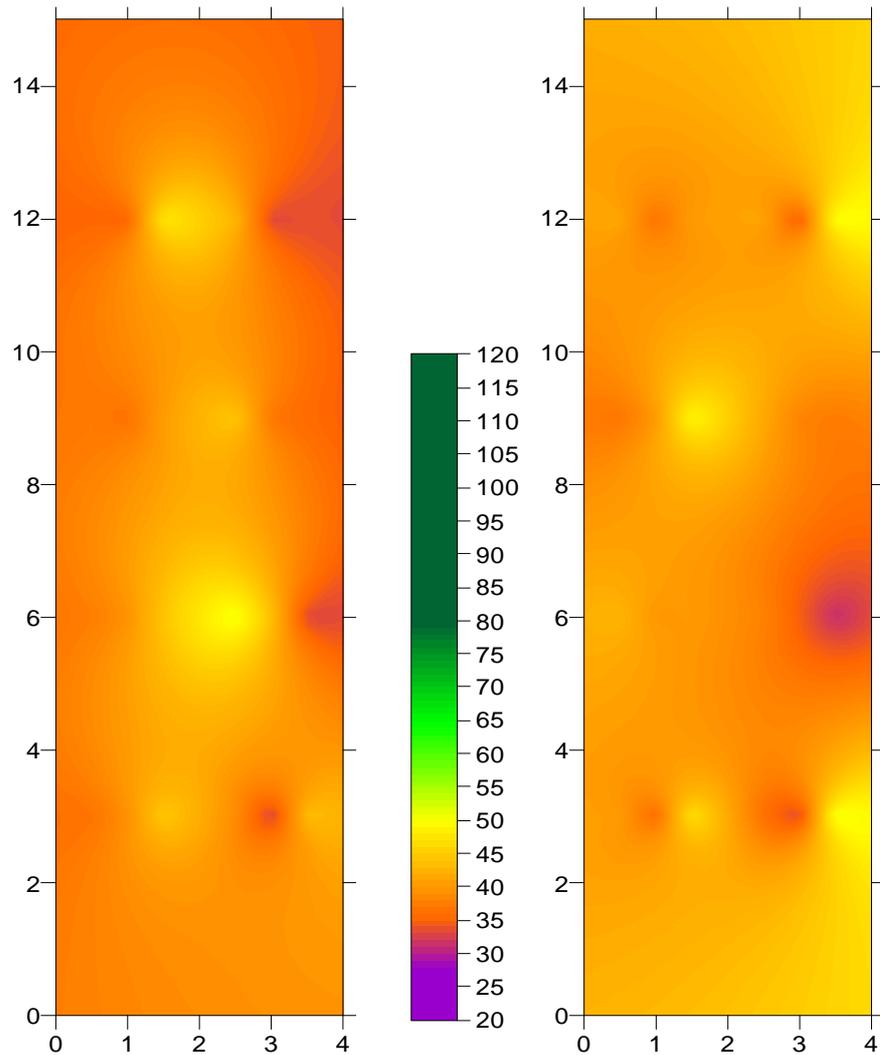
*Fig. 7.5 – mappatura Zorn del sottofondo: campo 1 (sx) e campo 2 (dx)*

Le due mappature non presentano differenze significative. Ciò che le accomuna è una visibile difficoltà di modellizzazione. Dalla mappatura del campo 1 appaiono punti con valori di modulo dinamico misurato intorno a 20 MPa, non in linea con i valori misurati vicino ad essi. Possiamo ipotizzare per tali punti, oltre alla situazione in cui effettivamente il terreno localmente sia più cedevole o umido, anche l'ipotesi di errore strumentale o di errore umano. In linea di massima i due campi appaiono piuttosto disuniformi; la striscia "A14", come ricordato sopra, fa presagire un fenomeno che possiede una strutturazione spaziale tipica (es. umidità al bordo dello scavo). Il campo 1 presenta un valore medio pari a 55 MPa e lo scarto tra i valori massimi e minimi registrati è di 55,3 MPa. Il secondo campo presenta una media del tutto confrontabile: 46,4 MPa. Il range di variazione dei valori massimo e minimo è pari a 46,6.



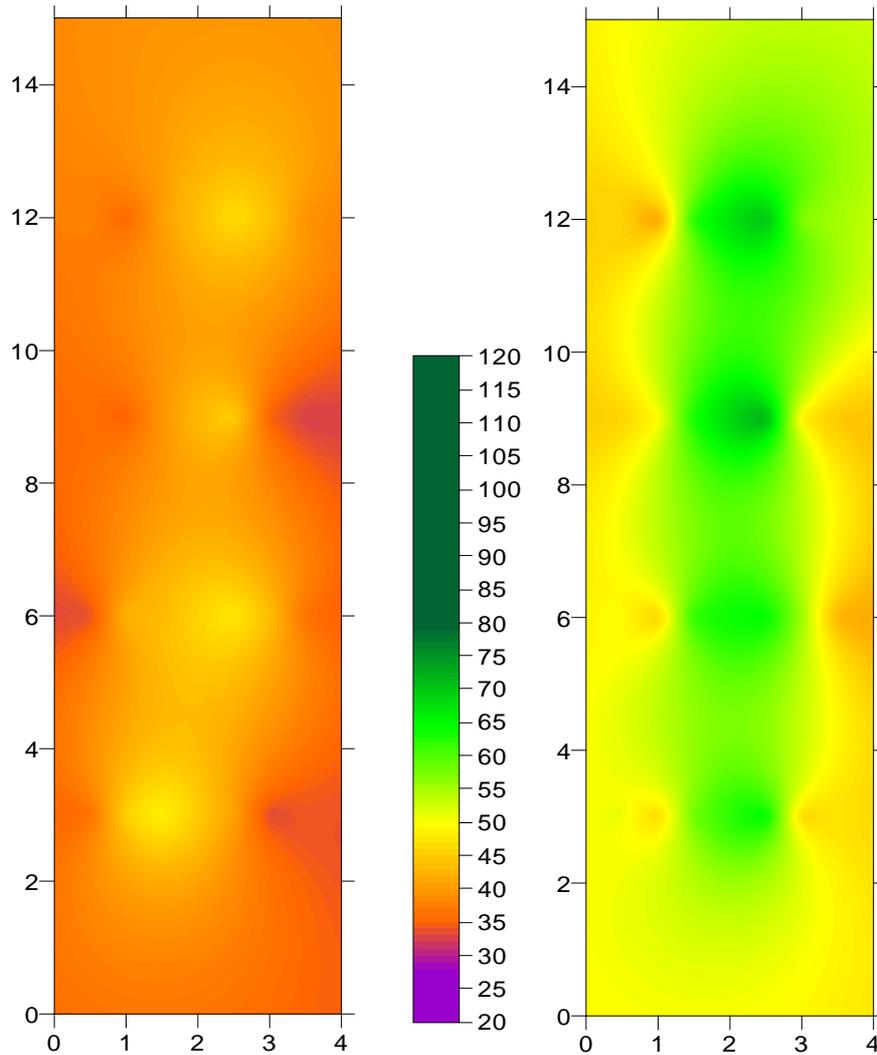
*Fig. 7.6 – mappatura Zorn del sottofondo: campo 3 (sx) e campo 4 (dx)*

Per i campi 3 e 4 può essere affrontata una interpretazione simile. Il campo 3 presenta un valore minimo misurato sul lato “A14” pari a 25,8 MPa e in generale la mappatura presenta una zona più debole sul lato “A14”. Il campo 4 possiede un valore medio pari a 51,3 MPa e un range di variabilità dei valori pari a 54,9 MPa. Anche in questo caso la zona “A14” presenta moduli inferiori.



