

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA CIVILE

DIPARTIMENTO DICAM

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali

COSTRUZIONE DI STRADE FERROVIE ED AEREOPORTI LS

***STUDIO SPERIMENTALE DELLA COMPATTAZIONE IN SITO
DI MATERIALI C&D PER MEZZO DI SISTEMI CCC***

Tesi di:
Albicini Marco

Relatore:
Chiar.mo Prof. Ing. Giulio Dondi

Correlatore:
Dott. Ing. Cesare Sangiorgi
Dott. Ing. Claudio Lantieri

Session II

Parole Chiave:

C&D

Compattazione IC

Modulo E_{vib}

Rulli Variocontrol

INDICE

INTRODUZIONE

CAPITOLO 1

MATERIALI C&D

1.1	Premessa	3
1.2	Gli impianti di trasformazione	4
1.2.1	Tipi di demolizione	7
1.2.2	Ciclo tecnologico	8
1.3	Scenari a livello europeo	9
1.4	Produzione di rifiuti inerti in Italia, studio condotto da Anpar	11
1.4.1	Aspetti quantitativi	18
1.5	Il quadro normativo	19
1.5.1	Definizioni	19
1.5.2	Direttiva 75/422/CEE	20
1.5.3	Decreto Ronchi	21
1.5.4	D.M. 8 Maggio 2003 N. 203	23
1.5.5	Circolare 15 Luglio 2005, N 5205	26
1.5.6	La marcatura CE	28
1.5.7	Direttiva 2008/98/CE del 19 Novembre 2008	30
1.6	Sintesi e considerazioni	32

CAPITOLO 2

DAL CONTROLLO CONTINUO DELLA COMPATTAZIONE ALLA COMPATTAZIONE INTELLIGENTE

2.1	Teoria sul costipamento delle terre	36
2.1.2	Metodi di compattazione	40
2.2	La compattazione convenzionale con rulli statici o vibranti	41
2.3	Basi della compattazione IC	45
2.3.1	Sistema di vibrazione	46
2.3.2	Forza centrifuga, ampiezza, frequenza nel rullo vibrante	47
2.3.3	Compattazione IC con rullo Bomag Variocontrol	49
2.3.4	Vantaggi compattazione intelligente	53
2.3.5	La compattazione IC sulle terre	54
2.3.6	Cenni storici sulla compattazione IC	55

2.4	Valori forniti dai compattatori Bomag	57
2.4.1	Valore Omega	57
2.4.2	Rigidezza del terreno ed energia trasferita al suolo	58
2.4.3	Evib Modulo di elasticità dinamica- Bomag	62
2.5	Passaggio da rigidezza a modulo Evib	67
2.6	Influenze sui valori Evib. Misurati con la compattazione	68
2.6.1	Suolo	69
2.6.2	Rullo	70
2.6.3	Posizione e geometria del rullo	71
2.7	Procedure rullatura CCC	72
2.8	Rappresentazione del modulo Evib sui rulli Bomag Variocontrol	73

CAPITOLO 3

UTILIZZO DEI MATERIALI C&D NELLE SOVRASTRUTTURE STRADALI E MATERIALI DEL CAMPO PROVE

3.1	Premessa	74
3.2	Capitolato d'appalto di riferimento per la scelta dei materiali C&D del campo prove	75
3.3	Risultati delle prove di laboratorio sui materiali C&D prodotti da C.A.R.	77
3.3.1	Confronto con il fuso di riferimento	87
3.4	Conclusioni	88

CAPITOLO 4

IL CAMPO SPERIMENTALE

4.1	Premessa	90
4.2	Localizzazione dell'area di cantiere	91
4.3	Caratteristiche progettuali del sito sperimentale	94
4.4	Strumentazione utilizzata	97
4.5	Fasi costruttive	102
4.5.1	Delimitazione dell'area di cantiere	103
4.5.2	Tracciamento del campo sperimentale	104
4.5.3	Scavo dei fossi e sbancamento	105
4.5.4	Riunione preliminare del personale	107
4.5.5	Taratura della strumentazione LWD	108

4.5.6	Rullatura	108
4.5.7	Posa dello strato 1 e livellamento dei 4 campi	109
4.5.8	Rullatura successiva a posa primo strato	110
4.5.9	Posa dello strato 2 e livellamento dei 4 campi	111
4.6	Schema di rilievo delle prove-fasi di testing e operatori	113
4.6.1	Indagine del 06 Luglio 2010 LWD, DCP	114
4.6.2	Indagine del 07 Luglio 2010 LWD, DCP	117
4.6.3	Indagine del 08 Luglio 2010 LWD	119

CAPITOLO 5

RISULTATI OTTENUTI CON LA COMPATTAZIONE CCC

5.1	Premessa	121
5.2	Caratteristiche geometriche e tecniche del campo sottoposto a compattazione	122
5.3	Compattazione CCC del campo sperimentale	124
5.4	Modalità di compattazione	125
5.4.1	Compattazione CCC del sottofondo	127
5.4.2	Compattazione dello strato 1 (Layer 1)	128
5.4.3	Compattazione dello strato 2 (Layer 2)	129
5.5	Risultati della compattazione CCC	130
5.5.1	Differenze tra i materiali tramite lettura dei dati E_{VIB}	133
5.5.2	Analisi sull'evoluzione ed efficacia della compattazione scelta	139
5.6	Differenze tra passaggi Manual 3 e Manual 1 in termini di E_{VIB}	153
5.7	Anomalie lungo il tracciato	158

CONCLUSIONI 162

BIBLIOGRAFIA 164

Capitolo 1

MATERIALI C&D

1.1 PREMESSA

La materia che si affronta in questa trattazione 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.

Nella costruzione di opere di Genio Civile come strade, ferrovie, piazzali portuali e interportuali, nelle quali sono generalmente più elevate le quantità di materiali inerti da impiegare per nuove realizzazioni o da smaltire, è sicuramente vantaggioso prevedere il riciclaggio e il riuso delle materie di risulta da attività di demolizione e costruzione, quali:

- quelle generate da attività di costruzione e demolizione di opere edilizie o stradali e quelle prodotte da escavazioni. La loro componente più significativa è costituita da frazioni inerti di macerie, terre e rocce di scavo.

Il riuso dei materiali inerti riciclati come materie prime e seconde è suggerito da diverse esigenze connesse a tematiche ambientali e economiche tra le quali:

- la presenza sempre più estesa di aree interessate da notevoli quantità di scarti provenienti dall'edilizia e da settori ad essa collegati con conseguente incremento della richiesta di aree da destinare a discariche.
- l'asportazione di materiali inerti naturali che comporta impatti negativi specialmente quando le aree interessate sono ambientalmente pregiate.
- l'impiego dei sempre più onerosi aggregati naturali con conseguente incremento dei costi di costruzione.

Da tempo sono state sperimentate, sia in laboratorio sia in sito, le buone qualità dei materiali inerti recuperati, e le tecniche di trattamento e di riciclaggio di tale tipologia di materiali.

1.2 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. Le principali differenze intercorrenti tra impianti fissi e impianti mobili constano nel fatto che 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. 1.1 – 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 1* i principali vantaggi/svantaggi che distinguono impianti fissi e mobili.

Tabella 1.1: Svantaggi e vantaggi dei vari tipi di impianti

<i>Tipo di impianto</i>	<i>Vantaggi</i>	<i>Svantaggi</i>
-------------------------	-----------------	------------------

MOBILE	<ul style="list-style-type: none"> -basso investimento -capacità di muoversi là dove si trova il materiale -minori spese di trasporto del materiale -impianti modulari 	<ul style="list-style-type: none"> -minore selettività -minore produttività -minore controllo su polveri e rumore -impatto ambientale del trasporto su gomma
FISSO	<ul style="list-style-type: none"> -ottime prestazioni -abbattimento polveri e rumore -buona separazione del materiale indesiderato -creazione di un bacino di utenza 	<ul style="list-style-type: none"> -alto investimento -maggiore sensibilità alle discontinuità del flusso di macerie all'ingresso



Figura 1.2: Impianto mobile per il riciclaggio dei rifiuti da C&D.



Figura 1.3: Impianto fisso per il riciclaggio dei rifiuti da C&D.

Andiamo ora ad analizzare nel dettaglio i vari tipi di tecniche di demolizione per il riciclaggio dei rifiuti da costruzione e demolizione

1.2.1 TIPO DI DEMOLIZIONE

- *Demolizione selettiva*

La separazione all'origine richiede l'ausilio di tecniche di decostruzione che sono indicate con il termine generale di demolizione selettiva: si tratta di un processo di disassemblaggio che, in genere, avviene in fase inversa alle operazioni di costruzione. Lo scopo della decostruzione è quello di aumentare il livello di riciclabilità degli scarti generati sul cantiere di demolizione secondo un approccio che privilegia l'aspetto della qualità del materiale ottenibile dal riciclaggio. Alla demolizione tradizionale con il conferimento delle macerie in discarica si sostituisce la demolizione selettiva che consente un recupero in percentuali elevate dei materiali attraverso tecniche in grado di separare le diverse frazioni omogenee per poterle, successivamente, inviare a idonei trattamenti di valorizzazione.

- *Demolizione controllata*

In alternativa alla separazione all'origine si può ricorrere al trattamento del rifiuto, raccolto alla rinfusa, in impianti appositamente realizzati. L'impiantistica in oggetto è stata caratterizzata, negli ultimi anni, da un notevole sviluppo tecnologico, portando a realizzazioni tali da rendere possibili l'adduzione di rifiuti indifferenziati ottenendo in uscita almeno tre categorie merceologiche differenti:

- *Inerti lapidei* di caratteristiche granulometriche predefinite, mediante sistemi di frantumazione, deferrizzazione e vagliatura.
- *Materiale metallico* separato dalle macerie mediante l'utilizzo di adeguati separatori magnetici
- *Frazione leggera* costituita in prevalenza da materiale ad elevato potere calorifico (carta, legno, plastica) ottenuta mediante varie tipologie di sistemi (si passa, infatti, dalla separazione manuale, a sistemi di aspirazione e ventilazione, per arrivare ad ingegnosi sistemi di separazione per flottazione).

1.2.2 IL CICLO TECNOLOGICO

Esaminate le principali differenze tra le diverse tecnologie di riciclaggio, è bene ricordare che il trattamento a secco per il recupero dei rifiuti inerti è generalmente sempre articolato nelle fasi riportate in figura.

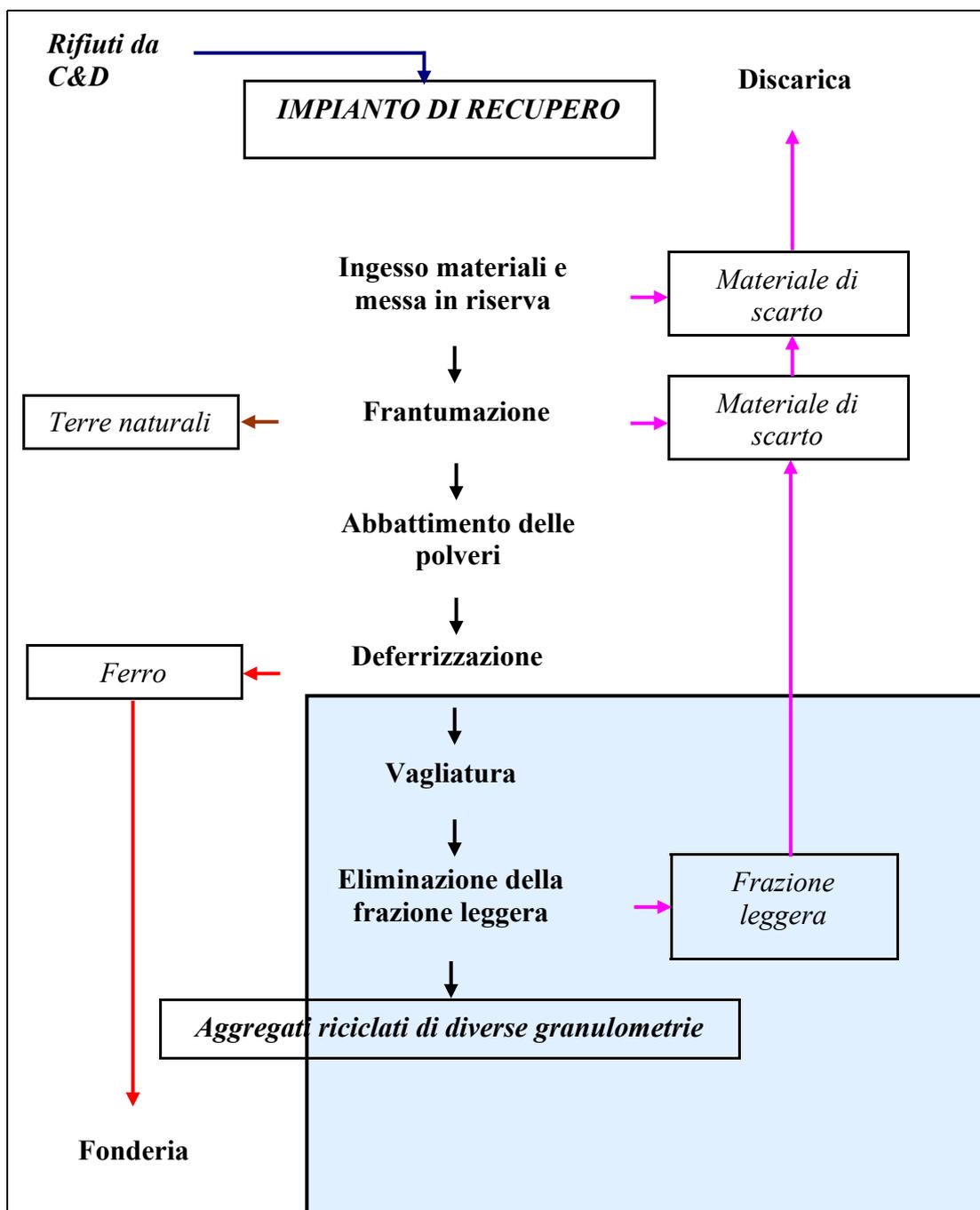


Figura 1.4: Il ciclo tecnologico



1.5.: L'impianto di frantumazione e Impianto di vagliatura .

1.3 SCENARIO A LIVELLO EUROPEO

Per fare fronte all'incremento della produzioni di CDW la Comunità Europea ha emanato direttive tese al raggiungimento di obiettivi di recupero molto ambiziosi. L'Italia purtroppo è ancora collocata in posizione arretrata sotto il profilo del riciclo.

Come si vede nel grafico sotto elencato

Paese	Produzione pro-capite kg/ab anno
Germania 1	719
Regno Unito 6	509
Francia 8	404
Italia 9	354
Spagna 10	326
Olanda 2	716
Belgio 4	662
Austria 5	580
Grecia 14	171
Portogallo 11	323
Danimarca 7	498
Svezia 13	192
Finlandia 12	265
Irlanda 15	154
Lussemburgo 3	700
Totale UE	480

Fig. 1.7 – produzione pro-capite paesi UE

a fronte di una percentuale di recupero molto alta di alcuni paesi l'Italia è invece in una posizione piuttosto arretrata con soli 354 kg/ab, meno della meta' della Germania. Infatti l'Italia si ritrova in nona posizione dietro alle nazioni del Nord europa che hanno puntato decisamente su strategie di recupero [1].

Paese	Riutilizzo /riciclaggio		Smaltimento in discarica	
	10 ³ t/a	%	10 ³ t/a	%
Germania	10,03	17	48,97	83
Regno Unito	13,50	45	16,50	55
Francia	3,54	15	20,06	85
Italia	1,81	8,9	18,59	91,1
Spagna	1,13	8,8	11,67	91,2
Olanda	10,16	91	1	9
Belgio	6,18	91,5	0,57	8,5
Austria	1,93	41	2,77	59
Grecia	0,07	4	1,73	96
Portogallo	0,13	4	3,07	96
Danimarca	2,22	84	0,42	16
Svezia	0,64	38	1,05	62
Finlandia	0,93	69	0,42	31
Irlanda	0,02	4	0,55	96
Lussemburgo	0,05	17	0,23	83
Totale UE	52,34	29,1	127,61	70,9

Fig 1.8 Produzione,recupero,riciclaggio e smaltimento in discarica dei rifiuti da demolizione e costruzione in Europa

Secondo gli studi condotti dal CRESME (1998) si considera una produzione media in Italia di 354 kg di detriti per abitante per anno; a causa della segmentazione territoriale del mercato della demolizione si vede una differenziazione da una regione all'altra della produzione pro capite di inerti. Si consideri che il 40-50% del quantitativo totale di materiale inerte richiesto nel campo dell'ingegneria civile viene attualmente impiegato come materiale di riempimento durante la preparazione e l'esercizio delle discariche, in opere di ripristino ambientale, per sottofondi stradali, riempimenti cioè in usi "meno nobili" che richiedono materiali di qualità inferiore, solo ridotti in granulometria .

Ancora più significativo è il dato riguardante lo smaltimento in discarica dei rifiuti in Italia, dove ci troviamo ai primissimi posti in Europa per quanto riguarda le percentuali di rifiuti stoccati con il 91,1%.

Dati troppo elevati, basti pensare che nazioni come Olanda, Danimarca, Belgio sono ben al di sotto del 20% ed hanno fatto del Riutilizzo/Riciclaggio una scelta di vita.

1.4 LA PRODUZIONE DI RIFIUTI INERTI IN ITALIA, SECONDO LO STUDIO CONDOTTO DA ANPAR (ASSOCIAZIONE NAZIONALE PRODUTTORI AGGREGATI RICICLATI)

In Italia, così come in Europa, la produzione di rifiuti è andata progressivamente aumentando, quale sintomo del progresso economico e dell'aumento dei consumi.

La diversificazione dei processi produttivi ha inoltre generato la moltiplicazione della tipologia dei rifiuti con effetti sempre più negativi per l'ambiente. Le considerevoli quantità di rifiuti prodotti, che tendono sempre più ad incrementarsi, unite alle difficoltà di smaltimento e alla crescita dei costi relativi, hanno determinato un sempre maggior interesse verso il riciclaggio, la possibilità cioè di recuperare alcune frazioni dei rifiuti, reinserendoli nei cicli produttivi sotto forma di materie prime e seconde.

Oggi tuttavia l'Italia, per quanto attiene le percentuali di recupero, si colloca in una posizione piuttosto arretrata rispetto agli altri Paesi europei, in particolare nel settore dei rifiuti da costruzione e demolizione e dei rifiuti inerti in genere.

Il settore delle costruzioni, ancora oggi, fa purtroppo un utilizzo indiscriminato delle risorse naturali. Ciò ha comportato un prelievo di risorse superiore alla capacità di rinnovamento ed una produzione di rifiuti maggiore della capacità di assorbimento degli stessi da parte dell'ambiente. Da una parte si pensava di poter disporre di una riserva illimitata di materie prime, dall'altra che la natura e la quantità dei rifiuti derivanti dalle attività di costruzione e demolizione non rappresentassero un effettivo problema di smaltimento. Oggi, alla luce delle esperienze condotte, si può affermare che tale comportamento non sia più sostenibile.

Infatti da una parte la necessaria domanda di aggregati ha generato forti impatti sul territorio a causa di una attività estrattiva che, con molta difficoltà, riesce ad essere pianificata e regolamentata, dall'altra il notevole quantitativo di rifiuti proveniente dal settore edile ha generato una domanda di impianti di smaltimento difficile da soddisfare e che, tra l'altro, ha comportato il frequente abbandono in discariche abusive, distribuite nelle aree periferiche dei centri urbani.

Nel presente studio di settore che andremo a presentare, ANPAR, ha elaborato i dati forniti direttamente dai gestori di impianti di riciclaggio che hanno aderito all'iniziativa sulla base della dichiarazione M.U.D. del 2005. Il campione su cui è stata effettuata l'indagine è composto da 54 impianti [2].

A tali gestori è stato richiesto di compilare un questionario con i quantitativi di rifiuti conferiti nell'anno 2005 relativi ai seguenti codici CER:

- **Cemento CER 17 01 01**
- **Mattoni CER 17 01 02**
- **Mattonelle e ceramica CER 17 01 03**
 - *Miscugli o scorie di cemento, mattoni, mattonelle e ceramiche, diverse da quelle di cui alle voce 170106 CER 17 01 07*
 - *Miscele bituminose contenenti catrame di carbone CER 17 03 01*
 - *Miscele bituminose diverse da quelle di cui alla voce 170301 CER 17 03 02*
- **Ferro e acciaio CER 17 04 05**
- *Terra e rocce, diverse da quelle di cui alla voce 170503 CER 17 05 04*
- *Fanghi di dragaggio, diversa da quella di cui alla voce 170505 CER 17 05 06*
- *Fanghi di dragaggio, diversa da quella di cui alla voce 170505 CER 17 05 06*
 - *Pietrisco per massicciate ferroviarie, diverso da quelle di cui alla voce 170507 CER 17 08 02*
- *Rifiuti misti dell'attività di costruzione e demolizione, diversi da quelli di cui alle voci 170901, 170902 e 170903 CER 17 09 04*

Come emerge dalla Fig 1.10 gli impianti sono dislocati principalmente al Nord Italia e, in numero inferiore, al Centro e al Sud Italia. La difficoltà di effettuare un censimento completo degli impianti di riciclaggio attivi in Italia e la conseguente mancanza di dati in merito, non consente di determinare con certezza la rappresentatività del campione analizzato, tuttavia i dati raccolti sono assolutamente attendibili sulle quantità di rifiuti da C&D riciclati e sulla loro composizione.

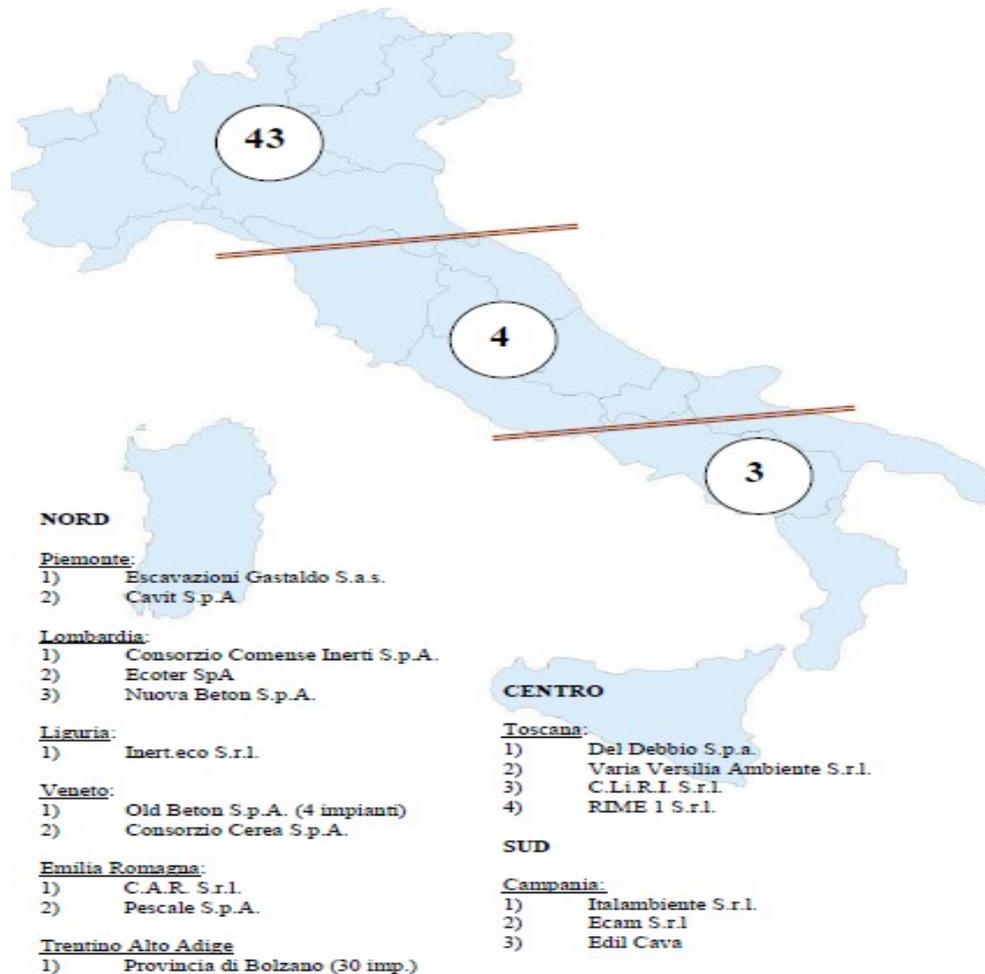


Figura 1.10: Dislocazione degli impianti che hanno partecipato alla ricerca

Una volta contraddistinti con l'appropriato codice CER, è importante osservare che i rifiuti da C&D costituiscono la stragrande maggioranza dei cosiddetti rifiuti inerti; quest'ultimi sono, in generale, rifiuti speciali non pericolosi .

Nella classe dei rifiuti non pericolosi sono inseriti rifiuti, speciali od urbani, che per le loro caratteristiche organolettiche o chimiche non compromettono l'ambiente una volta immessi nel ciclo di smaltimento, mentre, per definizione i rifiuti pericolosi sono individuati come quei rifiuti

speciali od urbani non domestici che contengono, o che sono composti, da materiale tossico, velenoso o comunque nocivo per la vita.

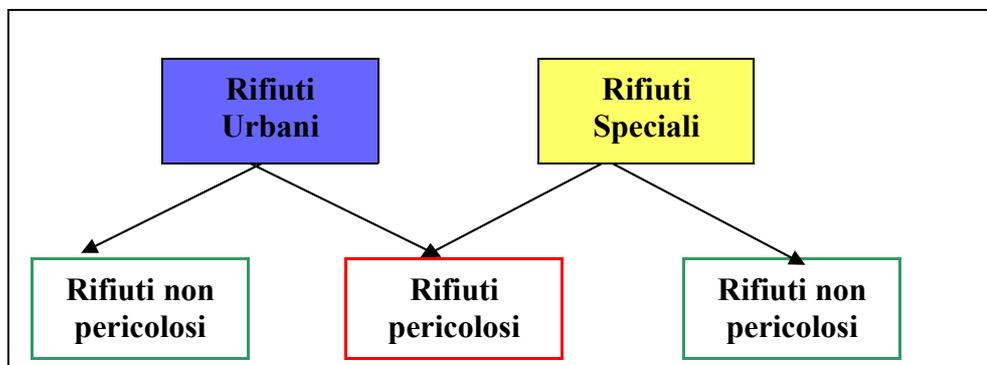


Figura 1.11: Rifiuti urbani e speciali

I rifiuti speciali non pericolosi sono provenienti da attività diverse che, come definito dall'articolo 2 della direttiva 1999/31/CE, soddisfano nel breve e lungo termine tutti i seguenti criteri:

- i rifiuti non subiscono alcuna disintegrazione o dissoluzione o altri cambiamenti significativi che potrebbero comportare eventuali effetti negativi per l'ambiente o danni alla salute umana.
- i rifiuti possiedono un tenore massimo di zolfo sotto forma di solfuro pari a 0,1% oppure hanno un tenore massimo di zolfo sotto forma di solfuro pari all'1% se il rapporto potenziale di neutralizzazione, definito come il rapporto tra il potenziale di neutralizzazione e il potenziale acido determinato sulla base di una prova statica conforme alla norma EN 15875, è maggiore di 3.
- i rifiuti non presentano rischi di autocombustione e non sono infiammabili.
- Il tenore nei rifiuti e segnatamente nelle polveri sottili isolate dei rifiuti, di sostanze potenzialmente nocive per l'ambiente o per la salute, in particolare Arsenico (As), Cadmio (Cd), è sufficientemente basso da non comportare, nel breve e nel lungo termine, rischi significativi per le persone o per l'ambiente. Per essere considerato sufficientemente basso da non comportare rischi significativi per le persone e per l'ambiente, il tenore di tali sostanze non deve superare i valori limite nazionali stabiliti per i siti classificati come non contaminati né i livelli di fondo naturali nazionali; la figura 1.12 definisce i valori limite di tali sostanze e il possibile utilizzo nell'ambito delle costruzioni.

Componente	mg/l	SOSTANZA PERICOLOSA	UTILIZZO NELL'AMBITO DELLE COSTRUZIONI
As	0,06		
Ba	4	Asbesto	Isolamento tubazioni, equipaggiamenti ventilazione, componenti soffitto, componenti copertura tetto
Cd	0,02		
Cr	0,1	Cadmio	PVC, plastica, vernici
Cu	0,6		
Hg	0,002	Cromo	Vernici
Mo	0,2	Zinco	Grondaie
Ni	0,12	Piombo	Tubazioni, fili elettrici, vernici
Pb	0,15	PVC -Plastica	Tubazioni, installazioni elettriche, rivestimento pareti e pavimenti, porte, finestre, ecc.
Sb	0,1		
Se	0,04		
Zn	1,2	Asfalto	Copertura tetti, superfici stradali, isolamento
Cloruro	460	Legno Impregnato	Legno da costruzione esterno
Fluoruro	2,5	PCB	Liquido isolante
Solfato	1500	Mercurio	Installazioni termiche
Indice fenolo	0,3		
COD	160		

Figura 1.12: Possibili sostanze pericolose nei rifiuti inerti e valori limite di concentrazione

La composizione dei rifiuti inerti risulta molto variabile, sia per la diversa origine dei rifiuti, sia in funzione di fattori quali le tipologie e le tecniche costruttive locali, il clima, l'attività economica e lo sviluppo tecnologico della zona, nonché le materie prime e i materiali da costruzione localmente disponibili.

Dall'analisi dei dati forniti dagli impianti di riciclaggio coinvolti nella ricerca emerge che la maggior parte degli impianti riceve quasi esclusivamente rifiuti appartenenti alla famiglia dei codici CER 17 xx xx , cioè rifiuti provenienti da operazioni di costruzione e demolizione compreso il terreno proveniente da siti contaminati.

Emerge che il rapporto tra il conferito appartenente alla categoria CER 17.xx.xx e il conferito totale risulta inferiore a 0,80 solo per tre impianti. Le ragioni di tale differenza sono da ricercarsi nelle particolari risorse ed attività economiche dei rispettivi bacini d'utenza (per esempio l'impianto Pescale Spa sorge in una zona caratterizzata dalla presenza di numerose industrie di piastrelle e ceramiche che conferiscono presso l'impianto gli scarti di lavorazione e di produzione; mentre il Consorzio Cerea ha centrato la propria attività sul trattamento e recupero di rifiuti industriali). Per quanto concerne invece la composizione media dei rifiuti trattati negli impianti oggetto della presente indagine, si evince che, sebbene in proporzioni diverse, i rifiuti inerti sono essenzialmente composti dalle seguenti tipologie di rifiuti:

- CER 17 09 04 Rifiuti misti dell'attività di costruzione e demolizione, diversi da quelli di cui alle voci 17 09 01, 17 09 02 e 17 09 03;
- CER 17 01 07 Miscugli o scorie di cemento, mattoni, mattonelle e ceramiche, diverse da quelle di cui alla voce 17 01 06;
- CER 17 05 04 Terra e rocce, diverse da quelle di cui alla voce 17 05 03

Considerato che la domanda di aggregati per usi strutturali rappresenta al massimo il 60% della domanda totale, esiste un ingente quantitativo di inerti a cui sono richieste prestazioni che possono essere comodamente raggiunte anche dai materiali riciclati. Il lavoro che sta alla base del seguente lavoro di tesi è teso appunto a dimostrare come possano essere usati inerti-materiali provenienti da centri di recupero per lavori stradali, senza alcuno svantaggio prestazionale.

I materiali C&D costituiscono pertanto un'ottima alternativa che offre anche importanti vantaggi dal punto di vista ambientale e di salvaguardia del territorio, particolare assolutamente non secondario.

In particolar modo i vantaggi sono:

- riduzione dell'attività estrattiva di materie prime con conseguente preservazione e ottimizzazione dello sfruttamento dei giacimenti, ovvero maggiore durata degli stessi.
- riduzione del numero di discariche presenti nel territorio, problema sempre più al centro dell'attenzione pubblica.
- abbassamento dei costi di smaltimento che potrebbe stimolare la riduzione della pratica dell'abbandono abusivo dei rifiuti

Tabella 1.2: *Composizione media del rifiuto trattato nel 2005 dagli impianti situati nel Sud Italia*

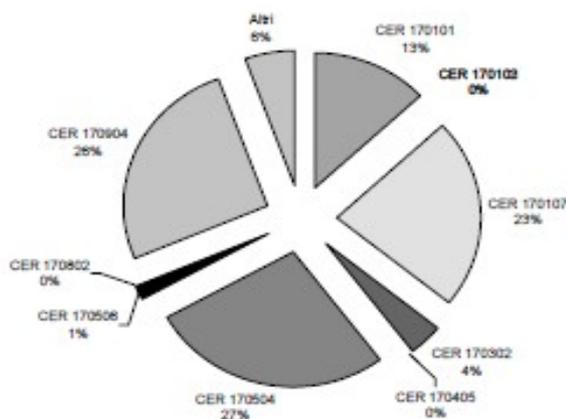
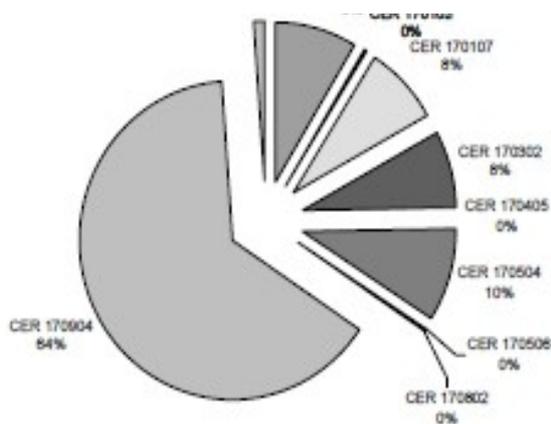


Tabella 1.3: *Composizione media del rifiuto trattato nel 2005 dagli impianti situati nel Centro Italia*



1.4.1 ASPETTI QUANTITATIVI

I dati ufficiali relativi al riciclaggio dei rifiuti inerti sono ancora oggi di scarsa affidabilità, nonostante, anche grazie all'apporto di ANPAR, gli ultimi dati ufficiali [3] siano cresciuti sensibilmente rispetto al passato allineandosi con le stime da sempre effettuate dalla nostra associazione. Il quantitativo di rifiuti da costruzione e demolizione prodotti in Italia, dichiarato da APAT, è pari a circa 42 milioni di tonnellate.

Nonostante infatti in questi ultimi anni l'attenzione nei confronti di tale famiglia di rifiuti sia notevolmente cresciuta (ne è testimonianza l'impegno assunto da molte Amministrazioni a sviluppare Accordi di programma), si può comunque ancora affermare che:

- non esiste un censimento ufficiale degli impianti autorizzati dislocati sul territorio nazionale.
- non si conosce l'entità del flusso di rifiuti da costruzione e demolizione (codice CER 170107+170904+170504) né il suo frazionamento nelle diverse destinazioni finali (discariche per inerti, impianti di riciclaggio e impianti di semplice riduzione volumetrica, etc.).
- esiste ancora una notevole quantità di rifiuti che non viene smaltita/riciclata regolarmente, come ad esempio i rifiuti impiegati tal quali in ripristini e rimodellamenti ambientali.
- esiste un flusso di materiali che, essendo di natura omogenea, possono essere assoggettati ad un trattamento di semplice riduzione granulometrica direttamente in cantiere ed al successivo reimpiego sul posto (e non viene quindi mai compresa nelle stime sulla produzione).

Come anticipato in premessa, i dati presentati nel seguito Tabella 1 sono relativi a 54 impianti, soci di ANPAR ed ad altri che hanno gentilmente collaborato alla ricerca.

Tabella 1.4: Quantitativi di rifiuti inerti conferiti presso gli impianti di riciclaggio che hanno aderito al presente studio di settore

	Rifiuti conferiti nell'anno 2004 (Kg)	
	Rifiuti inerti	CER 17 xx xx
NORD	2.879.230.543	2.038.468.789
CENTRO	785.563.726	784.118.246
SUD	124.755.070	117.709.680
TOTALE	3.789.549.339	2.940.296.715

1.5 IL QUADRO NORMATIVO

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.

1.5.1 DEFINIZIONI

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 [4], 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/CE 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.

1.5.2 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 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. 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, che andremo ora a presentare.

1.5.3 DECRETO RONCHI

Il decreto Ronchi [5], 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. Con esso 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, oltre ad azioni di informazione e comunicazione degli 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. Andiamo ora a vedere quelle che sono alcune 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.

1.5.4 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

citare 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. È 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.

1.5.5 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 [6]

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.

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.*

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 _____
Iscritta al registro delle ditte esercenti attività di riciclo della prov. di _____
n. _____ (eventuale), IVA _____

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 _____, tel. _____,
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.1.13- Allegato B- schema per aggregati riciclati

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 15 MPa, secondo le indicazioni della norma Uni 8520-2.

1.5.6 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 sponde 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.		

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. 1.14 - Allegato 3 del Decreto 11/04/07

1.5.7 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 [...]

1.5.8 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 delle Pubbliche Amministrazioni 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 3000m^3 .

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. 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:

- ≤ 45 per sottofondi stradali;
- ≤ 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

Capitolo 2

DAL CONTROLLO CONTINUO DELLA COMPATTAZIONE ALLA COMPATTAZIONE INTELLIGENTE.

2.1 TEORIA SUL COSTIPAMENTO DELLE TERRE



Fig.2.1 Immagine di un vecchio compattatore

In alcune applicazioni ingegneristiche, può essere necessario migliorare le caratteristiche di una terra, sia nelle sue condizioni naturali in sito, sia quando esso è impiegato come materiale anche in miscela come materiale da costruzione (ad esempio nelle dighe nei rilevati nei terrapieni, ecc..). Le tecniche di miglioramento del terreno possono essere di vario tipo, in particolare esistono:

- tecniche di tipo meccanico;
- tecniche di tipo chimico;
- tecniche basate sull'induzione di fenomeni di natura termica o elettrica (che vengono utilizzate soprattutto in maniera provvisoria).

Alcuni metodi consistono nell'eliminare o ridurre la presenza dell'acqua (per esempio con drenaggi); altri ancora nel sovraccaricare temporaneamente il terreno prima della realizzazione dell'opera in modo da esaurire preliminarmente un'aliquota dei cedimenti (precarico). Tra i metodi di tipo meccanico riveste particolare importanza il costipamento che consiste nell'aumentare artificialmente la densità del terreno, impiegato come materiale per la costruzione di rilevati stradali e ferroviari, argini, dighe in terra, ecc., attraverso l'applicazione di energia meccanica.

L'obiettivo del costipamento è il miglioramento delle caratteristiche meccaniche delle terre, che comporta, in generale, i seguenti vantaggi:

1. riduzione della compressibilità (e quindi dei cedimenti)
2. incremento della resistenza (e quindi della stabilità e della capacità portante)
3. riduzione degli effetti che possono essere prodotti dal gelo, da fenomeni di imbibizione o di ritiro (legati alla quantità di vuoti presenti).

Il primo ad occuparsi di questo fenomeno è stato l'ingegnere americano Chalton Springer Proctor (1930) a cui si deve la prova Proctor, usata oggi giorno per valutare la qualità della compattazione in laboratorio. In particolare quest'ultima viene utilizzata nell'ambito delle pavimentazioni infrastrutturali (in particolar modo stradali e aeroportuali) per determinare la massima massa volumica del secco della terra ottenuta tramite costipamento meccanico. L'umidità corrispondente è definita umidità ottima ed è per questa che si ha la massima densità raggiungibile con l'energia di costipamento impegnata [7] per valutare la qualità il quale ha evidenziato che il valore della densità secca alla fine del costipamento, è funzione di tre variabili:

- Il contenuto d'acqua.
- L'energia di costipamento
- Il tipo di terreno (granulometria, composizione mineralogica, ecc.).

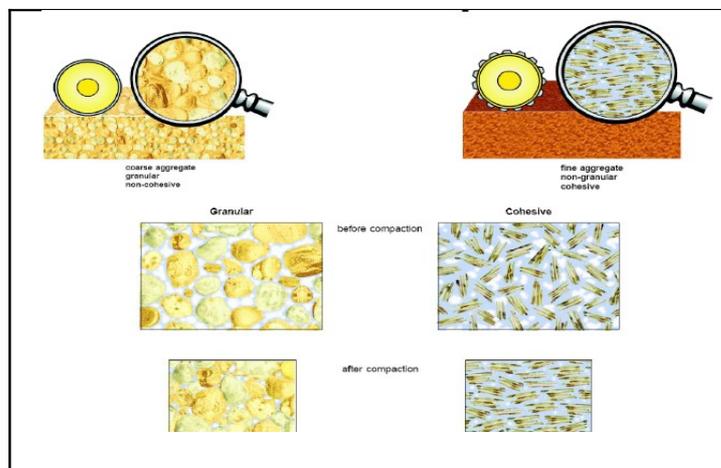


Figura 2.2 :Effetti della compattazione

In sito possono essere usate diverse tecniche di costipamento, in relazione alla natura del terreno da porre in opera ed eventualmente alla tipologia dei mezzi di cantiere disponibili. Tra i vari mezzi usati in cantiere per ottenere il miglior grado di costipamento vi sono i rulli, i quali vengono usati per addensare e quindi migliorare le capacità portante dei vari strati fondanti la sovrastruttura.

La compattazione svolge un ruolo critico nelle operazioni di costruzione e manutenzione delle pavimentazioni stradali. Solo fino ad alcuni anni fa essa era considerata, a torto, una parte

relativamente insignificante del processo di costruzione dei solidi viari. La vita presunta di questi ultimi e le spese di manutenzione dipendono ampiamente dalla portanza in modo particolare dalla compattazione del sottostante strato di base. Con l'aumento del peso del traffico nonché della velocità dei veicoli che incidono sempre di più sugli strati sottostanti la superficie, i requisiti in termini di stabilità del sottofondo rivestono un'importanza fondamentale. Oggi giorno una corretta cultura su come vanno eseguite le operazioni di compattazione di rilevati e asfalti, ed un impiego delle tecnologie di esecuzione e controllo dei risultati ottenuti sono sinonimo di qualità e in particolare modo di durata del lavoro eseguito. Fino ad oggi per compattare il suolo ed i materiali di riempimento sono stati impiegati *rulli statici* o *vibranti*.

Fig.2.3 Rullo statico



Fig.2.4 Rullo vibranti del campo sperimentate

Per la costruzione di strade, argini etc. in alcuni paesi europei viene utilizzato un nuovo metodo di compattazione, chiamato *compattazione intelligente*. Questo nuovo metodo mira a costruire strade di qualità superiore mediante l'utilizzo di un sistema di controllo interattivo sin dall'inizio della

costruzione. La metodologia di compattazione rimane la medesima: il terreno viene suddiviso in strisce parallele che sono coperte da un certo numero di passate del rullo. Il numero di passate dipende dal grado di compattazione che si raggiunge al termine di ogni passaggio. Se con i normali metodi di compattazione si incorre in problematiche relative 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 della massa eccentrica che trasferisce energia al terreno, tale energia è adoperata per la compattazione. E’ importante precisare che la compattazione IC è in grado di rilevare con continuità ed in maniera istantanea i moduli di rigidità del terreno, permettendo di raggiungere un ottimo grado di compattazione, con un numero limitato di passate. Grazie alle continue innovazioni, ad oggi molti rulli IC sono associati ad un sistema GPS, per una migliore precisione nel rilevamento dei dati di compattazione.

