

**Alma Mater Studiorum – Università di Bologna**

---

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**Corso di Laurea in Ingegneria Civile (V.O.)**

**D.I.S.T.A.R.T**

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

**Tesi di Laurea in Tecnica dei Lavori Stradali, Ferroviari e Aeroportuali**

**SISTEMI PER LA COMPATTAZIONE CONTINUA  
INTELLIGENTE : STUDIO SU RILEVATO SPERIMENTALE  
CON TERRE A<sub>2-5</sub> E MATERIALI C&D**

Tesi di:

**GIULIA URBINATI**

Relatore:

Dott. Ing. **CESARE SANGIORGI**

Correlatore:

Dott. Ing. **CLAUDIO LANTIERI**

**Anno Accademico 2008-2009**

---

**Sessione III**

## INDICE

<b><u>INTRODUZIONE</u></b> .....	1
<b><u>CAPITOLO 1</u></b>	
<b><i>LA COMPATTAZIONE DEI TERRENI</i></b>	
<b><i>1.1 PREMESSA</i></b> .....	5
<b><i>1.2 METODI DI COMPATTAZIONE</i></b> .....	7
1.2.1 <i>LA COMPATTAZIONE TRADIZIONALE</i> .....	7
1.2.2 <i>LA COMPATTAZIONE INTELLIGENTE</i> .....	9
<b><i>1.3 MODULI FORNITI DAI RULLI COMPATTATORI IN CCC</i></b> .....	14
1.3.1 <i>CMV</i> .....	15
1.3.2 <i>VALORE OMEGA <math>\Omega</math></i> .....	18
1.3.3 <i>MODULO DI VIBRAZIONE (<math>E_{vib}</math>)</i> .....	19
1.3.4 <i>RIGIDEZZA DEL TERRENO <math>k_s</math></i> .....	22
1.3.5 <i>OMV</i> .....	23
<b><i>1.4 DIFFERENZE TRA BOMAG, AMMANN E GEODYNAMIK</i></b> .....	24
1.4.1 <i>BOMAG(Germania)</i> .....	24
1.4.2 <i>AMMANN(Svizzera)</i> .....	27
1.4.3 <i>GEODINAMIK(Svezia)</i> .....	29
<b><i>1.5 CONFRONTO DEI VALORI DI <math>E_{vib}</math>, <math>K_s</math>, <math>CMV</math>, <math>\Omega</math></i></b> .....	30
<b><i>1.6 CONCLUSIONI</i></b> .....	33

**CAPITOLO 2****FONDAMENTI DI COMPATTAZIONE VIBRATORIA**

<b>2.1 PREMESSA</b> .....	35
<b>2.2 VIBRAZIONI DI RISONANZA E NATURALI</b> .....	37
<b>2.3 VIBRAZIONI ARMONICHE E SUB-ARMONICHE</b> .....	38
<b>2.4 PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI</b> .....	39
<b>2.5 FORZE DINAMICHE</b> .....	39
<b>2.6 SISTEMI ECCITATORI VIBRANTI PER I COMPATTATORI CON RULLI VIBRANTI</b> .....	40
<b>2.6.1 SISTEMA DI VIBRAZIONE</b> .....	40
<b>2.6.2 SISTEMA OSCILLATORIO</b> .....	41
<b>2.6.3 DIFFERENZE NELL'USO DEL SISTEMA OSCILLANTE E DI         QUELLO VIBRATORIO NELLA COMPATTAZIONE</b> .....	41
<b>2.6.4 PARAMETRI CHE CARATTERIZZANO LA VIBRAZIONE</b> .....	43
<b>2.7 CARICO STATICO APPLICATO SULL'ASSE E MASSA VIBRANTE</b> .....	44
<b>2.8 FORZA CENTRIFUGA, FREQUENZA, AMPIEZZA</b> .....	45
<b>2.9 TRASFERIMENTO DI ENERGIA</b> .....	49
<b>2.10 CONCLUSIONI</b> .....	52

**CAPITOLO 3****DETERMINAZIONE DEL MODULO VIBRATORIO  $E_{VIB}$** 

<b>3.1 PREMESSA</b> .....	53
<b>3.2 BASI FISICHE DEL PRINCIPIO DI MISURAZIONE</b> .....	53
3.2.1 DALLA RIGIDEZZA AL MODULO(TEORICO).....	60
3.2.2 DALLA RIGIDEZZA AL MODULO(SPERIMENTALE) .....	60
<b>3.3 TEST DI COMPATTAZIONE E CONFRONTO CON IL TEST DELLA PROVA DI CARICO SU PIASTRA</b> .....	62
<b>3.4 DETERMINAZIONE DELLA FORZA DI CONTATTO RULLO- TERRENO <math>F_B</math></b> .....	64
<b>3.5 CONCLUSIONI</b> .....	70

**CAPITOLO 4****SITO SPERIMENTALE ALTOPASCIO (LU)**

<b>4.1 PREMESSA</b> .....	73
<b>4.2 CARATTERISTICHE DEL MATERIALE C&amp;D</b> .....	76
<b>4.3 CARATTERISTICHE TERRENO A2-5</b> .....	78
<b>4.4 CARATTERISTICHE DEL COMPATTATORE BOMAG VARIOCONTROL</b> .....	79
<b>4.5 CAMPI PROVA</b> .....	80
4.5.1 CAMPO A2-5 GIORNO 6 OTTOBRE .....	85
4.5.2 CAMPO C&D GIORNO 7 OTTOBRE .....	87
<b>4.6 CONFRONTO GRAFICI IN MODALITÀ AUTOMATICA</b> .....	88
<b>4.7 INTRODUZIONE GEOSTATISTICA</b> .....	99
4.7.1 CONFRONTO DEI DATI OTTENUTI CON MODALITÀ MANUALE E MAPPATURE GEOSTATISTICHE.....	101

---

<b>4.8 CONFRONTO TRA MATERIALI A2-5 E C&amp;D TRAMITE I VALORI MEDI DI <math>E_{vib}</math>.....</b>	<b>107</b>
<b>4.9 STUDIO DEL COMPORTAMENTO DEL CAMPO C&amp;D SOPRA A2-5.....</b>	<b>110</b>
<b>4.10 CONFRONTO MODALITÀ AUTOMATICA-MODALITÀ MANUALE (PROOF-ROLLING) SU TERRENO A2-5 E MATERIALE C&amp;.....</b>	<b>113</b>
4.10.1 CAMPO IN TERRENO A2-5.....	113
4.10.2 CAMPO IN MATERIALE.....	116
<b>4.11 CONCLUSIONI.....</b>	<b>118</b>
<b><u>CAPITOLO 5</u></b>	
<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>120</b>
<b><u>BIBLIOGRAFIA</u>.....</b>	<b>123</b>