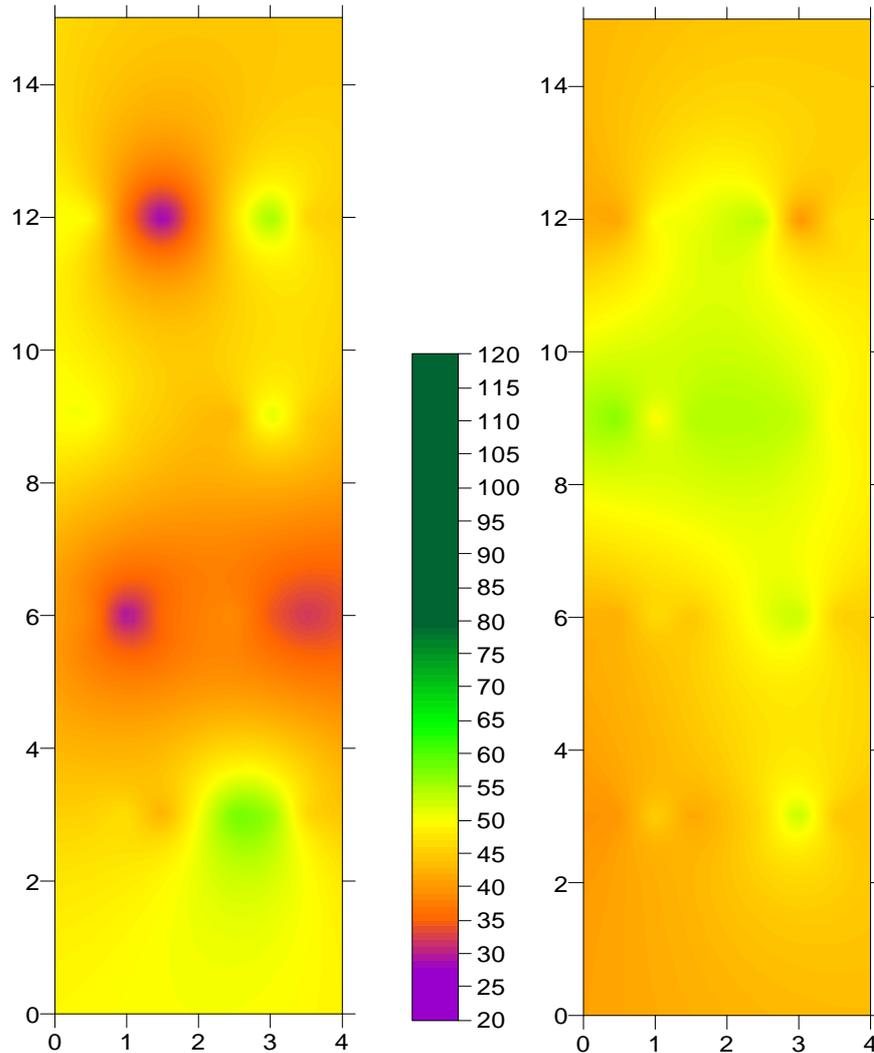
*Fig. 7.7 – mappatura Zorn del layer 1: campo 1 (sx) e campo 2 (dx)*

Dopo la stesa del primo strato la situazione è migliorata. I campi 1 e 2 presentano una maggiore uniformità di valori con range di variazione rispettivamente pari a 18,1 MPa per il campo 1 e 19,7 MPa per il campo 2. Il valore medio sul primo campo è pari a 38,8 Mpa, del tutto confrontabile col valore medio sul secondo, pari a 39,9 MPa



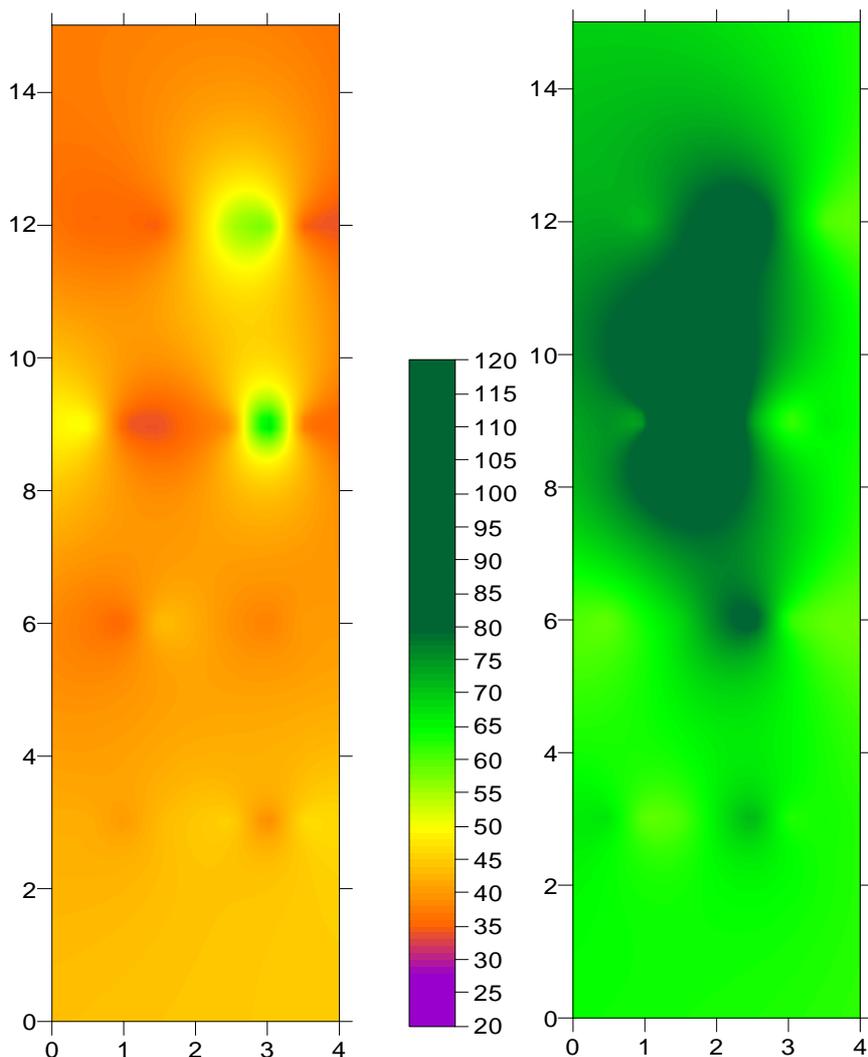
*Fig. 7.8 – mappatura Zorn del layer 1: campo 3 (sx) e campo 4 (dx)*

La mappatura del campo 3 presenta una ridotta variabilità dei valori di portanza dinamici, pari a 16,3 MPa con un valore medio sul campo pari a 39,7 MPa. Per il campo 4 l'incremento di portanza è evidente. Su tale campo infatti il valore medio misurato è di 50,9 MPa, con un range di variazione più alto e pari a 31,8 MPa. Inoltre è individuabile un fenomeno di abbassamento dei moduli in prossimità delle fasce laterali.