2.1.2 METODI DI COMPATTAZIONE CONVENZIONALE E IC

I metodi di compattazione del terreno attraverso i macchinari ad oggi disponibili si possono così suddividere:

- **Compattazione convenzionale**

- Rulli statici
- Rulli Vibratori lisci o a piede di pecora, piastre vibranti.

Nel paragrafo 2.2 si entra nel dettaglio di questa tipologia di compattazione.

- **Compattazione IC (Intelligent Compaction)-CCC (Continuous Compaction Control)**

- Rulli vibranti con strumentazione a bordo, nel nostro caso BTM plus, che interagisce con il rullo stesso e registra i risultati attesi. Il rullo che adotta la compattazione IC, intelligente, oltre ad un controllo continuo della compattazione riesce ad adattarsi alle caratteristiche del terreno, variando l'ampiezza delle vibrazioni in automatico. Nel caso invece della modalità CCC, il rullo si basa sempre su di un controllo continuo della compattazione ma non è in grado di agire autonomamente, deve essere l'operatore a impostare manualmente tutti i parametri che suppone siano migliori. I rulli IC sono quindi un passo avanti, poiché sono in grado di gestire la compattazione in modalità manuale ed automatica.

Nel caso del campo sperimentale di Imola, viene adottato un rullo Bomag IC, che ha la possibilità di adottare sia la manuale che quella automatica. Nel nostro caso si opta per la prima.

Le principali caratteristiche, elencate ora in breve, della compattazione IC sono:

- Misura dell'accelerazione del rullo in funzione della posizione
- Determinazione della rigidità del terreno e del modulo di rigidità dinamico E_{vib}
- Il valore del modulo viene confrontato con un valore di riferimento pre-impostato
- Il valore del modulo permette all'operatore di capire se il livello di compattazione del terreno è pari al valore richiesto
- Il rullo intelligente modifica automaticamente e istantaneamente il setting (ampiezza e frequenza) per rendere il valore del modulo pre-impostato.

Dopo aver elencato quelli che sono i differenti mezzi che permettono la compattazione, si presentano in modo più approfondito le caratteristiche tecniche di ciascuno di essi.

2.2 LA COMPATTAZIONE CONVENZIONALE CON RULLI STATICI O VIBRANTI

Per il costipamento dei terreni in sito possono essere impiegate attrezzature diverse in relazione alle caratteristiche e al tipo di terreno e all'energia richiesta per il costipamento.

Le tecniche impiegate possono trasmettere al terreno azioni meccaniche di tipo statico, di compressione e di taglio, o di tipo dinamico, attraverso vibrazioni. In base al prevalere di uno dei due tipi di azioni le attrezzature per il costipamento si suddividono in due classi costituite rispettivamente dai mezzi prevalentemente statici e prevalentemente dinamici.

In particolare, per il costipamento dei terreni a grana fine risultano efficaci solo le attrezzature di tipo *Statico*, mentre per il costipamento dei terreni granulari sono efficaci soprattutto quelle di tipo *Dinamico*.

Nei mezzi prevalentemente *statici* sono compresi i rulli lisci, i rulli o carrelli gommati e i rulli a punte. I rulli lisci statici compattano per compressione e la loro azione è limitata alla parte più superficiale di terreno; hanno un peso generalmente compreso tra le 2 e le 20t e trasmettono pressioni dell'ordine di 30÷100 kg/cm su una striscia di un centimetro di generatrice[1]. La loro azione è limitata alla parte più superficiale di terreno e sono generalmente adatti per terre plastiche. La macchina esercita sul materiale una pressione che induce tensioni sulle superfici di contatto dei grani che diminuiscono all'aumentare della profondità dello strato a seguito della distribuzione del carico, in tal modo si riduce il volume dei vuoti nel materiale, come dimostrano le deformazioni permanenti lasciate dopo il passaggio del rullo (ormaia del cilindro).

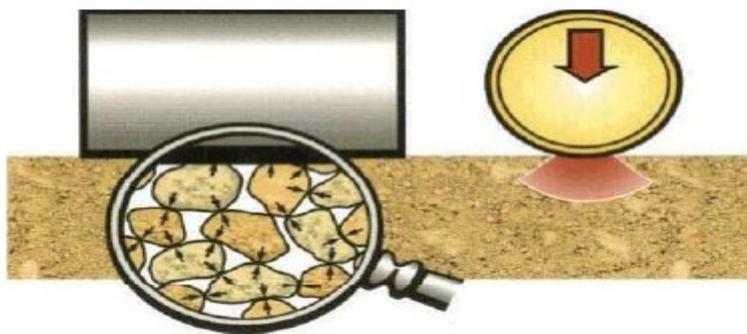


Fig.2.5 Azione di diminuzione dei vuoti con rullo statico

La pressione verticale di un rullo ad azione statica varia all'aumentare del costipamento. All'inizio, il rullo penetra leggermente nel materiale da costipare, in modo tale che un segmento circolare di dimensioni maggiori entri in contatto con il materiale. In tal modo si ottiene una superficie di appoggio corrispondente grande e, pertanto, una pressione superficiale specifica maggiore al centro dell'avvallamento e minore sul bordo. All'aumentare della compattazione, la pressione superficiale specifica aumenta, poiché il rullo penetra in misura minore nello strato di terreno.

I rulli statici sono classificati attraverso il *carico statico lineare*, che può essere identificato come, *Carico per asse / Larghezza del rullo*

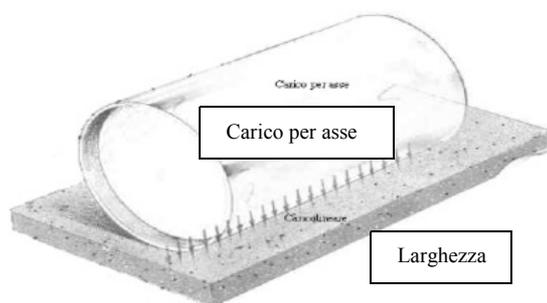


Fig.2.6 *Carico statico lineare*

L'effetto di queste macchine in profondità è relativamente ridotto. Non a caso tutti i compressori a rullo liscio, al giorno d'oggi sono utilizzati solo ed esclusivamente per il costipamento di quelli che sono gli strati di usura o binder del manto bituminoso stradale e per lavorare giunti e raccordi. Vi sono anche i rulli gommati, costituiti da un cassone trasportato da un certo numero di ruote gommate; compattano sia con azione di compressione che di taglio per mezzo degli pneumatici. Rispetto ai rulli lisci agiscono più in profondità. Alcuni rulli statici sono dotati anche di protrusioni di varia forma, (es. rulli "a piè di pecora") che esercitano sul terreno un'azione di punzonamento, cioè di compressione localizzata. Con la comparsa sul mercato della modalità di compattazione IC, i rulli di tipo statico hanno avuto sempre minor spazio.

Fig.2.7 *Dettaglio dei rulli a piede di montone*



Nella classe dei mezzi prevalentemente *dinamici* sono compresi i rulli lisci vibranti, le piastre vibranti e le piastre battenti. I rulli vibranti sono analoghi a quelli lisci, ma sono dotati di masse eccentriche che generano forze verticali di tipo sinusoidale che mettono in vibrazione il rullo stesso. Tale vibrazione agisce di conseguenza sul terreno stesso. I mezzi vibranti hanno pesi del tutto simili a quelli statici. Sono particolarmente adatti per le ghiaie, le sabbie e tutte le terre fini. Le frequenze di vibrazione si aggirano tra i 20/50 HZ.

Vibrare un terreno significa sottoporlo a due tipi di azioni:

- Una pressione verticale, dovuta al peso della macchina che si muove lentamente sulla superficie del terreno, questa è applicata attraverso superfici di varia forma e natura.
- Una oscillazione forzata, dovuta alla vibrazione del mezzo. Per effetto di tale oscillazione un punto generico del terreno subisce spostamenti ed è sottoposto ad una accelerazione proporzionale. Lo spostamento dei grani di terreno permette un miglioramento dell'addensamento.

Le conseguenze delle vibrazioni si traducono in una rottura dei legami fra i granuli di terra con diminuzione più o meno spinta della resistenza a taglio, per cui è agevole con pressioni verticali non elevate, realizzare un addensamento del terreno migliore rispetto al rullo statico. Esperienze svedesi hanno dimostrato che un terreno incoerente, sottoposto a vibrazione, vede ridotta la sua resistenza per attrito fino a meno di un decimo del valore iniziale; nei terreni coesivi l'effetto della vibrazione è meno sentito e la resistenza a taglio si riduce a valori compresi fra un terzo ed un mezzo di quella iniziale. Altre esperienze hanno posto in luce che a differenza di quanto avviene con le macchine statiche, l'addensamento maggiore con i mezzi vibranti non si realizza in superficie, ma ad una profondità che dipende dal tipo di macchinario e dal tipo di terre.

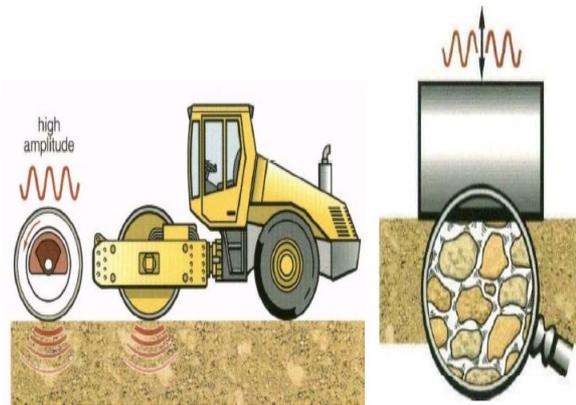
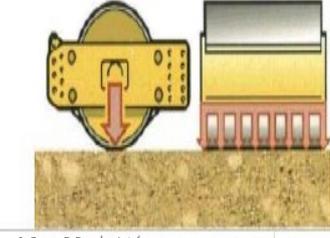
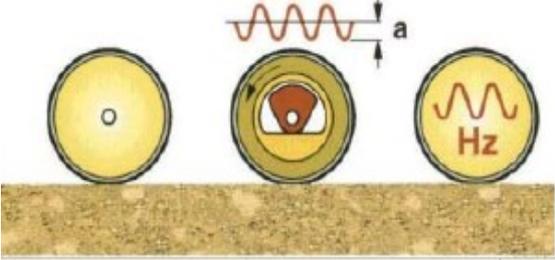


Fig.2.8 Azione di un rullo dinamico che compatta il terreno grazie al peso del rullo stesso e alle vibrazioni

Le piastre vibranti sono formate da una piastra di acciaio sulla quale è posto un motore e una serie di masse eccentriche che generano un moto sinusoidale verticale in grado di sollevare, spostare e far ricadere la piastra. Poiché il valore massimo della risultante verticale della forza centrifuga, supera il peso della macchina, inclinando il piano di rotazione degli eccentrici la macchina si sposta. Le piastre battenti consistono in una massa che viene ritmicamente sollevata e lasciata ricadere sul terreno; vengono usate soprattutto per costipare aree di dimensioni ridotte quando non possono essere utilizzati altre tecniche di costipamento. La scelta dello spessore e della quantità di energia (numero di passaggi con i rulli o di battute con le piastre) dipende dalle caratteristiche del materiale da compattare. Per i materiali a grana fine e per i materiali a grana grossa con percentuale elevata di fine tale scelta è molto legata al valore del contenuto d'acqua; per i materiali a grana grossa la compattazione è generalmente poco condizionata dal contenuto d'acqua.

Quindi riassumendo :

Tabella 2.5:Caratteristiche tecniche rulli statici e vibranti

RULLO STATICO	RULLO DINAMICO-VIBRANTE		
			
Caratteristiche tecniche del carico statico lineare:	Massa vibrante:	Ampiezza:	Frequenza
10 / 80 [N/cm]	0,5-6,5 [t]	0,7-2,5 [mm]	28-60 [hz]

2.3 BASI DELLA COMPATTAZIONE IC

La vibrazione e i movimenti di un compattatore a rullo vibrante cambiano con l'aumentare della rigidità degli strati di terreno che si alternano nel corso della compattazione. Il rapporto tra il comportamento reattivo del rullo compattatore e la rigidità del terreno dipende dalle caratteristiche del terreno e da quelle del macchinario. Si possono distinguere tra:

2.3.1 SISTEMA DI VIBRAZIONE

Il tamburo di un rullo vibrante è eccitato da una massa rotante che è connessa all'albero del tamburo. La massa rotante pone il tamburo in movimento e la direzione delle forze risultanti è legata alla posizione della massa eccentrica. La compattazione è ottenuta principalmente attraverso una serie di onde di compressione che penetrano il suolo in combinazione con il carico statico del rullo. Il comportamento di un qualsiasi tamburo vibrante per quanto riguarda ampiezza della vibrazione e frequenza cambia a seconda del comportamento del suolo.

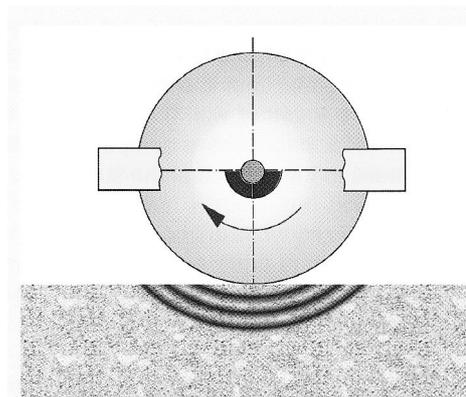
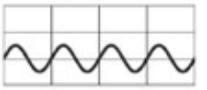
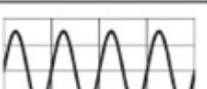
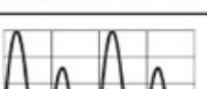
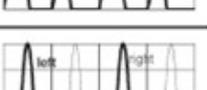
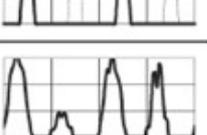


Fig2.11 Vibrazione circolare

I compattatori a rullo vibrante lavorano utilizzando diverse modalità di costipazione, queste ultime variano in funzione del tracciato, e dipendono dal moto vibratorio prodotto dalla massa eccentrica.

Numerose indagini hanno rilevato che il tamburo di un rullo vibrante opera in differenti condizioni a seconda di quella che è l'interazione del rullo con il suolo. Come si vede in figura:

Tabella 6.2: In tabella si spiegano le differenti modalità operative in cui si può trovare un rullo vibrante

COMPORTAM. TAMBURO	INTERAZIONE SUOLO-TAMB	CONDIZ. OPERATIVE	FORZA DI CONTATTO AL SUOLO	RIGIDEZZA	VELOCITÀ	AMPIEZZ. OSCILLAZ.
<i>Periodico</i>	<i>Contatto continuo</i>	<i>Contatto Continuo</i>		<i>BASSA</i> ↓ <i>ALTA</i>	<i>VELOCE</i> ↓ <i>BASSA</i>	<i>PICCOLA</i> ↓ <i>GRANDE</i>
	<i>Perdita di Contatto parziale</i>	<i>Partial Uplift</i>				
		<i>Double Jump</i>				
		<i>Rocking motion</i>				
<i>Caotico</i>	<i>Perdita di contatto</i>	<i>Chaotic motion</i>				

Il contatto continuo (Continuos Contact) con il suolo si ha solo ed esclusivamente quando la rigidità del suolo è molto bassa; questo è il caso di uno strato poco compattato composto da materiali fini. Il sollevamento parziale (“Uplift”) e il “Double jump” sono le condizioni operative più frequenti. La figura 2.12 mostra quelli che sono i movimenti verticali del terreno negli strati al di sotto del tamburo vibrante in condizioni “Double Jump”. Quando la rigidità del suolo aumenta, il moto dell'asse del rullo non è più verticale e il tamburo incomincia ad oscillare in modo caotico-casuale. Un suolo molto rigido in combinazione con parametri del rullo non favorevoli può portare ad un moto di questo tipo in cui non si ha alcuna compattazione. Ciò è assolutamente da evitare riponendo molta cura nella programmazione delle modalità di rullatura in funzione delle caratteristiche del suolo stesso[2].

2.3.2 FORZA CENTRIFUGA, FREQUENZA , AMPIEZZA NEL RULLO VIBRANTE IC

La forza centrifuga, la frequenza e l'ampiezza sono grandezze fondamentali riferite al sistema di compattazione IC.

Poiché tali grandezze sono funzione del tipo di terreno e della sua rigidezza, provocano effetti differenti, perciò devono essere studiate in modo distinto. La forza centrifuga F_c è generata dalla massa eccentrica che ruota su se stessa con velocità rotazionale o angolare all'interno del tamburo. La forza centrifuga è direttamente proporzionale al quadrato della velocità angolare o della frequenza f . La velocità di rotazione della massa eccentrica determina il numero di rivoluzioni n o la frequenza delle vibrazioni $f = 1/T \cdot n$ (la frequenza si misura in Hz o vibrazioni per unità di tempo) con T , periodo di riferimento.

L'ampiezza della vibrazione in (mm) dipende dal valore del momento eccentrico M_e ($\text{kg} \cdot \text{mm}$), ed è un parametro fondamentale di ogni tamburo, che come vedremo agisce in modo influente sulla compattazione.

Il tamburo si muove mentre la massa eccentrica sta ruotando. Questo movimento è fuori fase di 180°

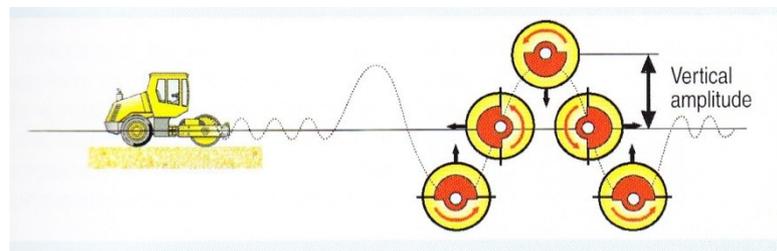


Fig.2.13 Ampiezza della vibrazione in funzione della posizione della massa eccentrica

L'effettiva forza di vibrazione dipende principalmente dall'ampiezza della vibrazione che, comunque, non è determinata dalla forza centrifuga. I forti impatti irregolari con il terreno, che sono causati dai saltelli del tamburo durante l'operazione di compattazione del terreno, potrebbero

causare sovra-compattazione o provocare una diminuzione di densità. Durante questi salti del tamburo, all'interno del rullo nascono delle vibrazioni con ampiezze troppo elevate che successivamente verranno assorbite dalle componenti interne del tamburo che risulteranno fortemente sollecitate. L'energia che viene trasferita in profondità aumenta proporzionalmente alla forza di vibrazione e all'aumento di frequenza come vedremo in seguito al paragrafo 2.3.3. La frequenza del rullo deve essere tenuta costante durante tutte le operazioni di compattazione CCC, le variazioni devono essere ridotte dell'ordine circa di +/- 2Hz

Gli effetti migliori di compattazione ottenuta tramite rulli vibranti si raggiungono per valori della frequenza compresi tra 25 e 50 Hz (1500-3000 vibrazioni al minuto).

In tutti i tipi di materiali, sia che ci si trovi di fronte a materiali scadenti o terreni rocciosi così come terreni coesivi per riuscire a compattare il terreno in maniera efficiente è necessario utilizzare un rullo con una massa molto grande, fino a quando la resistenza del materiale lo permette. Valori elevati dell'ampiezza trasferiscono una maggiore energia di compattazione fin negli strati di terreno più profondi che devono essere compattati, ma si ottiene una peggiore qualità di compattazione negli strati più superficiali. L'utilizzo di valori bassi di ampiezza di compattazione produce invece scarsi risultati di compattazione negli strati più profondi, ma trasferisce valori di energia elevati negli strati più superficiali di terreno, poiché le elevate vibrazioni fanno sì che i grani del terreno in superficie perdano il loro ingranamento, inoltre vi è un maggior rischio di "Double Jump". Queste considerazioni sono di fondamentale importanza per una ottima compattazione CCC. Per raggiungere il miglior risultato possibile bisogna saper quindi utilizzare tutte le modalità vibratorie del rullo, cioè le differenti ampiezze di oscillazione per compattare sia gli strati in profondità che in superficie. Nel capitolo 5 vengono esposte le ampiezze utilizzate per il rullo utilizzato nel campo prove in oggetto e come queste sono state utilizzate.

2.3.3 COMPATTAZIONE IC CON RULLO BOMAG VARIOCONTROL.

Nel caso del campo di Imola la compattazione intelligente è fornita dal rullo Bomag Variocontrol BW 213 con sistema integrato BTM plus. Il sistema Variocontrol consente l'adattamento automatico della ampiezza durante il processo di compattazione. L'ampiezza viene adattata in modo continuo in modo tale che le zone con scarsa capacità portante siano compattate con un'ampiezza elevata, mentre le aree con una maggiore capacità di carico siano compattate con ampiezza proporzionalmente inferiore.

La compattazione IC del rullo Variocontrol fa sì che la massima energia di compattazione possibile possa essere trasferita in qualsiasi momento, senza che il tamburo possa entrare in modalità di sollevamento parziale o di moto caotico, evitando anche la sovra-compattazione.

Il sistema Terrameter BTM plus è usato come strumento di lavoro integrato per la valutazione continua della superficie di compattazione e la capacità portante del terreno . BOMAG fornisce un test diretto per la rigidità del terreno in MN/m² durante il processo di compattazione con il rapporto tra la forza di contatto del suolo e la deformazione del tamburo . Il valore di misura è detto modulo di rigidità dinamico, rappresentato con E_{vib} [MN/ m²]. Il valore E_{vib} è direttamente correlato alla deformazione moduli EV1 o EV2 della norma tedesca DIN 18134 [8] per piastra di carico statica. È prevista una caratteristica particolare sui rulli Variocontrol, cioè cinque valori di E_{vib} [45, 80, 100, 120, 150 MN/m²] che è possibile preselezionare da parte dell'operatore prescelto. Il conducente del mezzo può scegliere quale modulo impostare come obiettivo della compattazione, a seconda del tipo di terreno su cui si trova a lavorare. In seguito adoperando la compattazione IC, il rullo automaticamente, presceglie le ampiezze che meglio permettono di raggiungere l' E_{vib} richiesto [8].

La compattazione e' realizzata principalmente attraverso le onde di compressione trasmesse al suolo in combinazione con il carico statico effettivo che viene trasmesso al suolo dal tamburo. La massima forza di compattazione si suppone sia quasi verticale. Di fondamentale interesse e' il comportamento del rullo a contatto con il suolo, poich  la vibrazione del tamburo cambia a seconda della risposta del suolo interagendo in maniera immediata con esso. In un Vario-rullo due masse contro-rotanti, le quali sono collegate in maniera concentrica sull'asse del tamburo, producono una vibrazione la cui direzione di eccitazione puo' essere aggiustata come e' mostrato in

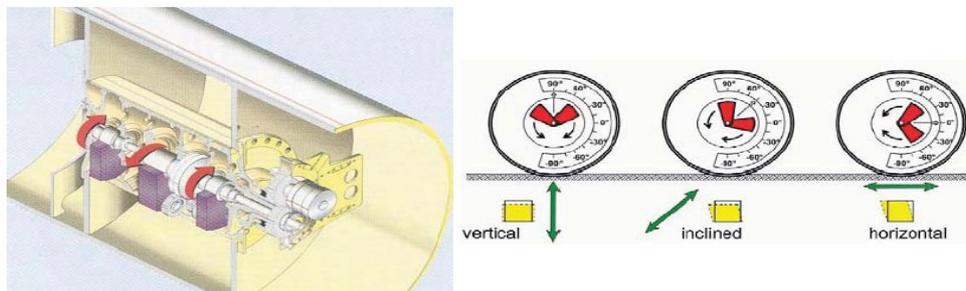


figura 2.17 in modo da ottimizzare gli effetti di compattazione a secondo del tipo di terreno considerato. Se la direzione di eccitazione e' verticale o inclinata, gli effetti di compattazione di un rullo Variocontrol possono essere comparati con quelli di un rullo vibrante. Invece se la direzione e' orizzontale, un rullo Variocontrol compatta il suolo come un rullo oscillante. Per questo, un Vario-rullo puo' essere usato sia per quella che e' una compattazione con compressione dinamica sia per una compattazione dinamica di taglio e anche per una combinazione di queste due. Grazie a queste caratteristiche il rullo "Variocontrol Bomag" puo' essere usato per qualsiasi tipo di suolo e quella che e' la rispettiva direzione-ottima puo' essere trovata attraverso indagini effettuate sul suolo da compattare.

Fig.2.17 A sinistra: masse eccentriche sull'asse del tamburo. A destra direzioni di eccitazione

Nella prossima illustrazione   raffigurato il funzionamento del rullo Variocontrol, a sinistra le masse rotanti sono eccitate in modo che la direzione di oscillazione sia orizzontale, come   indicato dalla freccia rossa in figura. In questo caso si ha una bassa energia di compattazione , ma si vede poi come all'inclinarsi della direzione di oscillazione l'energia di costipazione aumenti sempre pi , fino a raggiungere il suo massimo in direzione verticale. E' importante considerare che la profondita' di indagine cio  lo spessore del terreno fino a dove agiscono le vibrazioni, tende a variare ed aumenta all'aumentare dell'energia che viene trasferita al terreno. Per cui per una

direzione orizzontale avremo una bassa profondità di indagine, mentre per una verticale avremo una più ampia profondità di indagine.

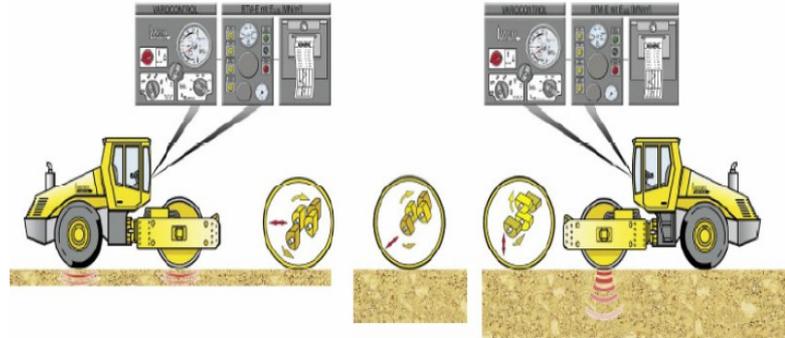


Fig.2.18 Rullo variocontrol BOMAG, funzionamento.

La compattazione IC (Intelligent Compaction) e' strettamente basata sulla misura dell' interazione dinamica tra rullo e terreno, per cui e' logico che il movimento del tamburo del rullo cambia a seconda della risposta del terreno. Questa iterazione rullo-terreno è utilizzata per determinare la rigidità del materiale. Di conseguenza, il tamburo è usato come strumento di misurazione, il suo il movimento viene registrato ed in seguito analizzato in un processore, dove è calcolato il modulo dinamico della compattazione E_{vib} e viene poi visualizzato su un quadrante o su un display in cui i dati possono essere memorizzati. Generalmente la posizione del rullo viene determinata con l'ausilio di un sistema GPS. I dati di tutta l'area interessata vengono resi immediatamente disponibili durante il processo di compattazione e sono caratterizzati dal layout di figura

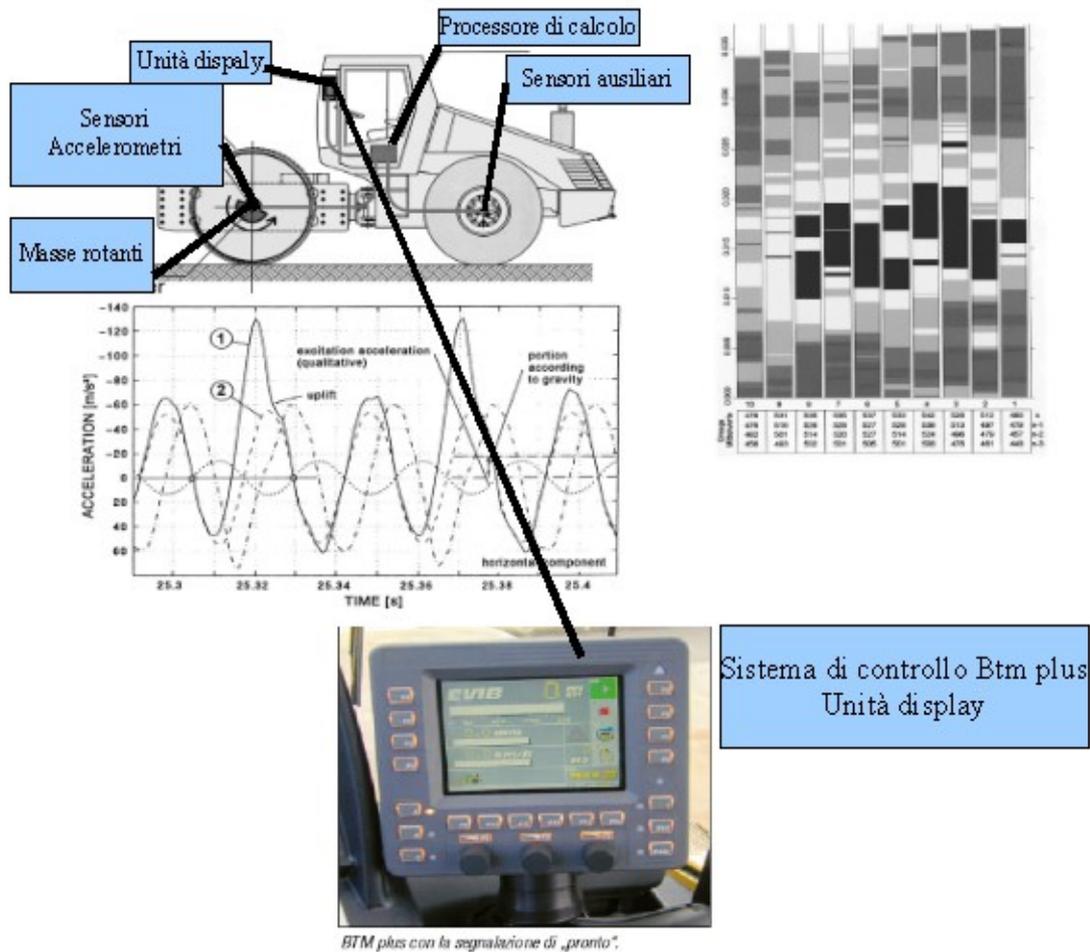


Fig.2.19 Componenti del rullo Variocontrol.

Inoltre e' essenziale tenere in considerazione quelle che sono le differenti profondità di indagine dei rulli IC rispetto alle usuali profondità di indagine dei test convenzionali su piastra, perche in generale un rullo dotato di un sistema IC, effettua delle misurazioni a maggiori profondità rispetto a qualsiasi test effettuato sul sito con i metodi tradizionali. Questo e' di fondamentale importanza perche eventuali strati di materiale soffice e poco compattato situato negli strati profondi potranno essere analizzati da un qualsiasi rullo CCC, cosa non possibile con gli attuali test tradizionali su piastra.

Vediamo ora alcuni importanti parametri che aiutano a leggere i risultati del rullo [9].

All'aumentare del numero dei passaggi, indicati a lato, il "mean value" aumenta



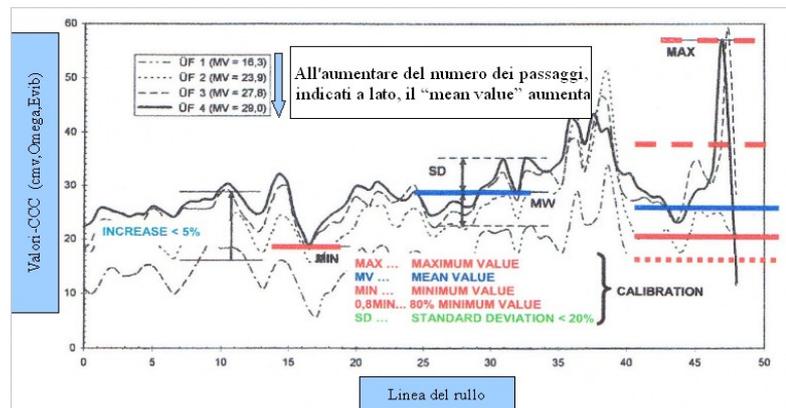


Fig.2.21 Andamento dei dati CCC e dei criteri di controllo

Il valore minimo rilevato “,MIN”, serve per determinare aree/punti caratterizzati da terreno cedevole.

Il valore massimo rilevato, “MAX”, serve per determinare strati di terreno con alte rigidzze.

Il “Mean Value” MV, identifica le condizioni generali medie dell'area in oggetto.

La deviazione standard , “standard deviation”, serve per valutare l’uniformità dell’area interessata.

Una diminuzione repentina di CCC serve come indicatore di un saltellamento del rullo durante la compattazione o presenza di acqua interstiziale.

2.3.4 VANTAGGI COMPATTAZIONE INTELLIGENTE IC

Innanzitutto vediamo quelli che sono i vantaggi della compattazione intelligente:

- Una maggiore efficienza ed una produttività massimizzata, mediante il controllo di ampiezza, frequenza e velocità da parte del rullo IC, rispetto alla modalità CCC che

non prevede la modalità automatica.

- Minor numero di passaggi sulla medesima striscia
- Adattabilità maggiore
- Risultati di compattazione migliori per una maggiore qualità
- Compattazione più uniforme
- Un minor numero di aggregati sono frantumati
- Miglior planarità
- Completa copertura di analisi del sito prescelto
- Misurazione dinamica ed in tempo reale della rigidità del suolo
- Nessun pericolo di Sovra-compattazione

Ovviamente la compattazione IC, oltre ad avere numerosi vantaggi come abbiamo precedentemente elencato, riserva alcune problematiche.

Le principali sono:

- Richiede apparecchiature sofisticate e delicate
- Richiede costi assolutamente maggiori rispetto a tutte le altre metodologie di compattazione tradizionali

Questi svantaggi però sono generalmente di minor impatto rispetto ai benefici di cui si può usufruire attraverso la compattazione IC. Infatti il terzo punto risulta essere uno svantaggio solo a breve termine, perché il mantenimento di un ottimo standard di qualità del prodotto nel tempo con i relativi minori costi di manutenzione e la maggiore soddisfazione dei clienti fanno sì che la compattazione IC sia di gran lunga la migliore nel lungo termine.

Ad oggi la compattazione di tipo IC è maggiormente diffusa in Europa rispetto agli Stati Uniti per tutta una serie di concause, non a caso le maggiori produttrici sono situate tutte nel vecchio continente. Cito le più conosciute:

- Bomag – Germania
- Ammann – Svizzera
- Geodynamik - Svezia

2.3.5 LA COMPATTAZIONE IC SULLE TERRE

La qualità delle strade, autostrade, binari ferroviari, aeroporti, dighe in terra, impianti di smaltimento dei rifiuti, le fondazioni di strutture ed edifici, ecc... si è visto essere molto dipendente dal grado di compattazione degli strati di riempimento, composti da diversi tipi di materiali, come ad esempio materiale granulare. Così, sia il metodo di compattazione e le attrezzature devono essere selezionate con cura ed il processo di compattazione deve essere ottimizzato al fine di conseguire il migliore risultato.

Se il controllo della compattazione potesse essere incluso nel processo di lavoro del rullo, si potrebbe risparmiare tempo e ridurre i costi. Inoltre, per una gestione della compattazione ottimale richiede un controllo continuo su tutto il territorio compattato, che può essere raggiunto solo con rulli di tipo IC. Il rullo integrato con un sistema IC (controllo continuo compattazione) fornisce istantaneamente dati relativi all'evoluzione della rigidità del materiale su tutta l'area di interesse. Il metodo IC può essere applicato a tutti i tipi di materiale non legato, generalmente i materiali grossolani quali ghiaie e ghiaie sabbiose risultano essere i più adatti per le applicazioni IC, come è possibile vedere in figura 2.10, campo A.

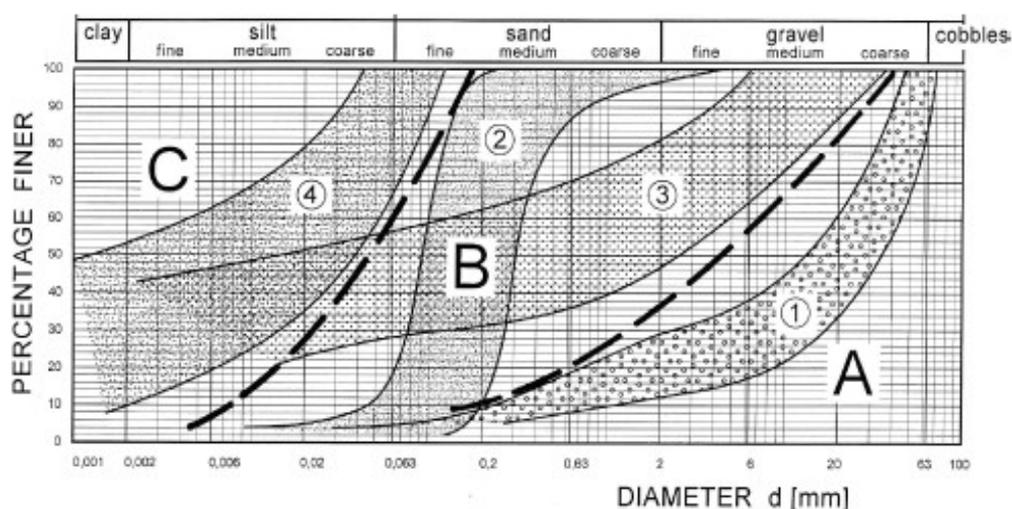


Fig.2.10 Per le applicazioni CCC i materiali che rispondono meglio alla compattazione risultano essere quelli in fascia A.

Nei terreni di tipo argilloso o di tipo sabbioso, Fig 2.10 campo B, contenenti una larga quantità di fini ca. 30-50% il contenuto d'acqua influisce enormemente su quello che è il comportamento durante la compattazione. Più è elevata l'umidità del suolo, più elevato è il contenuto di acqua che rimane intrappolato tra i vuoti del materiale a causa della bassa permeabilità, tutto questo influenza la compattazione IC.

Anche tutti i materiali a grana fine o artificiali (ceneri leggere, per esempio), in Fig 2.10 fascia C, hanno ancor più la tendenza ad essere difficilmente compattati a causa della bassa permeabilità, infatti l'acqua interstiziale e l'aria creano una pressione eccessiva nei pori durante la compattazione che ostacolano l'azione compattante del rullo. Un grado sufficiente di compattazione può essere solamente raggiunto impastando il materiale in modo da ridurre la pressione nei pori.

Quindi dovendo fare una classifica dei materiali più adatti alla compattazione IC:

- Materiali grossolani identificati con la fascia A di fig 1.10
- Materiali di tipo argilloso, fascia B fig 1.10
- Materiali molto fini, fascia C fig 1.10

2.3.6 CENNI STORICI SULLA COMPATTAZIONE IC

Le prime considerazioni sulle misurazioni effettuate con vibrazione-integrata durante la compattazione risalgono al 1930 quando la compattazione veniva effettuata tramite piastre vibranti. E' poi il 1974 quando il Dottor Heinz Turner effettua delle prove attraverso l'ausilio di un Rullo Vibrante integrato con un accelerometro. Le prove indicarono che il rapporto tra l'ampiezza della prima armonica e l'ampiezza della frequenza potevano essere correlate agli effetti di compattazione e la rigidità del suolo poteva essere misurata tramite prova di carico statico su piastra. Era quindi plausibile la comparazione tra il rullo vibrante Dynapac mobile e la piastra statica, questo fu l'inizio dell'evoluzione della compattazione IC.

Nel 1978 Geodynamik, azienda nata nel 1975 dalle intuizioni e dalla collaborazione di Heinz Turner con Åke Sandström, la quale tutt'ora sviluppa e commercializza strumenti di misura utilizzati nel controllo della compattazione del terreno durante la costruzione di strade, ferrovie, aeroporti, depositi, fabbriche e abitazioni, introdusse il Compactation Meter Value, CMV. Il nuovo metodo di misurazione fu introdotto alla prima conferenza internazionale sulla compattazione tenuta a Parigi, nel 1980 (Turner e Sandström 1980,). Molti dei produttori di rulli, per esempio, Caterpillar, Ingersoll Rand, hanno successivamente adottato il CMV.

Quando Geodynamik introdusse il CMV, la tecnologia con tamburo vibratorio era molto rudimentale, infatti la Vibrazione veniva avviata attraverso due mezzi meccanici di massa eccentrica (a conchiglia) che si trovavano ancorati ad un asse all'interno del tamburo. Se i due elementi ruotavano in una direzione, le due masse eccentriche fornivano la massima forza

centrifuga, quando invece operavano con una direzione di rotazione inversa, la forza centrifuga era minima.

Nel 1990 Bomag introdusse il Modulo Vibratorio o Modulo di elasticità dinamica E_{vib} che rileva la rigidità del terreno raggiunta in seguito a processi di compattazione. Nel 1990 la tecnologia dei rulli compattatori divenne molto più sofisticata. Nello stesso anno Bomag introdusse il rullo Variocontrol dotato di masse eccentriche rotanti e controllo servo-idraulico delle forze centrifughe verticali [2]. Nel prossimo paragrafo si spiega in modo dettagliato il significato del modulo E_{vib} .

2.4 VALORI FORNITI DAI RULLI COMPATTATORI - BOMAG

Si elencano ora quelli che sono i principali valori forniti dai rulli Bomag:

Tabella 2.7: Valori dei rulli Bomag

Sistema IC	Valore di output del rullo	Definizione	Casa produttrice
Terrameter	Omega	Energia trasferita al suolo	Bomag, Germany
Terrameter	Evib	Modulo di elasticità dinamica del terreno	Bomag, Germany
Terrameter	K_s	Rigidezza del terreno	Bomag, Germany

In particolar modo nel Capitolo 5, di analisi della rullatura, si elencano i risultati ottenuti nel campo sperimentale di Imola in termini di E_{vib} o meglio definito modulo di rigidezza dinamica.

2.4.1 VALORE OMEGA Ω

Sviluppato da Bomag e Krober (1988), e incorporato nel sistema Terrameter, il metodo omega fornisce una misura dell'energia trasmessa al suolo. Il valore di omega è determinato integrando la forza F_s e lo spostamento del tamburo z , in particolar modo quello che è il valore dell'accelerazione \ddot{z}_d di due consecutivi cicli di vibrazione. F_s è determinato sommando il peso del rullo, l'inerzia del tamburo e la forza eccentrica. Un accelerometro registra quelle che sono le varie accelerazioni del tamburo nel tempo.

Quella che è l'accelerazione del rullo è misurata in due direzioni ortogonali e la sua velocità è determinata integrando tutte quelle che sono le componenti dell'accelerazione \ddot{z}_d , Omega [Ω] evidenzia la rigidezza del terreno e può anche essere facilmente confrontato con i risultati ottenuti con i test convenzionali eseguiti dopo una compattazione effettuata con metodologia tradizionale.

A seconda del tipo di materiale compattato, il valore Omega raggiunge valori compresi tra 0 e 1000, a seconda che si tratti di terreni argillosi-sabbiosi, ghiaiosi-sabbiosi o particolarmente rigidi come quelli rocciosi.

Abbiamo che:

- M_d e' la massa del rullo
- M_e e' la massa della "massa oscillante"
- $F_{static}, F_s =$ Forza di contatto tra terreno e compattatore
- $F_e =$ Forza eccentrica

$$OMEGA \sim W_{eff} = \oint \left[-(m_D + m_E) \ddot{Z}_1 + \overline{F_{static}} + \overline{F_E} \right] \times \dot{Z}_1 dt$$

Fig.2.24 Valore Omega.