## **INTRODUZIONE**

La qualità delle strade, autostrade, binari ferroviari, aeroporti, dighe in terra, impianti di smaltimento dei rifiuti, fondazioni di strutture ed edifici, etc. dipende molto dal grado di compattazione, così, sia il metodo di compattazione sia le attrezzature devono essere selezionati con cura, tenendo in considerazione il materiale utilizzato. Il processo di compattazione deve essere ottimizzato al fine di raggiungere sufficienti gradi di compattazione e di uniformità. Se il controllo della compattazione può essere incluso nel processo di compattazione, si riducono costi e tempo. La valutazione della compattazione del suolo può ora essere determinata durante il processo di compattazione e questo grazie all'avvento delle nuove metodologie di compattazione, conosciute con il nome di Continuous Compaction Control, o più comunemente con il termine di Compattazione Intelligente.

Questo metodo consiste nel compattare il terreno tramite la propagazione di onde vibratorie che raggiungono i vari strati del terreno, prodotte da masse eccentriche vibranti poste all'interno del tamburo di un rullo compattatore.

Queste vibrazioni sono caratterizzate da un'ampiezza e da una frequenza che vengono variate in automatico ed in maniera continua e costante direttamente dal rullo.

Questo succede perché il compattatore è dotato di un sistema "intelligente" che a seconda dei valori di rigidità dinamica rilevati durante il costipamento, varia le ampiezze in modo da raggiungere i valori del modulo vibrotorio impostati inizialmente dall'operatore (modalità automatica).

Il compattatore può lavorare anche in una diversa modalità, definita manuale, dove inizialmente vengono impostati i valori massimi di ampiezza della vibrazione.

In particolare, si è studiato un particolare rullo compattatore Bomag con apparecchiatura integrata Variocontrol, che fornisce in maniera continua ed istantanea i valori del modulo vibrotorio Evib[MPa], che individuano la rigidità del terreno compattato.

Il modulo Evib si riferisce direttamente al modulo di deformazione Ev ed è evidenziato nel display del macchinario durante il lavoro di compattazione. Il conducente può controllare immediatamente, sia se i valori richiesti finali vengono raggiunti sia se è necessario un'altra

passata. Ciò si traduce in un lavoro efficiente di compattazione con un numero minimo di passaggi.

Il sistematico sviluppo di questo metodo di misurazione ha permesso la determinazione diretta del modulo vibratorio del suolo, durante ogni movimento di vibrazione e sulla base della correlazione tra la forza di contatto rullo-terreno e il conseguente abbassamento di quest'ultimo come segnale di compattazione avvenuta. Questo valore di misura è chiamato modulo di vibrazione Evib. Per questa grandezza non sono necessari processi di calibrazione.

Oltre a Bomag, altre case costruttrici si sono impegnate nello sviluppo della compattazione "intelligente", fornendo i propri rulli di dispositivi per la determinazione di diversi moduli o coefficienti.

Tutti questi metodi (CCC) forniscono valori che rappresentano l'incremento o la diminuzione della rigidità del terreno a seguito della compattazione. Questi valori devono essere tarati in modo da poter essere messi in relazione con i valori convenzionali presenti nelle norme e nelle disposizioni contrattuali. La prova dinamica dei carichi con piastra è l'unica prova che consente di effettuare una correlazione affidabile tra i valori CCC e il modulo di deformazione del carico statico con piastra senza bisogno di alcuna taratura.

Questo perché nonostante il valore che si ottiene di Evib sia un modulo dinamico, mentre il modulo di deformazione Ev sia un modulo statico, la metodologia sulla quale si basano questi due moduli è simile.

La fase, durante la quale il rullo si muove sul terreno a velocità costante, con una certa ampiezza e frequenza, imprimendo sul terreno una determinata forza di compattazione, può essere paragonata alla fase di carico della prova di carico su piastra.

Allo stesso modo la fase di scarico, può essere paragonata al momento successivo la compattazione, durante la quale si assiste ad una redistribuzione dei grani.

I rulli vengono selezionati a seconda:

- Spessore dello strato da compattare e proprietà dei materiali, quali la distribuzione granulometrica, granulometria massima, forma del grano e del grado di uniformità;

- Contenuto d'acqua;
- Acqua e permeabilità.

I principali parametri che caratterizzano il compattatore sono:

- Peso totale e rullo del tamburo di carico statico;
- Forza statica (senza vibrazione)
- Forze dinamiche causate da:
  - 1) Direzione della forza di contatto rullo-terreno;
  - 2) Frequenza di eccitazione;
  - 3) Ampiezza teorica della massa eccentrica posta nel tamburo;
  - 4) Forma della superficie e diametro del tamburo.

Il documento si suddivide in quattro capitoli.

Nel primo si è trattato in maniera più approfondita della compattazione intelligente e delle differenze con i metodi tradizionali di costipazione fino ad ora usati.

Inoltre, si è trattato delle varie case produttrici, Bomag, Ammann, Geodynamik, che si sono maggiormente interessate allo sviluppo di questa nuova metodologia di compattazione “intelligente”, mettendo a confronto i diversi moduli da esse determinati.

Nel secondo capitolo, si è effettuato uno studio sulle modalità di propagazione delle onde vibratorie nel terreno, causa della compattazione.

Si è inoltre affrontato lo studio delle modalità di propagazione di energia nel terreno, studiando i vari grafici indicatori.

Nel terzo capitolo si è affrontato in maniera più approfondita il tema del modulo vibratorio Evib, sia dal punto di vista teorico che sperimentale, confrontandolo con il modulo di deformazione Ev ottenuto tramite prova di carico su piastra.

Inoltre, si è determinata in maniera matematica la forza di contatto rullo-terreno e si è trattato in modo più approfondito il comportamento del rullo durante la compattazione, al variare delle caratteristiche del terreno e in funzione delle eventuali discontinuità.



Nel quarto capitolo si è trattato dello studio su un rilevato sperimentale in località Altopascio (LU), che l'università degli studi di Bologna ha realizzato insieme all'Università degli studi di Pisa e Bomag, in data 6-7 ottobre 2009.