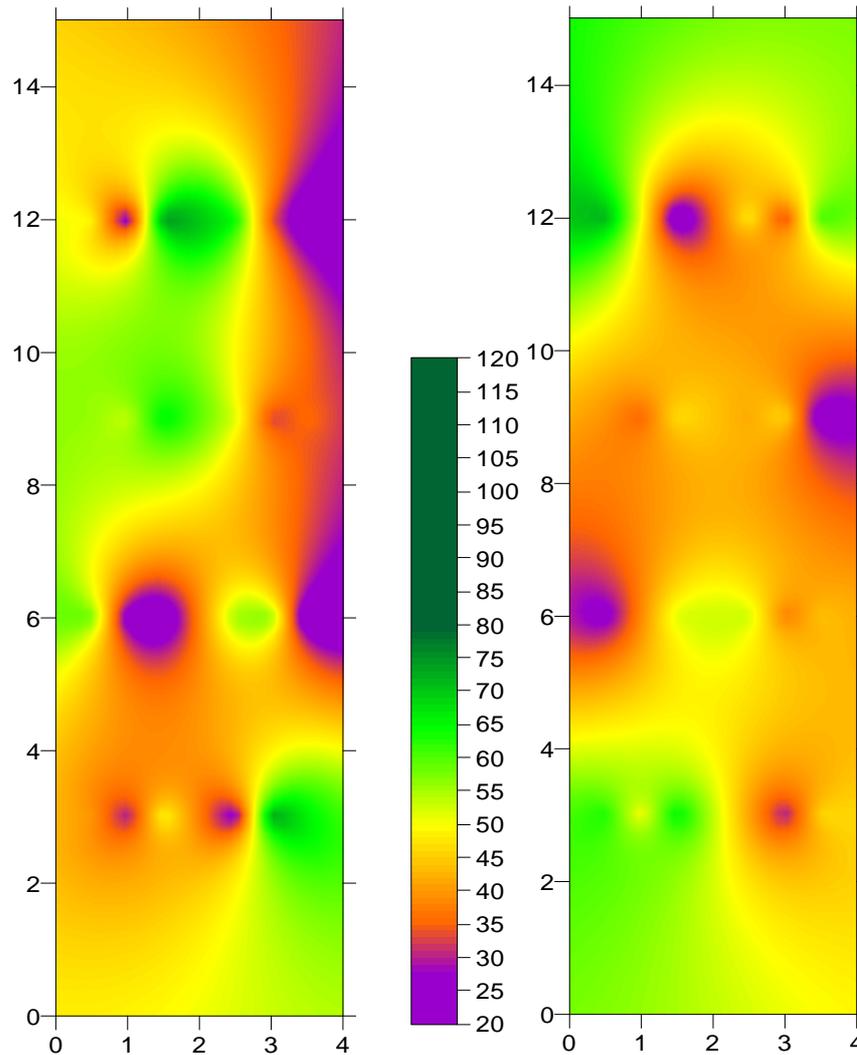
*Fig. 7.9 – mappatura Zorn del layer 2: campo 1 (sx) e campo 2 (dx)*

Con la stesa del secondo strato si assiste ad un incremento dei valori medi di portanza. In riferimento al campo 1 troviamo un valore medio pari a 45,4 MPa con un range di variabilità maggiore rispetto alla stesa precedente sul medesimo campo e pari a 30,9 MPa. La prima mappatura presenta due valori piuttosto bassi. Probabilmente il posizionamento della piastra di misura sul terreno, operazione delicata, non è andato a buon fine. Il campo 2 invece gode di un intervallo di variabilità dei valori molto inferiore, pari a 18, 1 MPa; per tale campo con la seconda stesa si assiste ad un incremento del valore medio del modulo di circa 10 MPa, pari quindi a 49,2 MPa.



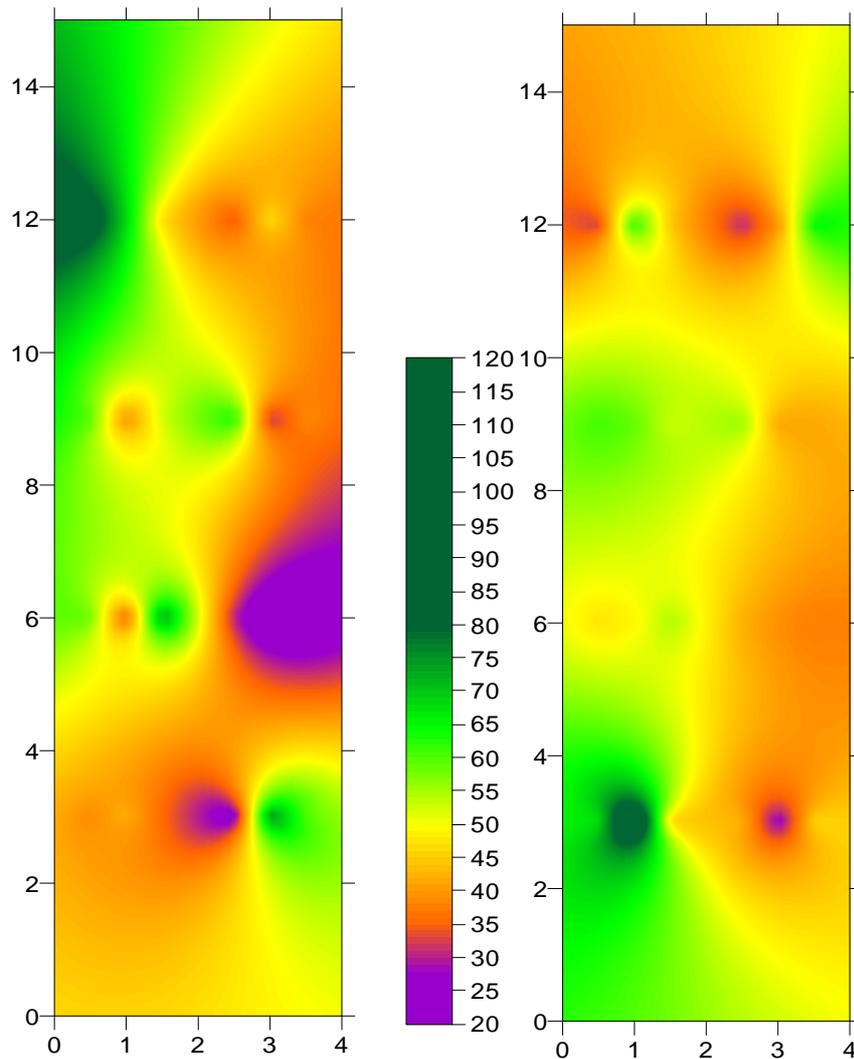
*Fig. 7.10 – mappatura Zorn del layer 2: campo 3 (sx) e campo 4 (dx)*

Il campo 3, con la seconda stesa di materiale, non incrementa il valore del modulo di portanza, che si attesta sempre sui 39 MPa. Il range di variabilità delle misure però, a causa di alcuni valori misurati piuttosto alti è maggiore del range riferito alla prima stesa e pari a 37,8 MPa. Per il campo 4 invece si possono fare considerazioni diverse. La media aumenta di circa 20 MPa con la seconda stesa. Viene registrato un massimo pari a 128 MPa e tuttavia un range di variabilità alto, pari a 70 MPa. Verosimilmente il campo 4 si può prestare al raggiungimento di valori di portanza ancora più elevati con ulteriore costipamento.