2.4.2 RIGIDEZZA DEL TERRENO k_s ED ENERGIA TRASFERITA AL SUOLO

Nel 1990 Ammann (Casa produttrice di rulli) introdusse un rullo che permetteva di determinare il parametro di rigidezza del terreno (k_s).

Per descrivere la rigidezza del suolo possiamo partire dalla forza di interazione F_b tra il tamburo e il suolo che e' definita come segue [10]:

$$F_b \cong -m_d \ddot{x}_d + m_u r_u \Omega^2 \cdot \cos(\Omega t) + (m_f + m_d) \cdot g$$

In cui abbiamo che:

- $M_d =$ massa del rullo (kg)
- $X_d =$ spostamento verticale del tamburo (m)
- $\ddot{X}_d =$ acceleratione del tamburo (m/sec^2)
- $M_f =$ massa del telaio (kg)
- $M_u =$ massa in movimento
- $r_u =$ distanza radiale alla tra M_u e il suo ancoraggio (m)
- $M_u r_u =$ momento statico del albero rotante ($kg \cdot m$)
- $t =$ tempo trascorso (sec)

- $g =$ forza di gravita' (m/sec^2)
- $f =$ frequenza dell'albero rotante (Hz)

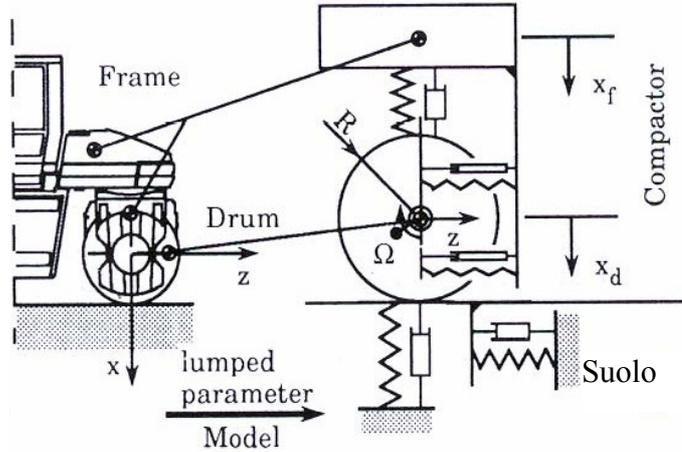


Fig.2.25 Modello a parametri concentrati di quello che e' il contatto tra il rullo-vibrante e il suolo.

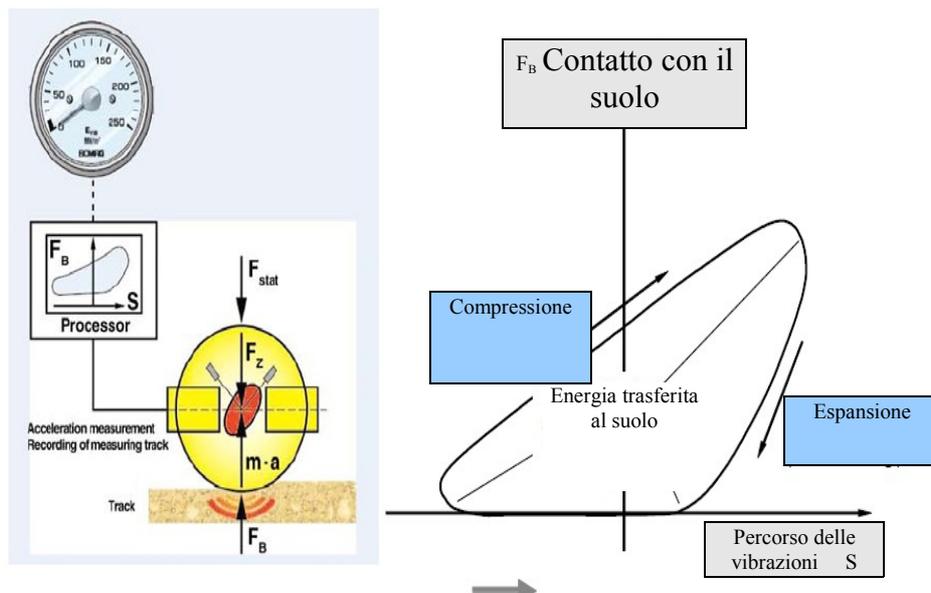


Fig.2.26 Forze sul tamburo e ciclo di carico associato[3]

Se il sottosuolo viene descritto come un sistema di molle, allora l'equazione relativa all'interazione tra il suolo e il tamburo può anche essere data da:

In cui si ha:

$$F_B \cong k_B x_d + d_B \cdot \dot{x}_d$$

k_B : rigidezza del suolo (KN/m)

d_B : Coefficiente di smorzamento (KN s/m) (viene usualmente assunto un rapporto di smorzamento di 0,2)

\dot{x}_d : Velocita' del tamburo (m/s)

Quindi si evince facilmente che conoscendo il valore di F_b , grazie alla formula vista in precedenza, dando per scontato la conoscenza di tutti i valori delle masse, degli spostamenti, delle accelerazioni l'unico valore incognito risulta essere proprio la rigidezza del terreno k_B .

Questa si troverà con una semplice operazione dato che nella formula appena elencata risulta essere l'unico valore non noto a parte il coefficiente di smorzamento che deve essere calibrato.

Oltre al metodo analitico esiste un metodo grafico, in cui la pendenza della curva di carico rappresenta il modulo di rigidezza del terreno, così come si vede in figura

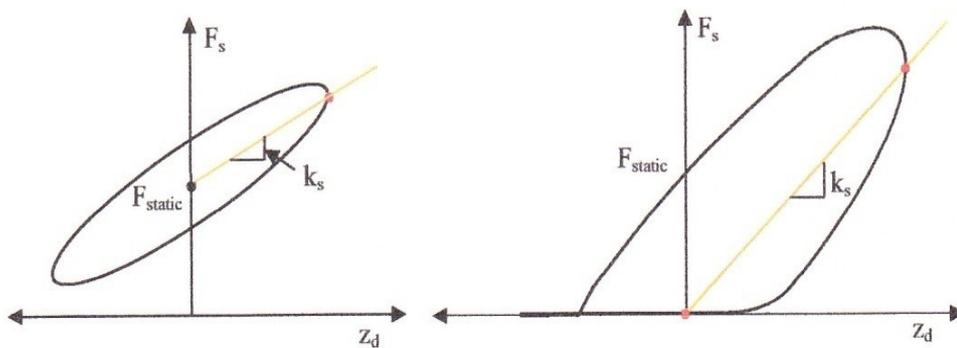


Fig.2.27 Metodo grafico per determinare le rigidezze

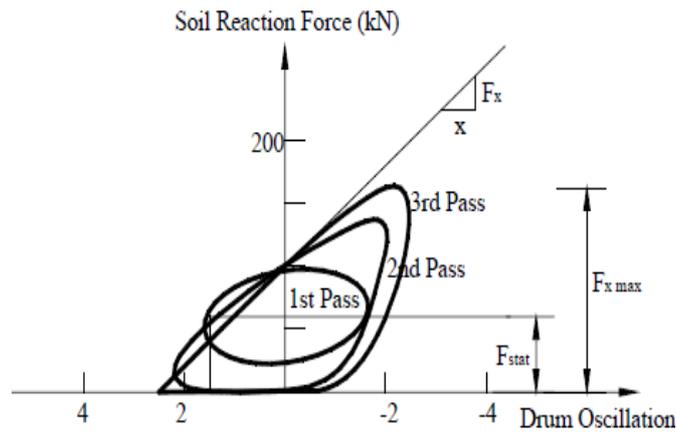
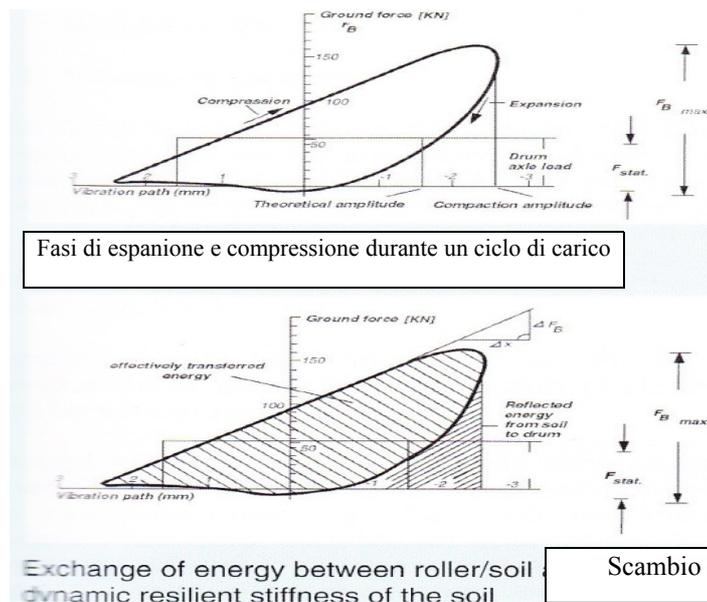


Fig.2.28 Variazione delle curve di carico per successivi passaggi 1,2 e 3.

Il ciclo di carico e' formato da una successione di fasi di espansione e di compressione durante il ciclo di compattazione. La linea a pendenza positiva nel grafico raffigura la prima parte corrispondente alla compressione del terreno, la quale arriva fino a $F_{b \max}$, cioe' la massima forza di interazione tra il tamburo ed il suolo a cui segue una successiva fase di espansione a pendenza negativa. L'energia totale trasferita dal rullo CCC al terreno durante il ciclo di carico coincide con l'area sottesa ed evidenziata in figura. Come e' evidenziato nella figura sopra riportata e' subito riscontrabile come all'aumentare delle passate l'energia trasferita risulta essere via via maggiore ed anche la $F_{b \max}$ si comporta di conseguenza.



Fasi di espansione e compressione durante un ciclo di carico

Exchange of energy between roller/soil dynamic resilient stiffness of the soil

Scambio di energia tra il tamburo ed il suolo

Fig. 2.29 Compressione ed espansione nei cicli di carico ed energia trasferita.

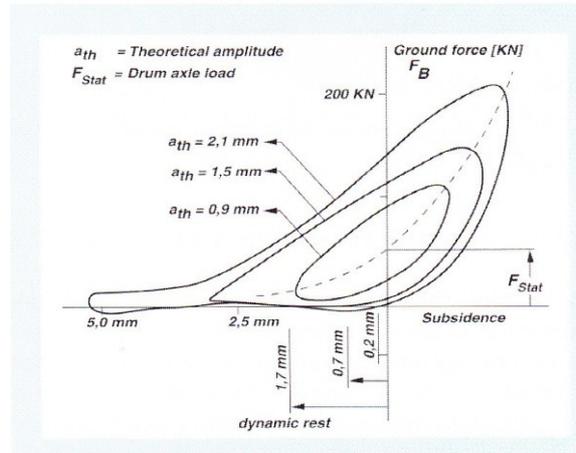


Fig 2.30 Energia trasferita al terreno in funzione della variazione delle ampiezze, 0,5 mm; 1,5 mm; 2,1 mm.

In figura viene messo in evidenza il rapporto che intercorre tra l'aumento dell'ampiezza della vibrazione e la corrispondente energia trasferita al terreno. Tutti i rulli Bomag infatti hanno la capacità di variare quella che è l'ampiezza di oscillazione manualmente, gli ultimi modelli Bomag Variocontrol, tra cui quello utilizzato nel campo prove a Imola arrivano fino ad ampiezze di oscillazione di 2,5 mm. Tanto maggiore è la stessa tanto maggiore è l'energia trasferita al terreno e quindi si riuscirà a intervenire su strati maggiormente in profondità.

Dalla figura si nota subito, come, aumentando il valore dell'ampiezza aumenti l'energia trasferita al terreno. Questo fenomeno accade, perché, utilizzando ampiezze elevate si vanno a coinvolgere anche gli strati del sottofondo, quindi, al termine della compattazione si ottengono terreni con rigidzze più elevate rispetto quelle iniziali. I valori delle ampiezze registrate vengono considerati validi fino a quando il display posto nella cabina dell'operatore del rullo non evidenzia valori di rigidzza troppo elevati o troppo bassi rispetto quelli ipotizzati. Se si dovessero aumentare ulteriormente le ampiezze, il comportamento del rullo diventerebbe instabile. In questa situazione i movimenti dovuti alle vibrazioni non-periodiche aumentano intorno all'asse longitudinale del tamburo con una frequenza che dipende dalla frequenza propria del sistema vibrante (telaio del macchinario/massa vibrante).

E' quindi di fondamentale importanza decidere quelle che sono le ampiezze di progetto e le loro successioni nelle varie passate, in funzione della prevedibile risposta del terreno. Nel successivo capitolo analizzeremo nel dettaglio quelle che sono state le decisioni nel nostro caso.

2.4.3 Evib MODULO DI ELASTICITA' DINAMICA – RULLO BOMAG

La rigidezza del suolo non e' una variabile del suolo, indipendente, infatti la essa e' il rapporto tra il carico e l'area ed e' dipendente dalla superficie sopra la quale il carico viene applicato. Il modulo del suolo E invece e' l'unico vero valore indipendente ed e' assolutamente necessario ottenere il suo valore relativamente al terreno preso in considerazione, partendo dalla conoscenza di K_b . Inizialmente non si riuscì a ricondursi a tale modulo E , ma in seguito questo problema fu risolto da Hertz nel 1895 ed in seguito sviluppato da Lundberg nel 1939. Hertz e Lundberg analizzarono la relazione tra il carico sul rullo e l'area di impronta creata dal rullo stesso.

Infatti riuscirono a trovare la relazione tra la rigidezza K_b del suolo ed il modulo E del materiale sotto il rullo, presentandola come di seguito:

- E = Modulo di Young
- L = Larghezza del rullo
- R = Raggio del tamburo
- ν = Coefficiente di Poisson, 0.35 .

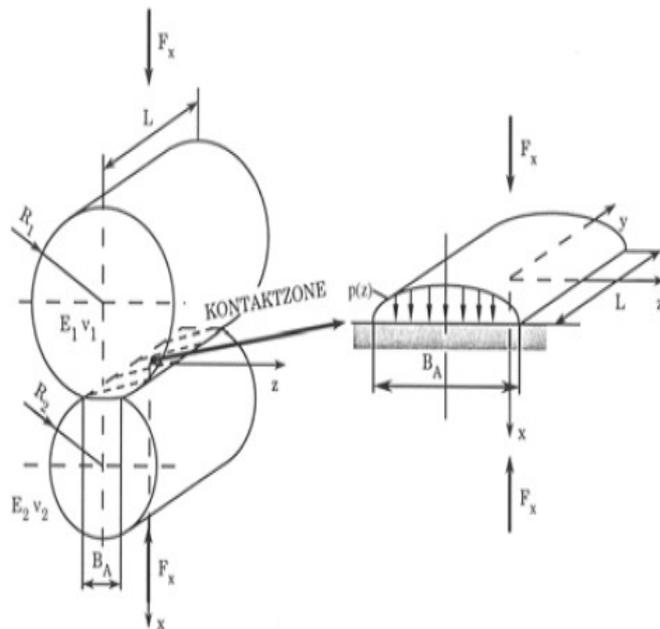


Fig2.31 Problema del rullo su suolo elastico Lundberg, 1939.

Partendo da quelle che sono state le considerazioni e i risultati a cui sono pervenuti da prima H.Hertz nel 1885 ed inseguito G. Lunberg, 1939 e che vengono presentati nella figura sottostante in cui b sta ad indicare la larghezza dell'area di contatto tra il rullo ed il suolo, mentre δ la profondita' di penetrazione.

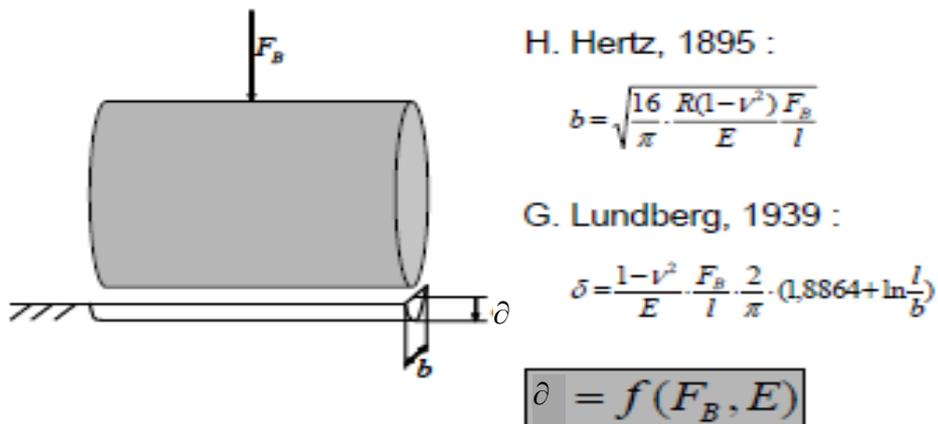


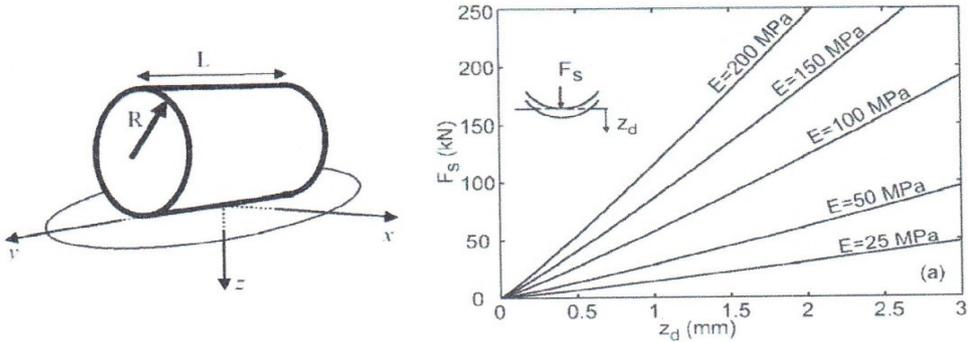
Fig2.32 Soluzione di Lundberg, 1939.

Si e' giunti ad una fondamentale formula che mette in relazione il modulo E con la rigidezza del terreno K_b , tenendo conto del raggio del rullo R e della sua larghezza, cioe' :

$$k_B = \frac{E \cdot L \cdot \pi}{2 \cdot (1-\nu^2) \cdot \left(2,14 + \frac{1}{2} \cdot \ln \left[\frac{\pi \cdot L^3 \cdot E}{(1-\nu^2) \cdot 16 \cdot (m_f + m_d) \cdot R \cdot g} \right] \right)} \quad [\text{MN/m}]$$

La relazione tra la rigidezza e il modulo E puo' essere stabilito su basi sperimentali attraverso prove di confronto tra rullo e prove di carico su piastra.

La relazione tra k ed E è mostrata anche in figura dove sono riportati i valori valori di E_{vib}



Come si puo' vedere vengono riportati i valori di E_{vib} , partendo dalla conoscenza di F_s e dello spostamento Z_d del rullo che corrisponde al relativo abbassamento del terreno sottostante il rullo. E' utile ricordare la relazione tra lo spostamento Z_d e b (larghezza area di contatto) dato da [10]:

$$z_d = \frac{2 \cdot (1 - \nu^2)}{\pi \cdot E} \cdot \frac{F_s}{L} \cdot (1,8864 + \ln \frac{L}{b})$$

E' fondamentale mettere in evidenza come, all'aumentare di F_s , si assista ad un incremento di z_d , cioè affondamento nel terreno, come è evidente dalla formula appena enunciata, dove F_s è al numeratore. Ma si assiste anche ad un successivo miglioramento delle condizioni del terreno precedentemente compattato, individuate da un progressivo aumento del modulo E_{vib} . Nella figura sottostante abbiamo preso un valore della forza di contatto tra terreno e compattatore pari a $F_s=100$ KN ed e' importante valutare come per un modulo E_{vib} del terreno pari a 150 mpa si abbia un affondamento di 1,1mm mentre per $E_{vib}=100$ mpa si raggiungono valori pari a 1,6 mm, con un aumento del 45% di affondamento Z_d . Questo vuol dire che andando a compattare con lo stesso carico di 100KN il terreno, si ha una diminuzione in successione degli affondamenti (1,6mm; 1,1mm e così via) avendo raggiunto valori dell' E_{vib} adeguati che sono via via aumentati, come si evincerà nella figura 1.33 nella successiva pagina. Conoscendo quindi il valore dell' E_{vib} siamo in grado di sapere quali saranno i successivi affondamenti e se il materiale è o meno compattato, per questo motivo i rulli Bomag che restituiscono il valore dell' E_{vib} immediatamente grazie alla compattazione CCC sono di grande utilità.

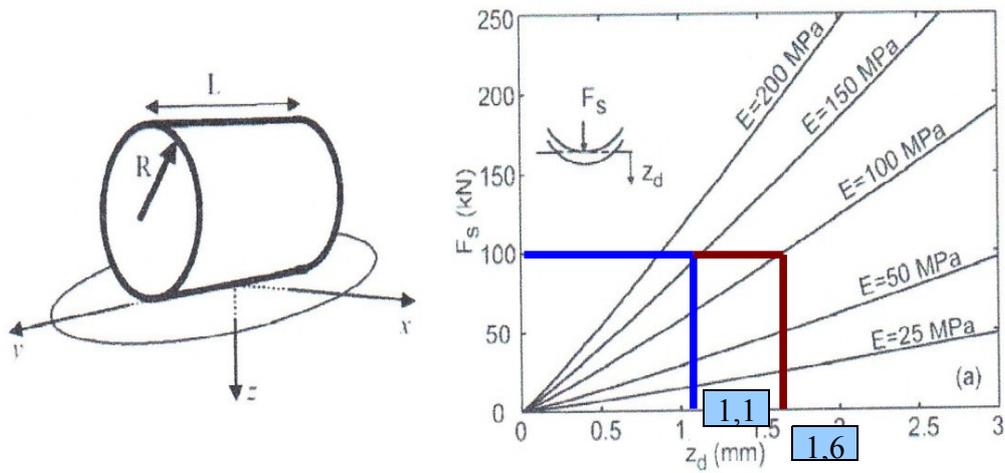


Fig. 2.32 Differenti affondamenti per un F_s pari a 100 kN a seconda dell' E_{vib} del terreno.

La successiva figura, rappresenta le fondamenta della tecnologia Bomag Variocontrol, si vede infatti come nella prima passata tra le successive distanze di 6 m e 10 m vi sia al di sotto del rullo un terreno che restituisce valori dell' E_{vib} bassi, pari a circa 20,30 MN/m², ciò comporta un istantaneo aumento dell'ampiezza di oscillazione del rullo in modo da investigare più in profondità nei vari strati, alla ricerca dei punti cedevoli e aumentando l' E_{vib} . Non a caso nei successivi passaggi il valore del modulo dinamico aumenta, fino a raggiungere nella 5a passata un valore ottimale. Il rullo Bomag è quindi riuscito a bonificare l'area debole.

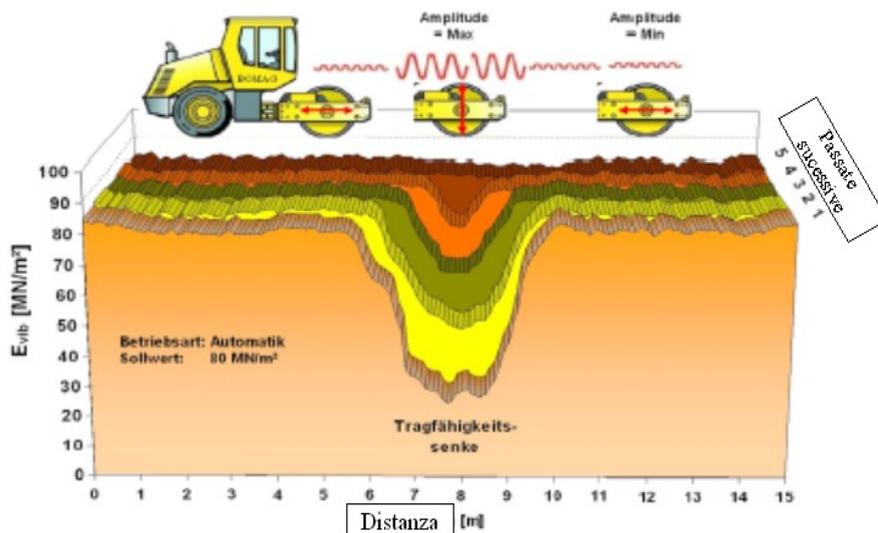


Fig. 2.33 Variazione dell' E_{vib} in seguito a successive passate vibrato CCC

2.5 PASSAGGIO DA RIGIDEZZA A MODULO E_{vib}

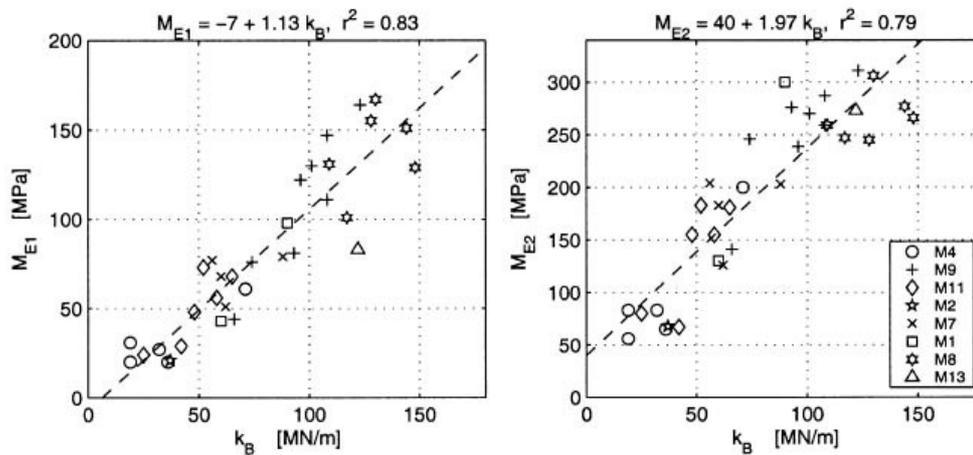


Fig. 2.34 Relazione tra il modulo E e la rigidezza k_B

Quando si conoscono i valori geometrici grazie alle formule appena citate siamo in grado di determinare la relazione tra K_b e E_{vib} con $\delta = f(F_B, E)$. Il coefficiente di Poisson ν può in questo modo essere costantemente considerato pari a 0,25.

Inizialmente la formula $\delta = f(F_B, E)$ forniva il risultato riportato nella figura sottostante in cui abbiamo riportato δ in ascissa e F_B in ordinata.

Il parametro che viene cercato è il modulo E .

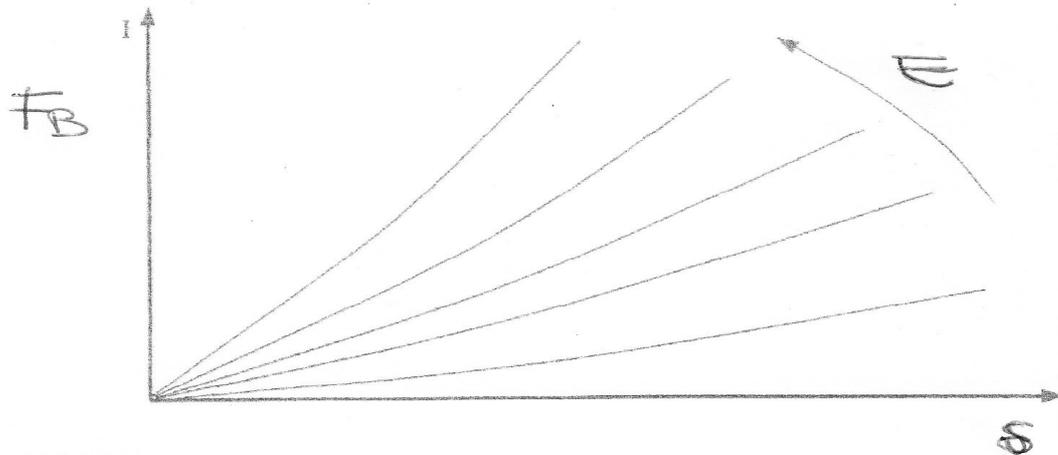


Fig.2.35 Rapporto forza di contatto rullo terreno e corrispondente cedimento

Il progressivo spostamento delle curve può essere spiegato con il fatto che, durante la fase di compattazione con il rullo, dopo che è stato raggiunto un certo abbassamento del terreno, la forza richiesta per la compattazione, aumenta fino a quando non si raggiungono gli abbassamenti di terreno che ci si è prefissi di ottenere.

Aumentando la forza, si assiste ad un continuo incremento della compattazione evidenziato dall'abbassamento del terreno e da un aumento del modulo del terreno E .

Il risultato di questo calcolo permette di determinare il modulo E . Siccome il terreno non si comporta in modo elastico, lineare e isotropo, il termine relativo al modulo E è simile al valore ottenuto con la prova di carico su piastra, ed è definito come modulo vibratorio E_{vib} , che tiene conto di tutte le variazioni cui è soggetto il sistema rullo-terreno.

Il modulo E_{vib} può essere considerato indipendente dalle caratteristiche del macchinario alle quali si fa riferimento per la determinazione della forza di contatto rullo terreno, ma risulta funzione delle caratteristiche del terreno.

2.6 INFLUENZE SUI VALORI E_{vib} MISURATI CON COMPATTAZIONE IC

Quelle che sono le differenti condizioni operative del rullo hanno effetti significativi sui relativi valori di E_{vib} misurati in sito. I valori riscontrati devono valutati separatamente a secondo che le condizioni operative del rullo siano da una parte le più comuni cioè di contatto continuo o sollevamento parziale (“Partial uplift”) e dall'altra di “ Double Jump”. Queste ultime dovrebbero essere evitate il più possibile, usando adeguate velocità del rullo e operando in maniera ottimale nella scelta delle varie modalità di ampiezze, non a caso ampiezze elevate favoriscono il “Double Jump” .

Si cerca ora di fare un elenco di tutte le caratteristiche del rullo e del campo prove che possono incidere sull' E_{vib} [2].

2.6.1 SUOLO

Il suolo è in grado di modificare quelli che sono I valori dell' E_{vib} in particolar modo vi sono una serie di parametri che incidono su di esso:

- **Struttura dello strato**

La struttura del suolo influisce sul valore dell' E_{vib} in particolar modo sulle sue condizioni operative. Come si è visto precedentemente le aree deboli in profondità influenzano il modulo dinamico.

1. **Tipo di suolo**

La granulometria del terreno è un parametro importante, in particolar modo i cambiamenti in seguito ai successivi passaggi del rullo nella distribuzione granulometrica influiscono sul modulo

- **Contenuto d'acqua**

E' fondamentale, non a caso a volte a causa di un elevato contenuto d'acqua, la compattazione non è assolutamente possibile. Infatti in seguito a successive passate del rullo in tali condizioni l' E_{vib} risultante tende a diminuire invece che ad aumentare.

- Superficie non omogenea

Pietre o rocce superficiali variano di molto il modulo, falsando i risultati attesi.

2.6.2 RULLO

- Ampiezza dell'oscillazione

L'ampiezza influenza sia gli effetti della compattazione, sia la profondità di investigazione, sia il comportamento del rullo (Double Jump, Partial Uplift). Se la stessa è elevata la profondità di indagine è maggiore e gli effetti della compattazione sono si più tangibili, ma anche i rischi di scontro tra i grani del terreno in superficie e la conseguente perdita di ingranamento tra essi risulta essere maggiore. Infatti elevate ampiezza non portano a compattazione degli strati superficiali.

- Frequenza

La frequenza deve essere tenuta assolutamente costante, al massimo variazioni dell'ordine dei +/- 2 mhz

- Carico statico lineare del rullo

Più è alto migliori sono gli effetti della compattazione, inoltre per rulli leggeri c'e' un elevato rischio di Double Jump.

- Velocità del rullo

Deve rimanere tra i 2 ed i 6 km/h e deve rimanere costante. Variazioni influenzano la misurazione.

- Direzioni di misurazione

La misurazione deve essere effettuata solo ed esclusivamente in una direzione, per cui si alterna ad una passata di andata in modalità vibrata IC, una statica di ritorno non registrata. Volendo è possibile farle tutte e due in modalità IC e comparare le due differenti direzioni.

-Peso del rullo

A seconda del peso del rullo varia molto la profondità di indagine:

-Per pesi fino a 2t, si arriva a 0,4 / 0,6 metri.

-Per pesi fino a 10t, da 0,6 a 1 metro.

-Per pesi che arrivano fino a 12 t le profondità di indagine si aggirano nell'ordine di 1,5 metri.

Ovviamente al variare della profondità di indagine l' E_{vib} si comporta di conseguenza, poiché vengono analizzati strati via via differenti.

2.6.3 POSIZIONE E GEOMETRIA DEL RULLO

- **Inclinazione.**

La misurazione dell' E_{vib} può essere effettuata su qualsiasi tipo di superficie inclinata, purchè sia possibile per il rullo avanzare lungo questa superficie correttamente. Generalmente fino al 5% di pendenza non sono riscontrabili problemi

- **Curve**

Sono assolutamente da evitare misurazioni lungo curve strette.

- Argini dello scavo

La striscia di avanzamento non deve essere nei pressi dell'argine, altrimenti influenza il modulo. Infatti è possibile notare differenze tra il modulo rilevato con bordo destro del rullo sul confine lo stesso punto di riferimento a.

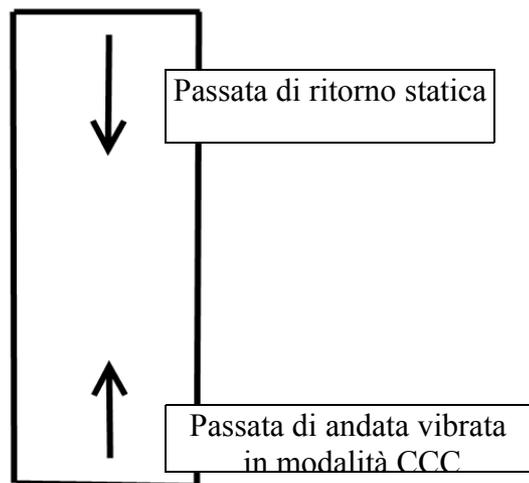


Fig. 2.36 Striscia compattata del Campo sperimentale

2.7 PROCEDURE DI RULLATURA

Comunemente per una sezione di tipo classico stradale, si va in primis a dividere la carreggiata stessa in N strisce parallele, le quali verranno tutte compattate in egual modo. Non sono in alcun modo permesse intersezioni tra le N strisce [2].

Per ciascuna di queste strisce la misurazione dell' E_{vib} deve avvenire durante l'avanzamento del rullo in un'unica direzione, a cui sussegue una passata statica in senso opposto la quale può anche avvenire in retromarcia, come nel caso di Imola.



Se i risultati della compattazione in una striscia differiscono di molto dai valori degli altri tracciati, ulteriori passaggi devono essere eseguiti affinché l' E_{vib} possa essere il più possibile uniforme su tutta la sezione considerata.

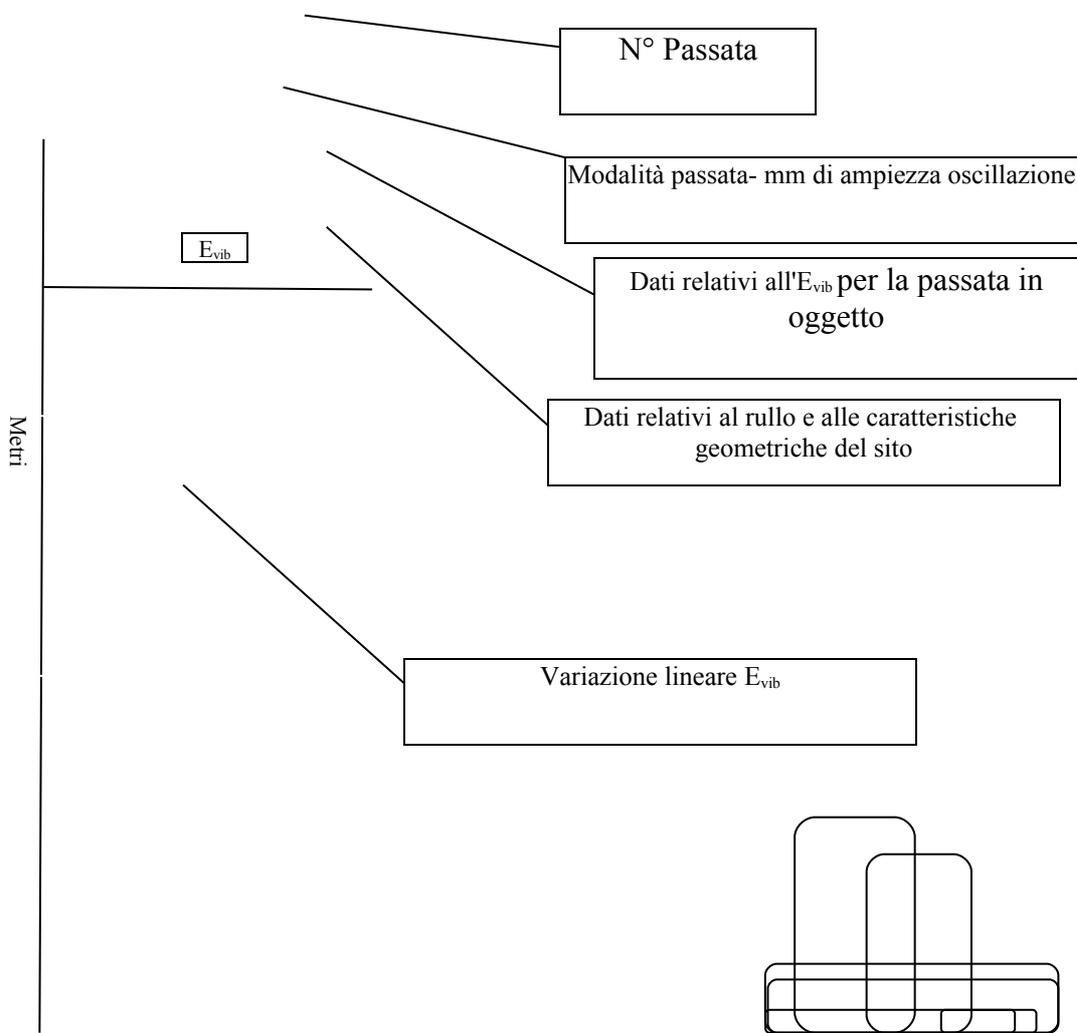
La procedura di compattazione vibrata in un verso e statica nel successivo deve essere portata avanti finché non si riscontrano risultati apprezzabili di incremento dell' E_{vib} . Nel caso in cui durante

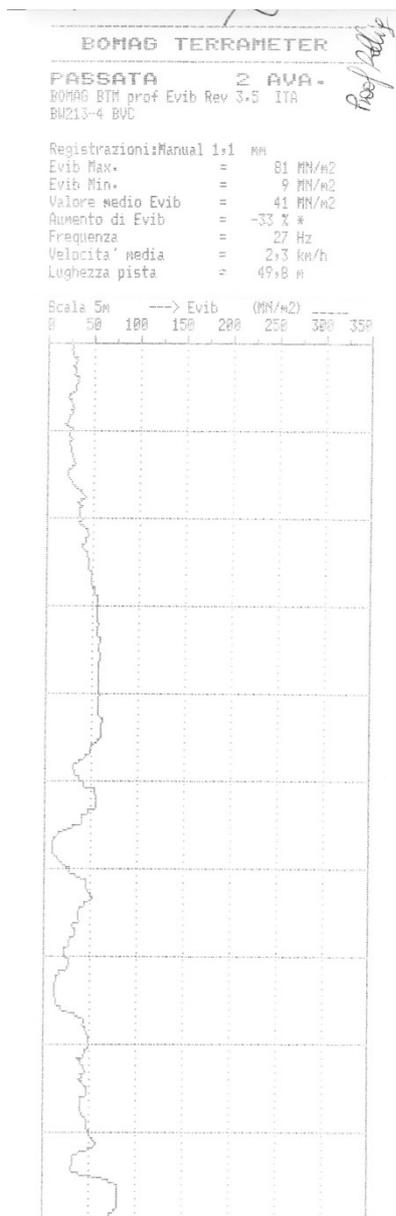
una passata si dovesse incorrere in una condizione Double Jump, allora l'operazione deve essere immediatamente interrotta e ripetuta con ampiezza di oscillazione minore o con stesso valore di ampiezza ma con velocità del rullo maggiore. Se si dovessero ripresentare sempre le stese condizioni allora si deve procedere a ricalibrazione o ad una scelta di rullo più adatto. Infatti quelle che sono le condizioni di Double Jump e di Rocking Motion(in Fig 4.12) che si presentano in caso di elevate ampiezze e di velocità basse sono alquanto pericolose poiché rendono il rullo assolutamente ingovernabile e per il conducente risulta difficile guidare in queste condizioni. Si possono creare situazioni di danno sia per il campo stesso ma anche per i mezzi.

2.8 RAPPRESENTAZIONE MODULO E_{vib} SUI RULLI BOMAG VARIOCONTROL

Si vuole ora presentare quelli che sono i risultati di Output dei rulli Bomag, in termini di E_{vib} . Infatti tutti i rulli della casa Tedesca sono in grado di fornirci dei risultati immediati sotto forma cartacea che vengono forniti online in seguito ad ogni passata Vibrata, del rullo e possono quindi essere immediatamente analizzati dai tecnici Bomag presenti sul rullo Variocontrol. I dati sono registrati solo nelle passate vibrare e non anche in quelle statiche, grazie al sistema BTM plus, per compattazione, integrato sul rullo Bomag Variocontrol

Fig 2.37. Tipico scontrino Bomag.





Capitolo 3

UTILIZZO DEI MATERIALI C&D NELLE SOVRASTRUTTURE STRADALI E MATERIALI DEL CAMPO PROVE

3.1 PREMESSA

Nel capitolo 1 si evince 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 si pone l'attenzione alla costruzione di strade; dopo aver brevemente analizzato per chiarezza le parti fondamentali di una sovrastruttura stradale, si valuta se i nostri materiali riciclati possano trovare impiego nei diversi strati che compongono la tipica sovrastruttura stradale. Si consideri come è già stato ampiamente asserito che la richiesta annua di aggregati a livello nazionale è pari a circa 375 milioni di tonnellate ed il 40% del quantitativo totale di materiale, richiesto nel campo dell'ingegneria civile, viene attualmente impiegato nel riempimento durante la preparazione e l'esercizio delle discariche, in opere di ripristino ambientale o per sottofondi stradali ovvero in usi "meno nobili" che richiedono materiali di qualità inferiore, solo eventualmente selezionati granulometricamente. Tenuto conto che, nel 2006, la produzione nazionale di rifiuti da C&D è stata pari a 52 milioni di tonnellate, esiste quindi la concreta possibilità di sostituire, almeno in parte, gli aggregati naturali con quelli ricavati da processi di recupero di rifiuti da costruzione e demolizione. Essi dunque si inseriscono a pieno diritto nella categoria di materiali alternativi intesi, secondo la definizione tratta dal Congresso di Sidney dell'Associazione Mondiale della Strada [1], come *“qualsiasi materiale non completamente conforme alle prescrizioni in vigore in un paese, ma che può essere usato con successo in relazione a particolari condizioni climatiche o grazie a processi tecnici, ovvero dopo aver subito un idoneo trattamento”*. Ovviamente, affinché i materiali riciclati costituiscano una possibile alternativa ai materiali naturali è necessario che essi siano marcati CE, come prescrivono le norme europee di riferimento, e garantiscano il rispetto dei requisiti di qualificazione e congruità del prezzo, così come definito dalla Circolare n.5205/2005: *“i prodotti devono presentare contestualmente medesimo uso e prestazioni conformi all'utilizzo cui sono destinati rispetto a quelli realizzati a partire da materiali vergini. La congruità del prezzo degli aggregati riciclati si intende rispettata se tale valore non risulta superiore a quello relativo ai corrispondenti materiali che si vanno a sostituire”*. Il rifiuto inerte trattato, che presenta le caratteristiche menzionate, è definito MPS, ossia Materia Prima Secondaria. Nella figura successiva sono evidenziate le parti del rilevato stradale in cui è possibile l'utilizzo di materiali CDW (Construction Demolition Waste).