Il rilevato è composto da due siti caratterizzati l'uno da materiale argilloso-sabbioso A2-5, l'altro da materiale di recupero, molto rigido C&D.

Entrambi i siti sono stati suddivisi in 3 fasce centrali compattate rispettivamente con 2,4 e 8 passate di rullo, e da due fasce laterali, utilizzate per le manovre del compattatore.

Le compattazioni sono state effettuate in entrambe la modalità, sia manuale (Proof-Rolling) che automatica, successivamente ne sono stati confrontati i valori di Evib ottenuti.

Inoltre si sono effettuati confronti relativi ai diversi valori ottenuti con i due materiali, mettendo anche in evidenza le grosse problematiche riscontrate sul campo in termini di umidità, avvallamenti e presunti strati di terreno cedevole nel sottofondo.

Ai grafici ottenuti tramite lo studio dei valori di Evib, si sono affiancate le mappature del sito ottenute tramite indagine geostatistica per meglio evidenziare le caratteristiche dei campi a seguito della compattazione.

## CAPITOLO 1

### *LA COMPATTAZIONE DEI TERRENI*

#### *1.1 PREMESSA*

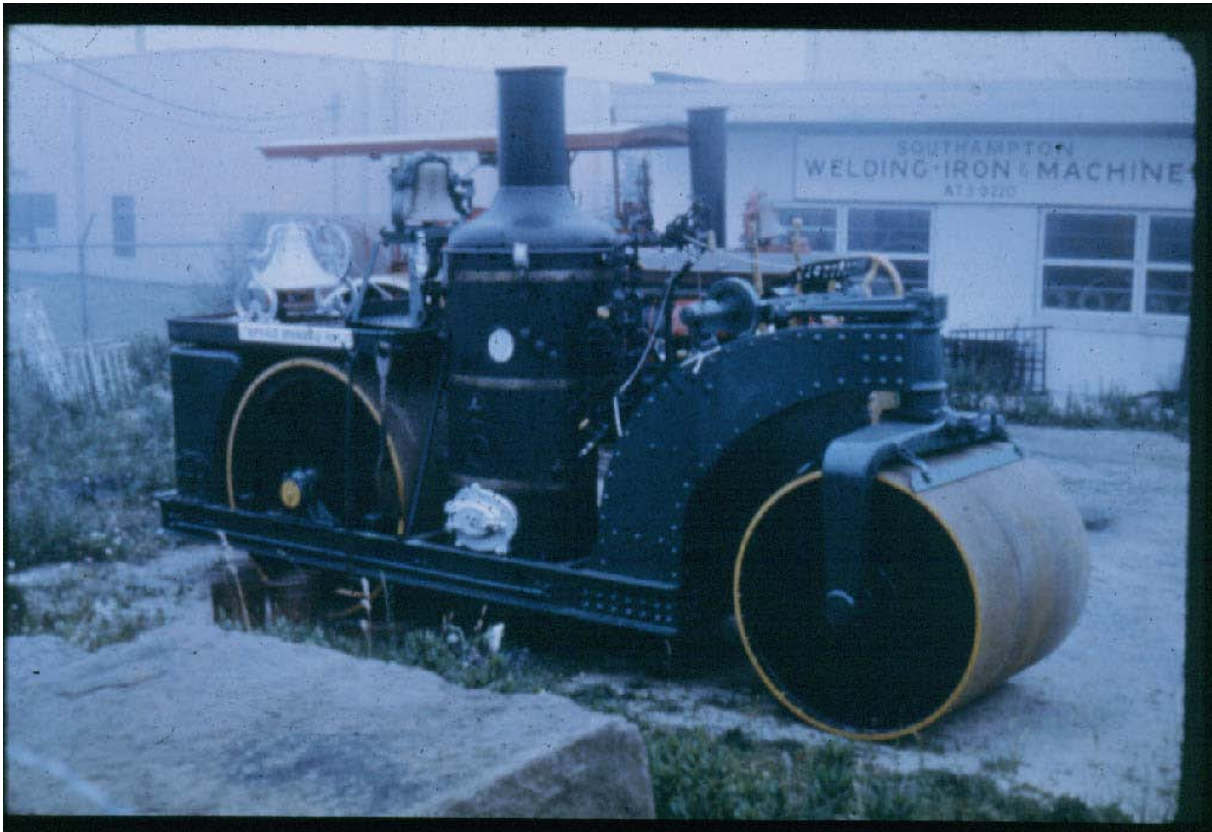


Fig.1 Immagine di un vecchio compattatore

Fino ad oggi per compattare il suolo ed i materiali di riempimento sono stati impiegati rulli statici o vibranti (Fig.1.1).

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, generando la compattazione, e rilevando con continuità ed in maniera istantanea i moduli di rigidità del terreno, riduce al minimo tali problematiche permettendo di raggiungere un ottimo grado di compattazione, con un numero limitato di passate.

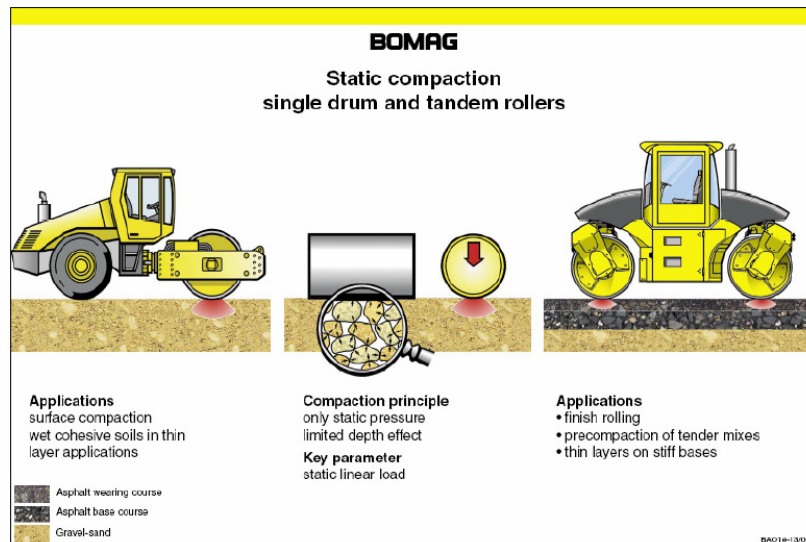


Fig.1.1 Rulli statici/dinamici

Il metodo più comune di controllo della qualità della compattazione nella costruzione delle strade è costituito dall'esecuzione di test in loco, utilizzati in maniera sistematica o statistica.