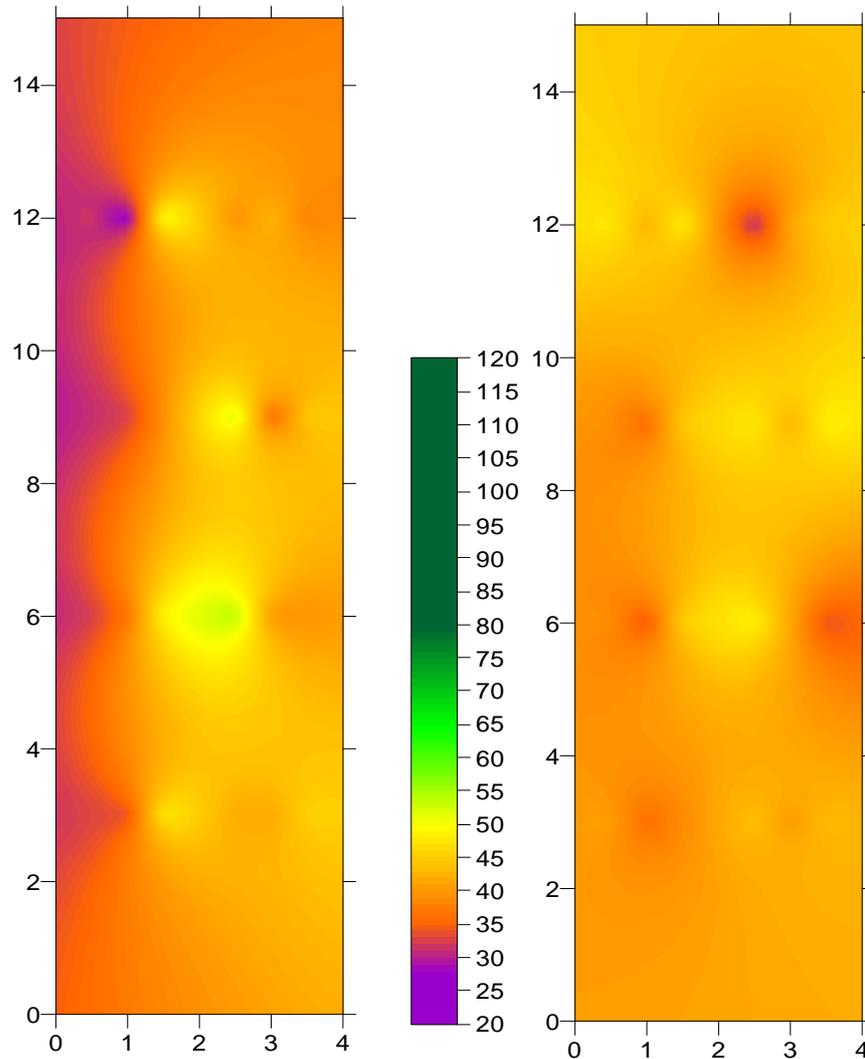
*Fig. 7.11 – mappatura Terratest del sottofondo: campo 1 (sx) e campo 2 (dx)*

Probabilmente queste mappature del sottofondo per i campi 1 e 2 presentano alcuni problemi di modellizzazione. Dal grafico sono chiaramente individuabili i punti di battuta. I range di variabilità delle misure sono alti: per il campo 1 pari a 56,6 MPa, per il secondo campo pari a 50,2 MPa. Anche lo strumento Terratest evidenzia il comportamento registrato dal rullo e da Zorn, una sensibile diminuzione dei moduli sul lato “A14”.



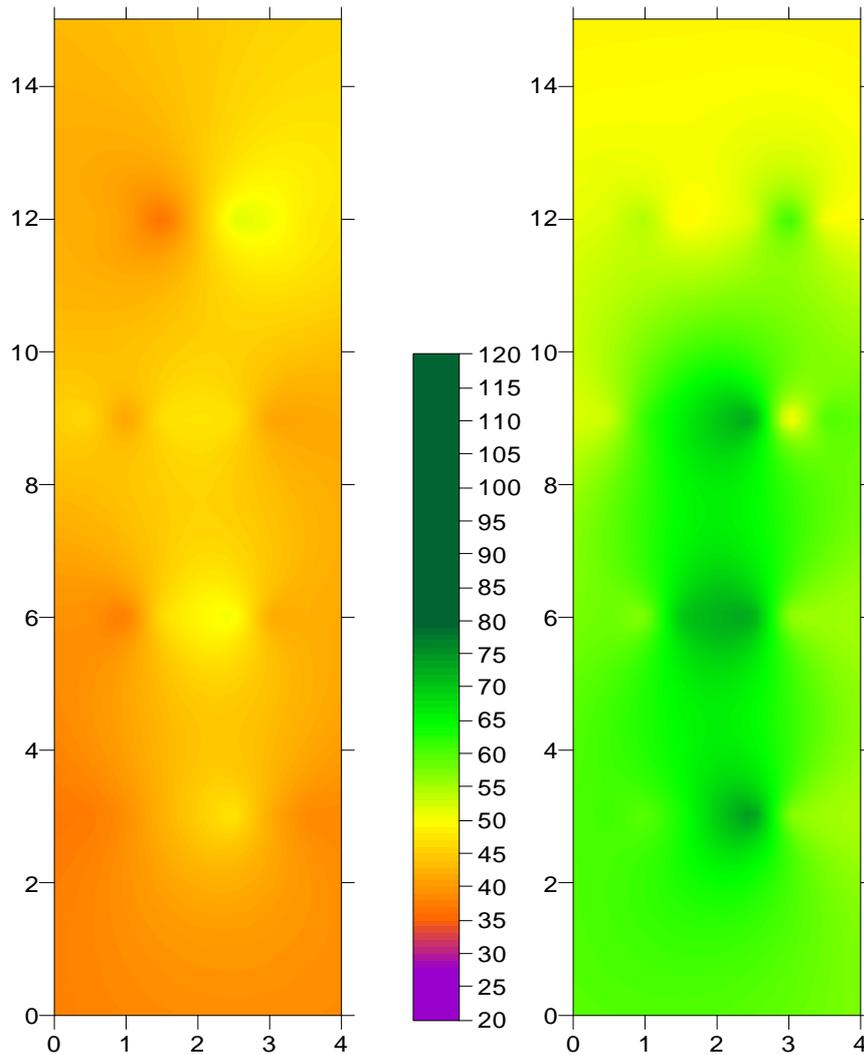
*Fig. 7.12 – mappatura Terratest del sottofondo: campo 3 (sx) e campo 4 (dx)*

Lo stesso dicasi per le modellizzazioni riferibili ai campi 3 e 4: a range di variabilità considerevoli e pari per il campo 1 a 64,8 MPa e per il campo 4 a 71,3 MPa si accompagnano valori medi sui 40 Mpa. Tutti i campi del sottofondo possiedono valori medi compresi tra 40 e 50 MPa.