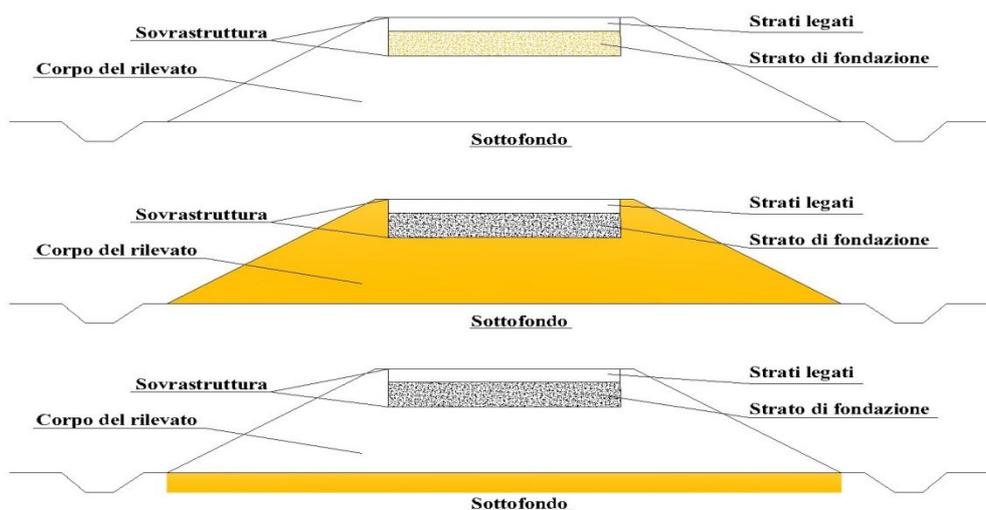


Fig. 3.1: Sono evidenziate le parti del rilevato stradale per le quali, ad oggi, è possibile l'utilizzo di materiali C&D

3.2 CAPITOLATO D'APPALTO DI RIFERIMENTO PER LA SCELTA DEI MATERIALI C&D DEL CAMPO PROVE

La direzione C.A.R. ha provveduto alla scelta di quattro materiali diversi da sottoporre alle prove. Il criterio di scelta tiene conto di indicazioni normative, cioè vengono selezionati quei materiali per i quali ad oggi adottando le indicazioni di alcuni Capitolati Speciali di riferimento, si pensa siano i più performanti. La sperimentazione sarà tesa alla valutazione di idoneità per i 4 materiali C&D nei confronti dell'utilizzo per strati di fondazione stradale in modo da testare la loro efficacia nel rispetto appunto dei *capitolati speciali di appalto- prestazioni tecniche*. Viene quindi assunto come nostro Capitolato di riferimento per l'identificazione della granulometria di interesse quello dell'Autostrada del Brennero [2]. Tutti i materiali proposti avranno quindi una curva granulometrica conforme al fuso che viene indicato dalle prescrizioni appena citate e che verrà di seguito presentato.

A22 – AUTOSTRADA DEL BRENNERO FONDAZIONE

[...] 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”.

Veniamo ora alla composizione granulometrica, il capitolato speciale dell’Autostrada del Brennero in merito ai materiali da usare per fondazione dice:

[...] La composizione granulometrica per la fondazione, 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.

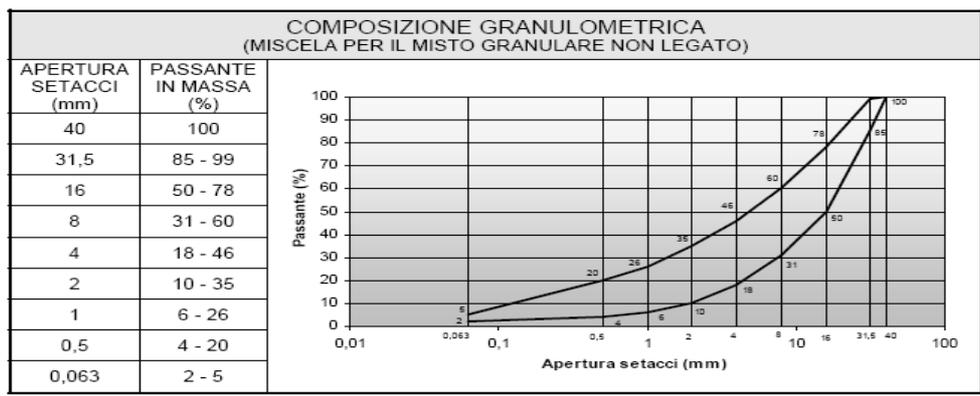


Fig. 3.2: Fuso granulometrico di riferimento per la scelta dei quattro materiali C&D

Questo è il fuso di riferimento, quindi la curva granulometrica di un qualsiasi materiale che debba essere impiegato come sottofondo per la costruzione di un tratto di Autostrada del Brennero deve ricadere all'interno del fuso in figura. Per cui, i quattro materiali C&D, C.A.R, saranno conformi alla seguente direttiva.

3.3 RISULTATI DELLE PROVE DI LABORATORIO SUI MATERIALI C&D PRODOTTI DA C.A.R

La direzione C.A.R. ha provveduto alla scelta di quattro 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 quattro materiali nei confronti dell'utilizzo per strati di fondazione stradale. Per questo motivo la prima scelta è stata orientata sulla granulometria di riferimento.

Una volta prelevati i quattro campioni sul sito è seguita la loro analisi granulometrica presso il laboratorio di strade della facoltà di Ingegneria di Bologna. Il lavoro è stato eseguito dal sottoscritto con l'aiuto del responsabile del laboratorio Elio Pinardi. Di seguito sono esposti i risultati del lavoro effettuato e tutti i fusi trovati vengono confrontati con il nostro fuso di riferimento per vedere se effettivamente i materiali usati sul campo sono ad esso conformi.

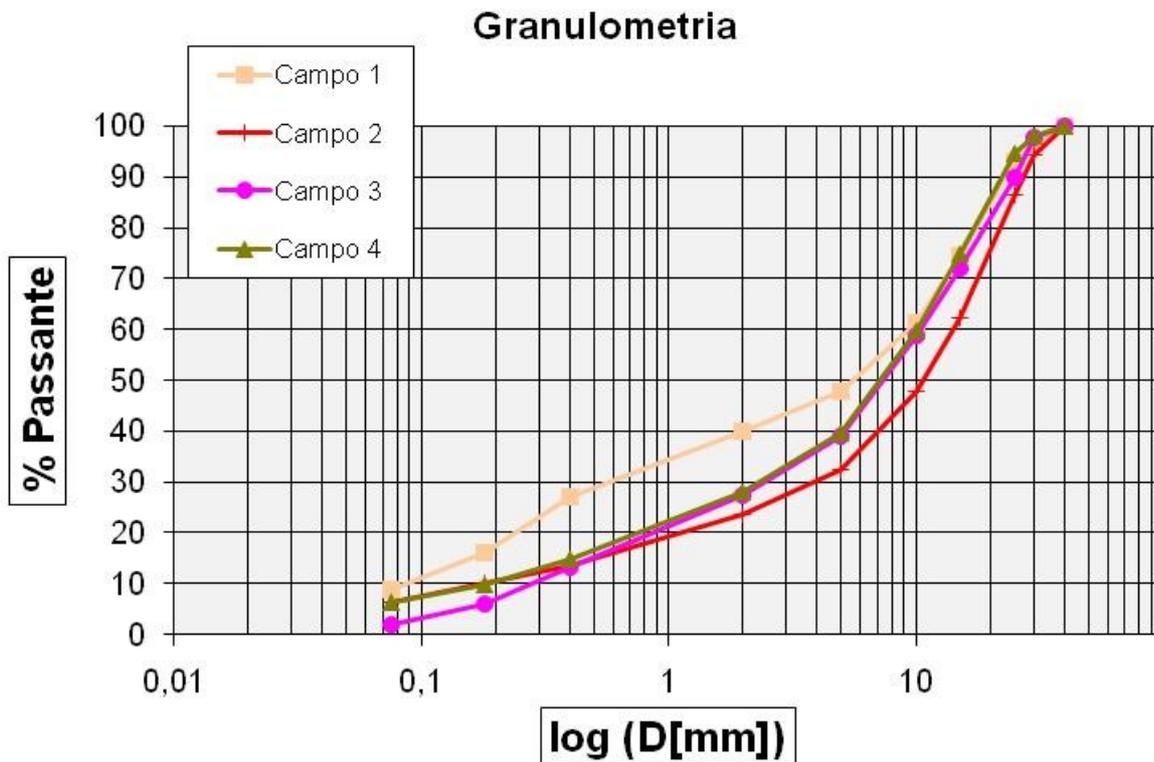


Fig. 3.3: Vengono qui esposte le quattro granulometrie relative ai rispettivi materiali.

Di seguito sono riportati nel dettaglio quelli che sono i materiali usati nei quattro campi; essi vengono descritti qualitativamente attraverso:

- Composizione
- Classifica delle terre (CNR-UNI 10006)
- Curva granulometrica

Ricordiamo che tutti i materiali sottoposti a prova sono prodotti dall'azienda C.A.R., Centro Autorizzato per il Riciclaggio. I motivi che hanno portato a una collaborazione intensa tra l'azienda sopracitata e le facoltà sono legati all'intento da parte di C.A.R stessa di dimostrare le qualità dei prodotti C&D e quindi il loro eventuale utilizzo come sottofondi stradali in sostituzione di materiali nuovi provenienti da cava. In particolare l'attenzione è stata concentrata sulle prove di portanza degli stessi, i cui risultati verranno presentati nel capitolo 5, in modo da dimostrare come i materiali C&D si comportino ottimamente al pari dei materiali di cava.

▪ MATERIALE CAMPO 1

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

Composizione: *65% demolizione mista*

20% loppa di fonderia

15% gres porcellanato



Fig. 3.4: Macinato misto di pietra C.A.R. 0/30 mm (materiale in mucchio).

In laboratorio sono state eseguite le analisi sul materiale del campo 1 che hanno prodotto i seguenti risultati:

Classifica delle terre (CNR-UNI 10006) Indice di gruppo: 0 Classificazione: A1-a

Classificazione generale	Terre ghiaia - argillose Frazione passante allo setaccio 0.075 UNI 2332 \leq 35%							Terre limo - argillose Frazione passante allo setaccio 0.075 UNI 2332 $>$ 35%					Torbe e terre organiche palustri A 8
	A 1		A 3	A 2				A 4	A 5	A 6	A 7		
Gruppo	A 1-a	A 1-b		A 2-4	A 2-5	A 2-6	A 2-7				A 7-5	A 7-6	
Analisi granulometrica Frazione passante allo setaccio													
2 UNI 2332 %	≤ 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
0,4 UNI 2332 %	≤ 30	≤ 50	> 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
0,075 UNI 2332 %	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	> 35	> 35	> 35	> 35	> 35	
Caratteristiche della frazione passante allo setaccio 0,4 UNI 2332													
Limite liquido	-	-	≤ 40	> 40	≤ 40	> 40	≤ 40	> 40	≤ 40	> 40	≤ 40	> 40	
Indice di plasticità	≤ 6	N.P.	≤ 10	≤ 10	≤ 10	> 10	≤ 10	≤ 10	> 10	> 10	IP \leq LL 30	IP $>$ LL 30	
Indice di gruppo	0		0	0				≤ 4	≤ 8	≤ 12	≤ 16	≤ 20	
Tipi usuali dei materiali caratteristici costituenti il gruppo	Ghiaia o breccia, ghiaia o breccia sabbiosa, sabbia grossa, pomice, scorie vulcaniche, pozzolane		Sabbia fina	Ghiaia e sabbia limosa o argillosa				Limi poco compressibili	Limi fortemente compressibili	Argille poco compressibili	Argille fortemente compressibili plastiche	Argille fortemente compressibili plastiche	Torbe di recente o remota formazione, detriti organici di origine palustre
Qualità portanti quale terreno di sottofondo in assenza di gelo	Da eccellente a buono					Da mediocre a scadente							
Azione del gelo sulle qualità portanti del terreno di sottofondo	Nessuna e lieve			Media				Molto elevata	Media	Elevata	Media		
Ritiro o rigonfiamento	Nullo			Nullo o lieve				Lieve o medio	Elevato	Elevato	Molto elev.		
Permeabilità	Elevata			Media o scarsa				Scarsa o nulla					
Identificazione dei terreni in sito	Facilmente individuabili a vista		Aspri al tatto. Incoerenti allo stato asciutto	La maggior parte dei granuli sono individuabili ad occhio nudo. Aspri al tatto. Una tenacità media o elevata allo stato asciutto indica la presenza di argilla.				Reagiscono alla prova di scuotimento*. Polverulenti o poco tenaci allo stato asciutto. Non facilmente modellabili allo stato umido.	Non reagiscono alla prova di scuotimento*. Tenaci allo stato asciutto. Facilmente modellabili in bastoncini sottili allo stato umido.				Fibri di color bruno o nero. Facilmente individuabili a vista.

* Prova di cantiere che può servire a distinguere i limi dalle argille. Si esegue scuotendo nel palmo della mano un campione di terra bagnata e comprimendolo successivamente fra le dita. La terra reagisce alla prova se, dopo lo scuotimento, apparirà sulla superficie un velo lucido di acqua libera, che scomparirà comprimendo il campione fra le dita.

Fig. 3.5: Classificazione C.N.R.-U.N.I. 10006

Come si evince dalle caratteristiche relative alla classificazione A1-a che possono essere desunte dalla tabella di figura, il materiale proposto ha buone caratteristiche qualitative, oltre che buone qualità di portanza. Caratteristica che dato il suo ruolo risulta essere fondamentale, ci saremmo dovuti aspettare questo risultato dato che si è deciso di usare un materiale conforme alle direttive dell'Autostrada del Brennero.

Tabella 3.8: Granulometria del campo 1, setacci % di passante al setaccio

CAMPO 1	
SETACCIO mm	PASSANTE %
40	100.00
30	96.6
25	93.1
15	74.4
10	61.2
5	47.7
2	40.1
0.4	27.2
0.18	16.2
0.08	8.8

<0.075 /

Come si evince dalla figura sottostante il materiale del campo 1 ha un buon assortimento, cioè è formato da inerti di varie pezzature; ciò è dimostrato dal fatto che la curva è caratterizzata da una pendenza costante.

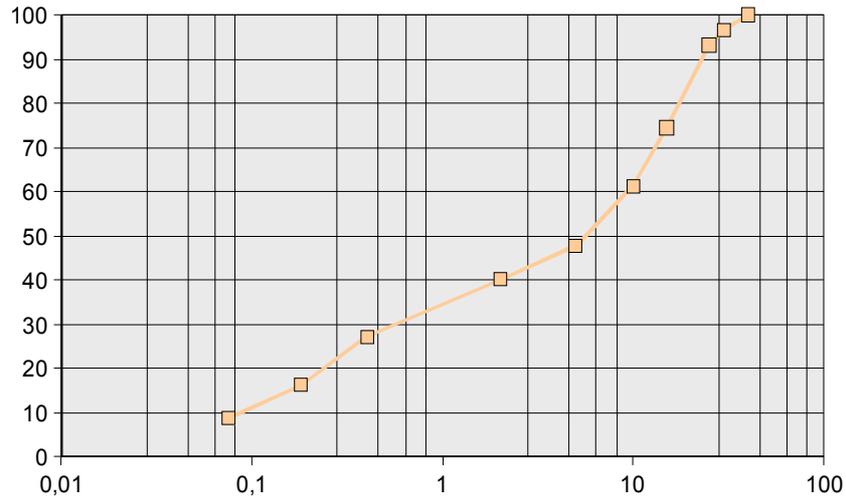


Fig. 3.6: Curva granulometrica del campo 1.

▪ **MATERIALE CAMPO 2**

Nome: *STABILIZZATO DI TRAVERSINE 0/30 mm*

Composizione: *50% traversine*

50% roccia arenaria



Fig. 3.7: Stabilizzato di traversine 0-30 mm (materiale in mucchio).

In laboratorio sono state eseguite le analisi sul materiale del campo 2 che hanno prodotto i seguenti risultati:

Classifica delle terre (CNR-UNI 10006) Indice di gruppo: 0 Classificazione: A1-a

Classificazione generale	Terre ghiaio - argillose Frazione passante allo staccio 0.075 UNI 2332 ≤ 35%						Terre limo - argillose Frazione passante allo staccio 0.075 UNI 2332 > 35%					Torbe e terre organiche palustri	
	A 1		A 3	A 2			A 4	A 5	A 6	A 7			A 8
Sottogruppo	A 1-a	A 1-b		A 2-4	A 2-5	A 2-6	A 2-7				A 7-5	A 7-6	
Analisi granulometrica Frazione passante allo staccio													
2 UNI 2332 %	≤ 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,4 UNI 2332 %	≤ 30	≤ 50	> 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,075 UNI 2332 %	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	> 35	> 35	> 35	> 35	> 35	> 35
Caratteristiche della frazione passante allo staccio 0,4 UNI 2332													
Limite liquido	-	-	≤ 40	> 40	≤ 40	> 40	≤ 40	> 40	≤ 40	> 40	≤ 40	> 40	> 40
Indice di plasticità	≤ 6	N.P.	≤ 10	≤ 10	> 10	> 10	≤ 10	≤ 10	> 10	> 10	IP ≤ LL 30	IP > LL 30	
Indice di gruppo	0		0	0			≤ 4	≤ 8	≤ 12	≤ 16	≤ 20		
Tipi usuali dei materiali caratteristici costituenti il gruppo	Ghiaia o breccia, ghiaia o breccia sabbiosa, sabbia grossa, pomice, scorie vulcaniche, pozzolane		Sabbia fina	Ghiaia e sabbia limosa o argillosa			Limi poco compressibili	Limi fortemente compressibili	Argille poco compressibili	Argille fortemente compressibili mediamente plastiche	Argille fortemente compressibili fortemente plastiche	Torbe di recente o remota formazione, detriti organici di origine palustre	
Qualità portanti quale terreno di sottofondo in assenza di gelo	Da eccellente a buono					Da mediocre a scadente					Da scartare come sottofondo		
Azione del gelo sulle qualità portanti del terreno di sottofondo	Nessuna e lieve		Media			Molto elevata		Media	Elevata	Media			
Ritiro o rigonfiamento	Nullo		Nullo o lieve			Lieve o medio		Elevato	Elevato	Molto elev.			
Permeabilità	Elevata		Media o scarsa			Scarsa o nulla							
Identificazione dei terreni in sito	Facilmente individuabili a vista		Aspri al tatto. Incoerenti allo stato asciutto	La maggior parte dei granuli sono individuabili ad occhio nudo. Aspri al tatto. Una tenacità media o elevata allo stato asciutto indica la presenza di argilla.			Reagiscono alla prova di scuotimento*. Polverulenti o poco tenaci allo stato asciutto. Non facilmente modellabili allo stato umido.		Non reagiscono alla prova di scuotimento*. Tenaci allo stato asciutto. Facilmente modellabili in bastoncini sottili allo stato umido.			Fibrosi di color bruno o nero. Facilmente individuabili a vista.	

* Prova di cantiere che può servire a distinguere i limi dalle argille. Si esegue scuotendo nel palmo della mano un campione di terra bagnata e comprimendolo successivamente fra le dita. La terra reagisce alla prova se, dopo lo scuotimento, apparirà sulla superficie un velo lucido di acqua libera, che scomparirà comprimendo il campione fra le dita.

Fig. 3.8: Classificazione C.N.R.-U.N.i. 10006.

CLASSIFICAZIONE DELLE TERRE C.N.R.-U.N.I. 10006

Anche in questo caso si possono fare le stesse considerazioni del caso precedente dato che il materiale rientra nella stessa identica classe e ha il medesimo indice di gruppo.

Tabella. 3.2: Granulometria del campo 2, setacci % di passante ai setacci.

CAMPO 2

SETACCIO mm	PASSANTE %
40	100.00
30	96.4
25	86.4
15	62.3
10	47.9
5	32.4
2	23.5
0.4	13.7
0.18	10.1
0.08	6.5
<0.075	/

Come si evince nella raffigurazione sottostante il materiale del campo 1 ha un buon assortimento, cioè è formato da inerti di varie pezzature, è dimostrato anche in questo caso dal fatto che la curva ha una pendenza costante.

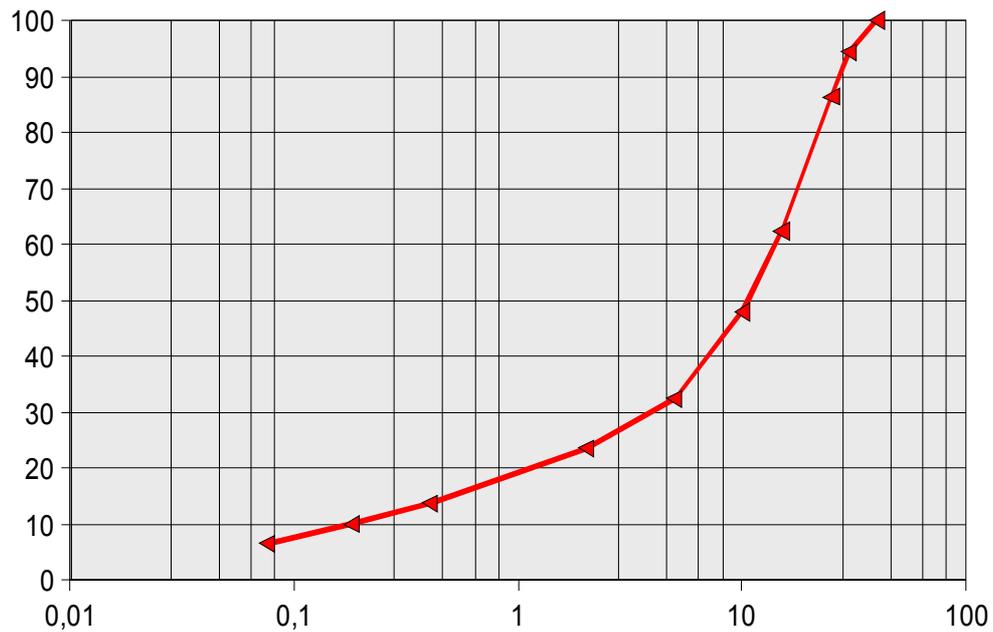


Fig. 3.9: Curva granulometrica per il materiale del campo 2.

▪ **MATERIALE CAMPO 3**

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

Composizione: *100% calcestruzzo*



Fig. 3.10: Stabilizzato di cemento 0-30 mm (materiale in mucchio).

In laboratorio sono state eseguite le analisi sul materiale del campo 3 che hanno prodotto i seguenti risultati:

Classifica delle terre (CNR-UNI 10006) Indice di gruppo: 0 Classificazione: A1-a

Classificazione generale	Terre ghiaio - argillose Frazione passante allo setaccio 0.075 UNI 2332 ≤ 35%						Terre limo - argillose Frazione passante allo setaccio 0.075 UNI 2332 > 35%					Torbe e terre organiche palustri	
	A 1		A 3	A 2			A 4	A 5	A 6	A 7			A 8
Sottogruppo	A 1-a	A 1-b		A 2-4	A 2-5	A 2-6	A 2-7				A 7-5	A 7-6	
Analisi granulometrica													
Frazione passante allo setaccio													
2 UNI 2332 %	≤ 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.4 UNI 2332 %	≤ 30	≤ 50	> 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.075 UNI 2332 %	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	> 35	> 35	> 35	> 35	> 35	> 35
Caratteristiche della frazione passante allo setaccio 0.4 UNI 2332													
Limite liquido	-	-	≤ 40	> 40	≤ 40	> 40	≤ 40	> 40	≤ 40	> 40	> 40	> 40	> 40
Indice di plasticità	≤ 6	NP.	≤ 10	≤ 10	> 10	> 10	≤ 10	≤ 10	> 10	> 10	IP ≤ LL .30	IP > LL .30	
Indice di gruppo	0	0	0	0	≤ 4	≤ 4	≤ 8	≤ 12	≤ 16	≤ 16	≤ 20	≤ 20	
Tipi usuali dei materiali caratteristici costituenti il gruppo	Ghiaia o breccia, ghiaia o breccia sabbiosa, sabbia grossa, pomice, scorie vulcaniche, pozzolane	Sabbia fina	Ghiaia e sabbia limosa o argillosa				Limi poco compressibili	Limi fortemente compressibili	Argille poco compressibili	Argille fortemente compressibili mediamente plastiche	Argille fortemente compressibili plastiche	Torbe di recente o remota formazione, detriti organici di origine palustre	
Qualità portanti quale terreno di sottofondo in assenza di gelo	Da eccellente a buono				Da mediocre a scadente							Da scartare come sottofondo	
Azione del gelo sulle qualità portanti del terreno di sottofondo	Nessuna e lieve		Media				Molto elevata	Media	Elevata	Media			
Ritiro o rigonfiamento	Nullo		Nullo o lieve				Lieve o medio	Elevato	Elevato	Molto elev.			
Permeabilità	Elevata		Media o scarsa				Scarsa o nulla						
Identificazione dei terreni in sito	Facilmente individuabili a vista		Aspri al tatto. Incoerenti allo stato asciutto	La maggior parte dei granuli sono individuabili ad occhio nudo. Aspri al tatto. Una tenacità media o elevata allo stato asciutto indica la presenza di argilla.				Reagiscono alla prova di scuotimento*. Polverulenti o poco tenaci allo stato asciutto. Non facilmente modellabili allo stato umido.		Non reagiscono alla prova di scuotimento*. Tenaci allo stato asciutto. Facilmente modellabili in bastoncini sottili allo stato umido.			Fibrosi di color bruno o nero. Facilmente individuabili a vista.

* Prova di cantiere che può servire a distinguere i limi dalle argille. Si esegue scuotendo nel palmo della mano un campione di terra bagnata e comprimendolo successivamente fra le dita. La terra reagisce alla prova se, dopo lo scuotimento, apparirà sulla superficie un velo lucido di acqua libera, che scomparirà comprimendo il campione fra le dita.

Fig. 3.11: Classificazione C.N.R.-U.N.I. 10006.

La classificazione per il materiale del campo 3 ha prodotto i medesimi risultati visti in precedenza.

Taellab. 3.3: Granulometria del campo 3, setacci % di passante ai setacci.

CAMPO 3	
SETACCIO mm	PASSANTE %
40	100.00
30	97.8
25	89.9
15	71.9
10	58.8
5	39.0
2	27.5
0.4	13.2
0.18	6.2
0.08	1.9
<0.075	/

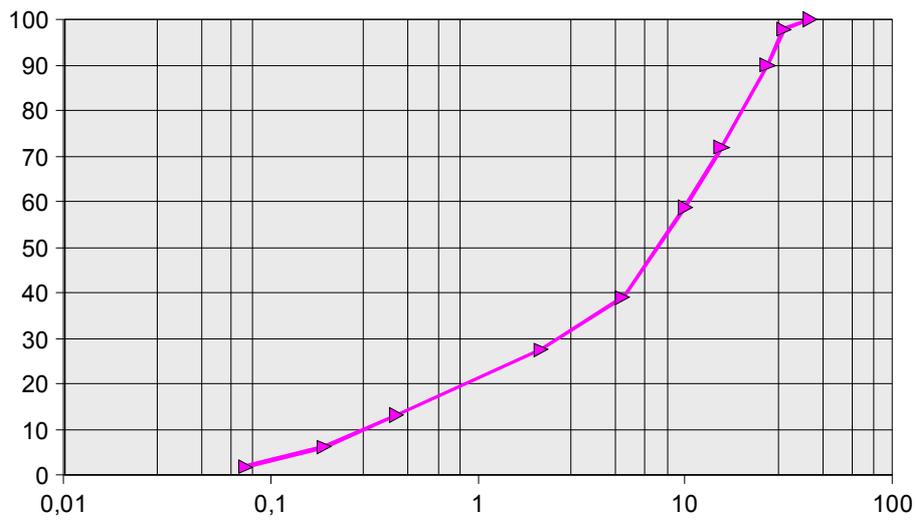


Fig. 3.12: Curva granulometrica del campo 3. Anche in questo caso il materiale ha un buon assortimento.

▪ MATERIALE CAMPO 4

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

Composizione: 50% fresato

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



Fig. 3.13: Miscela di cemento e asfalto 0-30 mm (materiale in mucchio).

In laboratorio abbiamo eseguito le analisi sul materiale del campo 4 il quale ci ha dato i seguenti risultati:

Classifica delle terre (CNR-UNI 10006) Indice di gruppo: 0 Classificazione: A1-a

Classificazione generale	Terre ghiaio - argillose Frazione passante allo staccio 0.075 UNI 2332 ≤ 35%							Terre limo - argillose Frazione passante allo staccio 0.075 UNI 2332 > 35%					Torbe e terre organiche palustri
	A 1		A 3	A 2			A 4	A 5	A 6	A 7		A 8	
Sottogruppo	A 1-a	A 1-b		A 2-4	A 2-5	A 2-6	A 2-7				A 7-5	A 7-6	
Analisi granulometrica													
Frazione passante allo staccio													
2 UNI 2332 %	≤ 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.4 UNI 2332 %	≤ 30	≤ 50	> 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.075 UNI 2332 %	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	> 35	> 35	> 35	> 35	> 35	> 35
Caratteristiche della frazione passante allo staccio 0.4 UNI 2332													
Limite liquido	-	-	-	≤ 40	> 40	≤ 40	> 40	≤ 40	> 40	≤ 40	> 40	> 40	> 40
Indice di plasticità	≤ 6		N.P.	≤ 10	≤ 10	> 10	> 10	≤ 10	≤ 10	> 10	> 10	> 10	> 10
											IP ≤ LL - 30	IP > LL - 30	
Indice di gruppo	0		0	0			≤ 4	≤ 8	≤ 12	≤ 16	≤ 20		
Tipi usuali dei materiali caratteristici costituenti il gruppo	Ghiaia o breccia, ghiaia o breccia sabbiosa, sabbia grossa, pomice, scorie vulcaniche, pozzolane		Sabbia fina	Ghiaia e sabbia limosa o argillosa				Limi poco compressibili	Limi fortemente compressibili	Argille poco compressibili	Argille fortemente compressibili medianamente plastiche	Argille fortemente compressibili plastiche	Torbe di recente o remota formazione, detriti organici di origine palustre
Qualità portanti quale terreno di sottofondo in assenza di gelo	Da eccellente a buono					Da mediocre a scadente					Da scartare come sottofondo		
Attione del gelo sulle qualità portanti del terreno di sottofondo	Nessuna e lieve			Media			Molto elevata	Media	Elevata	Media			
Ritiro o rigonfiamento	Nullo			Nullo o lieve			Lieve o medio	Elevato	Elevato	Molto elev.			
Permeabilità	Elevata			Media o scarsa			Scarsa o nulla						
Identificazione dei terreni in sito	Facilmente individuabili a vista		Aspri al tatto. Incoerenti allo stato asciutto	La maggior parte dei granuli sono individuabili ad occhio nudo. Aspri al tatto. Una tenacità media o elevata allo stato asciutto indica la presenza di argilla.				Reagiscono alla prova di scuotimento*. Folvulenti o poco tenaci allo stato asciutto. Non facilmente modellabili allo stato umido.		Non reagiscono alla prova di scuotimento*. Tenaci allo stato asciutto. Facilmente modellabili in bastoncini sottili allo stato umido.			Fibrosi di color bruno o nero. Facilmente individuabili a vista.

Fig. 3.14: Classificazione C.N.R.-U.N.i. 10006.

CLASSIFICAZIONE DELLE TERRE C.N.R.-U.N.I. 10006

Dopo aver classificato tutti i materiali si giunge alla conclusione che fanno parte della medesima classe *Classificazione* : A1-a ed hanno simili caratteristiche qualitative. Non a caso i loro fusi e le curve granulometriche sono del tutto simili.

Tabella. 3.4: Granulometria del campo 4, setacci % di passante ai setacci.

CAMPO 4	
SETACCIO mm	PASSANTE %
40	100.00
30	97.94
25	94.48
15	74.86
10	59.79
5	39.66
2	28.07
0.4	14.75
0.18	9.74
0.08	6.56
<0.075	/

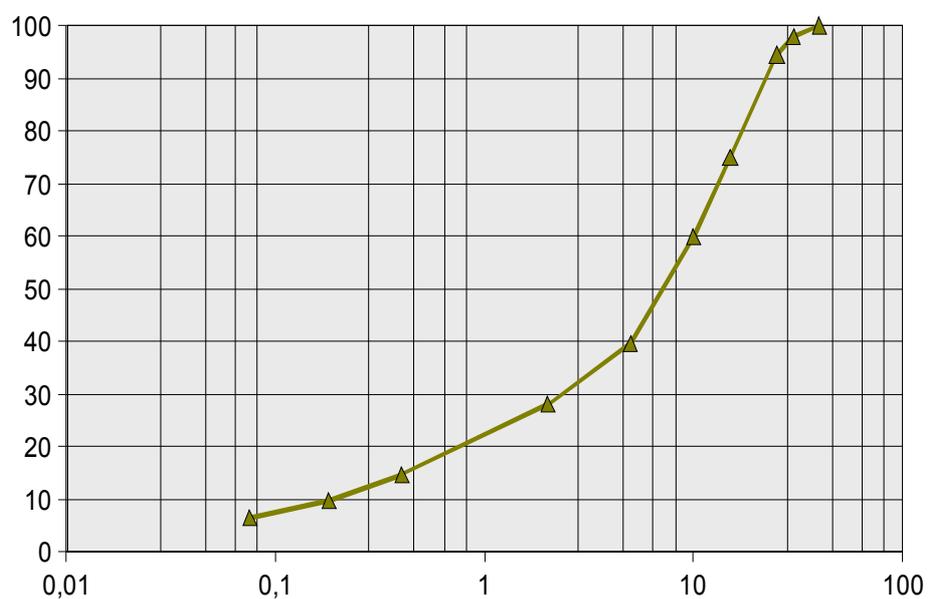


Fig. 3.15: Curva granulometrica del campo 4.

3.3.1 CONFRONTO CON IL FUSO DI RIFERIMENTO

Nella successiva Fig. 3.16, vengono illustrate le curve granulometriche di tutti e quattro i materiali, prima illustrate singolarmente, ora invece nello stesso identico grafico. Inoltre in nero viene raffigurato il fuso che devono rispettare tutti i materiali atti ad essere utilizzati come sottofondo per l'Autostrada del Brennero. Come si vede le curve granulometriche dei materiali del campo 2, 3 e 4 sono perfettamente all'interno del fuso stesso, quindi rispettano a pieno le imposizioni del capitolato speciale. Invece per quanto riguarda la curva granulometrica del campo 1 nel suo tratto finale sfiora il fuso, cioè esce dall'area compresa tra le due linee di color nero. Ciò significa che il materiale non risulta assortito perfettamente secondo le direttive imposte, infatti si registra un problema di scarso trattenuto nella curva tra i 5 mm e i 0,4 mm in cui la % di passante diminuisce di poco o comunque non con la pendenza richiesta.

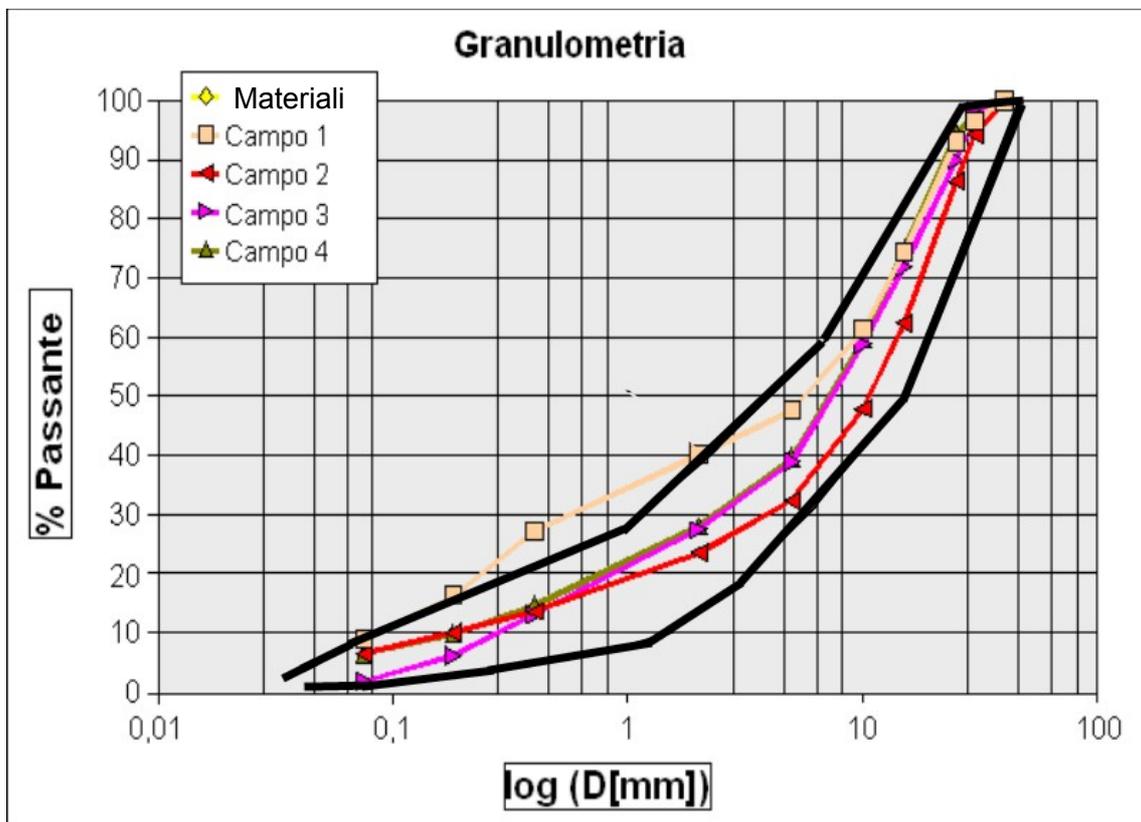


Fig. 3.16: Curve granulometriche dei 4 campi e Fuso di riferimento; la prima curva sfiora nel suo tratto finale l'area sottesa.

3.4 CONCLUSIONI

A questo punto è ovvio trarre alcune conclusioni generali 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.

Nel caso di materiali fresati, 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.

Le problematiche maggiori però non riguardano tanto le caratteristiche puramente granulometriche del materiale C&D, ma in modo particolare le sue capacità tecniche. Ad oggi in molti diffidano di questa tipologia di prodotti poiché tutti i materiali di cava sono stati adeguatamente normati e testati e le capacità tecniche più volte dimostrate a differenza dei CDW. Questo è appunto il fine del nostro campo sperimentale, cioè valutare la portanza di alcuni materiali C&D e richiamare l'attenzione pubblica sulle loro ottime capacità.

Capitolo 4

IL CAMPO SPERIMENTALE

4.1 PREMESSA

In questo capitolo sono elencate tutte le fasi di realizzazione del campo svoltosi a Imola durante i giorni 6/7/8/9 Luglio 2010. Il campo simula un rilevato stradale ed è realizzato con materiali riciclati provenienti dalle strutture dell'azienda C.A.R. (Centro Autorizzato Riciclaggio).

Una prima introduzione si concentra sulle caratteristiche tecniche del campo relativamente alle dimensioni degli scavi, spessori, volumi. In seguito, sono elencate le fasi che si sono susseguite nei quattro giorni e che hanno visto l'alternarsi di momenti di costruzione del campo a momenti di testing. L'intero lavoro è finalizzato a testare quelle che sono le caratteristiche dei quattro materiali C&D provenienti dall'azienda stessa, in modo da poterne verificare la loro idoneità per un possibile uso futuro come sottofondo di strade e affini. Sarebbe un campo di sviluppo per tutti i materiali di riciclo fondamentale e aprirebbe nuovi scenari sia per aziende quali C.A.R che si occupano della produzione di materiali C&D, sia per le imprese costruttrici, le quali avrebbero la possibilità di usare materiali assolutamente idonei e a costo minore rispetto a materiali di cava. Inoltre, ultimo aspetto vantaggioso sarebbe lo sfruttamento minore delle risorse naturali che il nostro paese offre.

4.2 LOCALIZZAZIONE DELL'AREA DI CANTIERE



Fig. 4.1: Localizzazione preliminare dell'area.

L'area dedicata alla sperimentazione viene scelta in una zona al limite del confine aziendale (fig. 4.1), compresa nella zona produttiva situata tra la via Selice e la via Laguna. Su richiesta di C.A.R. è stato effettuato uno studio geologico di massima tetso a valutare l'idoneità edificatoria per tale ambito.

L'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. 4.2). La prova localizzata vicino al ciglio di cava evidenzia uno spessore del riporto pari a 4,6 m, la penetrometria identificata dalla sigla CPTU- DPSH2 invece attraversa 10 m di terreni di riporto.

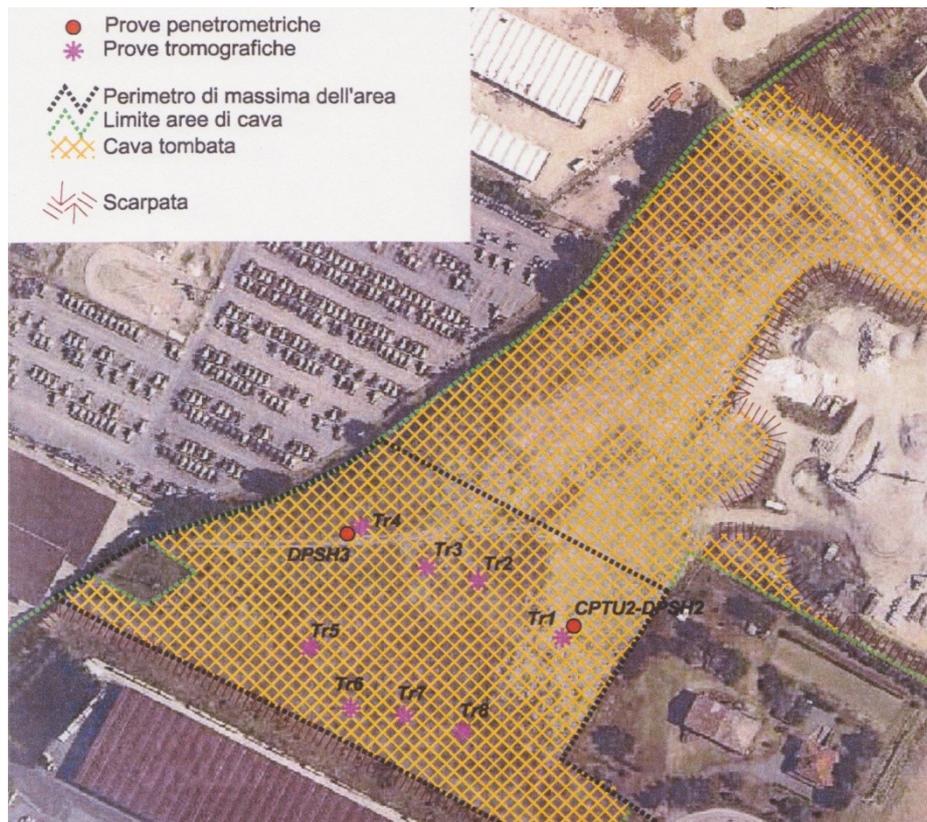


Fig. 4.2: Localizzazione delle prove geognostiche.