I test permettono di determinare il valore della portanza del terreno raggiunta a seguito della compattazione rilevando il modulo di deformazione E.

## ***1.2 METODI DI COMPATTAZIONE***

I metodi di compattazione del terreno si possono così suddividere:

### **1) Compattazione convenzionale**

- Tamburi statici o vibratorii lisci o a piede di pecora

### **2) Continuous Compaction Control (Vibratoria)**

- Rulli vibranti con strumentazione a bordo
- Misura dell'accelerazione del rullo in funzione del tempo
- Determinazione della rigidità del terreno e del modulo
- 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 (forza, ampiezza e frequenza) per raggiungere il valore del modulo pre-impostato.

### ***1.2.1 LA COMPATTAZIONE TRADIZIONALE***

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, di urto o vibrazione. 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 della prima classe, mentre per il costipamento dei terreni granulari sono efficaci soprattutto quelle del secondo tipo.

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. I rulli gommati sono costituiti da un cassone trasportato da un certo numero di ruote gommate; compattano sia con azione di compressione che di taglio per mezzo dei pneumatici. Rispetto ai rulli lisci agiscono più in profondità. I rulli a punte sono dotate di protrusioni di varia forma (es. rulli "a piè di pecora") o di segmenti mobili che esercitano nel terreno un'azione di punzonamento e di taglio. La loro azione è limitata alla parte più superficiale di terreno. 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 terreno.

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.

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.

In sito il costipamento viene eseguito disponendo il terreno a strati successivi di qualche decina di centimetri; 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.

### 1.2.2 LA COMPATTAZIONE INTELLIGENTE

Le prime considerazioni sulle misurazioni effettuate tramite vibrazione-integrata durante la compattazione risalgono al 1930 quando la compattazione veniva effettuata tramite piastre vibranti. E' il 1974 quando viene utilizzato 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.

Nel 1978 Geodynamik introduce il CMV. Quando Geodynamik per primo introdusse il valore di compattazione CMV, la tecnologia del tamburo vibratorio era in una fase rudimentale.

Nel 1980 Bomag introduce un nuovo metodo di misurazione che prende il nome di Metodo Omega (il valore omega fornisce una misura continua dell'energia di compattazione) che viene installato su un Terrameter. Nel 1990 Bomag introduce 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 introduce il rullo Variocontrol dotato di masse eccentriche rotanti e controllo servo-idraulico delle forze centrifughe verticali (Fig.1.2) .

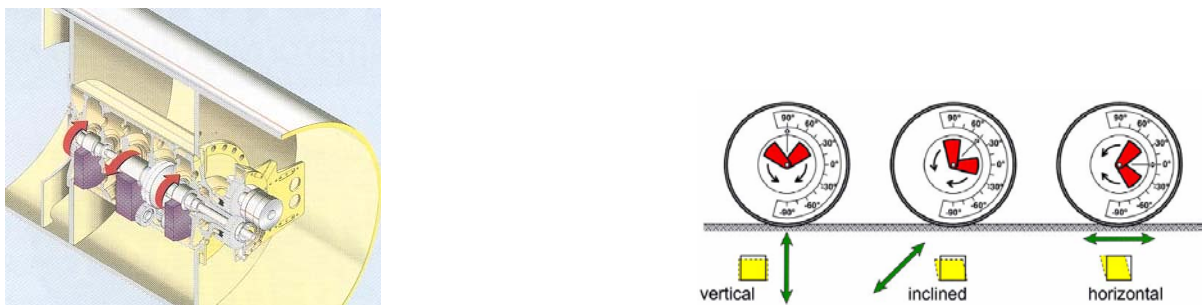


Fig.1.2 Sistema Variocontrol

Adam (1996) fu il primo a descrivere le caratteristiche relative alla modalità di operare dei rulli: area di contatto tamburo/terreno, parziale perdita di contatto, comportamento del

tamburo. Nello stesso anno Ammann introduce il rullo Ace dotato di due masse eccentriche rotanti e controllo di frequenza .

Nel 2001 Ammann introduce il parametro di rigidità  $k_s$

Questi metodi forniscono valori assoluti sulla compattazione appena conclusa dopo aver misurato con continuità il valore della densità e della rigidità.

In passato i risultati della compattazione assoluta potevano essere forniti solamente da misurazioni ottenute con dispositivi “indipendenti”, ovvero il dispositivo non era integrato al compattatore, oggi invece ci sono macchinari che hanno questi sistemi integrati.

La tecnologia utilizzata in questo metodo si basa un sistema regolatore che usa le informazioni ricevute per adattare continuamente il compattatore a raggiungere le condizioni richieste. Questo sistema controlla i diversi parametri di compattazione: ampiezza, frequenza e velocità. Le misurazioni vengono effettuate direttamente dal macchinario. Viene impostato un campo di variabilità entro il quale devono rientrare i valori ottenuti e automaticamente regola le impostazioni del rullo per raggiungere il valore prefissato nel caso le letture non dovessero cadere entro un valore accettabile.

Vengono utilizzati rulli vibranti con grandi ampiezze e basse frequenze per compattare suoli cedevoli mentre per compattare strati profondi di terreno e suoli rigidi si utilizzano ampiezze minori e alte frequenze.

Questi adeguamenti servono a garantire che il materiale non sia sovra compattato, se risultasse così l'ampiezza e la frequenza verrebbero automaticamente diminuite fino al raggiungimento del giusto grado di compattazione.

I compattatori dinamici generano vibrazioni non-lineari e le caratteristiche tipiche di queste vibrazioni sono da ricercarsi negli automatismi del sistema di controllo per la compattazione intelligente.

Della periodica perdita di contatto tra il rullo ed il terreno se ne tiene conto considerando gli effetti non lineari. Questa non-linearità produce fenomeni di vibrazioni sub-armoniche e può portare ad instabilità.

I sistemi di controllo per rulli si basano sui risultati ottenuti con la teoria delle oscillazioni non-lineari e permettono di raggiungere ottime condizioni di compattazione

grazie a continui aggiustamenti che vengono effettuati automaticamente impostando un corretto valore del modulo vibratorio  $E_{vib}$ .

Iniziando con grandi ampiezze e basse frequenze i sistemi di controllo automatici assicurano un buon effetto di compattazione degli strati più profondi. Quando il grado di compattazione aumenta, le frequenze aumentano e le ampiezze si riducono automaticamente, questi comportamenti permettono di ottenere un ottimo grado di compattazione.