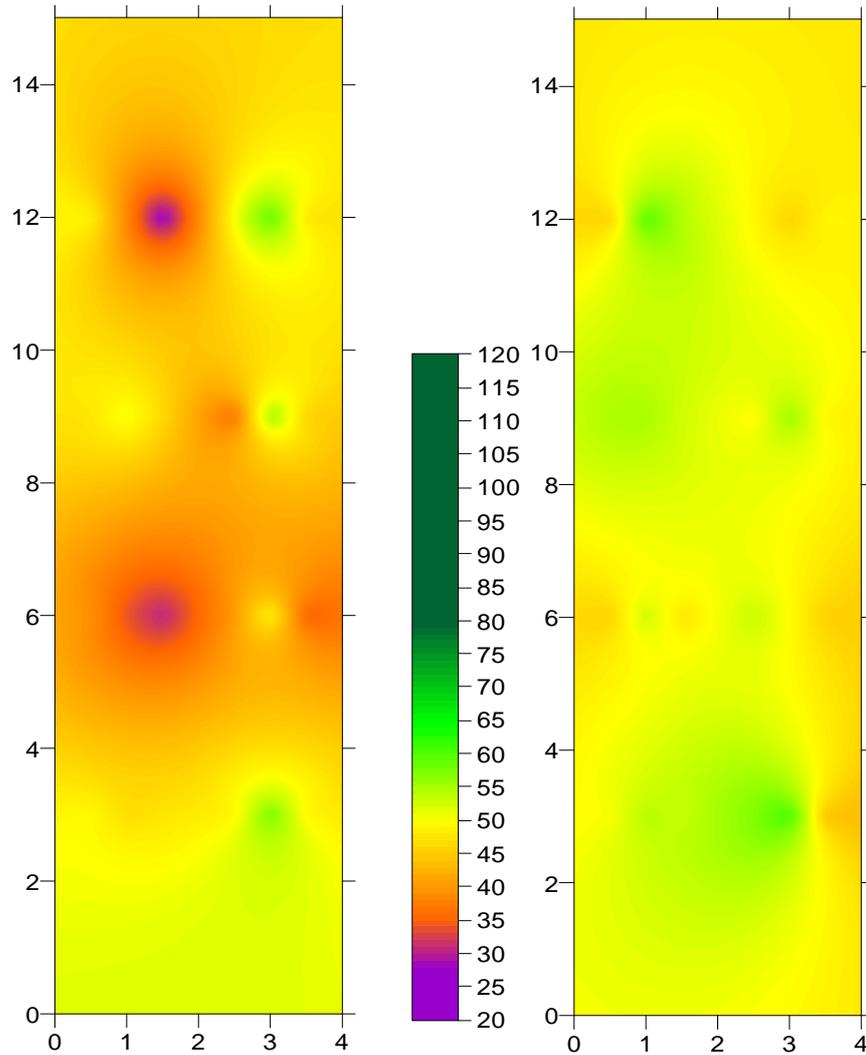
*Fig. 7.13 – mappatura Terratest del layer 1: campo 1 (sx) e campo 2 (dx)*

La strumentazione Terratest fornisce valori in linea con quella Zorn; le medie sui campi 1 e 2 per lo strato 1 sono del tutto confrontabili con le rispettive Zorn e pari a 39,6 MPa e 42,5 MPa. Il campo 2 presenta una variabilità delle misure inferiore e pari a 17 MPa. Sul lato “Imola” (quello in corrispondenza dei fossi di scolo) del campo 1 è visibile un decremento sistematico dei valori misurati.



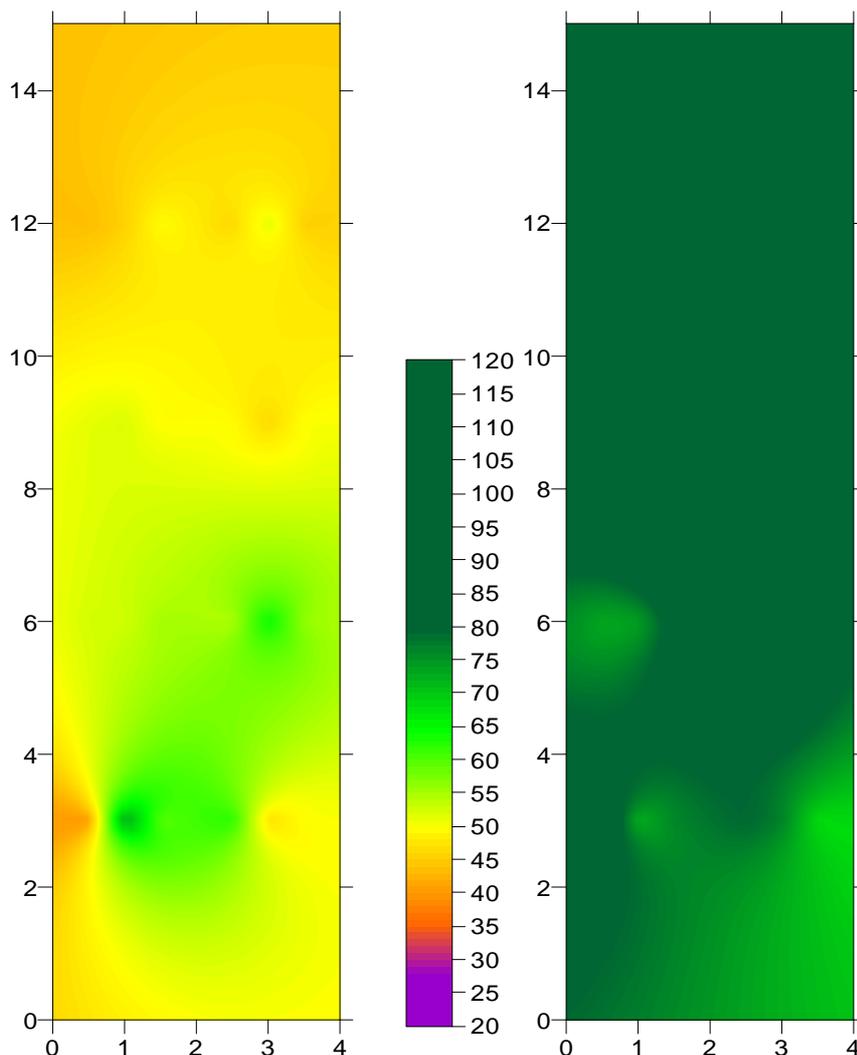
*Fig. 7.14 – mappatura Terratest del layer 1: campo 3 (sx) e campo 4 (dx)*

I campi si presentano piuttosto uniformi. I range di variabilità delle misure incontrate sono pari a 15 MPa per il campo 3 e 26,7 MPa per il campo 4. I valori medi sono lievemente maggiori rispetto a quelli trovati con la strumentazione Zorn e pari a 41,8 MPa per il campo 3 e 58, 5 MPa per l'ultimo campo. Non si evidenziano fenomeni significativi a questo livello di indagine se non l'incremento dei valori di modulo in prossimità del centro del rilevato.