Le caratteristiche del materiale di riempimento rivestono grande importanza poiché tale materiale costituirà il sottofondo del rilevato. In seguito a prove di laboratorio, si è rilevato che il materiale di riempimento si presenta fondamentalmente come terreno argilloso. Si individuano abbastanza frequentemente anche blocchi di roccia che possono raggiungere anche dimensioni di 50 cm e frammenti di calcestruzzo.

Il materiale presente in loco è soprattutto materiale di riporto che è stato accumulato nel corso degli anni, le sue scarse qualità sono riscontrate nelle successive prove di laboratorio attraverso analisi granulometrica e limiti di Atterberg.



Fig. 4.3: Frammenti di roccia in sito.

Lo spessore dello strato di riporto, una volta allontanati dall'ex ciglio di cava è piuttosto regolare; per il posizionamento definitivo del rilevato, quindi, viene scelto un punto piuttosto lontano dal ciglio di cava, parallelamente alla scarpata, affinché le condizioni al contorno siano più omogenee possibile.

In seguito all'analisi granulometrica sul materiale di sottofondo prelevato in sito e testato in seguito nel laboratorio di strade della facoltà di Ingegneria dell'università di Bologna, si è ricavata la classificazione del terreno, parametro fondamentale per capirne le caratteristiche di portanza.

I risultati della classificazione sono i seguenti:

-Classifica delle terre (CNR-UNI 10006) Classificazione : A7-6

Classificazione generale	Terre ghiaio - argillose Frazione passante allo staccio 0.075 UNI 2332 ≤ 35%						Terre limo - argillose Frazione passante allo staccio 0.075 UNI 2332 > 35%						Torbe e terre organiche palustri
	A 1		A 3	A 2			A 4	A 5	A 6	A 7		A 8	
Sottogruppo	A 1-a	A 1-b		A 2-4	A 2-5	A 2-6	A 2-7				A 7-5	A 7-6	
Analisi granulometrica Frazione passante allo staccio													
2 UNI 2332 %	≤ 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,4 UNI 2332 %	≤ 30	≤ 50	> 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,075 UNI 2332 %	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	> 35	> 35	> 35	> 35	> 35	> 35
Caratteristiche della frazione passante allo staccio 0,4 UNI 2332													
Limite liquido	-	-	-	≤ 40	> 40	≤ 40	> 40	≤ 40	> 40	≤ 40	> 40	> 40	> 40
Indice di plasticità	≤ 6		N.P.	≤ 10	≤ 10	> 10	> 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	> 10	> 10	> 10
Indice di gruppo	0		0	0			≤ 4	≤ 8	≤ 12	≤ 16	≤ 20		
Tipi usuali dei materiali caratteristici costituenti il gruppo	Ghiaia o breccia, ghiaia o breccia sabbiosa, sabbia grossa, pomice, scorie vulcaniche, pozzolane		Sabbia fina	Ghiaia e sabbia limosa o argillosa			Limi poco compressibili	Limi fortemente compressibili	Argille poco compressibili	Argille fortemente compressibili mediamente plastiche	Argille fortemente compressibili fortemente plastiche	Torbe di recente o remota formazione, detriti organici di origine palustre	
Qualità portanti quale terreno di sottofondo in assenza di gelo	Da eccellente a buono						Da mediocre a scadente						Da scartare come sottofondo
Azione del gelo sulle qualità portanti del terreno di sottofondo	Nessuna e lieve			Media			Molto elevata	Media	Elevata	Media			
Ritiro o rigonfiamento	Nullo			Nullo o lieve			Lieve o medio	Elevato	Elevato	Molto elev.			
Permeabilità	Elevata			Media o scarsa			Scarsa o nulla						
Identificazione dei terreni in sito	Facilmente individuabili a vista		Aspri al tatto. Incoerenti allo stato asciutto	La maggior parte dei granuli sono individuabili ad occhio nudo. Aspri al tatto. Una tenacità media o elevata allo stato asciutto indica la presenza di argilla.			Reagiscono alla prova di scuotimento*. Polverulenti o poco tenaci allo stato asciutto. Non facilmente modellabili allo stato umido.	Non reagiscono alla prova di scuotimento*. Tenaci allo stato asciutto. Facilmente modellabili in bastoncini sottili allo stato umido.					Fibrosi di color bruno o nero. Facilmente individuabili a vista.

* Prova di cantiere che può servire a distinguere i limi dalle argille. Si esegue scuotendo nel palmo della mano un campione di terra bagnata e comprimendolo successivamente fra le dita. La terra reagisce alla prova se, dopo lo scuotimento, apparirà sulla superficie un velo lucido di acqua libera, che scomparirà comprimendo il campione fra le dita.

Fig. 4.4: Classificazione delle terre C.N.R.-U.N.I. 10006

Sulla base della sopracitata classificazione, si è riscontrato che la tipologia di terra in sito è un *Argilla fortemente compressibile* ed è un materiale assolutamente plastico; essendo il sito prescelto caratterizzato da materiale di riporto era ampiamente prevedibile la scarsa qualità del sottofondo.

Infatti, le capacità di portanza dei terreni con classificazione *A7-6* sono molto scadenti e non sarebbero assolutamente adatte a rivestire il ruolo di sottofondo stradale.

La successive prove di laboratorio sono i limiti di Atterberg, i quali indicano il valore limite del contenuto d'acqua per il quale si registra una transizione dello stato fisico del terreno. In particolare si possono distinguere quattro possibili stati fisici in funzione della consistenza, in ordine crescente del contenuto di acqua, essi sono:

- solido
- semisolido
- plastico
- liquido

Il campione in oggetto ha dato i seguenti risultati:

- *Limiti di consistenza Atterberg (CNR-UNI 10014)*
 - *limite liquido (%)*: 41,38
 - *limite plastico (%)*: 21,81
 - *indice plastico*: 19,6

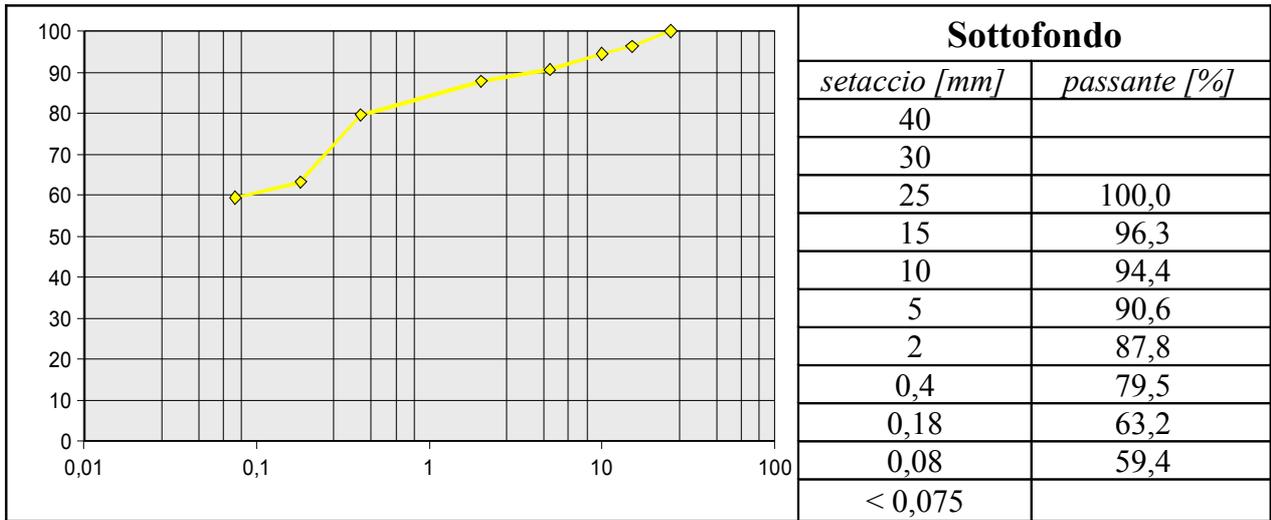


Fig. 4.5: Granulometria del sottofondo (linea di colore giallo).

4.3 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 sotto. Come precedentemente accennato, il rilevato sperimentale è suddiviso in quattro campi di lunghezza 15 metri e larghezza 5 metri; ogni campo è composto da uno dei materiali C&D precedentemente classificati.

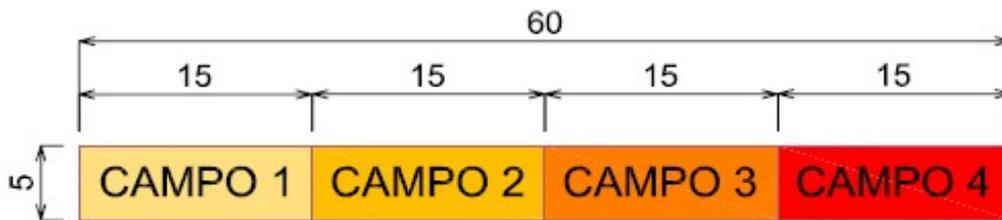


Fig. 4.6: Pianta quotata del rilevato (allegato A1).

Tab. 4.1: Scavo di sbancamento.

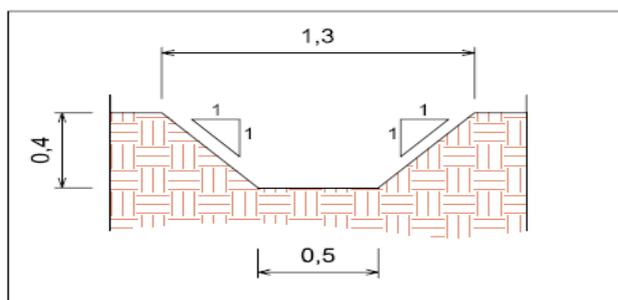
Distanza ciglio scavo – scarpata	5 m
Lunghezza dello scavo	60 m
Larghezza al fondo scavo	5 m
Profondità dello scavo	0,4 m
Inclinazione della scarpata	2:3
Pendenza del fondo scavo	2 %

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 allo stesso tempo la lunghezza dei fossi di scolo. È fondamentale aver un buon sistema di scolo che sia in grado di smaltire le acque e non permetta la creazione di ampi specchi d'acqua che potrebbero danneggiare la struttura. Vediamo allora le caratteristiche del sistema di scolo:

Tab. 4.2: Sistema di scolo.

<i>Lunghezza dei fossi</i>	<i>5 m</i>
<i>Interdistanza dei fossi</i>	<i>5 m</i>
<i>Inclinazione della scarpata</i>	<i>1:1</i>
<i>Pendenza</i>	<i>2 %</i>

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



Sezione C-C: fosso di scolo

Fig. 4.7: Sezione C-C da progetto e realizzazione effettiva.

Infine riportiamo le caratteristiche del rilevato:

Tab. 4.3: Rilevato.

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

Il rilevato, quindi, viene ad essere costituito dalla sovrapposizione di due strati successivi di 20 cm dello stesso materiale che vengono posati al di sopra del sottofondo argilloso e dopo ogni stesa adeguatamente compattati.

Nella figura si vede la sezione trasversale così come è stata realizzata:

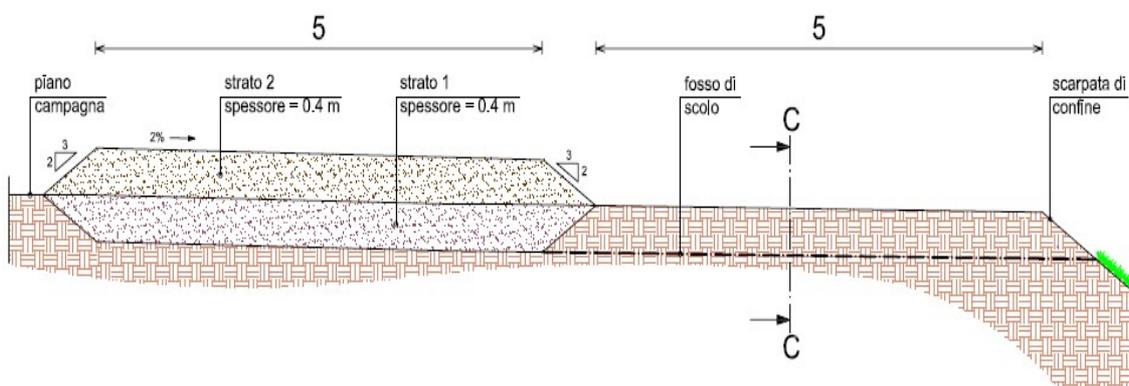


Fig. 4 8: Sezione trasversale del rilevato.

Di seguito, il computo dei volumi di materiale necessario alla realizzazione dell'opera.

Tab. 4.4: Computo dei volumi di materiale.

RILEVATO			
Materiale 1 – Strato 1	34,8 m ³	Materiale 1	70,0 m ³
Materiale 1 – Strato 2	35,2 m ³		
Materiale 2 – Strato 1	33,6 m ³	Materiale 2	67,2 m ³
Materiale 2 – Strato 2	33,6 m ³		
Materiale 3 – Strato 1	33,6 m ³	Materiale 3	67,2 m ³
Materiale 3 – Strato 2	33,6 m ³		
Materiale 4 – Strato 1	34,8 m ³	Materiale 4	70,4 m ³
Materiale 4 – Strato 2	35,6 m ³		

Tutti i materiali sono prelevati all'interno della stessa azienda e sono stesi in sito con l'ausilio di mezzi e personale fornito dall'azienda stessa.

4.4 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Gli strumenti utilizzati sono stati forniti dall'Università di Bologna e da quella di Pisa attraverso i rispettivi Laboratori di Strade e da BOMAG ITALIA; in particolare per un'analisi più efficace delle capacità di portanza dei 3 strati sono stati usati tre tipologie differenti di LWD che si distinguono fra loro per differenti caratteristiche tecniche:

- Light Falling Weight Deflectometer ZFG 2000 Zorn (Bologna)
- Light Falling Weight Deflectometer Terratest 3000 (Pisa)
- Light Falling Weight Deflectometer Dynatest (Pisa)

Il rullo prescelto per effettuare la compattazione IC (*Intelligent Compaction Control*), precedentemente citata nel capitolo 2, è stato fornito da BOMAG ITALIA:

- Rullo con sistema Variocontrol Bomag BW213 integrato con sistema BTM plus

Tutta la strumentazione essenziale per la prova densità umidità è stata fornita dal laboratorio di strade dell'Università di Bologna:

- Motopicco elettrico
- 2 Becker 2000cmc e relativa sabbietta
- 1 Becker 1000cmc e relativa sabbietta
- Generatore Honda

Inoltre, sono state effettuate diverse Prove DCP con l'ausilio di un Dynamic Cone Penetrometer (Pisa), per misurare il livello e l'uniformità verticale dell'addensamento.



Fig. 4.9: Rullo con sistema Variocontrol utilizzato presso C.A.R.



Fig. 4.10: LWD usati presso C.A.R: da sinistra LFWD Dynatest, LFWD Zorn, LFWD Terratest

Dopo aver analizzato nello specifico il sistema di compattazione CCC nel capitolo 2, ora segue una breve introduzione ad un altro strumento utilizzato in alcuni test effettuati sui 4 campi in occasione delle fasi di testing sui materiali: l'LFWD (noto anche per la sua maneggevolezza e trasportabilità come *Portable Falling Weight Deflectometer* – P.F.W.D.). Esso 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. 4.11: LWD Terratest utilizzato per la fase di test sul campo.

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 LWD. In commercio esistono diverse apparecchiature del tipo LWD 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 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 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) Zorn o Terratest 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.

Andiamo a vedere ora le principali caratteristiche tecniche dei LWD che sono stati utilizzati nel Campo prove di Imola.

Tab. 4.5: Zorn (caratteristiche).

Descrizione	LFWD ZFG 2000 Zorn
Peso	10/15 kg
Altezza di caduta	720 mm
Diametro della piastra	300 mm
Spessore della piastra	20 mm
Forza di picco	7.07/10.6 kN
Sensore	Accelerometro
Modulo	$E_{vd} = 22,5/s$

Fig. 4.12: Lwd Zorn.



Tab. 4.6: Caratteristiche LWD Dynatest.

Caratteristiche	LWD Dynatest	Caratteristiche	LWD Terratest
Spessore/Diametro piastra	17mm/ 150, 200, 300 mm	Diametro piastra	300 mm
		Peso	10/15 kg
Forza di picco	Variabile	Sensore	Accelerometro
		Profondità indagine	30 a 60 cm
Sensore	Geofono	Chip card per la memorizzazione di 250 prove	



Fig. 4.13: LWD Dynatest con il particolare dei geofoni nel riquadro a destra.

Le principali differenze sono così riassumibili: Zorn e Terratest utilizzano 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.

Altro strumento utilizzato è 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 poco compattati in quella che è la successione dei vari strati .

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 soggetti a minor compattazione.



Fig. 4.14: Dynamic Cone Penetrometer (DCP).

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 misura l'affondamento e va ad infingersi nel terreno con l'ausilio di una punta. 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 è anch'essa di acciaio inossidabile ed 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'angolatura è di 60° con una tolleranza di un grado.

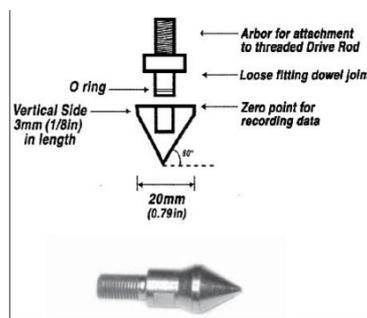


Fig. 4.15: Punta del Dynamic Cone Penetrometer.

4.5 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 viene riportata la suddivisione dei lavori per giornate e la successione delle fasi che hanno portato alla costruzione del Campo prove. Il cronoprogramma è stato definito in collaborazione tra le Università di Pisa e Bologna e i tecnici che si occupano di ricerca e sviluppo di Bomag Germania. Come è riscontrabile in tabella il cronoprogramma è stato molto intenso ed ha visto il susseguirsi di fasi di costruzione durante la mattina e di test durante il pomeriggio con l'ausilio di tutti gli operatori chiamati in causa.

Tab. 4.7: Cronoprogramma dei lavori.

<i>Fase</i>	<i>Giorno</i>
<ul style="list-style-type: none"> ● Delimitazione dell'area di cantiere ● Tracciamento del campo sperimentale ● Scavo dei fossi ● Sbancamento 	01/07/2010 A cura di UNIBO e C.A.R.
RIUNIONE PRELIMINARE presso C.A.R.	05/07/2010
<ul style="list-style-type: none"> ● TESTING DEL SOTTOFONDO, IN SEGUITO A RULLATURA 	06/07/2010
<ul style="list-style-type: none"> ● Posa dello strato 1 e livellamento dei 4 campi (<i>mattina</i>) ● RULLATURA (<i>mattina</i>) ● TESTING DELLO STRATO 1 (<i>pomeriggio</i>) 	07/07/2010
<ul style="list-style-type: none"> ● Posa dello strato 2 e livellamento dei 4 campi (<i>mattina</i>) ● RULLATURA (<i>mattina</i>) ● TESTING DELLO STRATO 2 (<i>pomeriggio</i>) 	08/07/2010

Di seguito, sono descritte nel dettaglio tutte quelle che sono state le fasi di costruzione del campo descrivendo passo, passo come si è svolto l'operato durante le giornate del 1 e 5, 6, 7, 8 luglio.

4.5.1 FASE 1 – DELIMITAZIONE DELL'AREA DI CANTIERE



Fig. 4.16: Accesso al cantiere e dotazioni di sicurezza fornite da C.A.R.

I lavori di delimitazione dell'area di cantiere iniziano il primo di luglio 2010 durante la mattinata tutta la zona interessata dalle lavorazioni viene segnalata con picchetti ogni 5 m e nastro. I cartelli di sicurezza obbligatori per delimitare le varie aree di cantieri e nel rispetto delle norme sulla sicurezza nei luoghi di lavoro sono affissi ai paletti di recinzione.

4.5.2 FASE 2 – TRACCIAMENTO DEL CAMPO SPERIMENTALE

Il tracciamento del campo è stato realizzato dal personale UNIBO nelle persone di Marco Albicini, Ing. Cesare Sangiorgi e Ing. Claudio Lantieri. 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 e sono 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. 4.17: A sinistra in primo piano è ben visibile il picchetto da 1,6 m posto ogni 15 m a destra il picchetto da 0.



4.5.3 FASI 3 E 4 – SCAVO DEI FOSSI E SBANCAMENTO



Fig. 4.18: Scavo dei fossi di scolo.

I lavori procedono con un preliminare sbancamento ad opera dell'escavatore, come si vede in figura, dove si è provveduto allo scavo dei fossi. Si è cercato per quanto possibile di dare una pendenza costante verso la scarpata in modo da favorire il deflusso delle acque meteoriche.

Successivamente alla creazione dei fossi sono iniziati i lavori di sbancamento dell'area adibita per la costruzione del rilevato, area precedentemente delimitata. Scopo di tale preliminare sbancamento sarà quindi allontanare quanto più materiale possibile senza alterare né intaccare sensibilmente la

superficie del sottofondo, mantenendola il più possibile regolare e senza buche, con una pendenza uniforme verso il lato Imola, cioè il terrapieno, in modo da favorire lo scolo delle acque piovane.

Quest'opera di creazione dello scavo si articola in due giornate:

- Nella prima giornata (il 1° luglio) si procede con un escavatore ad una grossolana opera di sbancamento dei primi cm di terreno (al termine della giornata il sito si presenta come nella figura successiva, dove si può notare il terreno accumulato, con l'ausilio di una benna, a bordo scavo);



Fig. 4.19: Sbancamento.



Fig. 4.20: Vista dello scavo al termine della prima giornata.

- Nella seconda giornata (il 5 luglio) vengono ultimati i lavori di sbancamento con l'ausilio di un mini escavatore che, adottando una livellazione laser, permette di stabilire il dislivello da colmare in senso longitudinale da un estremo all'altro dello scavo, consentendo di arrivare alla profondità desiderata di circa 40 cm. Oltre alla pendenza longitudinale viene conferita la pendenza di scolo verso la scarpata pari al 2%.

L'allontanamento del materiale che si interpone fra le trincee viene realizzato tramite escavatore.

Prima del meeting preliminare, il sito si presenta come nella figura sottostante in cui tutte le geometrie sono rispettate e la superficie del sottofondo si presenta regolare.



Fig. 4.21: Vista dello scavo

al termine del 5 luglio.

4.5.4 RIUNIONE PRELIMINARE DEL PERSONALE

La sera prima dell'inizio dei test il personale universitario della facoltà di Pisa e Bologna, i tecnici Bomag Germania e Italia e la direzione C.A.R. si sono incontrati nella sede dell'azienda. I punti all'ordine del giorno sono stati:

- spiegazione del cronoprogramma, entrando nel dettaglio di tutte le fasi costruttive delle giornate del 6, 7, 8 e 9 luglio;
- esposizione della strumentazione che verrà utilizzata per le fasi di testing;
- delucidazioni e chiarimenti su alcuni dubbi sorti tra i tecnici in merito alla calibrazione degli strumenti.



Fig. 4.22: Riunione preliminare presso la sede C.A.R.

Dopo la prima fase di spiegazione e delucidazione si è andati sul Campo prove con tutti i tecnici che sarebbero intervenuti nelle giornate successive per avere una prima presa visione dell'insieme e per fugare alcuni dubbi in merito alle caratteristiche tecnico-geometriche del sito.



Fig. 4.23: Presa visione successiva a riunione preliminare nella tarda serata di lunedì 5 luglio.

4.5.5 TARATURA DELLA STRUMENTAZIONE LWD

Prima di iniziare ogni operazione sul rilevato si procede a “tarare” la strumentazione LWD. La taratura è un'operazione necessaria, poiché gli LWD hanno differenti curve di carico e valori di picco, quindi questa fase è necessaria per poter poi confrontare i risultati dei vari LWD tra loro. Wolfgang e Hans i due tecnici del settore ricerca e sviluppo di Bomag-Germania effettuano un piccolo foro nel terreno. Con l'ausilio di una delle 6 celle di pressione a disposizione si vanno a tarare i tre LWD, ricoprendo con la sabbia da prima la cella in modo da uniformare la superficie della stessa che è a forma conica ed in seguito appoggiando al di sopra della cella la piastra di carico del LWD. In seguito attraverso il computer centrale vengono registrati tutti i valori di pressione provenienti dalla cella e si procede alla calibrazione. La calibrazione è eseguita misurando i valori di picco di pressione per ogni battuta dei vari LWD, dal momento che la pressione viene



Fig. 4.24: Fase di taratura a sinistra: Posa della cella di pressione e stesa sabbia; a destra: Registrazione con LWD Dynatest. registrata dalla cella sottostante e visualizzata sul computer. In questo modo si vanno a confrontare i differenti valori di picco e le differenti curve di carico dei LWD.

4.5.6 RULLATURA

Subito dopo la taratura strumentale descritta in precedenza, si è affrontata, durante la mattinata, la compattazione del sottofondo (BOMAG BTM con strumentazione BW213). Nel successivo capitolo 5 saranno analizzati in maniera più approfondita tutte le fasi di rullatura e quelli che sono i risultati.



Fig. 4.25: Rullatura del sottofondo.

In seguito alla rullatura si procederà con le indagini in programma per il giorno 6 luglio, che saranno trattate in maniera più approfondita al paragrafo 4.6.1. La fase di testing e di prove sul campo viene terminata in serata e con essa si concludono i lavori del 6 luglio.

.5.7 POSA DELLO STRATO 1 E LIVELLAMENTO DEI QUATTRO CAMPI



Fig. 4.26: Posa dello strato 1.

La mattina del 7 luglio si procede alla stesa del primo strato di 40 cm di materiale. La stesa è risultata difficoltosa a causa della mole, che come abbiamo visto nella tabella relativa alle volumetrie, ingente ed, inoltre, non avendo a disposizione macchinari atti ad una veloce livellamento, questo deve essere fatto a mano. Nella figura si vede appunto l'autocarro scaricare il macinato misto a fianco della breccia di traversine. Con l'ausilio dell'escavatore il materiale verrà grossolanamente livellato per poi essere rifinito, appunto, a mano cercando di ottenere un grossolano livellamento. Il livellamento è molto importante per ottenere il miglior grado di compattazione dopo la passata del rullo, per fare ciò è fondamentale che la stesa sia omogenea lungo i due lati, A14 e Imola.

*Fig.
Stesa del
materiale*



in



*4.27:
sito e*

successivo livellamento manuale.

4.5.8 RULLATURA SUCCESSIVA A POSA PRIMO STRATO

In seguito alla posa del primo strato di 40 cm di materiale, viene effettuata la rullatura, con le modalità di progetto, per ottenere il miglior grado di compattazione. Le procedure di compattazione vengono decise in comune accordo tra l'Ing. Cesare Sangiorgi e Hans Klubert, il quale si occupa in prima persona di eseguire la compattazione con rullo Bomag.



Fig. 4.28: Rullatura del primo strato.

In seguito alla rullatura si procederà con le indagini in programma per il giorno 07 luglio e concluse queste ultime sarà ultimata la seconda giornata di lavori.

4.5.9 POSA DELLO STRATO 2 E LIVELLAMENTO DEI 4 CAMPI

Nella mattinata dell'8 luglio termina la posa del secondo strato di materiale. La stesa di quest'ultimo strato avviene seguendo le stesse fasi viste precedentemente: vengono scaricati dai camion i volumi di progetto, livellati poi grossolanamente con escavatore e rifiniti a mano.

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.

Fig. 4.29: Livellazione rilevato con escavatore e successiva piattatura manuale.



4.5.10 RULLATURA SUCCESSIVA POSA SECONDO STRATO E FINE LAVORI

Dopo la costruzione del rilevato, con gli stessi materiali dello strato uno, si è proceduto ad una successiva rullatura dei 4 campi. A differenza delle precedenti due giornate, a causa della scarsa umidità del secondo strato, si è deciso di effettuare una prima rullatura seguita da una umidificazione del rilevato e da una veloce seconda rullatura: un livello adeguato di umidità del materiale, a differenza di quello secco, consente un migliore addensamento e compattazione.



Fig. 4.30: A sinistra, prima rullatura; a destra, umidificazione precedente a seconda rullatura.

Anche in questo caso, a conclusione dei lavori di compattazione CCC, si è proceduto alla fase di testing sul rilevato che si è conclusa a tarda serata.

Nella figura sottostante è visibile il campo nella serata dell'8 luglio al termine dei lavori sul campo prove di Imola. Come si evince dalla figura, si è deciso di lasciare il rilevato intatto per permettere eventuali ulteriori prove nei mesi successivi.

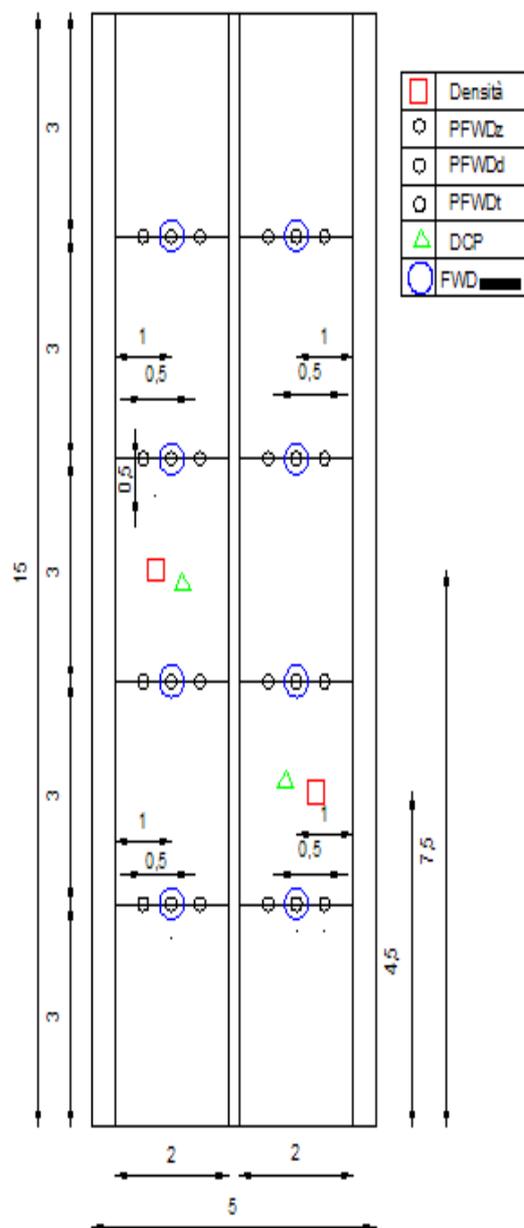


Fig. 4.31: Campo prove a lavori ultimati.

SCHEMA DI RILIEVO DELLE PROVE – FASI DI TESTING E OPERATORI

Lo schema delle prove da effettuare giornalmente, prevede per ognuno dei quattro campi e per lo strato uno e due:

- prove di rullatura con sistema di compattazione CCC (*Continuous Compactation Control*);
- 2 prove di densità/umidità;
- 24 determinazioni di portanza con sistema LWD (Zorn, Dynatest, Terracontrol);
- 2 prove DCP;
- 8 prove FWD.



- le campagne di indagine sono state condotte secondo le modalità giornaliere riportate nella tabella sottostante, per quanto riguarda le prove LWD secondo la geometria a griglia vista in precedenza;

Tab. 4.8: Prove LWD eseguite nelle tre giornate di Testing.

<i>Data rilievo</i>	<i>Campi esaminati</i>	<i>Geometria del rilievo</i>	<i>Strumento</i>
6 LUGLIO 2010	Campo 1-2-3-4	Griglia Sottofondo	LWD

7 LUGLIO 2010	Campo 1-2-3-4	Griglia Layer 1	LWD
8 LUGLIO 2010	Campo 1-2-3-4	Griglia Layer 2	LWD

- Le campagne di indagine per quanto riguarda le prove di densità/umidità e DCP sono state condotte secondo le modalità giornaliere riportate in tabella e nei punti che sono stati indicati nella figura precedente.

Tab. 4.8: Prove densità/umidità e DCP.

<i>Data rilievo</i>	<i>Campi esaminati</i>	<i>Geometria del rilievo</i>	<i>Strumento</i>
6 LUGLIO 2010	Campo 1-2-3-4	Sottofondo	Densità DCP
7 LUGLIO 2010	Campo 1-2-3-4	Layer 1	Densità DCP
8 LUGLIO 2010	Campo 1-2-3-4	Layer 2	Densità DCP

4.6.1 INDAGINE DEL 6 LUGLIO 2010 LWD, DCP.

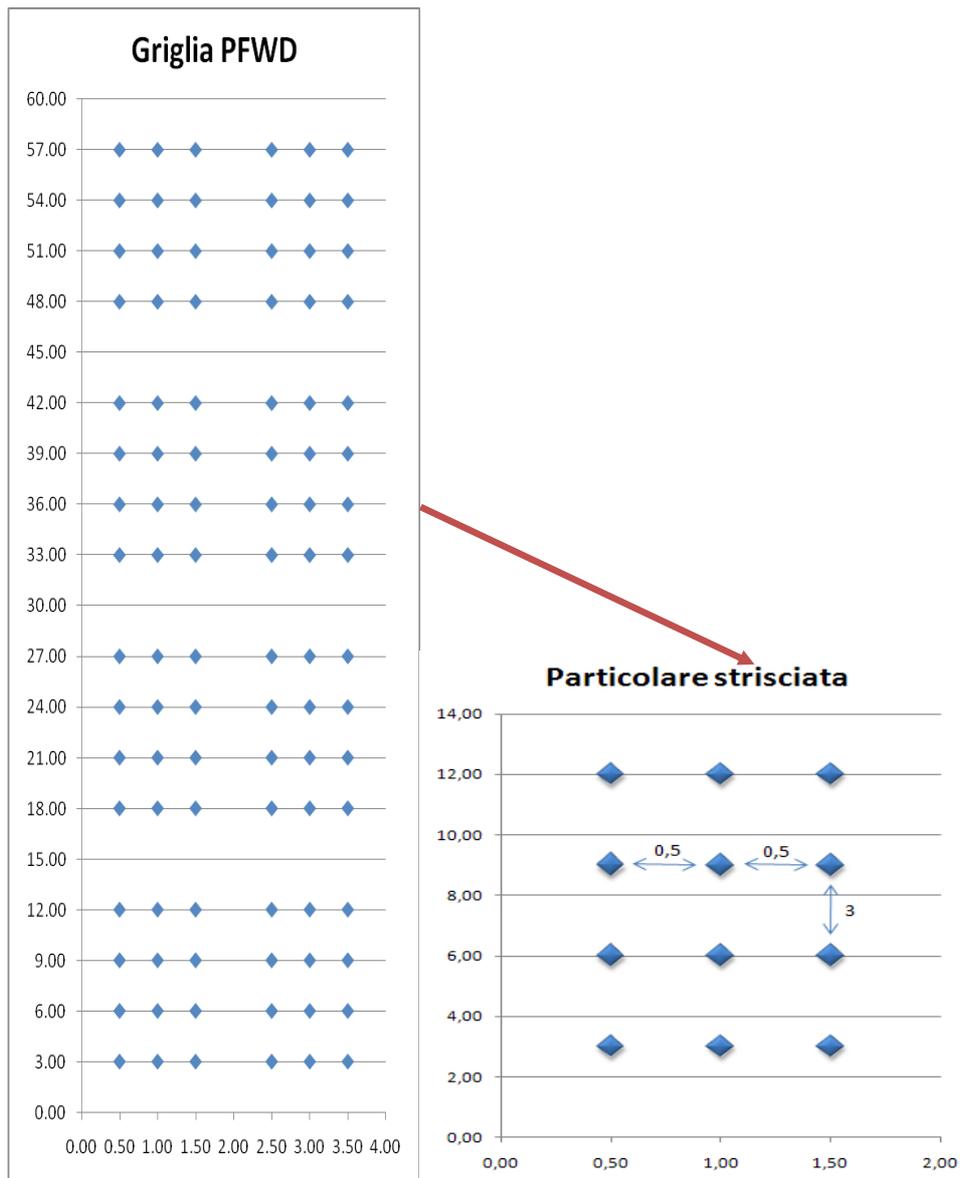
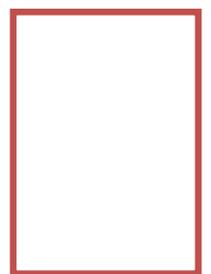


Fig. 4.32: Griglia LFWD.

	SOTTOFONDO	
	Lato "A14"	Lato "Imola"
CAMPO 1	CS1-1	CS1-2
CAMPO 2	CS2-1	CS2-2
CAMPO 3	CS3-1	CS3-2
CAMPO 4	CS4-1	CS4-2



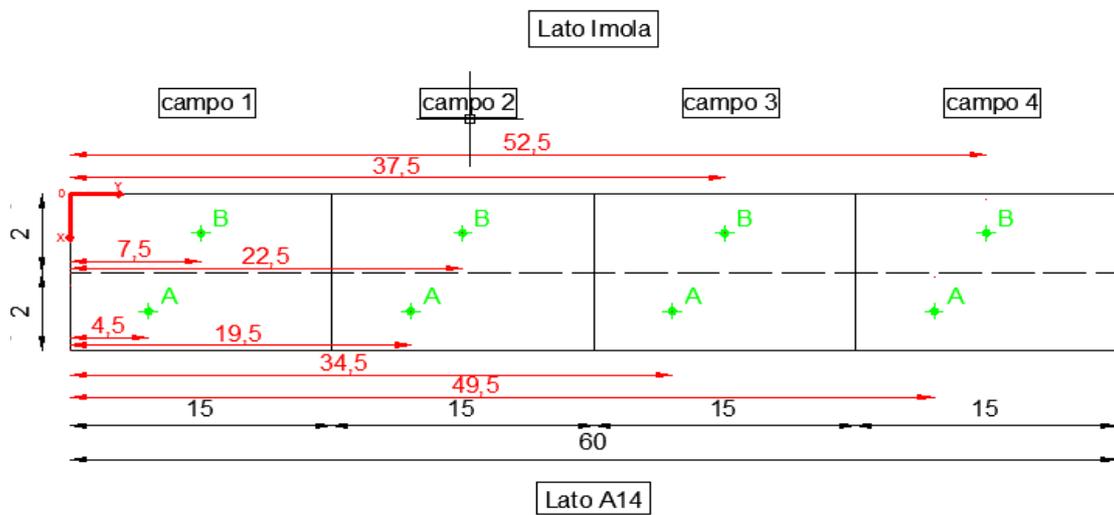


Fig. 4.33: Prove DCP.

In figura sono elencate le prove DCP alle progressive distanze di:

- 4,5 m nel punto A
- 7,5 m nel punto B
- 19,5 m nel punto A
- 22,5 m nel punto B
- 34,5 m nel punto A
- 37,5 m nel punto B
- 49,5 m nel punto A
- 52,5 m nel punto B

4.6.2 INDAGINE DEL 7 LUGLIO 2010 LWD, DCP.

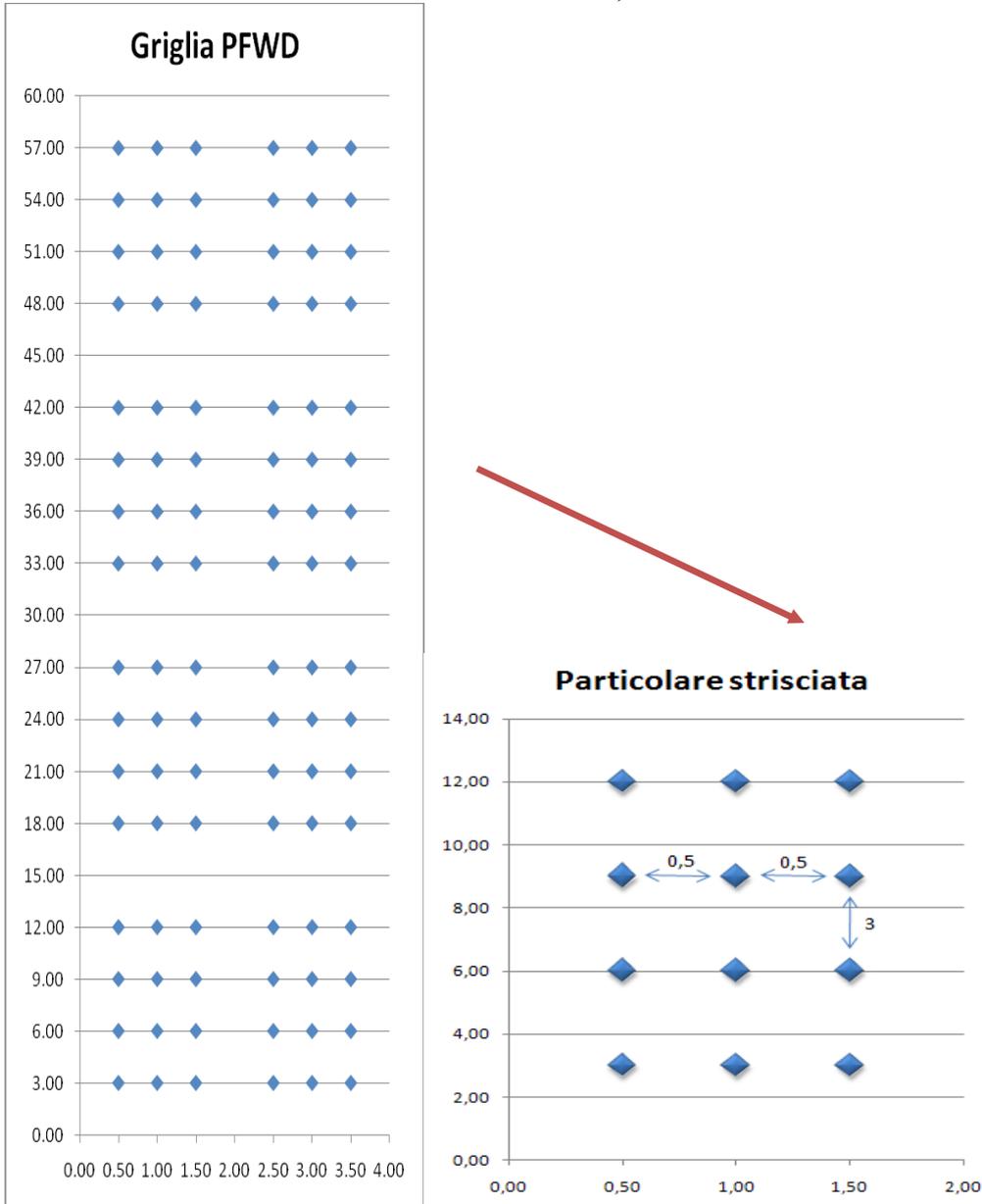
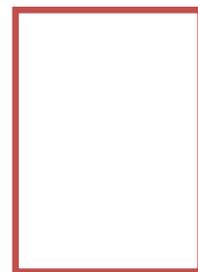


Fig. 4.34: Griglia LWD.