I valori della rigidità che si ottengono, sono direttamente confrontabili con quelli determinati tramite prova di carico su piastra per controllare la compattazione.

La compattazione intelligente permette inoltre di mostrare il grado di omogeneità e il grado di compattazione ottenuto.

Vengono effettuate un numero minimo di passate e poi vengono monitorati i risultati.

Oltre ad ottenere un ottimo grado di compattazione, si evita il rischio di overcompaction, i costi di laboratorio sono ridotti e l'affidabilità è massimizzata.

Questo nuovo metodo di compattazione assicura una valutazione immediata e completa della zona che deve essere compattata, evidenziando i punti deboli in modo continuo e istantaneo Fig.1.3.



Compaction control with  $E_{VIB}$  [MN/m<sup>2</sup>]

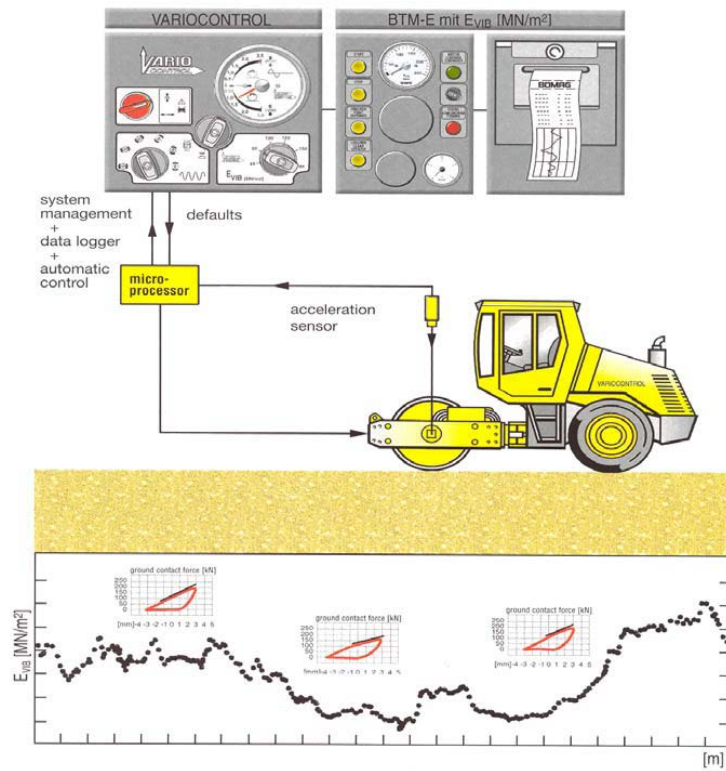


Fig.1.3 Tecnologia Bomag

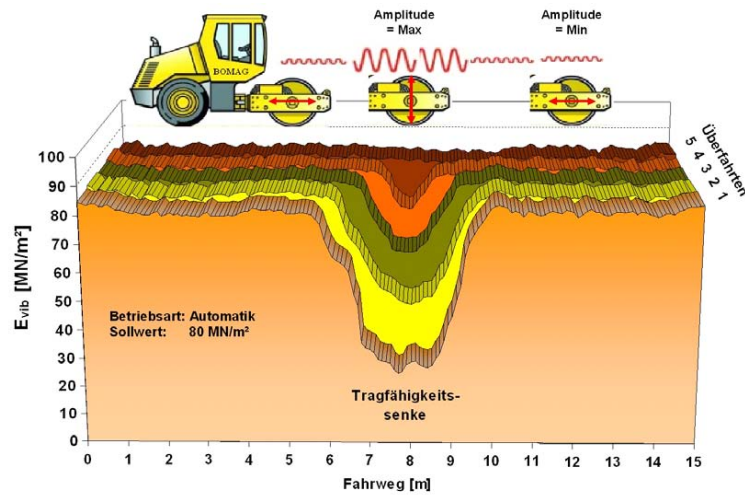


Fig.1.4 Variazione delle ampiezze e frequenze per ottimizzare la compattazione

In Fig.1.4 mettendo in ascissa la progressiva misurata in [m] relativa alla lunghezza del campo da compattare ed in ordinata i valori del modulo vibratorio misurato in  $[MN/m^2]$ , si nota come per compattare terreni cedevoli il rullo utilizzi ampiezze molto elevate, raggiungendo in alcuni casi valori massimi ottenuti quando la massa eccentrica si trova in posizione verticale.

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

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

### 1.3 MODULI FORNITI DAI RULLI COMPATTATORI IN CCC

In questa parte verrà trattato l'argomento relativo ai valori di misurazione dinamica utilizzati dai rulli compattatori forniti da Bomag, Geodynamik, Ammann, che risultano essere:

- CMV (Compaction Meter Value)
- Valore Omega ( $\Omega$ )
- $E_{vib}$  (Modulo di vibrazione)
- Rigidezza del terreno  $k_s$
- OMV (Oscillometer Value)

Sistemi CCC	Valore CCC	Definizione del valore di CCC	Produttori
Compactometer	CMV []	Rapporto ampiezza dell'accelerazione	Geodynamik
Terrameter	OMEGA [Nm]	Energia trasferita al terreno	Bomag
Variocontrol	$E_{vib}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	Modulo di elasticità dinamica del terreno	Bomag
ACE	$k_s$ [N/m]	Rigidezza del terreno	Ammann