*Fig. 7.15 – mappatura Terratest del layer 2: campo 1 (sx) e campo 2 (dx)*

Molto probabilmente il posizionamento non corretto della piastra altera le reali condizioni del campo 1. I valori medi misurati sono del tutto paragonabili a quelli Zorn e pari rispettivamente a 47,4 MPa per il campo 1, a 52,4 MPa per il campo 2. La variabilità delle misure è ridotta, sia sul primo che sul secondo strato.



*Fig. 7.16 – mappatura Terratest del layer 2: campo 3 (sx) e campo 4 (dx)*

Il campo 3 incrementa il valore del modulo di circa 10 MPa rispetto alla prima stesa di materiale, in disaccordo col comportamento ritrovato con la strumentazione Zorn, che non evidenziava incrementi del valore medio ma solo dei valori massimi registrati. Il campo 4 possiede invece un valore medio sensibilmente maggiore, pari a 88,8 MPa, con valori massimi di 118,8 MPa. Il materiale è costituito dal 50% di fresato e proprio quest'ultimo è il vero responsabile del comportamento. Inoltre la curva granulometrica del misto asfalto – cemento è molto ben assortita, i due materiali si miscelano ottimamente. L'incremento medio è stato notevole, circa 30 MPa ed è plausibile possa essere ulteriormente incrementato.

<i>Campo</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Data	6-07-010	6-07-010	6-07-010	6-07-010
Media (m)	55	46.4	53.1	51.3
Varianza ( $\sigma^2$ )	229.47	138.06	176.74	193.44
Scarto quadratico medio ( $\sigma$ )	15.15	11.75	13.29	13.91
Coeff. di variazione CV(x)	0.302	0.247	0.258	0.272
Massimo	78.9	79	70.6	85.9
Minimo	23.6	32.4	25.8	31
Range ( $\Delta C(x)$ )	55.3	46.6	44.8	54.9

*Tabella 1: statistiche elementari per il sottofondo, 4 campi, strumento Zorn*

<i>Campo</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Data	7-07-010	7-07-010	7-07-010	7-07-010
Media (m)	38.8	39.9	39.7	50.9
Varianza ( $\sigma^2$ )	24.04	26.02	25.37	83.24
Scarto quadratico medio ( $\sigma$ )	4.90	5.10	5.04	9.12
Coeff. di variazione CV(x)	0.125	0.128	0.127	0.170
Massimo	50.5	50.6	48.5	72.3
Minimo	32.4	30.9	32.2	40.5
Range ( $\Delta C(x)$ )	18.1	19.7	16.3	31.8

*Tabella 2: statistiche elementari per il layer 1, 4 campi, strumento Zorn*

<i>Campo</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Data	8-07-010	8-07-010	8-07-010	8-07-010
Media (m)	45.4	49.2	39.1	68.2
Varianza ( $\sigma^2$ )	68.49	26.62	80.43	206.69
Scarto quadratico medio ( $\sigma$ )	8.28	5.16	8.97	14.38
Coeff. di variazione CV(x)	0.191	0.108	0.215	0.203
Massimo	58.1	56.9	71.2	128.8
Minimo	27.2	38.8	33.4	58.8
Range ( $\Delta C(x)$ )	30.9	18.1	37.8	70

*Tabella 3: statistiche elementari per il layer 2, 4 campi, strumento Zorn*

<i>Campo</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Data	6-07-010	6-07-010	6-07-010	6-07-010
Media (m)	49.7	45.9	41.9	45.9
Varianza ( $\sigma^2$ )	312.67	167.55	307.77	215.75
Scarto quadratico medio ( $\sigma$ )	17.68	112.94	17.54	14.69
Coeff. di variazione CV(x)	0.394	0.292	0.377	0.299
Massimo	74.8	71.8	85.4	97.6
Minimo	18.2	21.1	20.6	26.3
Range ( $\Delta C(x)$ )	56.6	50.7	64.8	71.3

*Tabella 4: statistiche elementari per il sottofondo, 4 campi, strumento Terratest*

<i>Campo</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Data	7-07-010	7-07-010	7-07-010	7-07-010
Media (m)	39.6	42.5	41.8	58.5
Varianza ( $\sigma^2$ )	50.10	24.51	20.85	58.18
Scarto quadratico medio ( $\sigma$ )	7.08	4.95	4.57	7.63
Coeff. di variazione CV(x)	0.178	0.119	0.106	0.129
Massimo	53.6	48.4	51.6	75
Minimo	27.2	30.8	35.7	48.3
Range ( $\Delta C(x)$ )	26.4	17.6	15.9	26.7

*Tabella 5: statistiche elementari per il layer 1, 4 campi, strumento Terratest*

<i>Campo</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Data	8-07-010	8-07-010	8-07-010	8-07-010
Media (m)	47.4	52.4	51.2	88.8
Varianza ( $\sigma^2$ )	65.24	19.53	50.86	177.53
Scarto quadratico medio ( $\sigma$ )	8.08	4.42	7.13	13.32
Coeff. di variazione CV(x)	0.180	0.086	0.137	0.149
Massimo	58.9	60.5	73.2	118.8
Minimo	27.1	44.1	40.1	68
Range ( $\Delta C(x)$ )	31.8	16.4	33.1	50.8

*Tabella 6: statistiche elementari per il layer 2, 4 campi, strumento Terratest*

## 7.5 DETERMINAZIONI DI DENSITÀ E UMIDITÀ

Sotto vengono riportate le densità umide in situ e le umidità dei campioni prelevati durante i 3 giorni. Avere indicazione riguardo alla densità è fondamentale per capire il grado di costipamento e riferirlo poi al grado di costipamento ottimo.