	LAYER 1	
	Lato "A14"	Lato "Imola"
CAMPO 1	L1C1-1	L1C1-2
CAMPO 2	L1C2-1	L1C2-2
CAMPO 3	L1C3-1	L1C3-2
CAMPO 4	L1C4-1	L1C4-2



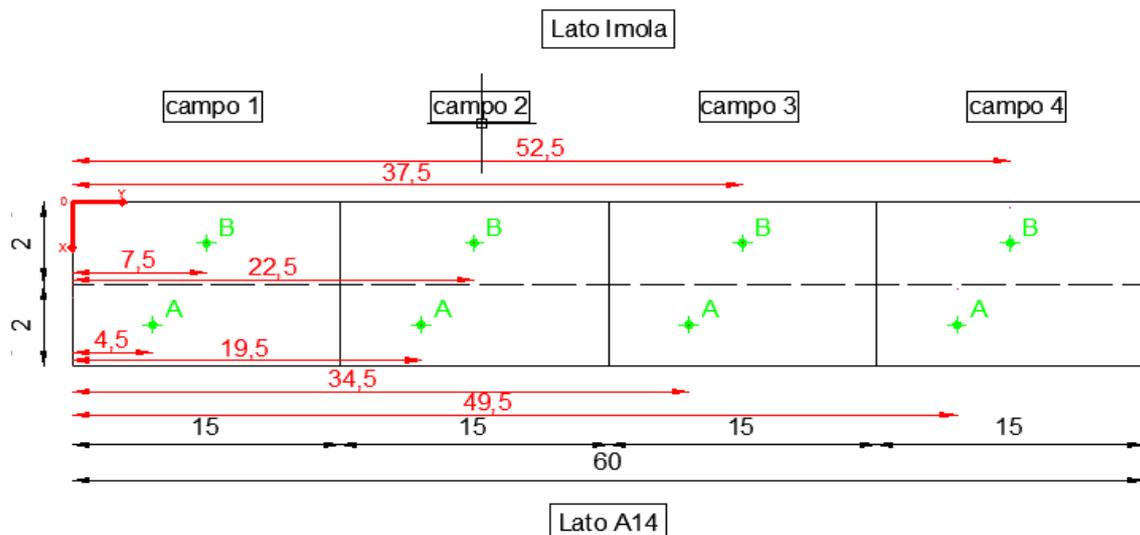


Fig. 4.35: Prove DCP.

In figura sono elencate le prove DCP alle progressive distanze di:

- 4,5 m nel punto A
- 7,5 m nel punto B
- 19,5 m nel punto A
- 22,5 m nel punto B
- 34,5 m nel punto A
- 37,5 m nel punto B
- 49,5 m nel punto A
- 52,5 m nel punto B

4.6.3 INDAGINE DELL'8 LUGLIO 2010

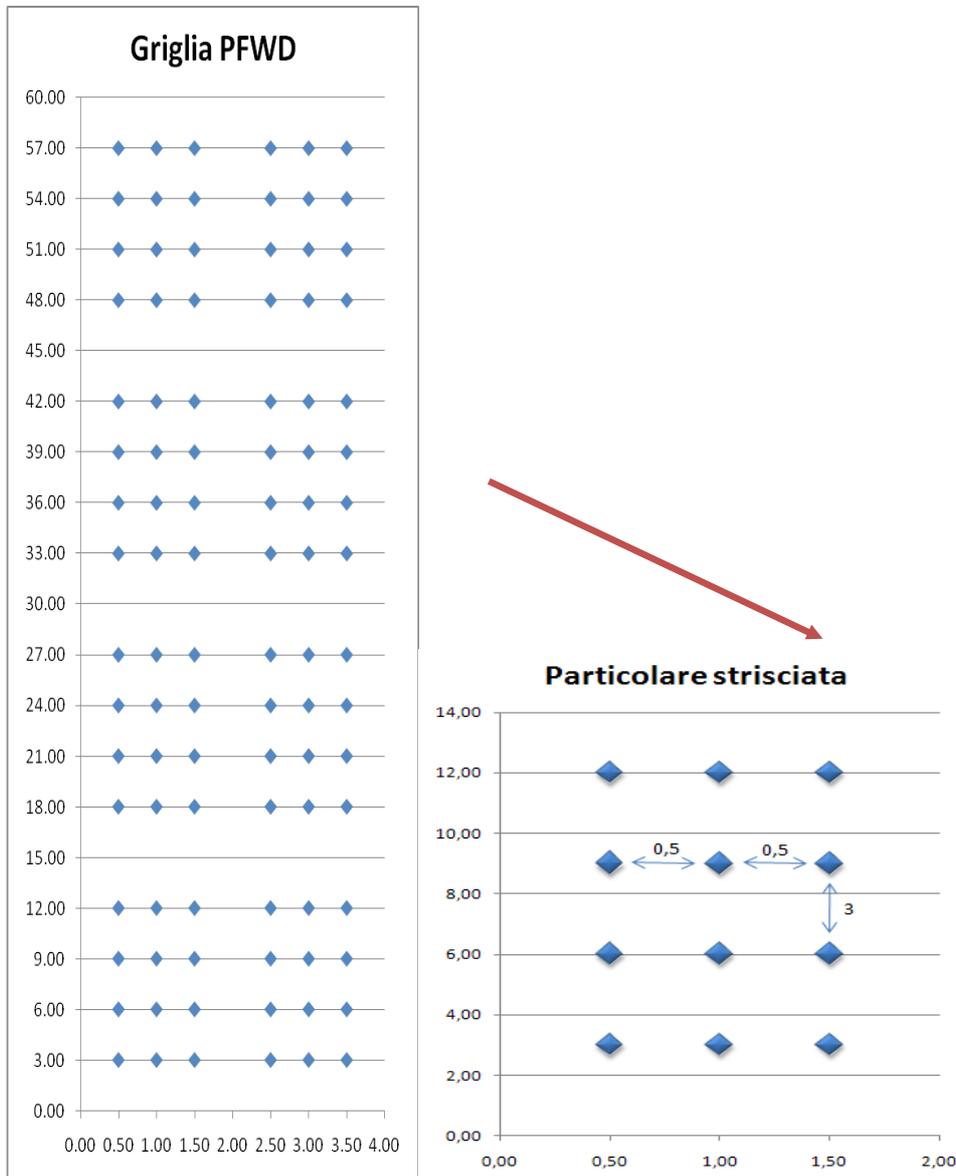
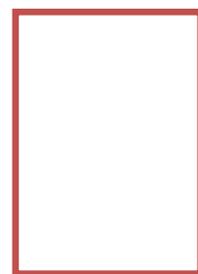


Fig. 4.36: Griglia LFWD.

	LAYER 2	
	Lato "A14"	Lato "Imola"
CAMPO 1	L2C1-1	L2C1-2
CAMPO 2	L2C2-1	L2C2-2
CAMPO 3	L2C3-1	L2C3-2
CAMPO 4	L2C4-1	L2C4-2



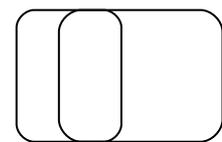
Capitolo 5

ANALISI SULLA COMPATTAZIONE CON RULLO BOMAG

5.1 PREMESSA

Nei capitoli precedenti si sono analizzate le caratteristiche del campo, in particolar modo concentrando l'attenzione sui materiali impiegati e sulle loro proprietà ed in secondo luogo sulle attrezzature usate nelle varie fasi di costruzione del campo. Strumenti che sono stati adoperati per testare i materiali di tipo C&D. Si concentra l'attenzione sui risultati forniti dal Rullo Bomag Variocontrol BW 213, integrato con sistema BTM Plus. Strumento utilizzato per la compattazione CCC, manuale, del campo prove di Imola.

Questo tipo di procedura di compattazione, è di fondamentale importanza perché è in grado di restituire dei dati relativi alle fasi di lavoro del rullo. Sul sito in maniera continua e diretta attraverso veri e propri grafici in forma cartacea che rappresentano la variazione dell' E_{vib} . A posteriori come file, in differenti formati, che elencano le variazioni E_{vib} registrate dal rullo durante la passata.



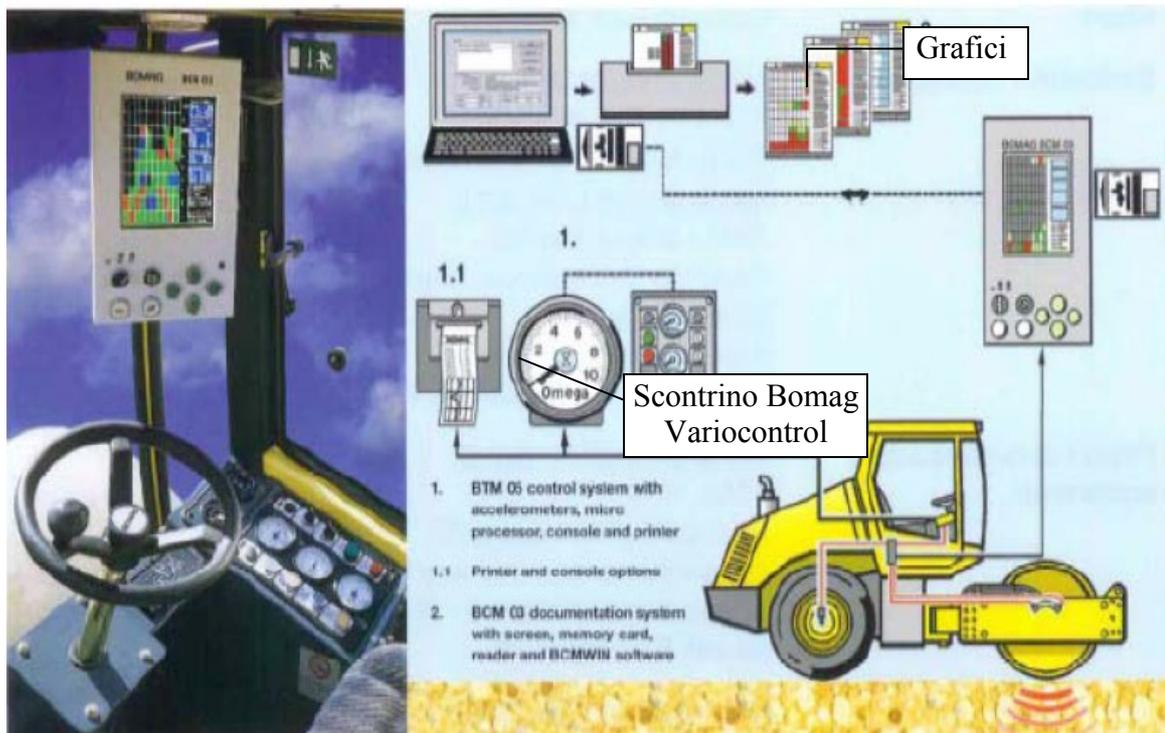


Fig 5.1: Output E_{vib} nei rulli Bomag Variocontrol, e controlli di cabina.

Fig 5.2 Sistema BTM plus di cabina per il controllo continuo della compattazione .



BTM plus con la segnalazione di „pronto“.

Fig 5.1 Output E_{vib} nei rulli Bomag Variocontrol, e controlli di cabina.

5.2 CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E TECNICHE DEL CAMPO SOTTOPOSTO A COMPATTAZIONE.

Come descritto nel precedente capitolo si è deciso di dividere il campo in due “Lati”, uno rivolto verso la città di Imola e per questo motivo chiamato Lato Imola ed uno rivolto verso l'autostrada, chiamato Lato A14. Questa precisazione è di fondamentale importanza per una corretta comprensione dei dati successivi, poiché per evidenti caratteristiche di larghezza del rullo, si è proceduto ad una divisione del campo come si evince nella figura sottostante.



Fig. 5.3 A sinistra: I due lati A14 e Imola

A destra: Operazione di rullatura lato A14

Come è già stato dettagliatamente descritto nel capitolo 4, ricordiamo che il sito ha una lunghezza complessiva di 60 m ed è diviso in 4 campi di 15 metri ciascuno. I quali sono composti da materiale C&D, in particolar modo:

CAMPO 1 - MACINATO MISTO DI PIETRA C.A.R 0/30 mm

CAMPO 2 - STABILIZZATO DI TRAVERSINE 0/30 mm

CAMPO 3 - STABILIZZATO DI CEMENTO (CALCESTRUZZO) 0/30 mm

CAMPO 4 - MISCELA CEMENTO (CLS) E ASFALTO 0/30 mm

La striscia da compattare ha una larghezza di 5 metri, ma l'intero rilevato non verrà sottoposto a compattazione, solo la parte centrale dello stesso, vedi Fig 5.4. Viene così lasciato un margine di un metro a partire dall'esterno del rilevato, che non sarà in seguito sottoposto ad alcuna fase di testing. Come si evince dallo schema delle prove al paragrafo 4.6.1.

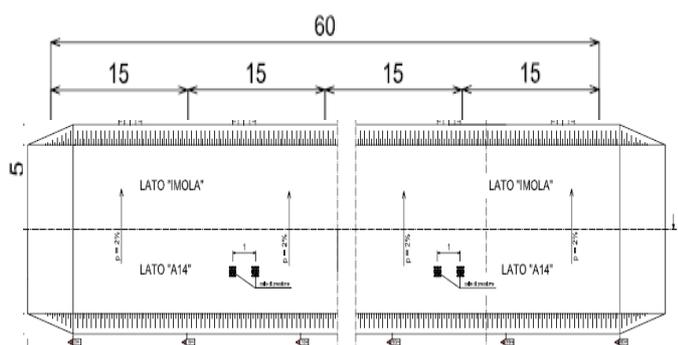


Fig 5.4 Planimetria del campo e margine laterale interno

5.3 COMPATTAZIONE CCC DEL CAMPO SPERIMENTALE

Nelle giornate del 06 07 08 Luglio si è proceduto alla compattazione con rullo Bomag del campo prove, il lavoro come è stato precedentemente menzionato ha visto una prima serie di passate sul Lato A14 e successivamente sul Lato Imola per ciascuno strato, alternando passate vibrato a passate statiche nelle modalità successivamente descritte in tabella 5.1

Bisogna innanzitutto ricordare che le differenti ampiezze di oscillazione producono differenti effetti nel terreno interessato, come è stato precedentemente menzionato. In particolar modo per quanto riguarda la profondità di indagine e l'energia trasferita al terreno. Ma anche il materiale da testare influisce notevolmente, per questo motivo prima di illustrare le modalità delle differenti passate si concentra l'attenzione sul rullo Bomag usato in sito e sulle sue caratteristiche tecniche principali che

hanno influito sulla compattazione. Andiamo a vedere in particolar modo i principali requisiti forniti dalla stessa casa produttrice tedesca in merito al Bomag Variocontrol (BVC) monotamburo BW 213 DH-4 di Imola [1].

Tabella 5.9: Requisiti Bomag BW 213 DH-4

Modello di rullo BW213DH-4-BVC	Quantitativi di materiale orari massimi testati [m³/h]	Spessore dello strato di indagine [m]
<i>Materiale Roccioso</i>	700-1400	1,20
<i>Ghiaia,Sabbia</i>	480-960	0,80
<i>Limo,Argilla</i>	210-420	0,30

Da questa prima tabella si capisce come nel caso di materiali incoerenti di tipo granulare la compattazione è più veloce e si ha una produzione ampiamente maggiore a differenza di materiali fini che sono più difficilmente compattabili come era già stato illustrato in figura 2.10, e come si vedrà in seguito.

Altro punto fondamentale, riguarda gli spessori di terreno che il rullo è in grado di compattare[1] e che vengono elencati in tabella.

Questa è una caratteristica del rullo molto importante, perché incide sulla qualità di compattazione, se siamo in grado di compattare fino agli strati più profondi maggiori benefici avrà la compattazione CCC.

Anche in questo caso si evince come per i materiali granulari i rulli Variocontrol lavorino decisamente meglio rispetto ad argille e limi. Nel caso di questi ultimi materiali la profondità massima di indagine, che viene cioè compattato, è di circa 30cm. Per roccia e ghiaie si aggira invece tra gli 80cm fino addirittura a 1,20 m.

Nel caso di Imola si sono incontrati tutti quanti i vari tipi di materiali elencati precedentemente, infatti ci si è trovati di fronte ad un sottofondo argilloso e ai successivi 2 strati di materiale prevalentemente ghiaioso come si vedrà dai risultati relativi all' E_{vib} .

Altre caratteristiche tecniche importanti del rullo in questione sono quelle relative al sistema eccentrico utilizzato, che nel caso del rullo BOMAG- BW 213 DH-4 [1].

Tabella 5.10: Caratteristiche tecniche del sistema eccentrico

Caratteristiche tecniche del sistema eccentrico	
Variocontrol	Di serie
Frequenza	28 HZ
Ampiezza	0-2,50 mm
Forza centrifuga	365 KN

In particolar modo si concentra l'attenzione sull'ampiezza di oscillazione, che varia tra gli 0 mm e i 2,5 mm, questa gamma di ampiezze risultano di fondamentale importanza per variare la compattazione ed ottenere effetti sempre più efficaci.

Innanzitutto è necessario fare una prima distinzione per quanto riguarda le modalità di compattazione, che possono essere adottate da un qualsiasi rullo Bomag, che sono [2]:

- Automatica
- Manuale

Nella modalità *automatica* l'operatore deve inserire il valore E_{vib} desiderato e il rullo utilizzando la modalità IC, confronta in maniera continua il valore registrato con quello immesso variando in automatico il suo comportamento al fine di arrivare il più vicino possibile al risultato desiderato. Il funzionamento è molto semplice, all'inizio il rullo procede nelle prime passate con ampiezze di oscillazione superiori a 1,9mm, per poi diminuire le stesse con l'avvicinarsi al risultato in modo da non oltrepassare l' E_{vib} richiesto. In questo modo siamo in grado di dare un valore omogeneo del modulo dinamico a tutta l'area interessata. Altra peculiarità della modalità automatica è la sua capacità di evitare la sovra-compattazione. Una volta raggiunto il valore richiesto di E_{vib} l'operatore viene informato tramite il display che non sono più necessari ulteriori passaggi.

Nel caso invece della *manuale*, cioè la modalità CCC, è l'operatore prescelto a decidere quelle che sono le varie ampiezze. L'addetto può scegliere tra 6 settaggi pre-impostati sul rullo Bomag BW 213 DH-4, ad ognuno di essi corrisponde un preciso valore di ampiezza di oscillazione. Una volta impostata la modalità, Manual 4 per esempio, questa rimane costante per tutto il tempo necessario all'ultimazione della passata. Generalmente la manuale viene scelta quando non sono possibili ampiezze elevate, poiché ampiezze oltre i 2 mm possono creare vari disagi a causa delle ampie vibrazioni, con la modalità manuale si preclude ogni rischio.

Per quanto riguarda il caso del campo sperimentale di Imola sono state usate tre modalità tutte manuali, rispettivamente:

- Manual 2, 0,7 mm di oscillazione continua libera del asse del tamburo
- Manual 3, 1,1 mm di oscillazione continua libera del asse del tamburo
- Manual 5, 1,9 mm di oscillazione continua libera del asse del tamburo

Fatta questa fondamentale introduzione si può ora andare a vedere in maniera dettagliata tutte le fasi di compattazione con rullo Bomag sul sottofondo, sul primo strato e sul secondo strato di ulteriori 40 cm.

5.4 MODALITÀ DI COMPATTAZIONE

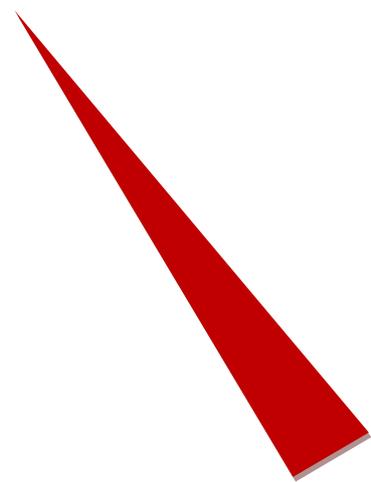




Fig. 5.7: Passate vibrata e statiche; In rosso si evidenzia la striscia rilevata dal rullo Bomag

È necessario prima di elencare la successione delle passate ed i risultati delle stesse, fare una precisazione in merito alle modalità di rilevazione. Infatti la registrazione dell' E_{vib} da parte del rullo Bomag nei due differenti lati, avviene in maniera diversa, se nel lato Imola la passata vibrata viene fatta in un senso, nel lato A 14 viene fatta nel senso opposto. I grafici che vengono presentati di seguito sono stati elaborati sulla base di una ampia serie di dati forniti dai tecnici Bomag-Germania, poiché il rullo grazie alla compattazione CCC (Continuos Compaction Control), fornisce il valore dell' E_{vib} ogni 9/10 cm durante la passata vibrata. Grazie a questo valore quasi continuo, siamo in gradi di analizzare al meglio le caratteristiche dei 4 campi e l'evoluzione della compattazione durante le successive passate.

Il problema principale che si riscontra in questi dati è relativo al fatto che vengono misurati tutti i 60 metri di lunghezza, ma il rullo non è in grado di rilevare anche la variazione dell' E_{vib} in larghezza. Questo è dovuto al fatto che l'accelerometro Bomag si trova sul lato sinistro del tamburo e rileva l' E_{vib} a lato rullo, per cui non è in grado di misurare tutta l'effettiva sezione compattata.

5.4.1 COMPATTAZIONE CCC DEL SOTTOFONDO

Nella giornata del 06 Luglio si è compattato il sottofondo prettamente argilloso, con classificazione A7-6, alternando differenti modalità manual a passate statiche.

Come si è già detto si è effettuata una prima compattazione del lato A14 e in seguito del lato Imola.

La successione delle passate per i due lati è:

Tabella 5.11: Compattazione CCC del sottofondo

SOTTOFONDO				
Lato	A14		Imola	
<i>Passaggi</i>	<i>Modalità</i>	<i>Ampiezza di oscillazione [mm]</i>	<i>Modalità</i>	<i>Ampiezza di oscillazione [mm]</i>
<i>Pass 1</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>
<i>Pass 2</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 3</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>
<i>Pass 4</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 5</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>
<i>Pass 6</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 7</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>
<i>Pass 8</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 9</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>
<i>Pass 10</i>	<i>Manual 5</i>	<i>1,9mm</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 11</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>	<i>Manual 5</i>	<i>1,9mm</i>
<i>Pass 12</i>	<i>Manual 2</i>	<i>0,7mm</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 13</i>			<i>Manual 2</i>	<i>0,7mm</i>

5.4.2 COMPATTAZIONE DELLO STRATO 1 (Layer 1)

Nella giornata del 07 Luglio, in seguito alla posa di 40 cm di materiale che va a formare i 4 differenti campi, partono le procedure di compattazione attraverso il rullo Bomag (BVC) BW 213-DH-4 di Imola. In questo caso come si vede dalle tabelle esposte di seguito si decide per una differente strategia di compattazione CCC rispetto al sottofondo, infatti in questo caso la modalità Manual 5 non viene utilizzata in nessuno dei due lati.

La successione delle passate risulta quindi:

Tabella 5.12: Compattazione primo strato.

Modalità di compattazione del primo strato, lato Imola e A14.		
<i>Passaggi</i>	<i>Modalità</i>	<i>Ampiezza di oscillazione [mm]</i>
<i>Pass 1</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>
<i>Pass 2</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 3</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>
<i>Pass 4</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 5</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>
<i>Pass 6</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 7</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>
<i>Pass 8</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 9</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>
<i>Pass 10</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 11</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 12</i>	<i>Manual 2</i>	<i>0,7 mm</i>

5.4.3 COMPATTAZIONE DELLO STRATO 2 (Layer 2)

Successivamente alla posa dell'ultimo strato che va a formare il rilevato, di 40 cm, si procede con l'ultimazione dei lavori con rullo Bomag. Questi vengono conclusi nella mattinata dell'08 Luglio, in questo caso si procede con una identica strategia di compattazione sul lato Imola e sul lato A14. A differenza delle altre giornate il lavoro viene diviso in 2 parti , separate tra di loro da una fase di umidificazione del campo. In particolar modo vengono eseguite tre passate:

1. *Manual 3*
2. *Statica*
3. *Manual 3*

In seguito si passa alle procedure di umidificazione, in Fig 5.6, per poi riprendere la compattazione con altrettante 8 passate. Questo sia per il lato A 14 che per il lato Imola. L'importanza dell'umidificazione è legata al fatto che migliora l'ingranamento del materiale, poiché l'acqua favorisce lo scorrimento tra i granuli e quindi l'addensamento, favorendo l'efficacia della compattazione CCC .



Fig 5.6 Umidificazione lato A 14

La successione delle passate risulta quindi:

Tabella 5.13: Compattazione secondo strato

<i>Modalità di compattazione del primo strato, lato Imola e A14.</i>		
<i>Passaggi</i>	<i>Modalità</i>	<i>Ampiezza di oscillazione [mm]</i>

<i>Pass 1</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>
<i>Pass 2</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 3</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>
<i>Pass 4</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 5</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>
<i>Pass 6</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 7</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>
<i>Pass 8</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 9</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>
<i>Pass 10</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 11</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 12</i>	<i>Manual 2</i>	<i>0,7 mm</i>

Un'osservazione deve essere fatta in merito al fatto che sia sullo strato 1 che sullo strato 2 si parte con una modalità che agisce più in profondità cioè la Manual 3, che ha una ampiezza di oscillazione pari a 1,1mm per poi finire sempre con una Manual 2. Questo è dovuto al fatto che con l'ultima passata si vuole agire esclusivamente sugli strati superficiali usando appunto un'ampiezza minore rispetto alle passate precedenti. Quindi prima si agisce sugli strati interni profondi per poi intervenire su quelli più esterni.

5.5 RISULTATI DELLA COMPATTAZIONE CCC

Grazie al gran numero di dati forniti dal rullo, è stato possibile fare un'accurata analisi sui moduli E_{vib} .

Le finalità di tale lavoro di trattamento dati sono volte a capire:

- Differenze tra i materiali.
- Evoluzione ed efficacia della modalità di compattazione scelta, che è stata presentata al paragrafo 5.3.

Per una completa lettura del trattamento dati effettuato, si richiama l'allegato al presente capitolo.

I dati del rullo di partenza, in seguito analizzati, sono elencati nella seguente modalità:

Tabella 5.14: Estratto dati Bomag

Metri	Pass Manuale 1	Pass Manuale 3	Pass Manuale 5	Pass Manuale 7	Pass Manuale 9	Pass Manuale 11
0,86 m	E_{vib} :7,89	22,51	51,94	49,91	60,1	28,67
0,946 m	E_{vib} :7,53	23,26	51,52	49,66	60,21	31,14
1,032 m	E_{vib} :8,34	23,99	53,21	52,44	60,93	30,84
1,118 m	E_{vib} :8,2	24,29	58,1	52,73	61,62	30,09
1,204 m	E_{vib} :7,96	26,03	55,53	53,3	62,4	30,79
1,29 m	E_{vib} :8,18	27,17	60,71	54,89	63,97	31,87
1,376 m	E_{vib} :8,16	28,33	60,91	58,52	64,6	30,67
1,462 m	E_{vib} :8,19	29,62	60,99	58,66	65,65	30,02

Come esempio abbiamo preso dati relativi al secondo strato sul Lato A 14.

I dati mostrano, come il rullo Bomag, sia in grado di fornire una lettura continua dell' E_{vib} sul rilevato. Infatti la misurazione è effettuata ogni 9/10 cm.

5.5.1 DIFFERENZE TRA I MATERIALI TRAMITE LETTURA DEI DATI E_{vib} .

L'analisi sui valori E_{vib} , ci permette di confrontare i quattro materiali utilizzati. L'analisi è volta a capire quali tra i 4 campi presentano i più alti valori di E_{vib} , modulo di rigidezza dinamico, e quali tra i materiali hanno presentato il miglior grado di compattazione in seguito al passaggio del rullo Bomag BW 213 DH-4, cioè un miglioramento costante e graduale in tutte le successive passate del rullo.

Per fare questa lettura ci riferiamo ai soli risultati ottenuti per il secondo strato, quindi agli ultimi 40 cm di materiale posati nell'ultimo giorno di Test nel campo prove di Imola, che risultano essere quelli di maggiore interesse per quel che riguarda il dato E_{vib} e che si presuppone non risentano del sottofondo con materiale di scarsa qualità A7-6.

Una prima analisi statistica dei dati viene fatta sull'ultimo strato per tutti i 4 campi.

Vengono trovati per lato, passata, campo i seguenti valori:

- Media
- Massimo
- Minimo
- Varianza
- Scarto quadratico medio

Di seguito si riportano i risultati delle ultime tre passate, aventi moduli E_{vib} caratterizzanti il materiale più adeguati rispetto alle prime due passate. In dettaglio si presentano i valori del secondo strato per i passaggi 5,7,9, lato Imola e A 14.

Tabella 5.15: Risultati secondo strato A14

PASSAGGIO 5	CAMPO 1	CAMPO 2	CAMPO 3	CAMPO 4
<i>Media E_{vib}</i>	53,22	46,2	38,89	58,76
<i>Varianza E_{vib}</i>	37,25	93,33	23,18	43,47
<i>Massimo E_{vib}</i>	61,78	64,83	57,97	74,89
<i>Minimo E_{vib}</i>	28,58	29,55	32,33	35,1
<i>Scarto Q.M. E_{vib}</i>	6,10	9,68	4,80	3,74
PASSAGGIO 7	CAMPO 1	CAMPO 2	CAMPO 3	CAMPO 4
<i>Media E_{vib}</i>	63,93	62,27	49,83	74,72
<i>Varianza E_{vib}</i>	46,1	83,12	31,74	51,65

<i>Massimo E_{vib}</i>	76,99	80,24	67,72	88,9
<i>Minimo E_{vib}</i>	34,38	42,05	34,49	46,39
<i>Scarto Q. M. E_{vib}</i>	6,79	8,87	5,62	6,60
PASSAGGIO 9	CAMPO 1	CAMPO 2	CAMPO 3	CAMPO 4
<i>Media E_{vib}</i>	73,93	73,16	59,96	82,14
<i>Varianza E_{vib}</i>	67,78	54,3	33,88	40,31
<i>Massimo E_{vib}</i>	88,26	89,37	80,27	95,81
<i>Minimo E_{vib}</i>	43,57	56,11	45,85	58,99
<i>Scarto Q. M. E_{vib}</i>	8,23	7,17	5,81	6,37

Questi sono i risultati per quel che riguarda il Lato A14. Da una prima lettura si percepisce come, in tutti e tre i passaggi il campo che presenta i valori più elevati per quel che riguarda le medie E_{vib} risulta essere il quarto.

Il grafico successivo presenta le 3 medie di ogni campo:

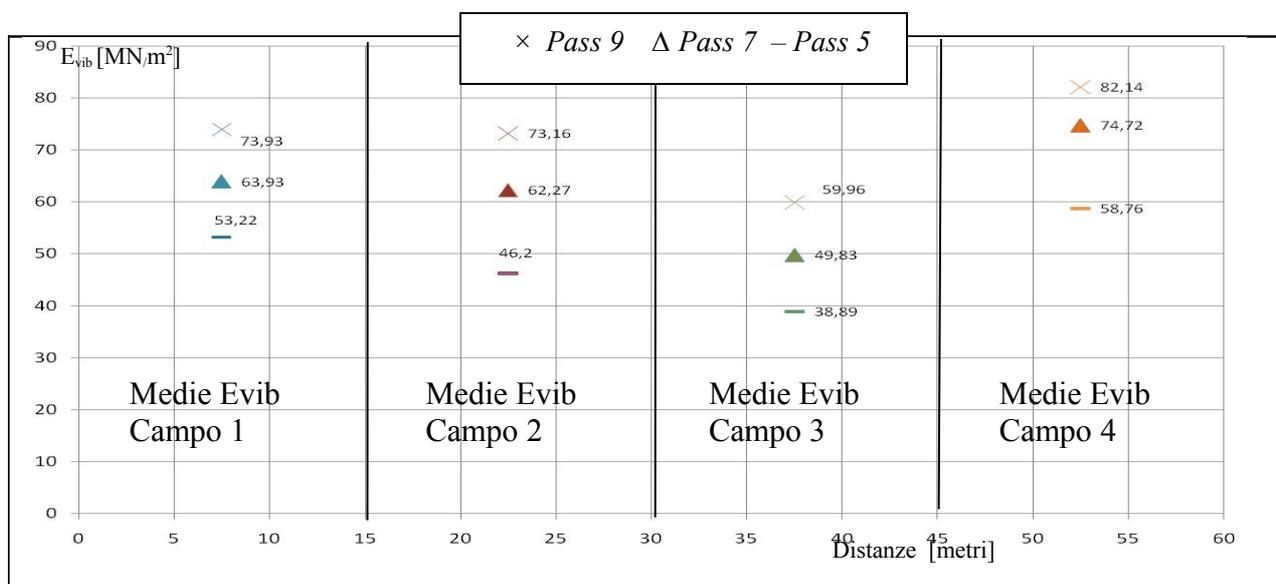


Fig. 5.7 Medie E_{vib} delle ultime tre passate Manual 3 lato A14.

Vediamo ora la stessa analisi sul lato Imola, prendendo sempre le ultime tre passate Manual 3, del secondo strato:

Tabella 5.16: Risultati secondo strato Imola

PASSAGGIO 5	CAMPO 1	CAMPO 2	CAMPO 3	CAMPO 4
<i>Media E_{vib}</i>	68,2	73,39	60,33	70,19
<i>Varianza E_{vib}</i>	86,59	45,57	71,49	43,29
<i>Massimo E_{vib}</i>	87,07	86,37	81,5	83,49
<i>Minimo E_{vib}</i>	45,55	54,04	42,73	46,72
<i>Scarto Q. M. E_{vib}</i>	9,31	6,71	8,63	7,26
PASSAGGIO 7	CAMPO 1	CAMPO 2	CAMPO 3	CAMPO 4
<i>Media E_{vib}</i>	59,44	61,97	54,02	75,15
<i>Varianza E_{vib}</i>	49,11	23,14	45,94	107,52
<i>Massimo E_{vib}</i>	72,55	71,09	69,48	96,18
<i>Minimo E_{vib}</i>	41,34	47,81	40,91	49,06
<i>Scarto Q. M. E_{vib}</i>	7,01	4,31	6,86	10,31
PASSAGGIO 9	CAMPO 1	CAMPO 2	CAMPO 3	CAMPO 4
<i>Media E_{vib}</i>	67,32	71,64	63,31	86,92
<i>Varianza E_{vib}</i>	54,37	26,46	49,05	74,87
<i>Massimo E_{vib}</i>	81,29	79,13	74,21	103,52
<i>Minimo E_{vib}</i>	49,03	56,72	49,25	65,26
<i>Scarto Q. M. E_{vib}</i>	7,37	5,17	7,03	8,59

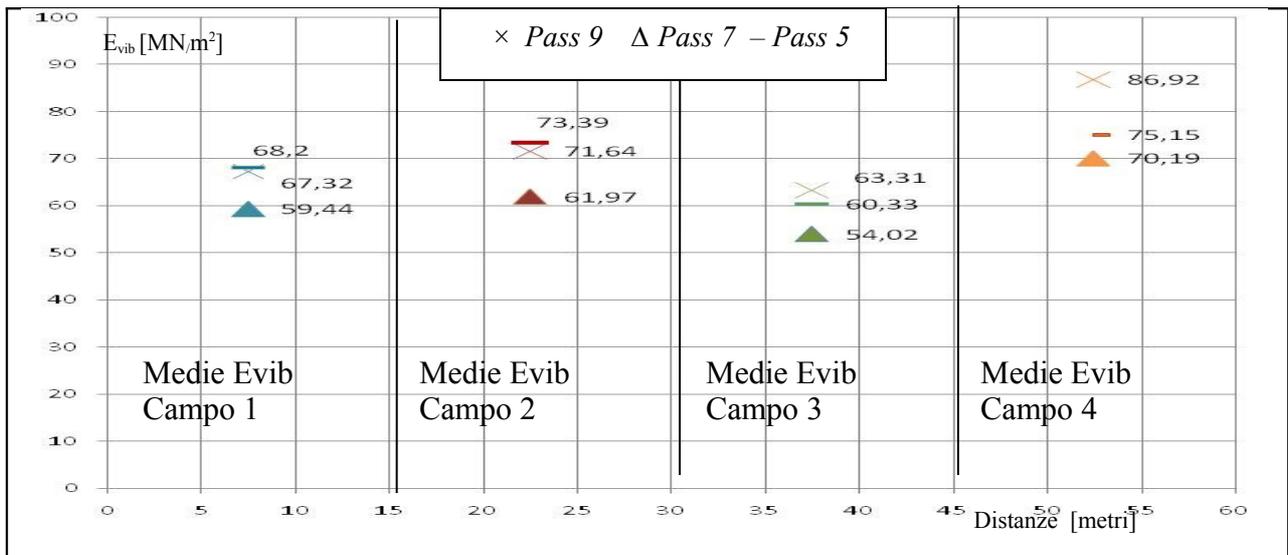


Fig. 5.8 Medie E_{vib} delle ultime tre passate Manual 3 lato Imola

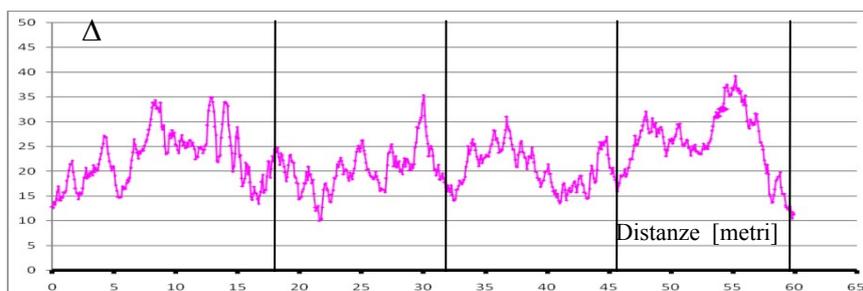
Il grafico mostra come anche in questo lato il campo 4 presenti medie E_{vib} superiori agli altri materiali.

E' altresì interessante notare come nel susseguirsi delle varie passate sui lati Imola e A14, gli E_{vib} più elevati per ogni campo, "Massimo Valore E_{vib} ", risultino sempre quelli del quarto campo, sia per il lato Imola che per il lato A14 .

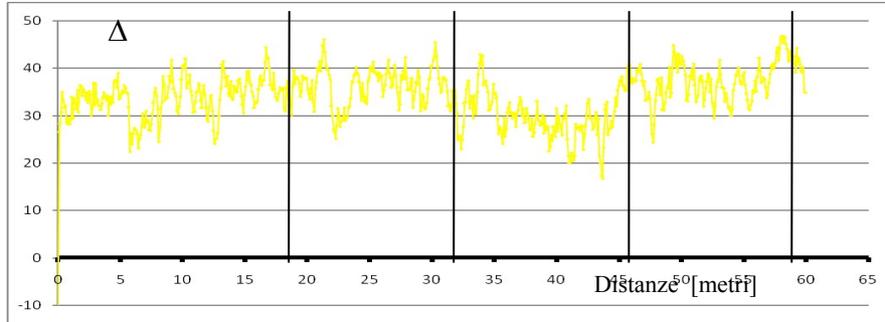
I migliori risultati della MISCELA CEMENTO (CLS) E ASFALTO 0/30 mm sono evidenziati anche da quella che è una lettura sui Δ . Con Δ intendiamo la differenza di due letture del dato $E_{vib_{metri}}$ successive passate alla stessa distanza, per esempio:

- $\Delta_{53} = E_{vib} \text{ passata 5} - E_{vib} \text{ passata 3}$

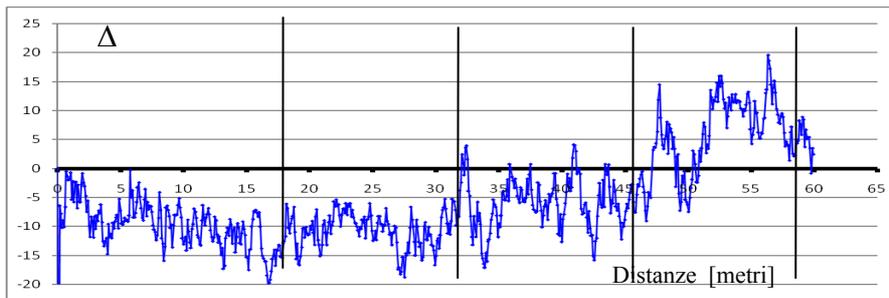
Questo dato ci permette di capire se le successive passate sono state efficaci, cioè hanno portato ad un aumento di E_{vib} sullo stesso lato. Il quarto materiale risulta esser quello che presenta i Δ maggiori, cioè che risponde nel migliore dei modi alla compattazione del rullo Bomag. Ciò è chiaramente riscontrabile nel secondo strato sul lato Imola, di seguito i grafici elencati chiariscono quanto detto:



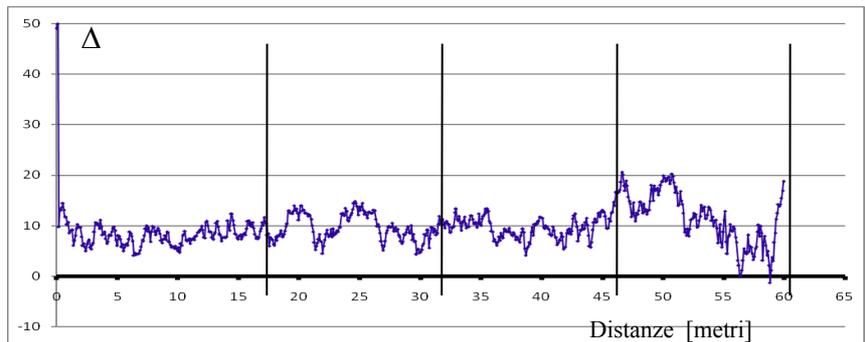
Medie Campo 1	Medie Campo 2	Medie Campo 3	Medie Campo 4
23,37	19,96	20,9	25,5



Medie Campo 1	Medie Campo 2	Medie Campo 3	Medie Campo 4
32,71	36,09	30,27	37,4



Medie Campo 1	Medie Campo 2	Medie Campo 3	Medie Campo 4
-9,05	-11,4	-6,31	4,97



Medie Campo 1	Medie Campo 2	Medie Campo 3	Medie Campo 4
8,56	9,66	9,29	11,6

Fig. 5.9 Grafici Δ - metri

Infatti come si vede dalle medie dei Δ per ciascun campo, il quarto ha i valori maggiori in ciascun grafico e risponde nel migliore dei modi alla compattazione. Quanto detto è riscontrabile anche dall'analisi del primo strato sui due lati.