Tab.1 Confronto moduli caratteristici dei rulli compattatori

### 1.3.1 CMV

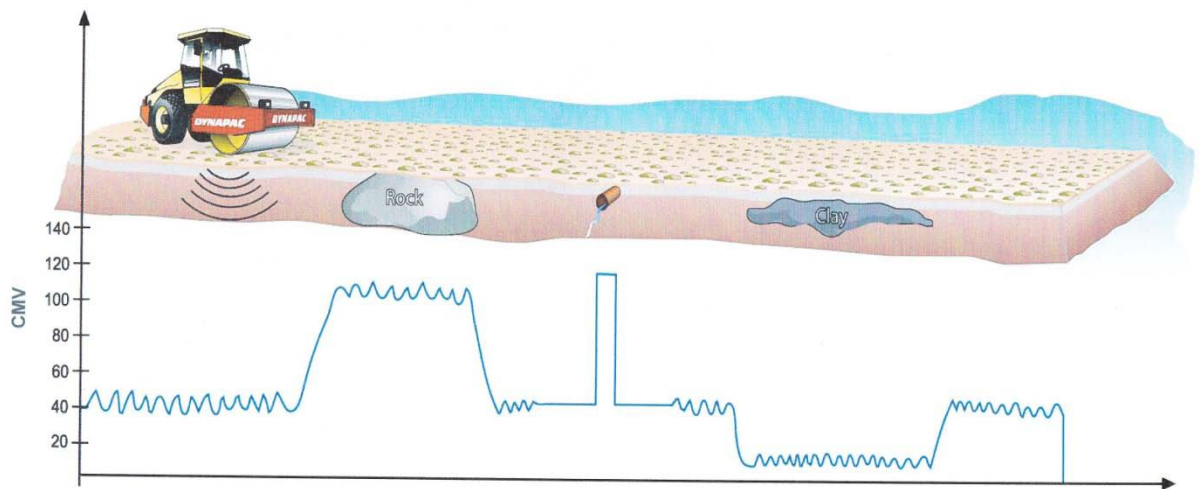


Fig.1.5 Sistema CMV

La tecnologia CMV (Fig.1.5) utilizza accelerometri installati su un rullo di un compattatore vibrante per misurare le accelerazioni del rullo in funzione del comportamento del terreno durante la compattazione.

Molti studi hanno dimostrato che il rapporto tra l' ampiezza della prima armonica  $A_{2\Omega}$  e l'ampiezza della frequenza fondamentale  $A_{\Omega}$  è un importante indicatore della compattazione del terreno.

Le ultime ricerche dimostrano che i diversi indici che tengono conto dell'ampiezza di accelerazione del tamburo e dell'ampiezza delle sue armoniche (multipli della frequenza eccitatoria) potrebbero essere correlati alla compattazione del suolo e alle rigidità degli strati di terreno (Forsblad 1980). Da queste ultime ricerche il valore di CMV viene calcolato come:

$$CMV = C \frac{A_{2\Omega}}{A_{\Omega}}$$

$A_{\Omega}$  = ampiezza di accelerazione verticale del tamburo alla base (operativo)

$A_{2\Omega}$  = ampiezza di accelerazione del tamburo della prima armonica (= a due volte la frequenza eccitatoria eccentrica)

$\Omega$  = frequenza

C = valore costante stabilito durante la calibrazione in sito (molto usato è il valore

C = 300)

$\frac{A_{2\Omega}}{A_{\Omega}}$  = misura non lineare

Se si utilizza il valore C = 300 la variazione percentuale di accelerazione equivale a CMV = 3 o  $\pm 1,5$ , rapporto geodinamico di poca affidabilità per CMV < 8-10.

In un sistema rullo-tamburo veramente lineare, un rullo con una frequenza eccitatoria di 30 Hz potrebbe produrre una risposta di accelerazione del tamburo pari a 30 Hz ed il rapporto  $\frac{A_{2\Omega}}{A_{\Omega}}$  sarebbe = 0.

Siccome il sistema rullo-terreno non è lineare (il terreno non è elasto-plastico lineare: si verifica una parziale perdita di contatto con il terreno, la superficie di contatto varia in modo non lineare durante ogni ciclo di carico) l'accelerazione di risposta del tamburo è distorta e non sinusoidale.

L'analisi di Fourier è in grado di riprodurre una forma di onda distorta sommando multipli di frequenza eccitatoria. Quindi il rapporto  $\frac{A_{2\Omega}}{A_{\Omega}}$  è una misura del grado di distorsione o non lineare.

CMV viene calcolato tramite l'analisi spettrale relativa alla misurazione dell'accelerazione verticale del tamburo durante due cicli di vibrazione (Fig.1.6).

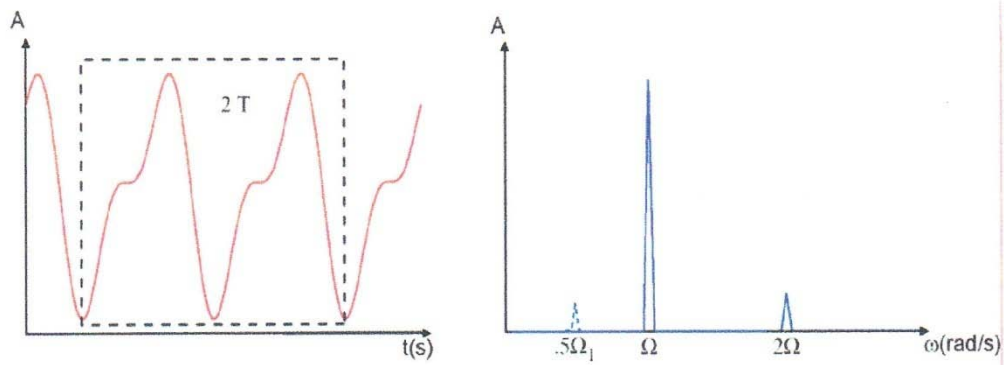


Fig.1.6 Analisi spettrale

Un parametro simile al CMV è l'RMV definito dal rapporto:

$$RMV = \frac{A_{0,5\Omega}}{A_{\Omega}} \quad \text{dove:}$$

$A_{0,5\Omega}$  = ampiezza di accelerazione della sub armonica causata dal salto, cioè il tamburo salta ad ogni ciclo

Il rapporto tra CMV, la densità del suolo, la rigidezza ed il modulo è empirico ed è influenzato dalle dimensioni del rullo, dall'ampiezza della vibrazione e dalla frequenza, dalla velocità, dal tipo di suolo e dagli strati di terreno sottostante il suolo compattato. Quindi l'utilizzo di CMV in CCC richiede un'accurata calibrazione.

Sakay ha recentemente introdotto il valore CCV che oltre alla prima armonica fondamentale considera la prima sub-armonica ( $0,5\Omega$ ) e armoniche di ordine superiore.

$$CCV = \left[ \frac{A(0,5\Omega) + A(1,5\Omega) + A(2,5\Omega) + A(3\Omega)}{A(2,5\Omega) + A(3\Omega)} \right] * 100$$

### 1.3.2 VALORE OMEGA $\Omega$

Sviluppato da Bomag e Krober (1988), e incorporato nel sistema Terrameter, il metodo omega fornisce una misura dell'energia trasmessa al suolo.

Il BTM05 Terrameter, per determinare il grado di compattazione del terreno, utilizza la relazione tra l'accelerazione della massa vibratoria e la rigidità dinamica del terreno.