<i>Campione</i>	<i>Sottofondo</i>	
	Densità umida in situ	umidità
CS1-1	2,031	13,8
CS1-2	2,076	11,4
CS2-1	1,876	15,8
CS2-2	2,202	12,8
CS3-1	1,914	16,4
CS3-2	2,175	8,5
CS4-1	2,110	14,7
CS4-2	2,138	9,5

*Tab. 7 – densità e umidità del sottofondo*

<i>Campione</i>	<i>Strato 1</i>	
	Densità umida in situ	umidità
L1C1-1	2,546	6,1
L1C1-2	2,035	5,6
L1C2-1	1,961	5,6
L1C2-2	2,136	4,8
L1C3-1	1,919	6,1
L1C3-2	1,984	5,4
L1C4-1	1,952	5,5
L1C4-2	1,992	4,4

*Tab. 8 – densità e umidità dello strato 1*

<i>Campione</i>	<i>Strato 2</i>	
	Densità umida in situ	umidità
L2C1-1	2,065	8,7
L2C1-2	1,934	7,2
L2C2-1	2,130	3,8
L2C2-2	2,157	3,8
L2C3-1	1,919	6,7
L2C3-2	1,936	5
L2C4-1	2,061	4,8
L2C4-2	2,107	5,1

*Tab. 9 – densità e umidità dello strato 2*

## CONCLUSIONI

Dai valori di modulo dinamico  $E_{vb}$  registrati durante la sperimentazione possiamo fornire un giudizio di ammissibilità dei materiali in relazione alla costruzione di:

- sottofondi;
- corpi di rilevati;
- strati di fondazione.

I requisiti richiesti per i sottofondi (ex UNI 10006, 2002) per tutte le categorie di strade è che il modulo di deformazione  $M_d$  non sia inferiore a 15 MPa (CNR B.U. 146/92). Nel caso tale modulo risultasse inferiore si dovrà procedere ad un ulteriore addensamento.

Esiste una ulteriore importante caratteristica da richiedere per un sottofondo: la garanzia di un sufficiente grado di addensamento. È per questo motivo che il sottofondo deve essere costipato ad una densità relativa non minore del 95% di quella AASHO modificata per strade ad alta intensità di traffico e ad una densità relativa non minore del 95% della densità AASHO standard per strade a limitata intensità di traffico.

Lo strato superiore di un rilevato costituisce il sottofondo di una qualsiasi sovrastruttura e delle banchine pertanto ad essi non è irragionevole siano applicate le norme che si applicano ad un sottofondo in trincea (ex UNI 10006, 2002).

Passiamo infine agli strati di fondazione. Per essi le prestazioni da garantire sono ovviamente maggiori. Possiamo assumere come modulo di deformazione statica  $M_d$  per una fondazione di una strada a media ed elevata intensità di traffico un valore di  $M_d$  pari a 80 MPa. Questo valore inoltre fa riferimento a strati posti ad una distanza non inferiore a 20 cm dal piano viabile. Un valore maggiore sarebbe richiesto se trattassimo strati di base a immediato contatto col manto stradale oppure strati a immediato contatto col traffico per strade poco trafficate. In questi due casi dovremmo soddisfare almeno 100 MPa sempre con la stessa tipologia di prova PLT.

Per uno strato di fondazione inoltre sono richieste ulteriori caratteristiche ampiamente discusse nel capitolo 5. È necessario però approfondire un aspetto rilevante riguardante il confronto tra i valori che vengono comunemente forniti dai capitolati italiani e i valori di modulo dinamico  $E_{vd}$  risultato della sperimentazione.

$M_d$ , il modulo di deformazione statica è quello fornito dalla classica prova di carico su piastra PLT.  $E_{vd}$ , il modulo fornito dal LFWD è un modulo dinamico. I due moduli forniscono

indicazione di una risposta del terreno a due domande differenti, e quindi ovviamente, sono tra loro molto diversi.

Una delle soluzioni è cercare correlazioni tra i due moduli, possibilmente per materiali più simili possibile a quelli del nostro studio. Alcune correlazioni sono state prodotte a partire da studi sperimentali. Sui capitolati purtroppo non sono fornite informazioni di questo tipo per lo strumento LFWD, almeno in Italia. In alcune direttive tedesche invece da un po' di tempo si possono trovare indicazioni circa i moduli ottenuti con piastra dinamica.

Dobbiamo fare prima una ulteriore considerazione: se è vero che un'ottima costipazione del terreno e in generale di uno strato è immediatamente valutabile da una prova di carico con piastra semplicemente facendo il rapporto tra i moduli ottenuti al primo e al secondo ciclo di carico, allora possiamo affermare che una ottima costipazione equivale ad avere un cedimento al secondo ciclo prossimo al cedimento ottenuto al primo ciclo. Il rapporto di  $M_{d1}$  e  $M_{d2}$ , diviene, stante sempre l'ipotesi di costipamento ottimo, un valore prossimo ad 1.

Sarebbe utile avere a disposizione indicazioni relative ad un materiale simile al nostro per il quale venga fornita una correlazione parametrica tra  $M_d$  ed  $E_{vd}$  oppure tra  $M_{d2}$  ed  $E_{vd}$  oppure semplicemente un valore di  $E_{vd}$  minimo per il tipo di opera che stiamo prendendo in considerazione.

A tale proposito è stata presa in considerazione la normativa tedesca “ GrenzwertwFallgeraet - Valori limite per il controllo della compattazione con apparecchiatura LFWD”. La stessa normativa nella parte introduttiva afferma che esistono incertezze sulla correlazione tra valori PLT e LFWD. In ogni caso la norma fornisce una tabella di correlazione tra  $E_{v2}$  ed  $E_{vd}$  per valori di  $E_{v2}$  fino a 120 MPa. Può sembrare ragionevole assumere quindi come valori di riferimento del modulo dinamico per uno strato di fondazione un valore correlato e corrispondente agli 80 MPa statici di cui sopra:

- **40 MPa.**

Con questo valore potremo giudicare l'idoneità del materiale.

Si procede quindi alla schematizzazione dell'opera che abbiamo costruito. Questa può essere pensata come un rilevato poggiante su un sottofondo. Se l'opera viene considerata in questo modo riusciamo a soddisfare sia le richieste sul sottofondo (cautelativamente può essere assunto per un sottofondo un valore di 15 MPa). Su un rilevato il requisito di portanza può essere assunto, in apparente contrasto con quanto affermato sopra, ma ponendosi sempre in un'ottica cautelativa, pari a 25 MPa (50 MPa statici). Tutti i materiali quindi, con valori superiori a 25 MPa, possono concorrere alla costituzione del corpo di rilevati.

Infine passiamo alle fondazioni. La schematizzazione del sito sperimentale quindi, ipotizzando di considerare l'ultimo strato come strato di fondazione, è la seguente:

- sottofondo;
- rilevato (40 cm);
- fondazione (40 cm).

A questo punto i valori limite risultano:

- 15 MPa sul sottofondo;
- 25 MPa sul primo strato;
- 40 MPa sul secondo e ultimo strato.

Le strumentazioni Zorn e Terratest hanno fornito valori medi relativi al sottofondo per entrambe le strumentazioni e per tutti i campi superiori a 40 MPa. Il primo requisito risulta ampiamente soddisfatto. Sul primo strato i valori medi si attestano su valori prossimi a 40 MPa, ad eccezione del campo 4 che presenta valori del modulo superiori a 50 MPa. Anche il secondo requisito è soddisfatto. Con la stesa del secondo strato il campo 1 presenta un valore del modulo pari a 45 per la strumentazione Zorn e a 47 per quella Terratest. Il campo 2 si attesta sui 50 MPa per entrambe le strumentazioni, per il campo 3 il LFWD Zorn fornisce un valore attorno a 40 MPa e il LFWD Terratest intorno a 50 MPa. Per il campo 4 Zorn fornisce un valore di 68 MPa mentre il LFWD Terratest fornisce 88 Mpa.