I migliori risultati in termini di E_{vib} sono chiaramente intuibili anche dal grafico successivo, relativo al secondo strato, lato A14:

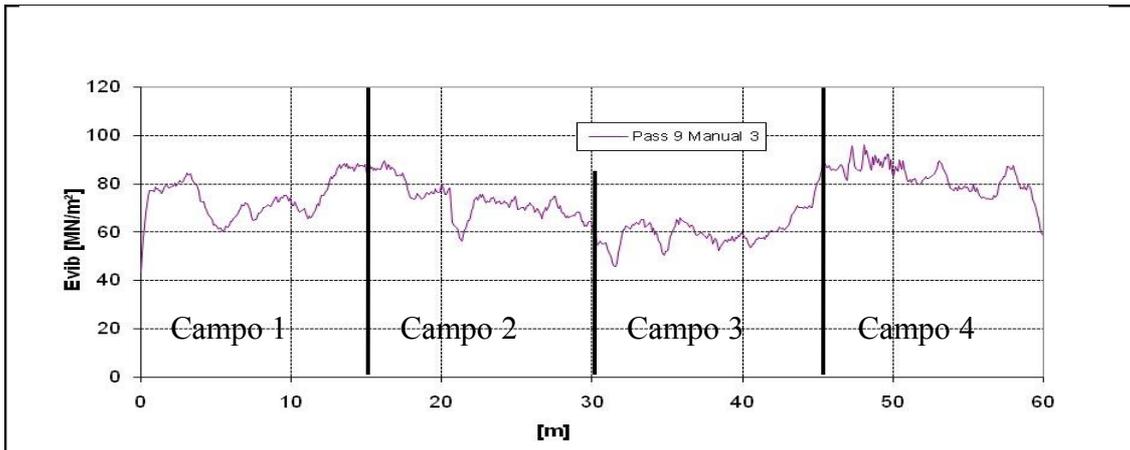


Fig. 5.10 *E_{vib}- metri. Pass manual 9 .Secondo strato A14*

Dalla variazione lineare del modulo di rigidità dinamica si intuisce come il quarto campo tra i 45 metri e i 60 metri conclusivi, presenta E_{vib} maggiori di tutti gli altri tre campi precedenti. Lungo il lato Imola questo concetto è ancora più evidente:

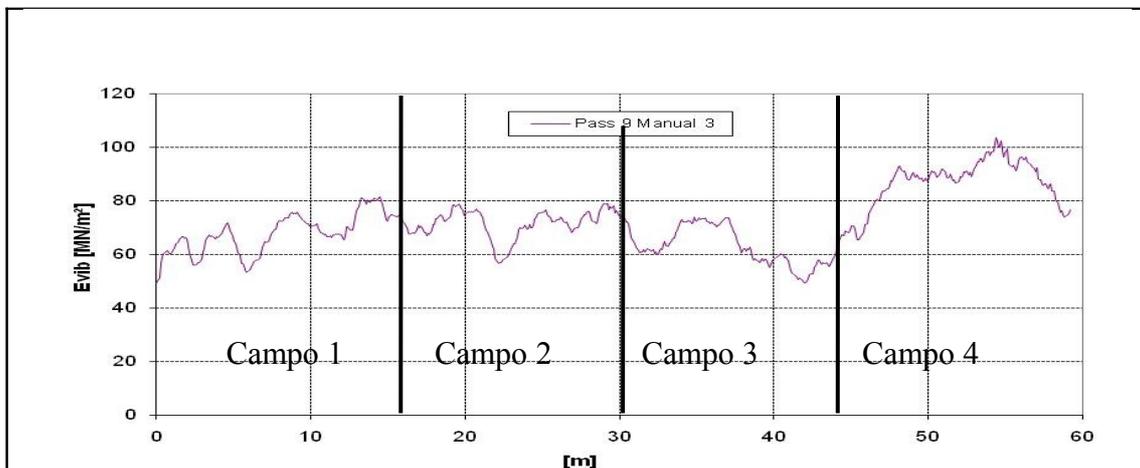


Fig. 5.11: *E_{vib}- metri. Pass manual 9 . Secondo strato Imola*

5.5.2 ANALISI SULL'EVOLUZIONE ED EFFICACIA DELLA COMPATTAZIONE SCELTA

Dopo una prima analisi sui differenti materiali C&D utilizzati nel campo prove e sulle loro differenze in merito ai valori del modulo di rigidezza dinamico, si concentra l'attenzione sulla parte relativa alla compattazione con rullo Bomag.

Da questa analisi si possono fare alcune interessanti considerazioni in merito:

1. Sviluppo della compattazione. Si intende cioè l'evolversi dei dati E_{vib} nelle successive passate per ogni campo e per ogni lato dei 3 strati studiati. I grafici chiariscono come nel susseguirsi delle passate vi siano stati incrementi o diminuzioni del modulo di rigidezza dinamico. Si presentano i soli grafici relativi al primo strato, per una lettura completa si richiama l'allegato.
2. Efficacia della compattazione. Con efficacia, si intende la capacità da parte del rullo di migliorare considerevolmente l'addensamento del materiale rendendolo via via sempre più rigido nel susseguirsi delle passate. Tanto più il materiale sarà rigido e addensato tanto più i valori del modulo di rigidezza dinamico saranno elevati. La parte complessa nel lavoro di rullatura è appunto quella di arrivare ai valori migliori di E_{vib} per ogni materiale, riuscendo in ogni passata ad incrementare le caratteristiche di rigidezza di tutti i campi. L'analisi compiuta, con l'ausilio dei grafici elaborati e che in seguito verranno presentati, ci permette di capire se ad un lavoro di

rullatura sia susseguito per il numero di passate prefissato e le modalità della passata un trend di incrementi E_{vib} .

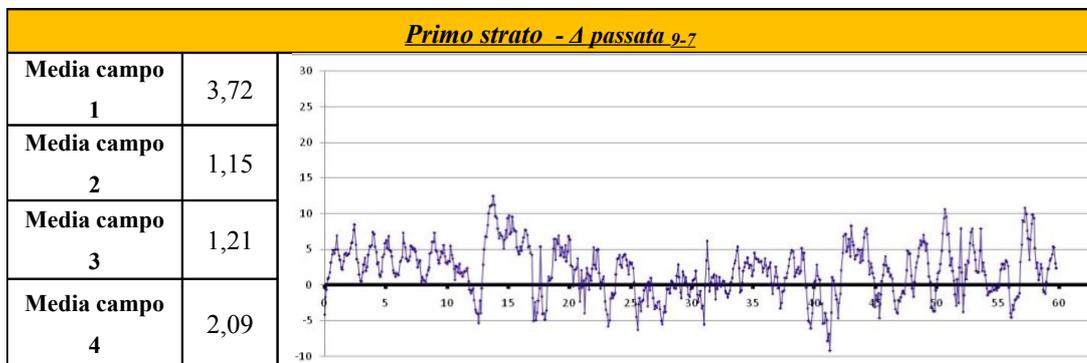
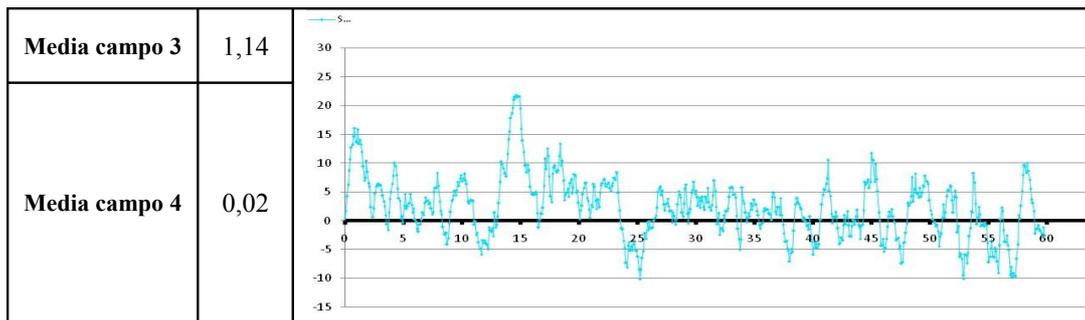
Questa analisi è molto importante, poiché permette di capire se si sono verificati:

- Numero di passaggi superflui. Nel senso che le ultime passate non hanno portato sostanziali incrementi medi e puntuali di E_{vib} rispetto alle prime, per cui sono risultate del tutto inutili. Questo risulta essere il caso del sottofondo.
- Numero di passaggi minore rispetto quelli ottimali. In alcuni casi dai grafici si evince come si sarebbe potuto optare per un numero di passaggi maggiori, in modo da ottenere valori ancora maggiori di E_{vib} .

Di seguito si presentano una serie di elaborati che ci permettono di fare alcune considerazioni in merito all'evoluzione della rullatura del primo strato e anche sulla efficacia.

Tabella 5.17: Primo strato Δ - metri A14

Primo strato - Δ passata 3-1		
Media campo 1	4,07	
Media campo 2	7,08	
Media campo 3	6,89	
Media campo 4	10,22	
Primo strato - Δ passata 5-3		
Media campo 1	6,22	
Media campo 2	6,58	
Media campo 3	8,02	
Media campo 4	8,36	
Primo strato - Δ passata 7-5		
Media campo 1	4,87	
Media campo 2	3,37	



Con Δ intendiamo la differenza di due letture del dato E_{vib} tra due successive passate alla stessa distanza, per esempio:

- $\Delta_{5-3} = E_{vib} \text{ passata } 5 - E_{vib} \text{ passata } 3$

Nel caso del lato opposto invece i risultati sono i seguenti:

Tabella 5.18: Primo strato Δ - metri Imola

<i>Primo strato - Δ passata 3-1</i>		
Media campo 1	12,01	
Media campo 2	11,89	
Media campo 3	7,99	
Media campo 4	8,59	
<i>Primo strato - Δ passata 5-3</i>		
Media campo 1	6,72	
Media campo 2	5,3	
Media campo 3	9,68	
Media campo 4	5,88	
<i>Primo strato - Δ passata 7-5</i>		
Media campo 1	3,45	
Media campo 2	1,64	
Media campo 3	1,85	
Media campo 4	2,36	

<i>Primo strato - Δ passata 9-7</i>		
Media campo 1	5,53	
Media campo 2	0,63	
Media campo 3	6,98	
Media campo 4	6,62	

Si capisce quindi lo sviluppo dei cambiamenti in termini di E_{vib} apportati sullo stesso strato, durante le successive passate. Si possono fare alcune considerazioni in merito:

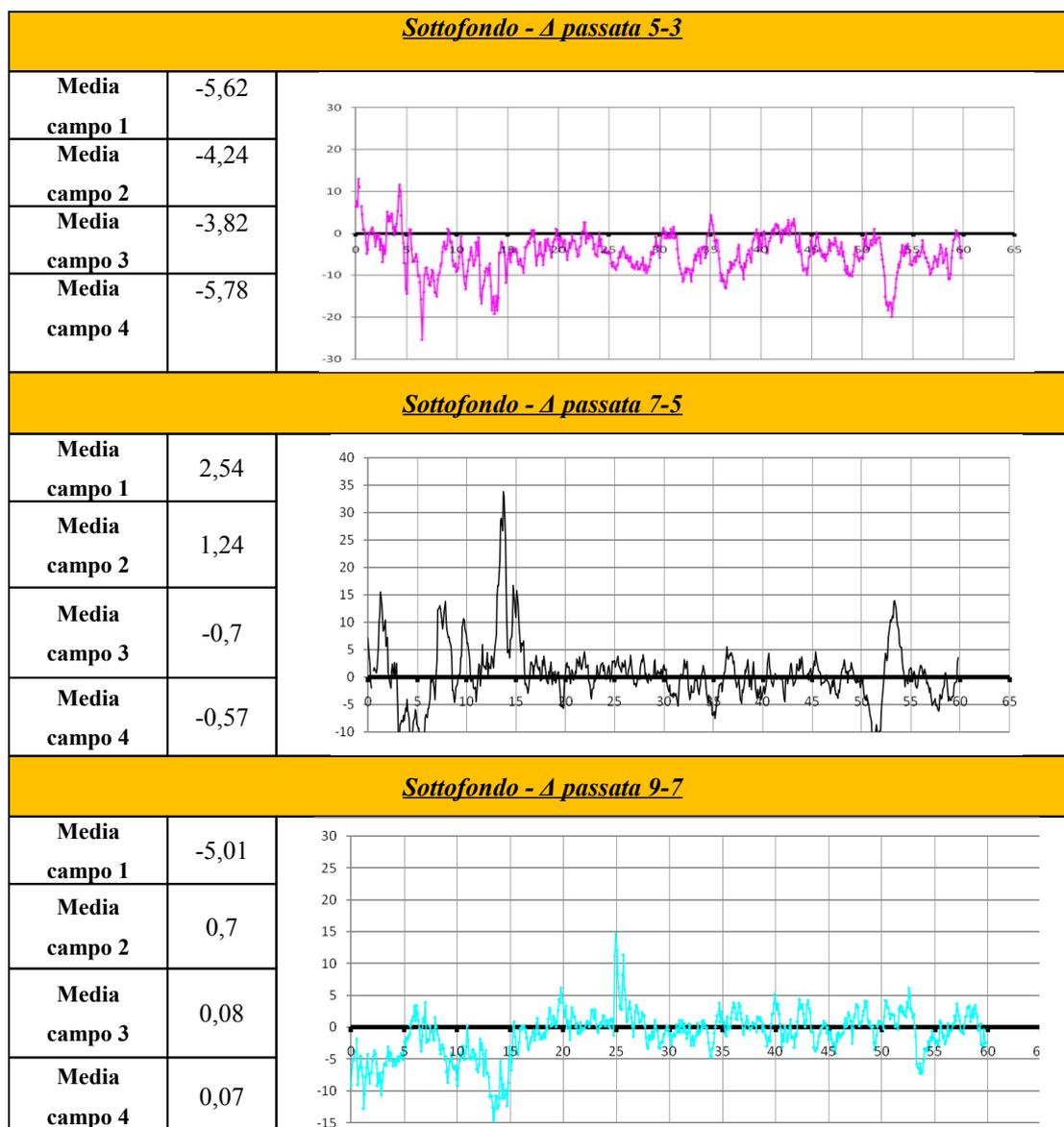
1. I valori medi E_{vib} presentano sempre valori positivi, ciò significa che in media tra una passata e la successiva del primo strato vi è stato un miglioramento in termini di rigidità. Questo è sicuramente un fatto positivo, poiché invece nel caso del sottofondo, (vedi allegato al Capitolo 5) ciò non avviene, anzi nel primo strato si ha un peggioramento in quasi tutti i campi. Il decremento nei grafici Δ - metri è probabilmente legato alla cattiva qualità del materiale, classificato A7-6.

Tabella 5.11: Sottofondo A14 - Δ passata

2. Inoltre dal grafico a lato tabella 5.11, si capisce come nelle prime passate gli incrementi siano considerevoli, per poi andare a diminuire nelle successive. Ciò si ripresenta anche nel secondo strato, come si può notare dai grafici presenti nell'allegato. Si presenta ora una serie di elaborati che aiutano a capire quella che è in particolar modo l'efficacia della compattazione.

Le prime due tabelle di grafici che si presentano, sono state create per :

- *Strato (Layer) - Campo - Lato.*



Andando a prendere tutti quelli che sono i valori di E_{vib} di ogni singola passata, per il solo campo di interesse. Questo sia per il lato A 14 che per il lato Imola, in modo da avere una lettura completa di tutto il nostro rilevato.

I valori di ogni singolo campo vengono inseriti in un grafico dove sugli assi abbiamo:

- In X, i valori del modulo E_{vib} della prima passata
- In Y, i valori del modulo E_{vib} della passata successiva

Ogni singolo gruppo di punti presenti nel grafico, è riferito a due passate successive, che saranno così identificate:

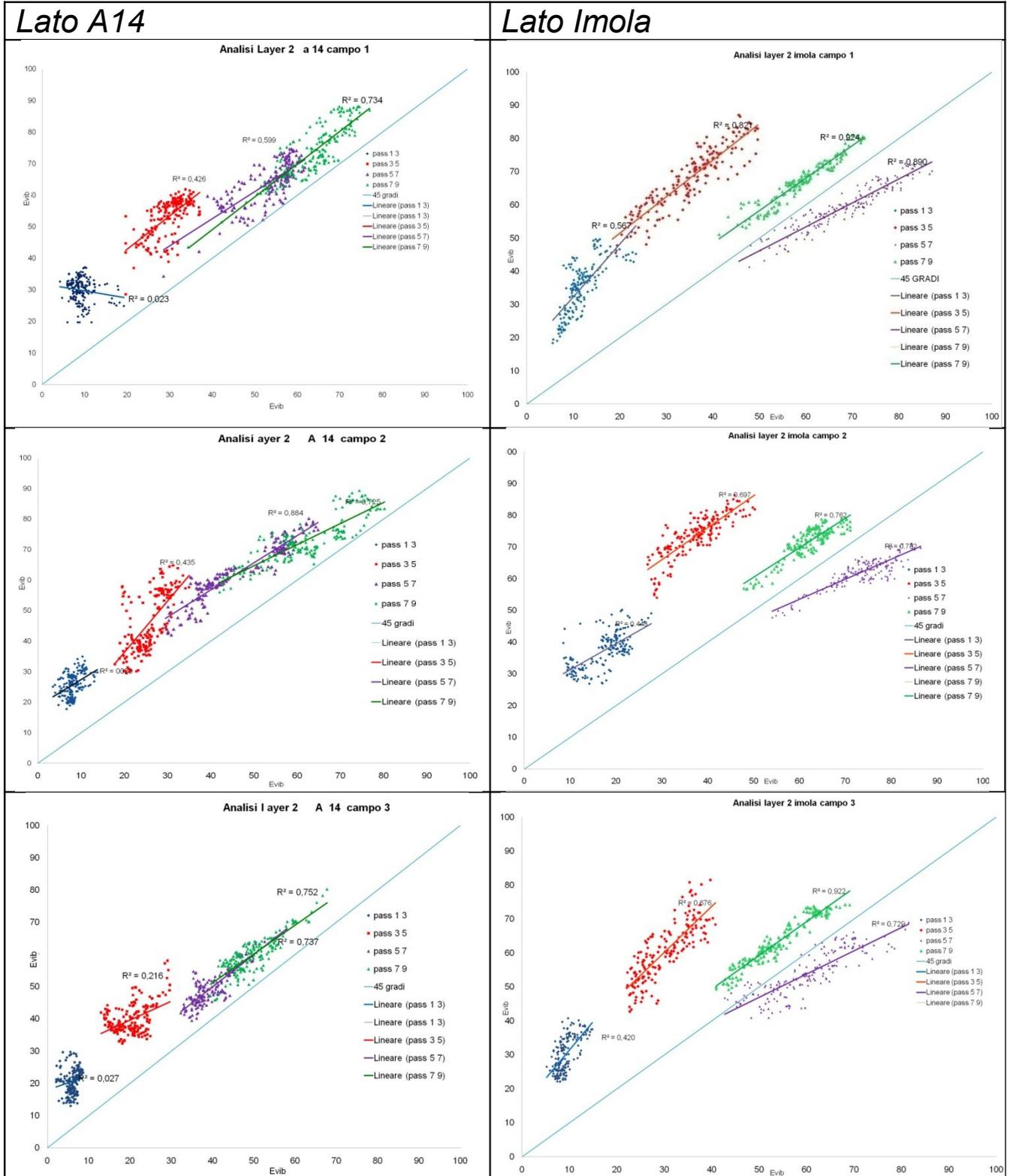
- Passaggio 1/3
- Passaggio 3/5
- Passaggio 7/5
- Passaggio 9/7

Nelle tre tabelle finali, i grafici sono creati nel modo precedentemente illustrato, ma in questo caso si riferiscono alla totalità dei valori E_{vib} [MN/m^2] di ogni lato. Quindi vengono presentati per:

- *Strato (Layer) - Lato.*

La retta “45gradi”, presente in ogni grafico, risulta essere il luogo dei punti corrispondenti a identici valori lungo l’asse X e lungo l’asse Y. Questa linea ha una inclinazione quindi di 45° gradi e ci aiuterà ad una migliore lettura degli elaborati esposti.

Tabella 5.19: Grafici secondo strato Evib-Evib per Campo



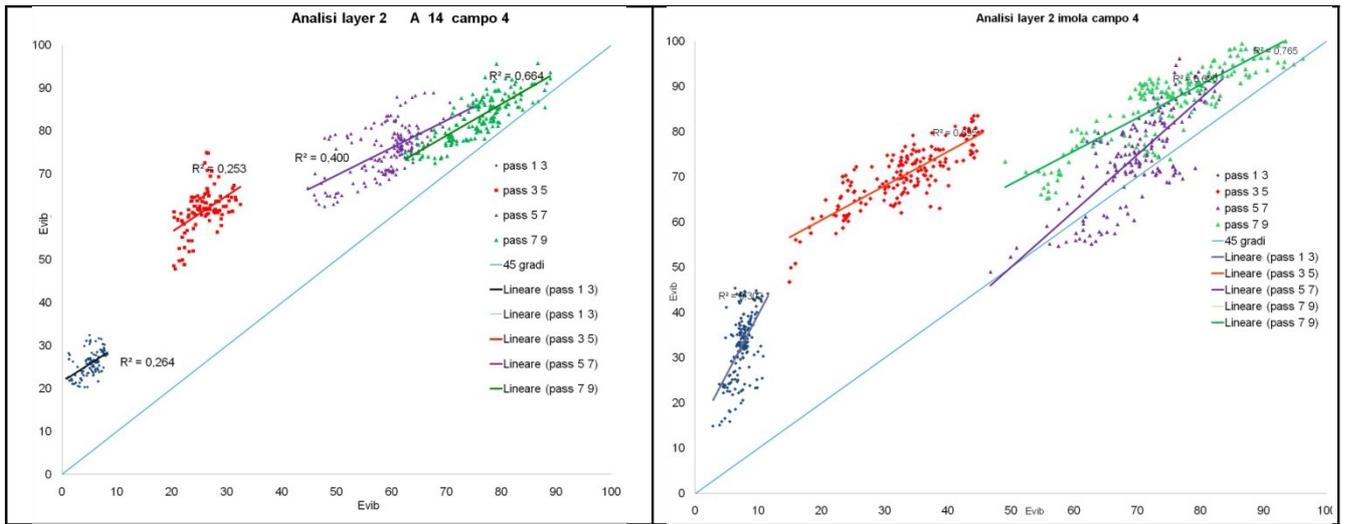
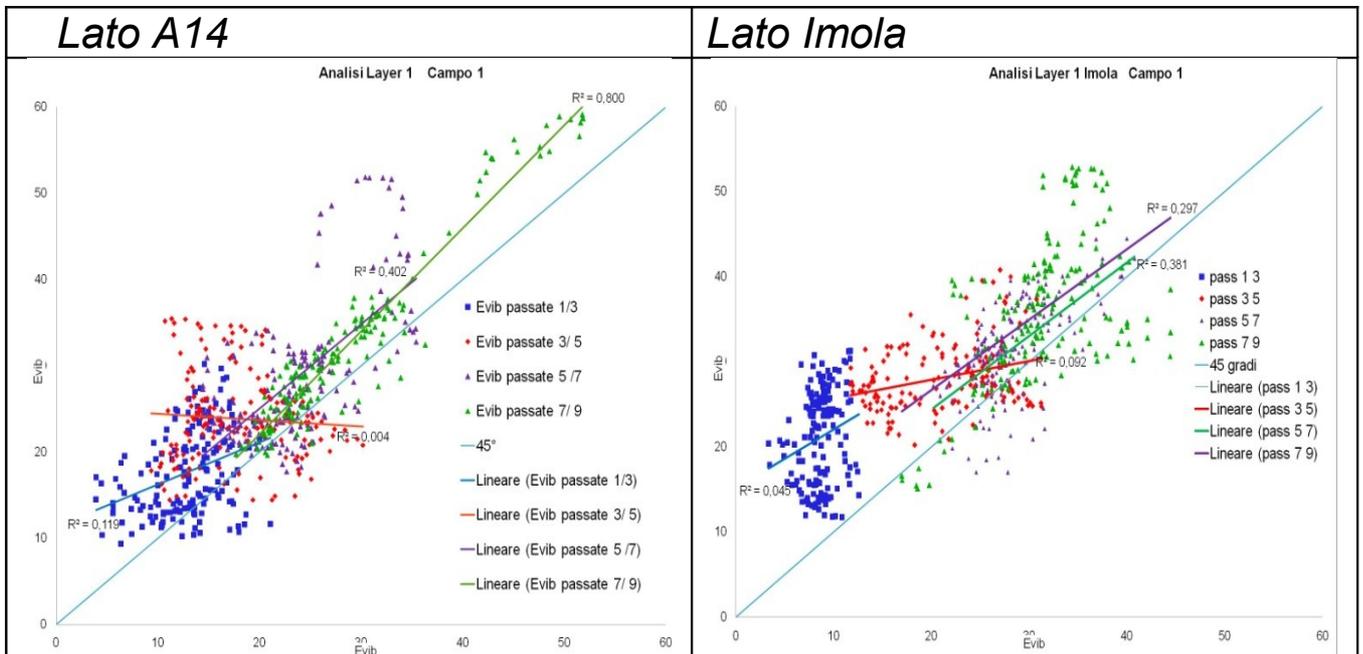


Tabella 5.20: Grafici primo strato Evib-Evib per campo



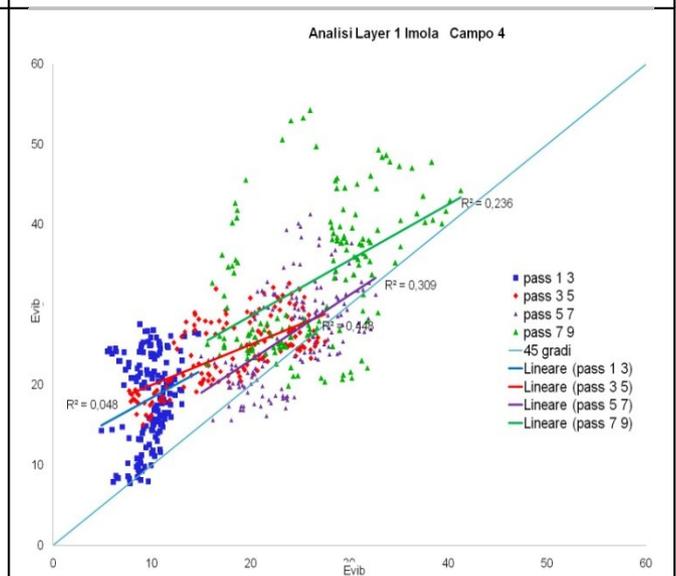
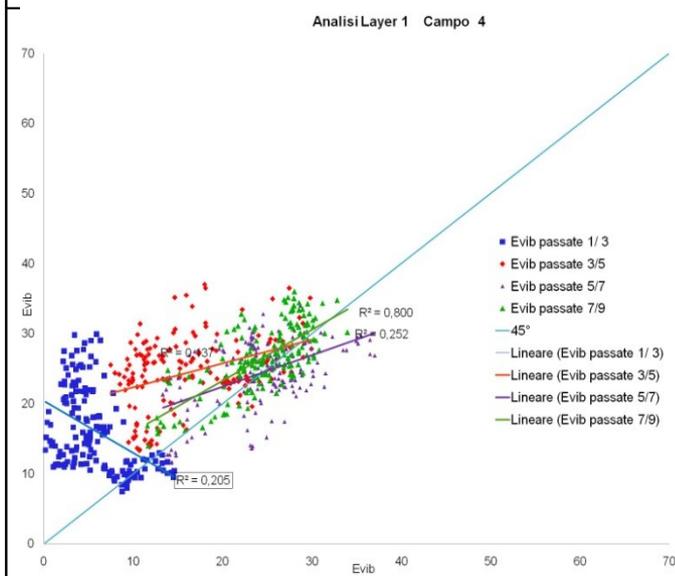
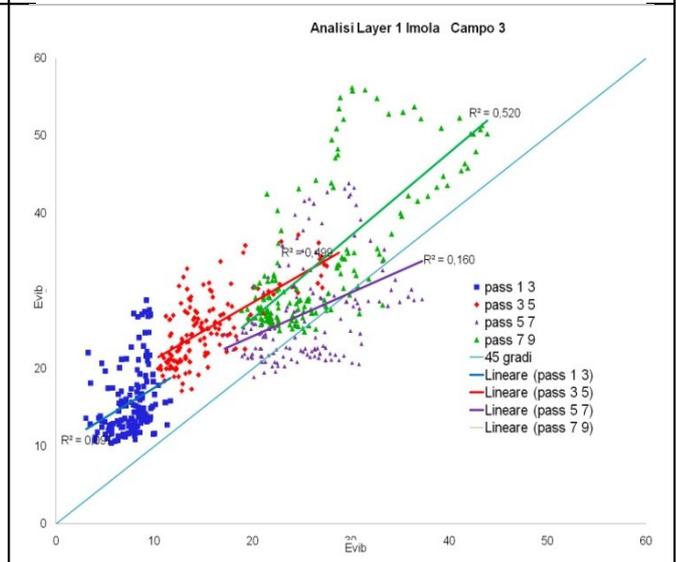
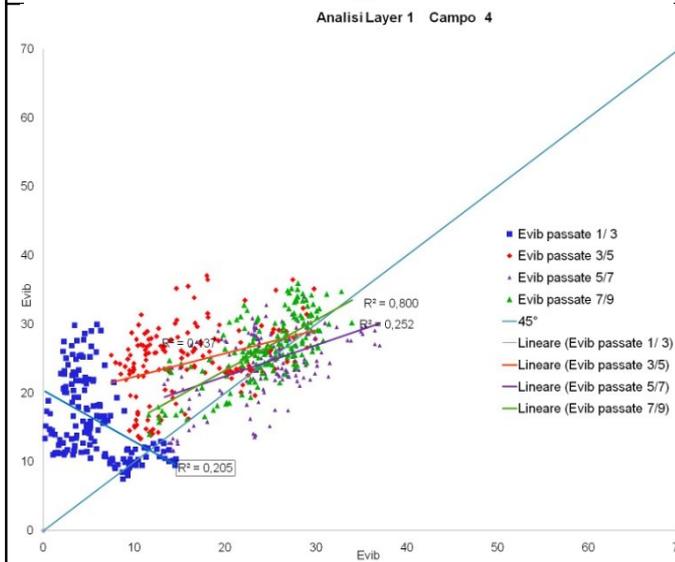
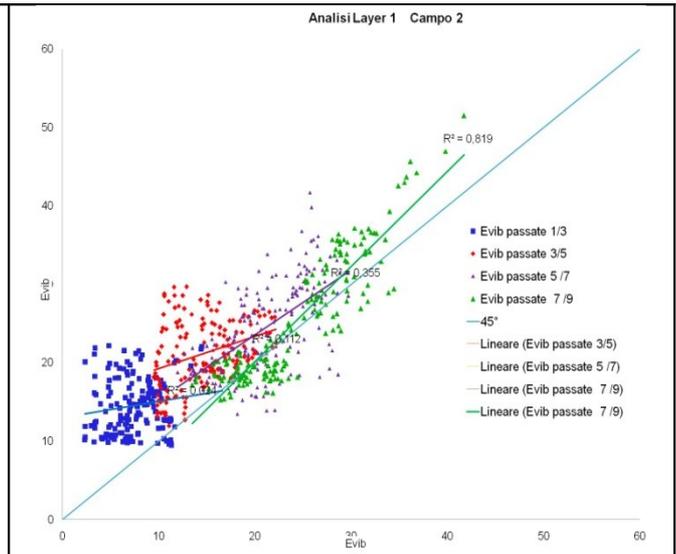
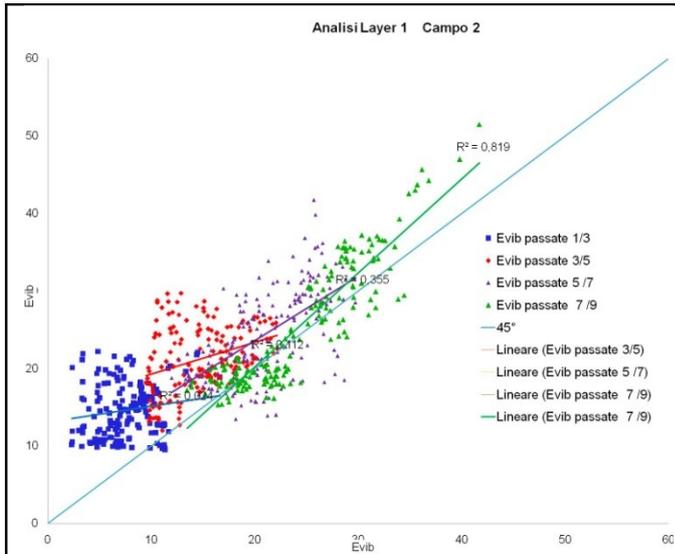


Tabella 5.21: Grafici sottofondo Evib – Evib. Totali

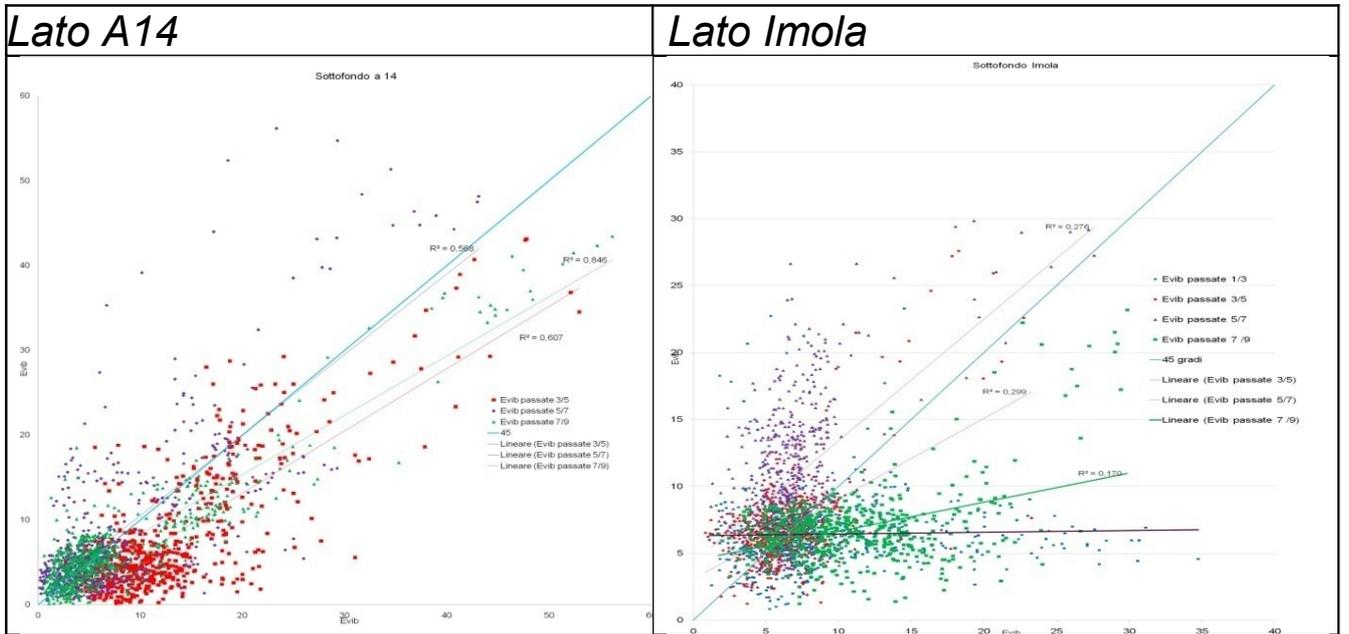
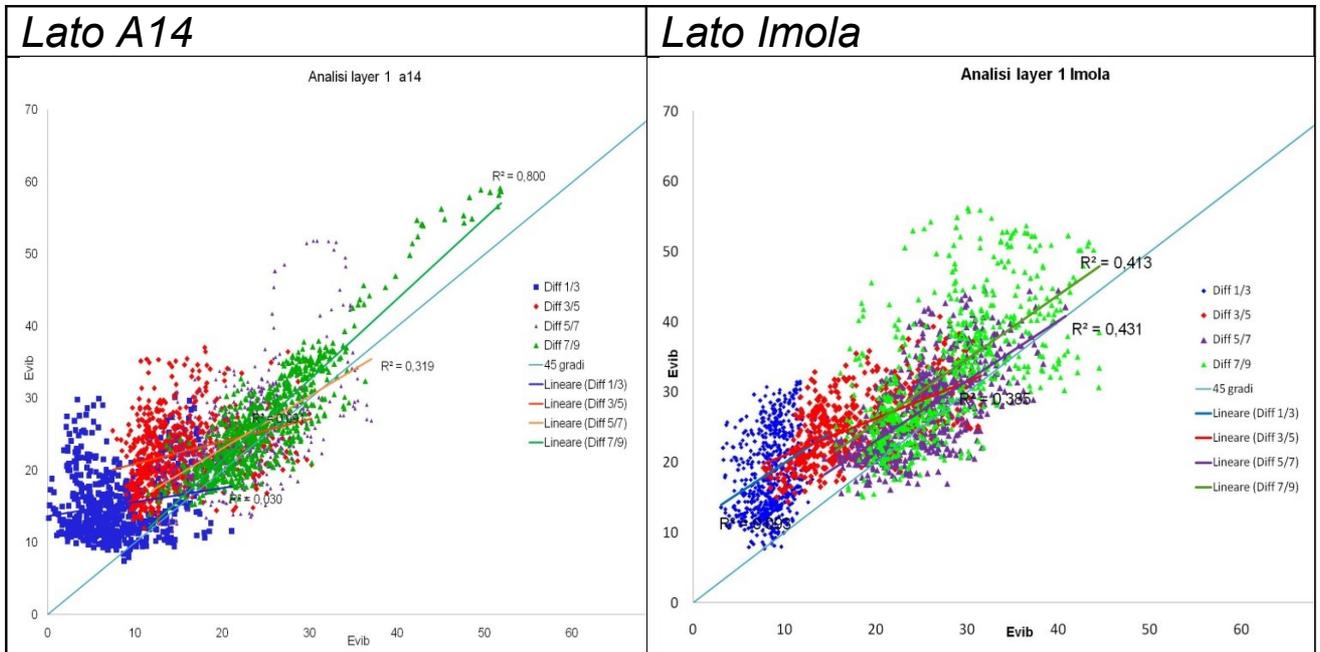
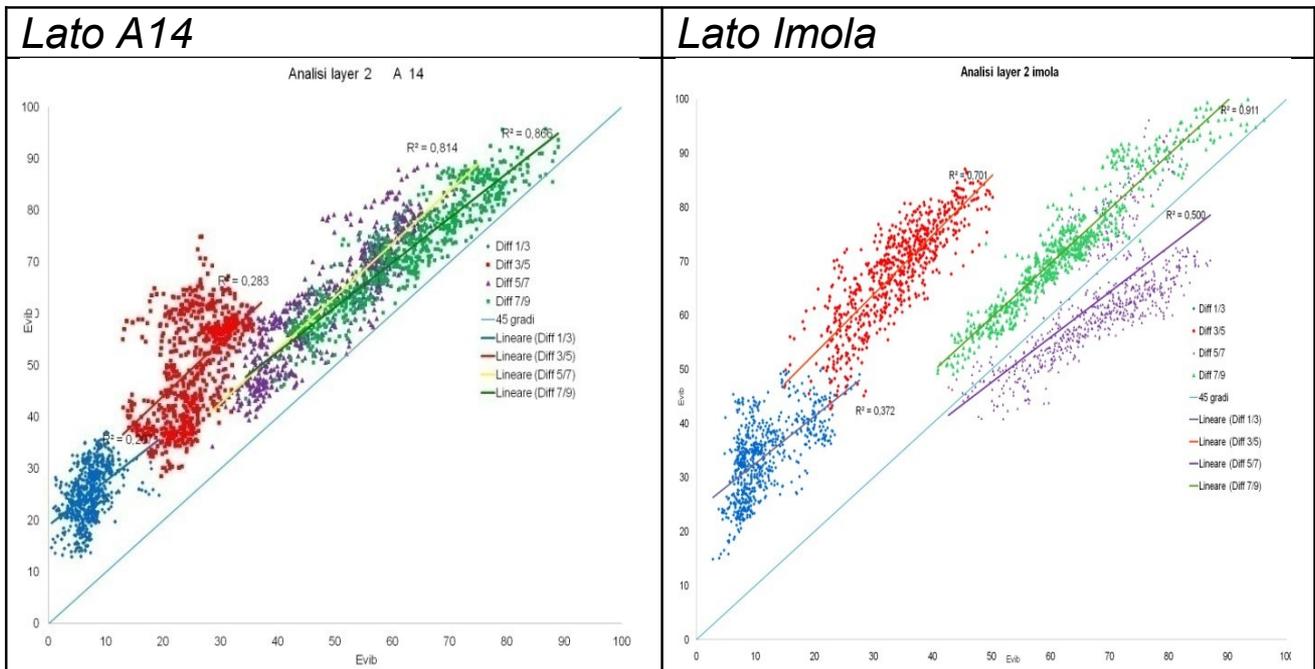


Tabella 5.22: Grafici primo strato Evib – Evib. Totali



Tabel: Grafici secondo strato Evib – Evib. Totali la 5.23



Da quella che è la lettura di questi grafici siamo in grado di fare alcune importanti considerazioni:

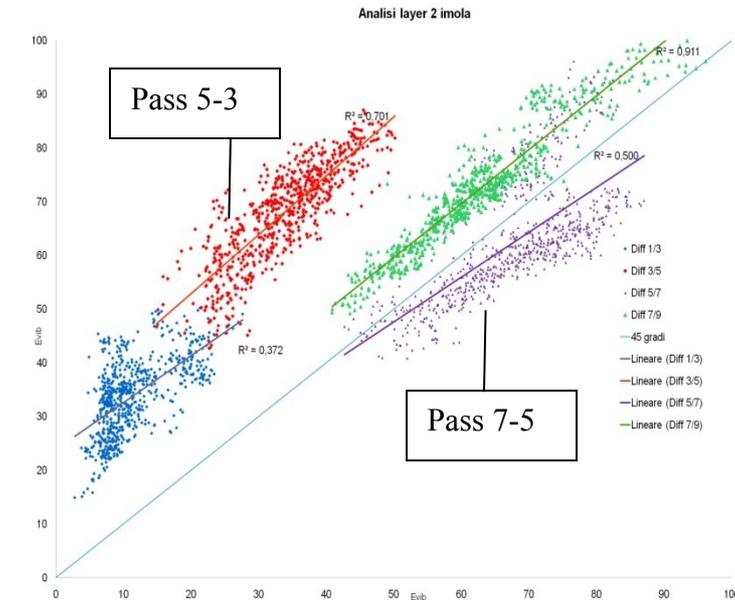
- Una prima considerazione è possibile su quella che è la disposizione di Pass.3-1, Pass.5-3, Pass.7-5, Pass.9-7 rispetto alla linea a quarantacinque gradi. Infatti si ha che tanto più ogni gruppo si approssima alla retta “45gradi” tanto più i valori delle due passate considerate sono identici. Essendo i valori delle successive passate identici significa che non sono necessarie ulteriori passate, dato che non si riscontrano miglioramenti nei moduli . Come si vede dai grafici, il primo strato ed il secondo hanno risposto alla rullatura Bomag, avvicinando con la Pass 9-7 alla linea dei 45 gradi ciò non si avviene invece per il sottofondo.
- Una seconda conclusione può essere fatta sull’andamento delle Pass.3-1, Pass.5-3, Pass.7-5, Pass.9-7, che nel caso dei due strati di materiale C&D hanno uno spostamento a destra lateralmente e in alto verticalmente. Questo spostamento è dettato da un miglioramento dei dati E_{vib} che assumono valori maggiori sia lungo l’asse X che lungo l’asse Y. Anche in questo caso sui due strati, si vede l’efficacia della rullatura, mentre per il sottofondo si presenta un unico gruppo di valori prossimi

all'origine

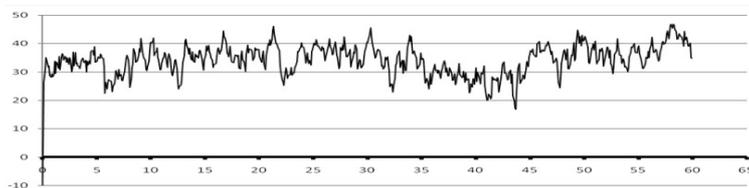
- Nei casi in cui sia presente un gruppo di valori E_{vib} a destra della retta "45gradi", come nel caso del secondo strato lato imola, possiamo concludere che vi sia stato un peggioramento dei valori E_{vib} in seguito ad un'ulteriore passata. Cioè i moduli sono maggiori lungo l'asse X (asse che riporta i valori della prima passata), rispetto a quelli dell'asse Y, (asse che riporta i valori della successiva passata).