Il sistema di misurazione in base alle accelerazioni del rullo determina un valore Omega [ $\Omega$ ].

Tale valore, evidenzia la rigidità 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.

Il valore di omega è determinato integrando la forza  $F_s$  e lo spostamento  $z_d$  di due consecutivi cicli di vibrazione:

$$\text{Omega } (\Omega) = \int_0^{2T} [- (m_d)\dot{z}_d + (m_d + m_f)g + m_o e_o \Omega^2] \dot{z}_d dt$$

$F_s$  viene determinato sommando la forza statica (peso del rullo), l'inerzia del tamburo e la forza eccentrica, l'inerzia del macchinario viene trascurata.

$F_s$  = forza trasmessa al suolo [KN]

$z_d$  = spostamento del tamburo [mm]

### 1.3.3 MODULO DI VIBRAZIONE ( $E_{vib}$ )

Il più recente valore di misura utilizzato da Bomag è il modulo di vibrazione  $E_{vib}$  che considera parametri di vibrazione concentrati ed il cilindro (tamburo) che si muove su un mezzo elastico (Teoria dello spazio).

Per determinare  $E_{vib}$  si fa riferimento al modello illustrato in Fig.1.7 dove:

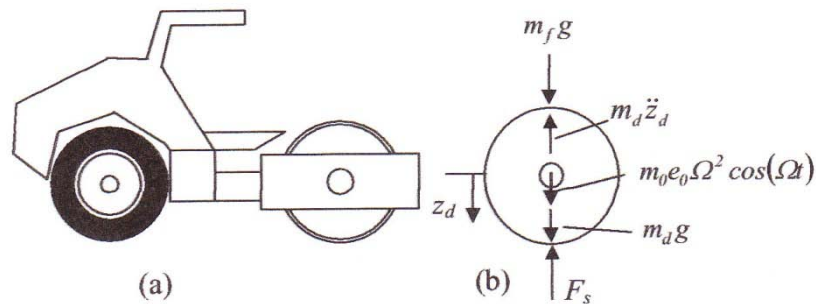


Fig. 1.7 Sistema di forze per determinare  $E_{vib}$

$m_d$  = massa del tamburo

$m_f$  = massa del telaio

$z_d$  = spostamento del tamburo

$\ddot{z}_d$  = accelerazione tamburo

$m_0 e_0$  = momento di massa eccentrica

$\Omega$  = frequenza eccitatoria

Bomag impiega una costante di frequenza di compattazione  $\Omega = 32$  Hz

$F_s$  = forza di contatto tra terreno e compattatore

$g$  = accelerazione di gravità

Bomag impiega due accelerometri per misurare l'accelerazione verticale del tamburo.

Il valore caratteristico fornito dal rullo Bomag è il Modulo Vibratorio  $E_{vib}$ , rilevato con continuità su tutto il tracciato.



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

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

Il rapporto tra  $F_s$  e il corrispondente abbassamento del terreno  $z_d$ , dovuto all'avvenuta compattazione, fornisce il valore della rigidità  $k_s$  (Fig.1.8).

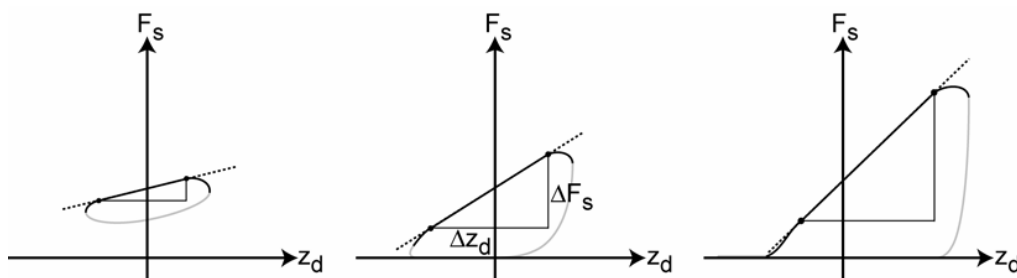


Fig.1.8 Curve di deformazione

La Fig.10 mette in relazione  $F_s$  con  $z_d$ , il gradiente della retta individuata nel grafico dal rapporto  $F_s/z_d$  fornisce il valore della rigidità  $k_s$ .

La curva evidenziata, e definita curva di deformazione, rappresenta l'energia di compattazione trasferita al terreno.

È interessante notare, come, all'aumentare della rigidità del terreno, individuata dall'aumento della pendenza della retta, aumenti l'area della curva di deformazione, e quindi, l'energia di compattazione trasferita.

Per collegare il comportamento della  $F_s$  misurata, della  $z_d$  e della rigidità  $k$  ad  $E_{vib}$ , si può utilizzare una soluzione teorica di Lundberg, studiata per un cilindro rigido che appoggia su un terreno omogeneo, isotropo.

La teoria di Lundberg è una teoria statica e riguarda  $F_s$ ,  $z_d$ , la lunghezza  $L$  del tamburo,  $R$  il diametro,  $\nu$  il coefficiente di Poisson,  $E$  il modulo di Young:

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

dove :

b = larghezza di contatto

$$b = \sqrt{\frac{16 \cdot R \cdot (1 - \nu^2)}{\Pi \cdot E \cdot L} \cdot F_s}$$

La relazione tra k ed E è mostrata in Fig.1.9.

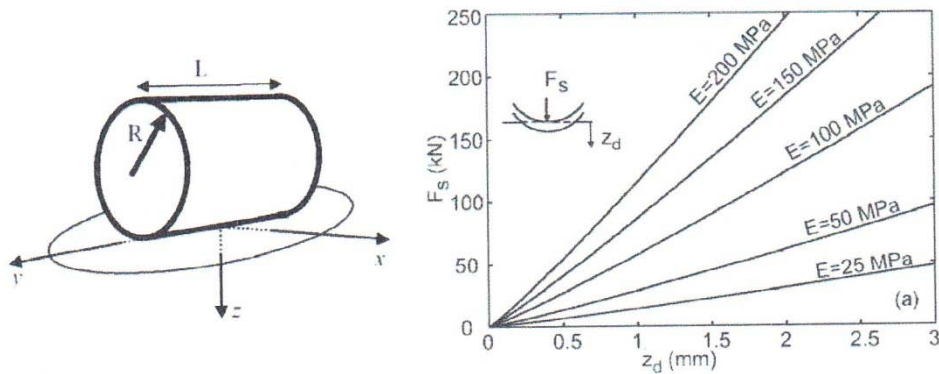


Fig.1.9 Relazione tra rigidità k e il modulo E

In Fig.1.9 vengono descritti i parametri fondamentali del rullo, utili per la determinazione di  $z_d$  e di  $b$  tramite la teoria di Lundberg.