Possiamo quindi dedurre che tutti i materiali proposti, nella configurazione determinata in questo modo, sono idonei alla costituzione delle opere suddette.



---

## BIBLIOGRAFIA

- A. Bonoli, Appunti del corso di **Ingegneria delle Materie Prime**.
- A. Bonoli, Appunti del corso di **Valorizzazione delle risorse I e II**.
- A. Simone, Appunti del corso di **Sovrastrutture stradali, ferroviarie, aeroportuali**.
- C. Sangiorgi, **La misura della portanza con il Light Falling Weight Deflectometer (LFWD)**, in *Strade & Autostrade*, n° 2/2006, pagg. 33-38.
- C. Sangiorgi, **Studio di correlazioni tra prove di carico su piastra stitiche e dinamiche in Strade & Autostrade**, n° 3/2006, pagg. 2-8.
- C. Sangiorgi, C. Lantieri, **Prove ad alto rendimento DISTART Università di Bologna LFWD Zorn ZFG 2000**.
- A. Marradi, **Verifiche prestazionali su materiali riciclati a freddo**, *Cold recycling* 2007.
- Metodi avanzati ad alto rendimento per la determinazione delle caratteristiche del pacchetto stradale: il “ Falling Weight Deflectometer”**.
- G. Urbinati, Tesi di Laurea V.O.: **Sistemi per la compattazione continua intelligente: studio su rilevato sperimentale con terre a2-5 e materiali c&d**.
- R. Mazza, Tesi di laurea triennale: **Valutazione prestazionale in sito delle stabilizzazioni dei terreni per mezzo dei leganti idraulici**.
- D. Grandesso, **Rifiuti inerti - Considerazioni e problematiche nel controllo**.
- G. Bressi, **Indicazioni per l'operatività nel settore edile, stradale e ambientale, ai sensi del decreto ministeriale 8 maggio 2003, n. 203**, *ECOMONDO*, Rimini, 2006.
- Studio Legale Associato CNTTV, **Gestione, recupero riciclaggio dei rifiuti inerti da costruzione e demolizione alla luce della normativa di settore**.
- Direttiva 75/442/CEE.
- D.lgs 5 febbraio 1997 n. 22 (Decreto Ronchi).
- D.M. 8 Maggio 2003 N. 203.
- 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.
- Direttiva 89/106/CEE.
- Direttiva 2008/98/ce del 19 novembre 2008.
- Direttiva 96/61/ce.

UNI 10006, 2002

GRENZWERTEFALLGERAET

EN 13383-1:2002 “Aggregati per opere di protezione (armourstone) – Parte1: specifiche”, recepita come UNI EN 13383-1:2003.

EN 13242:2002 “Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l’impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione delle strade”, recepita come UNI EN 13242:2004.

UNI 1097-2

UNI EN1097-2

UNI EN 1097-6

UNI EN 933-8

UNI EN 933-3

UNI EN 933-4

UNI EN 933-1

UNI EN 933-5

AUTOSTRADE PER L’ITALIA: Manutenzione e costruzione delle pavimentazioni – norme tecniche d’appalto prestazionali.

AUTOSTRADA DEL BRENNERO: Capitolato speciale d’appalto - prescrizioni tecniche;

ANAS: Capitolato speciale d’appalto sezione 15 – pavimentazioni.

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - Capitolato Speciale d’Appalto Tipo per Lavori Stradali.

AUTOVIE VENETE s.p.a.: Capitolato speciale d’appalto – norme tecniche.

S.P. n. 144 DI COIMO: Capitolato speciale d’appalto per lavori di allargamento e sistemazione incrocio con la S.S. 337.

[www.carinerti.com](http://www.carinerti.com)

<http://www.borsarifiuti.com>

<http://www.edilportale.com>

[http://www.provincia.verbania.it/allegati/Ing.\\_Blengini\\_-\\_Gestione\\_dei\\_rifiuti\\_da\\_C&D\\_-\\_VB\\_2009.pdf](http://www.provincia.verbania.it/allegati/Ing._Blengini_-_Gestione_dei_rifiuti_da_C&D_-_VB_2009.pdf)

<http://www.ecoblog.it>

<http://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/06152dl.htm>

<http://www.ambientediritto.it/Legislazione/Rifiuti/2002/Decreto%20Ronchi%201997%20n.%2022.htm>

[http://www.laberg.it/prove\\_laboratorio.htm](http://www.laberg.it/prove_laboratorio.htm)

<http://www.bio-architettura.org/articoli/145-bitumi.html>

<http://www.edilportale.com/Dossier/dos101003-1.asp>

<http://www.ambiente.it>

[http://www.actas.itrisorsedocumenticentroambiente\\_inertirecupero.pdf.pdf](http://www.actas.itrisorsedocumenticentroambiente_inertirecupero.pdf.pdf)



## RINGRAZIAMENTI

*Desidero ringraziare tutte le persone che hanno avuto un ruolo, piccolo o grande, in questo lavoro, sperando di non dimenticarne nessuna. Comincio dai pilastri che mi hanno sostenuto e hanno creduto in me: la Prof.ssa Alessandra Bonoli e il Direttore C.A.R. Giorgio Laghi. Grazie per la fiducia, per la correttezza, per il tempo che mi avete dedicato. Grazie a chi ha contribuito ad indirizzarmi verso la strada giusta, il Prof. P. Berry, il Prof. S. Fabbri e Fausto P.. Grazie per l'estrema disponibilità al Prof. A. Simone, grazie e a presto a Claudio L., a Cesare S., a Francesco P.. Non posso dimenticare la squadra compatta di abili stradini, grazie a tutti i ragazzi che hanno lavorato al campo di Imola. Grazie anche all'Università di Pisa, al Prof. Marradi, a Giacomo B. e Tony M.. Grazie a Bomag.*

*Grazie allo staff C.A.R.: Davide, Sabrina, Andrea, Giovanni, siete un bel gruppo, è stato un piacere lavorare con voi. Grazie a Maurizio Visani.*

*Fondamentale è stato l'aiuto di due amiche: Martina P. e Giulia B., non dimentico ciò che avete fatto per me. Grazie a Sandra e Maurizio.*

*Grazie ai miei amici, compagni di progetti, compagni di viaggio: Alma, Diego, Franci, Laura, Dalila, Antonio, Silvia B., Valentina C., Simone D., Silvia L. e a tutti i miei amici di Imola, di Bologna, di Rimini. Spero di potervi dedicare un po' di tempo in più. Grazie Luca.. sappimi dire per la LUPASOL..! Grazie Anfo.*

*Grazie Moro. Grazie Mate.*

*Grazie Giulia.*