Per dimostrare quanto detto, si illustra di seguito:

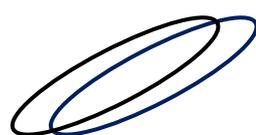
- 1) Il grafico relativo al secondo strato Imola, in cui Pass.7-5 è al di sotto della linea a 45 gradi
- 2) L'analisi dei Δ_{5-3} e Δ_{7-5}



Secondo strato Δ_{5-3} Imola



Secondo strato Δ_{7-5} Imola



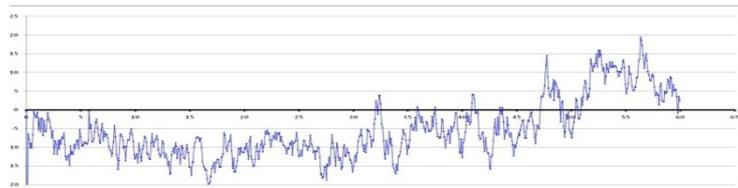


Fig 5.11. Grafico di analisi strato 2 Imola- e grafici Δ -metri

Si vede appunto come nel caso Δ_{7-5} vi sia un decremento dei valori E_{vib} lungo quasi tutto il campo, i moduli della passata cinque risultano quindi migliori della settimana. Il lato Imola del secondo strato, come si vede dalla prima tabella, presenta in tutti i primi tre campi questa caratteristica a differenza del lato A 14.

- Si sono trovati per ciascun gruppo (Pass.3-1, Pass.5-3, Pass.7-5, Pass.9-7), le rispettive linee di regressione, ricavando in seguito il valore R^2 di ciascuna linea. L' R -quadro è utile per valutare la dispersione dei dati attorno alla retta di regressione stessa. Per definizione l' R^2 è un indicatore compreso tra 0 ed 1.

Per cui si avrà che tanto più son bassi i valori di tale indicatore tanto più son dispersi i punti delle Pass 3-1, Pass 5-3, Pass 7-5, Pass 9-7 rispetto alla linea di tendenza , mentre, più son elevati i valori del R^2 più son allineati lungo la linea di regressione.

Infatti nel caso di R^2 pari a 1, tutti i valori si trovano su tale retta. Tale indicatore rappresenta quindi quella che è l'omogeneità degli incrementi o dei decrementi per le Pass.3-1, Pass.5-3, Pass.7-5, Pass.9-7. Infatti nel caso di identici Δ tutti i punti si trovano sulla retta di regressione, Fig 5.12.

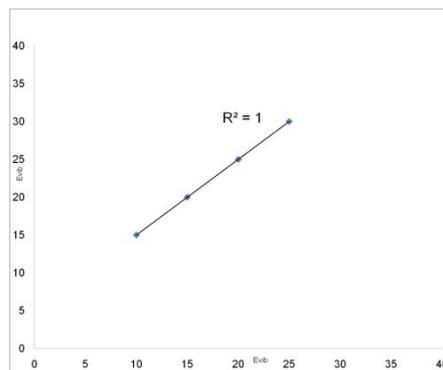


Fig 5.12 Linea di tendenza- R^2

Si nota come generalmente Pass 3-1, Pass 5-3 abbiano valori di R^2 inferiori a Pass 7-5, Pass 9-7.

- Un' ulteriore considerazione può esser fatta, richiamando quanto detto al punto precedente,

andando a notare come in diversi elaborati creati, si vedono alcuni valori totalmente dispersi all'interno del grafico. Questa dispersione è evidente solo in alcuni grafici, poiché in altri il gruppo di valori E_{vib} risulta essere molto concentrato. Come esempio si prende lo strato uno, campo 4, lato Imola, in cui per il gruppo relativo al Passaggio 9/7 si nota una dispersione dei punti verso l'alto. Questa dispersione è sintomatica del fatto che il valore in Y di quel punto, cioè l' E_{vib} per la nona passata in un punto del campo 4, sia superiore rispetto la maggior parte degli altri valori del passaggio 9. Ciò è dimostrato da una prima lettura degli istogrammi, che mostrano come, per le prime tre passate i valori E_{vib} siano concentrati attorno alla media, mentre in particolar modo nella nona passata si presenta un massimo di 54,25 rispetto ad una media di 33,23. L'istogramma chiarisce ancor meglio il concetto.

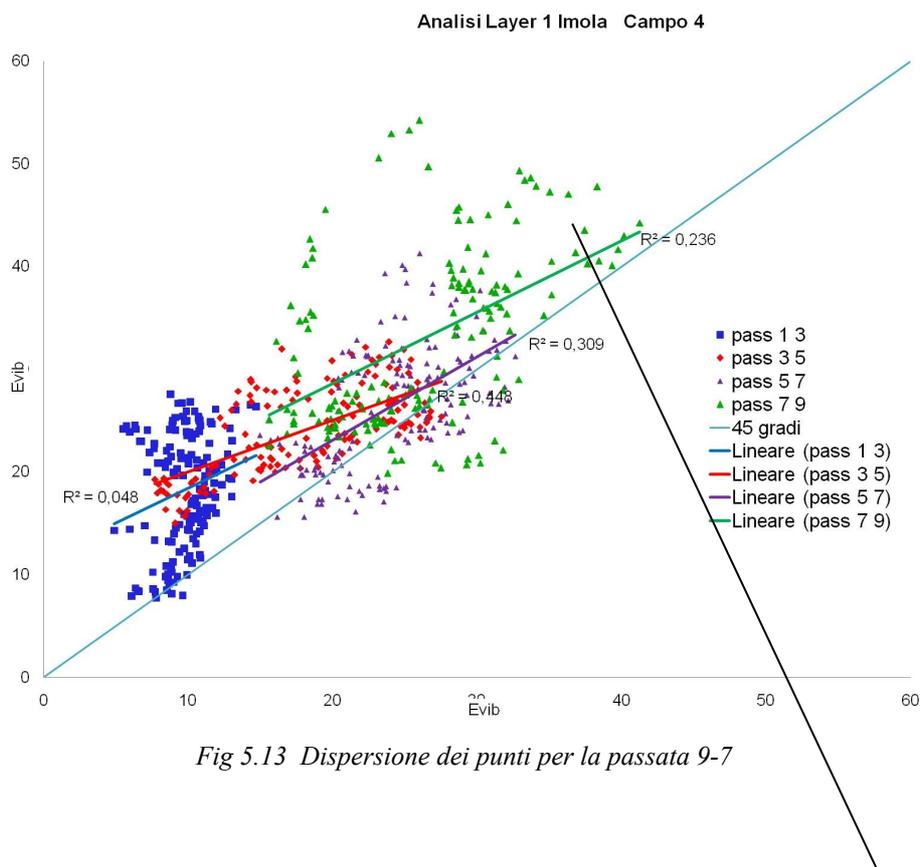


Fig 5.13 Dispersione dei punti per la passata 9-7



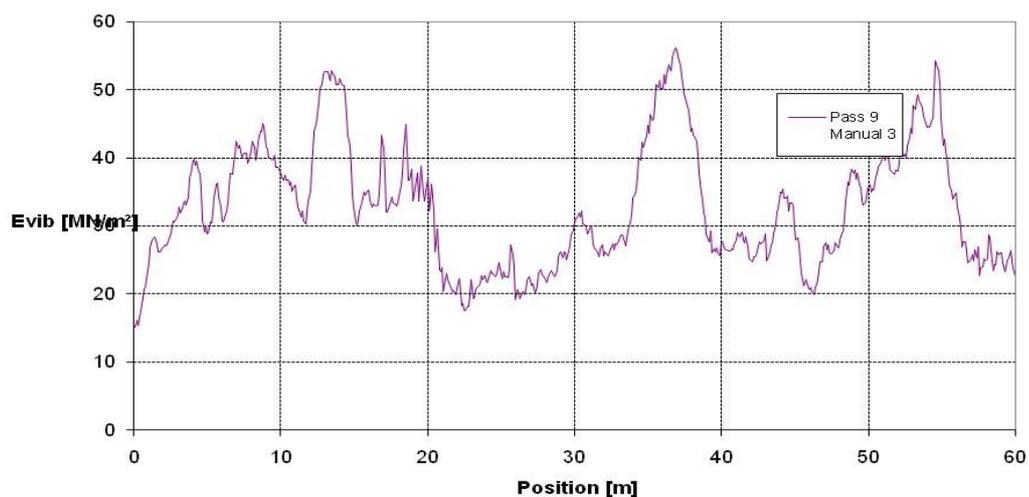
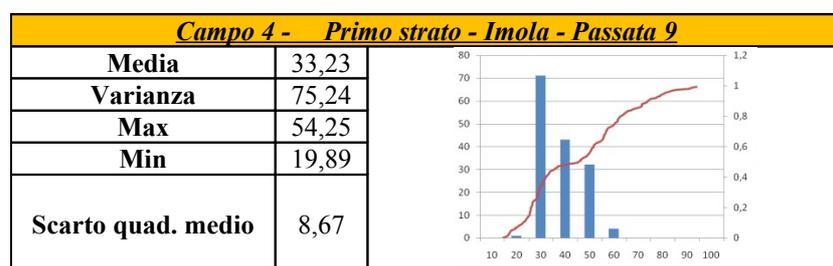
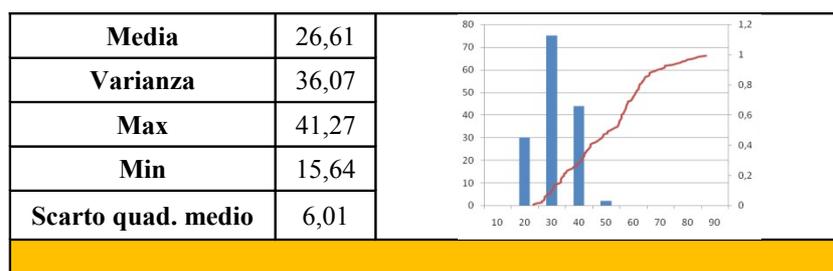


Fig 5.14: E_{vib} - metri. Valori massimi di E_{vib} nel quarto campo primo strato

Tabella 5.24: Campo 4- Primo strato - Imola

Campo 4- Primo strato - Imola - Passata 1		
Media	9,79	
Varianza	3,30	
Max	14,71	
Min	4,9	
Scarto quad. medio	1,82	
Campo 4 - Primo strato - Imola - Passata 3		
Media	18,25	
Varianza	30,98	
Max	27,55	
Min	7,71	
Scarto quad. medio	5,57	
Campo 4 - Primo strato - Imola - Passata 5		
Media	24,21	
Varianza	16,98	
Max	32,66	
Min	15,00	
Scarto quad. medio	4,12	
Campo 4 - Primo strato - Imola - Passata 7		



- Un'ultima considerazione viene fatta sui grafici delle tabelle 5.14, 5.15, 5.16. Richiamando tutti i punti precedenti che permettono di capire l'efficacia della compattazione, si è in grado di concludere che:
 - La compattazione con rullo Bomag sul sottofondo non ha avuto alcun effetto positivo nelle passate successive alla terza. Per cui le ulteriori passate sono risultate inefficaci.
 - Il primo strato pur reagendo alla compattazione Bomag, probabilmente ha risentito degli effetti del sottofondo, non ottenendo i risultati del "Layer 2"
 - Il secondo strato non poggiante sul sottofondo, ha reagito meglio del primo. Come si evince da tutti i dati raccolti

5.6 DIFFERENZE TRA PASSAGGI MANUAL 3 E MANUAL 2 IN TERMINI DI E_{VIB}

Come è stato precedentemente trattato nel paragrafo 5.3, in cui sono state chiarite le modalità di compattazione sui due strati di materiale C&D, le passate hanno visto l'alternarsi di Manual 3 e Manual 2.

In particolar modo richiamando la successione dei passaggi per il secondo e primo strato:

Tabella 5.25: Modalità di compattazione strato 1 e 2, lato Imola e A14.

Modalità di compattazione strato 1 e 2, lato Imola e A14.		
<i>Passaggi</i>	<i>Modalità</i>	<i>Ampiezza di oscillazione [mm]</i>
<i>Pass 1</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>
<i>Pass 2</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 3</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>
<i>Pass 4</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 5</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>
<i>Pass 6</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 7</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>
<i>Pass 8</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 9</i>	<i>Manual 3</i>	<i>1,1 mm</i>
<i>Pass 10</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 11</i>	<i>Statica</i>	<i>/</i>
<i>Pass 12</i>	<i>Manual 2</i>	<i>0,7 mm</i>

Si vede come le prime 5 passate vibrato sono tutte eseguite in modalità Manual 3, con oscillazione 1,1 mm mentre la conclusiva in Manual 2.

Questa strategia è dettata dal fatto che con le prime passate, grazie ad un'ampiezza di oscillazione maggiore vengono interessati strati oltre i 40 cm di profondità per cui con le prime passate si cerca di compattare gli strati più profondi e assestare questi ultimi. Mentre con la conclusiva Manual 2 si è concentrata la compattazione sugli strati più superficiali.

Tutto ciò sta a significare che lavorando con ampiezze di 1,1 mm, si riescono a raggiungere valori di E_{vib} più elevati rispetto a 0,7 mm, poiché nella compattazione vengono coinvolti strati di terreno maggiori.

A dimostrazione di quanto enunciato, facciamo un confronto tra le due *Manual*, sia in termini statistici:

Tabella 5.26: Passaggi Manual 2 e Manual 3 A 14- Secondo strato A14

<i>Pass 11 Manual 2</i>	CAMPO 1	CAMPO 2	CAMPO 3	CAMPO 4
<i>Media E_{vib}</i>	46,19	39,71	32,78	59,46

<i>Massimo E_{vib}</i>	62,79	60,11	50,86	77,71
<i>Minimo E_{vib}</i>	19,72	24,5	18,06	46,41
<i>Pass 9 Manual3</i>	CAMPO 1	CAMPO 2	CAMPO 3	CAMPO 4
<i>Media E_{vib}</i>	73,93	73,16	59,96	82,14
<i>Massimo E_{vib}</i>	88,26	89,37	80,27	95,81
<i>Minimo E_{vib}</i>	43,57	56,11	45,85	58,99

Tabella 5.27: Passaggi Manual 2 e Manual 3 A 14- Secondo strato Imola

<i>Pass 11 Manual2</i>	CAMPO 1	CAMPO 2	CAMPO 3	CAMPO 4
<i>Media E_{vib}</i>	42,46	44,16	38,15	54,12
<i>Massimo E_{vib}</i>	67,62	60,2	52,7	80,74
<i>Minimo E_{vib}</i>	23,69	26,15	20,68	16,51
<i>Pass 9 Manual3</i>	CAMPO 1	CAMPO 2	CAMPO 3	CAMPO 4
<i>Media E_{vib}</i>	67,32	71,64	63,31	86,92
<i>Massimo E_{vib}</i>	81,29	79,13	74,21	103,52
<i>Minimo E_{vib}</i>	49,03	56,72	49,25	65,26

Sia in termini di un confronto tra i due E_{vib} lungo tutto il campo, in cui si percepisce ancor più la differenza:

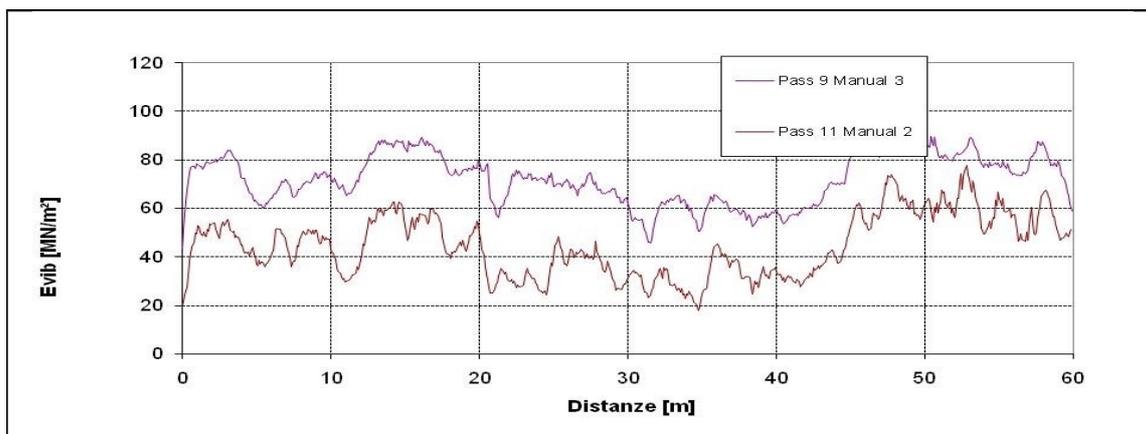


Fig. 5.15 Evib- metri. Pass manual 9/11 .Secondo strato, A14.

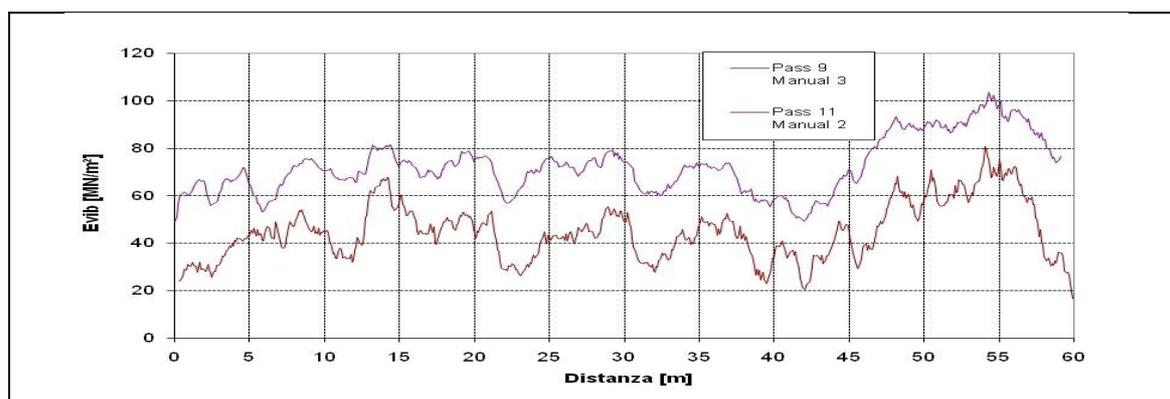
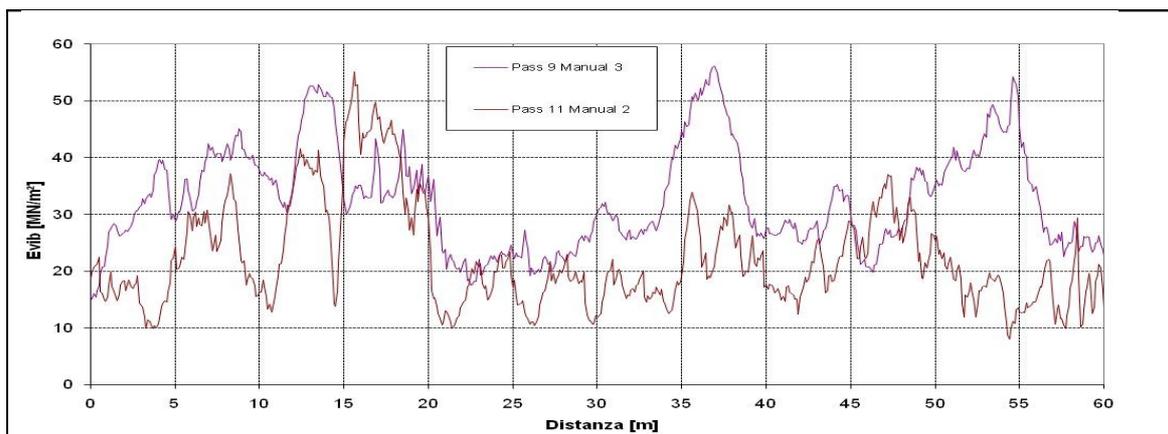


Fig. 5.16 Evib- metri. Pass manual 9/11 .Secondo strato Imola.

Nella figura 5.17 vengono elencate le passate 9 ed 11 del primo strato lato Imola e A14. Per il primo strato le differenze tra *Manual 2* e *Manual 3* risultano essere meno marcate.

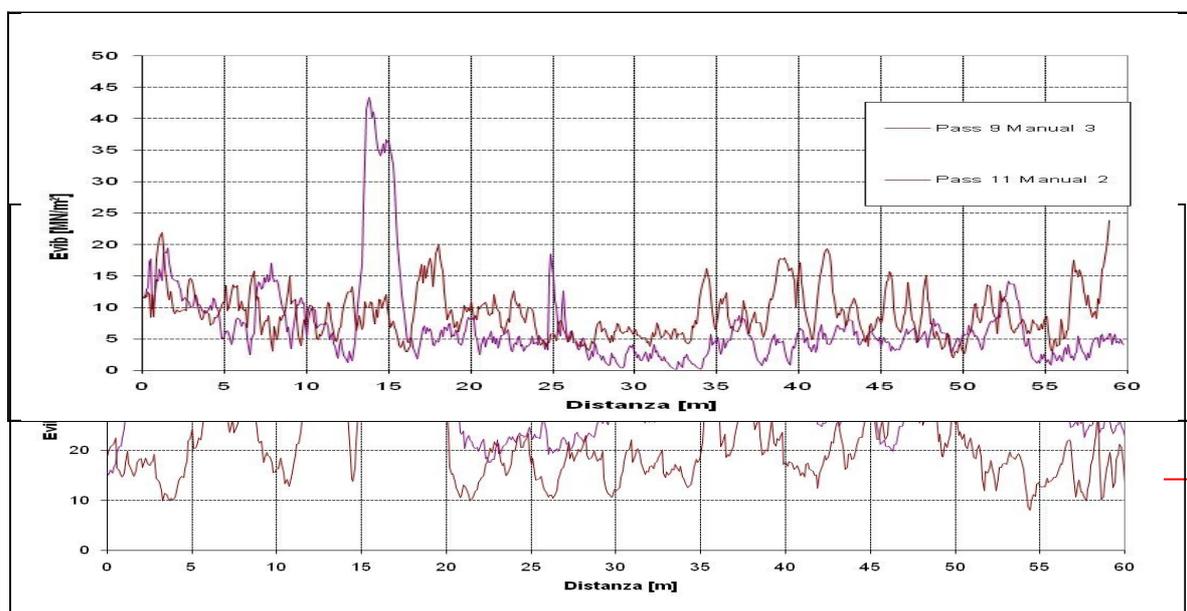


g. 5.17 Evib- metri. Pass manual 9/11 .Primo strato A14 e poi Imola.

Il *Manual 3* ha profondità d'indagine maggiore rispetto al *Manual 2*. Le differenze di valori in modulo tra questi due settaggi del rullo sono quasi nulle per il sottofondo e aumentano progressivamente per il layer 1 e 2.

Questo può essere dovuto al fatto che all'aumentare della profondità d'indagine, si interessa la parte compattata dello strato sottostante (sottofondo per i testing sul layer 1, sottofondo e layer 1 per quelli sul layer 2), provocando così un innalzamento del modulo.

La minor profondità d'indagine del *Manual 2* inoltre è messa in evidenza nel sottofondo: la presenza nell'intorno dei 15 m di un ammasso roccioso sottostante il rilevato è infatti riconosciuta nel passaggio in manual 3, con un picco d'incremento di circa il 70 % sul modulo medio dello strato.



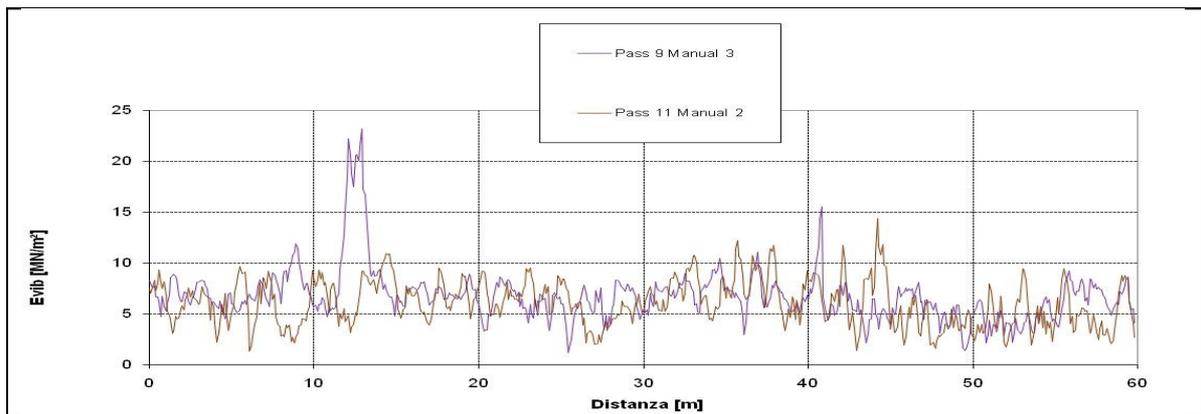


Fig. 5.17 Evib- metri. Pass manual 9/11 .Sottofondo A14 e poi Imola.

5.7 ANOMALIE LUNGO IL TRACCIATO.

Dall'analisi compiuta sui dati è emerso subito un punto localizzato tra 13 e 15 metri del primo campo in cui il dato E_{vib} subisce un improvviso incremento. Lungo questo tratto il rullo Bomag rileva dati notevolmente superiori alla media del campo. Ciò è riscontrabile, attraverso una lettura dei dati in allegato al capitolo 5, sul primo campo del sottofondo, in particolar modo il lato A 14 . Si capisce la anomalia poiché in tutte le passate vi è un valore massimo di E_{vib} molto al di sopra delle medie dell'intero campo. Inoltre anche la lettura dell'istogramma a lato, che mostra la distribuzione di tutti i valori del modulo di rigidezza dinamica del campo, chiarisce il concetto.

Tabella 5.28: Campo 1.Sottofondo- A14

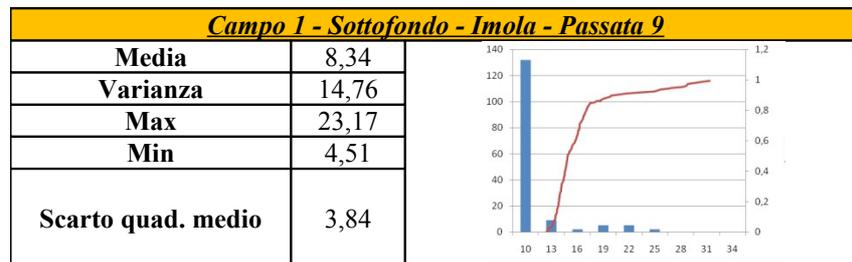
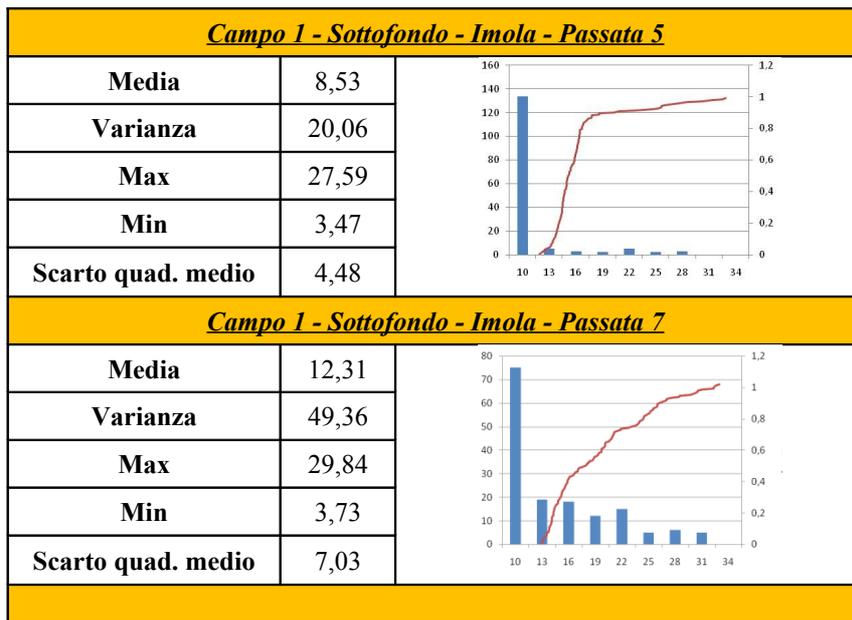
Campo 1 - Sottofondo - A14 - Passata 3	
Media	20,04
Varianza	76,61
Max	52,93
Min	5,54
Scarto quad. medio	8,75



Campo 1 - Sottofondo - A14 - Passata 5		
Media	14,88	
Varianza	77,92	
Max	43,12	
Min	2,03	
Scarto quad. medio	8,83	
Campo 1 - Sottofondo - A14 - Passata 7		
Media	17,45	
Varianza	129,71	
Max	56,17	
Min	4,15	
Scarto quad. medio	11,39	
Campo 1 - Sottofondo - A14 - Passata 9		
Media	12,45	
Varianza	87,71	
Max	43,44	
Min	1,18	
Scarto quad. medio	9,33	

Tabella 5.29: Campo 1. Sottofondo Imola

Campo 1 - Sottofondo - Imola - Passata 1		
Media	7,89	
Varianza	8,78	
Max	17,83	
Min	1,83	
Scarto quad. medio	22,96	
Campo 1 - Sottofondo - Imola - Passata 3		
Media	8,11	
Varianza	14,29	
Max	23,28	
Min	2,85	
Scarto quad. medio	3,79	



Probabilmente questa anomalia è legata alla presenza nel sottofondo di materiale roccioso al di sotto della superficie, tale materiale estremamente rigido fa sì che i valori del modulo di rigidezza dinamica E_{vib} siano elevati in quel punto. Questa anomalia risulta comunque rappresentativa del tracciato, non deve essere considerato come un errore di rilievo. La figura 5.15 mostra quanto enunciato.

Anomalia

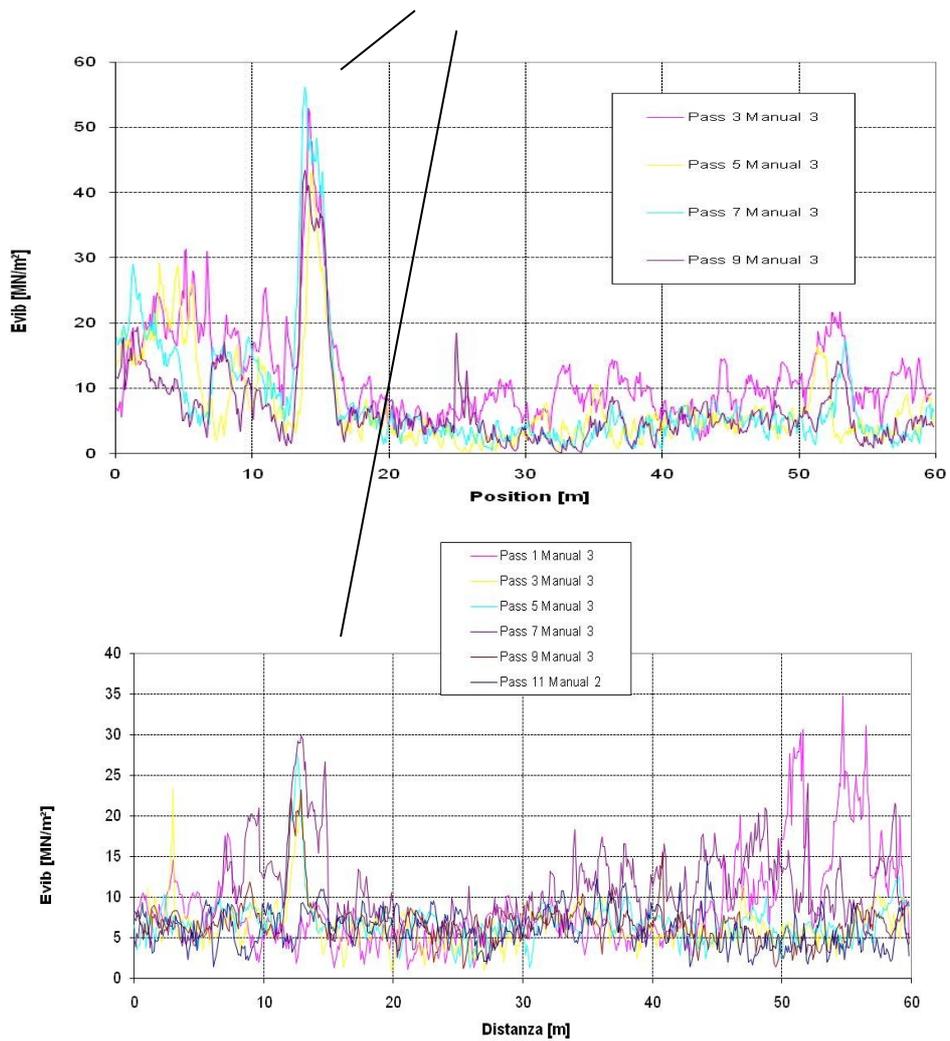


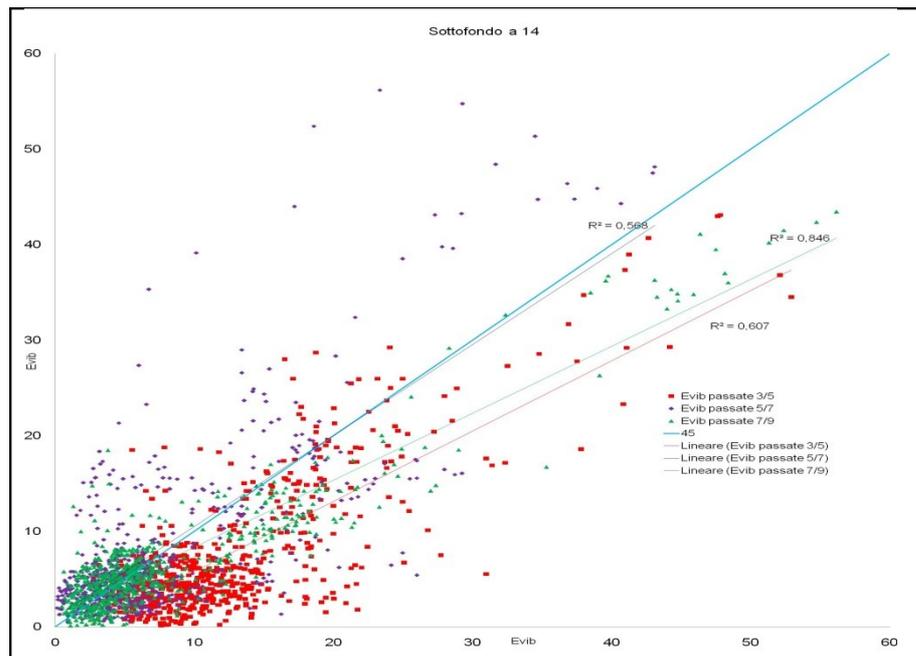
Fig. 5.17 Evib- metri. Sottofondo, A14- Imola.

I valori E_{vib} caratteristici del punto trattato, superano i 40/ 50 [MN/m²] e sono visibili anche nel grafico di tabella 5.22.

Tabella 5.30: Sottofondo lato Imola e A 14.

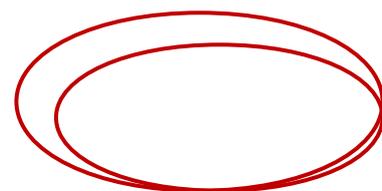
Lato A14





CONCLUSIONI

I sistemi di compattazione con rulli IC (Intelligent Compaction) ed i materiali di riciclo assumono ogni giorno sempre maggior importanza. Per questi motivi nel caso della sperimentazione attuata sul rilevato del campo di Imola, si è proceduto con l'ausilio di un rullo IC-Bomag Variocontrol alla compattazione di un rilevato della lunghezza 60 metri, formato da materiale C&D.



Gli obiettivi del campo prove sono:

- Testare i dati del modulo dinamico E_{vib} derivanti dal rullo per ciascuno dei 4 materiali di interesse;
- Verificare l'efficacia della compattazione con rullo Bomag Variocontrol.

I risultati relativi ai punti sopra elencati vengono illustrati in maniera approfondita nell'allegato finale.

Relativamente al primo punto, si percepisce da una lettura dei dati per ciascuno dei quattro materiali proposti che la *miscela cemento asfalto 0/30 mm* del quarto campo, risulta la più idonea per un utilizzo come sottofondo o fondazione stradale. Si è giunti a questa conclusione attraverso un'analisi statistica dei moduli dinamici E_{vib} derivanti dal rullo e un successivo confronto dei risultati fra campi. Il valore E_{vib} che fornisce il rullo Bomag e su cui è incentrato tutto il lavoro sperimentale del seguente elaborato, viene definito come il modulo di rigidità dinamica ed è una misura della qualità in termini di rigidità del materiale. La miscela citata fornisce i valori più alti sia puntuali, sia in termini di medie E_{vib} dell'intero rilevato, con un valore medio del modulo che si attesta, a differenza delle altre miscele, oltre gli 80 [MN/m²] per il lato A14 ed Imola.

In merito al secondo punto si è fatta un'analisi dettagliata ed approfondita che ha permesso di raggiungere importanti considerazioni in merito all'efficacia e all'evoluzione della compattazione. Tale ricerca si è basata sull'evoluzione dei Δ , cioè sui differenti valori in modulo E_{vib} riscontrati nello stesso punto su due successive passate. Dall'andamento dei Δ e la creazione di utili elaborati grafici si è arrivati alle seguenti considerazioni:

- La compattazione con rullo Bomag sul sottofondo non ha avuto alcun effetto positivo nelle passate successive alla terza. Per cui le ulteriori passate sono risultate inefficaci. Ciò è legato alla scarsa qualità del materiale classificato come A7-6.
- Il primo strato pur reagendo alla compattazione Bomag, probabilmente ha risentito degli effetti del sottofondo, non ottenendo gli stessi risultati del "Layer 2"
- Il secondo strato (Layer 2) non poggiante sul sottofondo, ha reagito meglio del primo. Come si evince da tutti i dati raccolti. Ciò è probabilmente legato al fatto che quest'ultimo poggiava su di uno strato già di per sé rigido.
- Le modalità ed i settaggi decisi per la compattazione Bomag sono risultati efficaci su tutti i materiali C&D, i quali hanno reagito incrementando i propri moduli di rigidità

dinamica.

Note bibliografiche di riferimento:

[1]: Rapporto APAT 2007 -**Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici**. Esame dati dell'anno 2006

- [2]: Rapporto ANPAR 2005/06: **Produzione di aggregati riciclati in Italia**, Ing. Giorgio Bressi, Ottobre 2005.
- [3]: Rapporto APAT 2008- **Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici**. Esame dati dell'anno 2007
- [4]: Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152, "**Norme in materia ambientale**", pubblicato nella *Gazzetta Ufficiale* n. 88 del 14 aprile 2006 - Supplemento Ordinario n. 96. 2006
- [5]: D.Lgs. n.22/1997 (Legge Ronchi), "**Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio**". 1997
- [6]: **Circolare n°5205** del 15/07/2005.
- [7]: **Appunti del corso Strade LB-** Bucchi Simone, 2007.
- [8]: WWW.Bomag.com. **System for soil compaction**. Bomag. 2010
- [9]: **Roller-integrated Continuous Compaction Control (CCC). Technical Contractual Provisions & Recommendations Cap 9**, D.Adam, *Vienna University of Technology & Consulting Engineer, Austria*. 2005
- [10]: **Intelligent compaction: OVERVIEW AND RESEARCH NEEDS**. Jean-Louis Briaud and Jeongbok Seo, Texas A&M University. 2003
- [11] **Congresso A.I.P.C.R. – Associazione Internazionale Permanente dei Congressi della strada**, Sydney, 1983.
- [12] Autostrada del Brennero: **Capitolato speciale d'appalto progetto dei lavori di ordinaria manutenzione; prestazioni tecniche-parte seconda**. Trento 2008.
- [13]: Rulli Vibranti: BW 213 DH-4. **Performance Data**. Bomag. Germania. 2010
- [14] Bomag rulli vibrati tandem BW177-226D4. **Performance Data**. Bomag. Germania 2009

Pubblicazioni :

ADAM, D. and KOPF F. (2000). **“Sophisticated Compaction Technologies and Continuous Compaction Control,”** European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials, Presses Ponts et Chaussées, Paris, France.

ADAM, D. and KOPF F. **“Operational devices for compaction optimization and quality control (Continuous Compaction Control and Light Falling Weight Device)”**

Sangiorgi, C., Marradi, A., Lantieri, C. and Pinori, U., 2009. **Dynamic field assessment of bearing capacity for pavement subgrades and foundations.** 6° International Conference on maintenance and rehabilitation of pavements and technological control, Torino, July.

AMMANN (2003). **“ACE-Soil Compaction and Compaction Control,”** CD, AMMAN Verdichtung AG, Langenthal, Swiss.

Cesare Sangiorgi, Alessandra Bonoli, Claudio Lantieri, Francesco Petretto; Alessandro Marradi **“Indagine sugli aggregati da C&D”**, *Strade e Autostrade* 11/2010.

Kröber, W., R. Floss, and W. Wallrah. **“Dynamic Soil Stiffness as Quality Criterion for Soil Compaction.”** Technical Paper, BOMAG Schriftenreihe, Boppard, Germany.

Adam, D. and Kopf, F., (2004) **"Operational devices for compaction optimization and quality control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device) "**

Proc. Intl. Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction, 97-106, December 16-17, 2004, Athens, Greece.

Normative:

-C.N.R. B.U. n. 69 (30/11/78)

Norme sui materiali stradali – Prova di costipamento di una terra.

- C.N.R. B.U. n. 139 (15/10/92)

Norme sugli aggregati: criteri e requisiti di accettazione degli aggregati impiegati nelle sovrastrutture stradali.

-C.N.R. B.U. n. 104 – 1984

Identificazione delle rocce più comuni impiegate come aggregati stradali.

- C.N.R. B.U. n. 130 – 1989

Norme sulle miscele di aggregati e leganti idrocarburici: determinazione della resistenza a compressione e delle suscettibilità all'acqua di miscele di aggregati lapidei ed emulsioni bituminose.

-C.N.R. B.U. n. 178 – 1995

Catalogo delle pavimentazioni stradali.

-ASTMD 6951-03:

“Standard test method for use of the dynamic cone penetrometer in shallow pavement applications”;

- UNI-EN 13383-1:2002

"Aggregati per opere di protezione (armourstone) - Parte1: specifiche", recepita come UNI EN 13383-1:2003.

-UNI-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-EN 12620:2004

Per il confezionamento di calcestruzzi con resistenza 15 MPa, secondo le indicazioni della norma Uni 8520-2.