Inoltre, si studia nuovamente il rapporto che lega  $F_s$  e  $z_d$ , mettendo in evidenza come, all'aumentare di  $F_s$ , si assista ad un incremento di  $z_d$  e ad un successivo miglioramento delle condizioni del terreno compattato individuate da un progressivo aumento del modulo  $E$  riferito ad  $E_{vib}$ .

**1.3.4 RIGIDEZZA DEL TERRENO  $k_s$**

Nel 1990 Ammann introdusse un rullo che permetteva di determinare il parametro di rigidità del terreno ( $k_s$ ).

Ammann determina la forza d'inerzia del tamburo e la forza eccentrica, la durata del processo per ottenere la misura del valore dell'accelerazione del tamburo e la posizione eccentrica (senza considerare l'inerzia dell'intelaiatura).

L'ampiezza dello spostamento del tamburo  $z_d$  è determinata tramite l'integrazione del valore di accelerazione più alto del tamburo. Il risultato ottenuto  $F_s$ - $z_d$  è illustrato in Fig.1.10, per una compattazione continua.

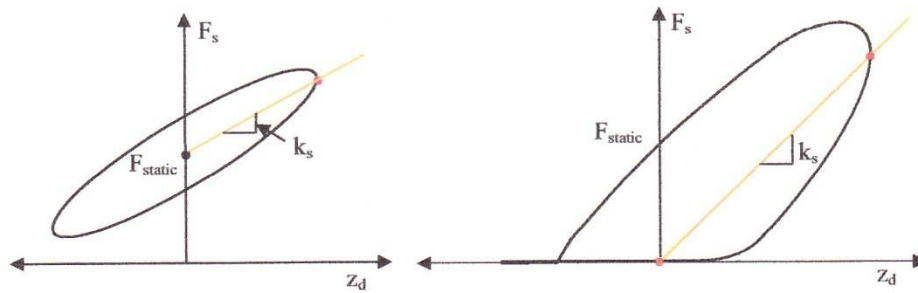


Fig.1.10 Metodo grafico per determinare le rigidità

Risolvendo l'equazione del moto per  $k_s$ , quando la velocità del rullo è = 0 si ottiene l'equazione qui di seguito riportata dove i parametri sono stati precedentemente definiti:

$$k_s = \omega^2 \cdot \left[ m_d + \frac{m_o e_o \cos \phi}{z_d} \right]$$

$k_s$  (Ammann) è il rapporto tra  $F_s$  e  $z_d$  ed è calcolato quando il tamburo è alla fine del suo percorso e  $z_d$  è massimo.

### 1.3.5 OMV

Il tamburo di un rullo oscillante (Fig.1.11), espone il terreno a ripetuti sforzi di taglio orizzontale sommati a carichi verticali applicati. Il corrispondente metro di compattazione è l'oscillometro. Sull'oscillometro, l'accelerometro deve essere installato in posizione orizzontale in modo da riuscire a misurare l'accelerazione orizzontale dell'asse del tamburo. Il segnale di accelerazione viene analizzato da un elaboratore e il risultato, il valore dell'oscillometro OMV, viene mostrato all'operatore.

L'OMV si ottiene valutando l'ampiezza delle accelerazioni orizzontali rilevate al centro del tamburo. Il valore ottenuto esprime le forze orizzontali trasferite dal tamburo al terreno. L'imprevisto scivolamento tra il tamburo ed il terreno è una complicazione che è sparita con la possibilità di analizzare il segnale dell'oscillometro. Il valore OMV rappresenta la rigidità orizzontale dello strato di terreno superficiale quando è caricato dinamicamente con un cilindro (tamburo). Così come avviene per un rullo vibrante, l'area caricata è una striscia rettangolare, la grandezza di tale striscia è funzione del rullo e dei parametri del terreno.

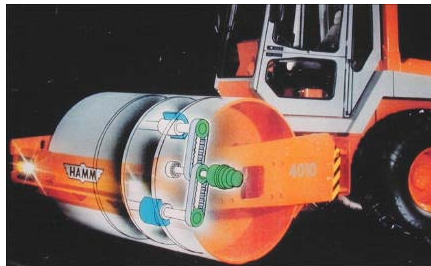


Fig.1.11 Rullo oscillante

#### ***1.4 DIFFERENZE TRA BOMAG, AMMANN E GEODYNAMIK***

I rulli variano in peso da 5 a 25 tonnellate e utilizzano frequenze dell'ordine dei 30 Hz. La forza di contatto con il terreno può raggiungere 40 tonnellate e lo spostamento sotto il rullo varia da 30mm (prima passata) fino a una frazione di millimetro (ultima passata). Il modulo misurato dopo la compattazione può variare da 30MPa a 200MPa. Qui di seguito sono riportati esempi di macchinari utilizzati per la compattazione intelligente introdotti da Bomag, Ammann e Geodynamik.

##### ***1.4.1 BOMAG (Germania)***

La strumentazione VarioControl installata su alcuni rulli Bomag rappresenta un sistema di compattazione intelligente installato su alcuni rulli Bomag monotamburo per l'adattamento continuo automatico dell'energia di compattazione allo stato del terreno. I rulli vibranti della serie BVC (Bomag VarioControl) sono dotati del sistema di vibrazione Bomag Vario che genera una vibrazione orientata del tamburo, adatta continuamente ed in automatico le ampiezze di vibrazione, e quindi l'energia di compattazione, consentendo il massimo aumento della forza compattante ed aumentando la produttività della macchina. Il VarioControl è abbinabile ai sistemi di misurazione e documentazione della compattazione BTM plus, BTM prof, BCM 05. Il valore di misura, denominato modulo di vibrazione, viene rilevato e visualizzato in continuo unitamente ad altri parametri (valore minimo di compattazione preimpostato, ampiezza e frequenza di vibrazione utilizzate al momento, velocità della macchina), consentendo di verificare in tempo reale il risultato del lavoro ed eventualmente stampare i dati di misura raccolti. Collegabile anche a sistema GPS per una maggior precisione nel rilevamento dei dati di compattazione.

Molti rulli sono equipaggiati con questa apparecchiatura che può essere utilizzata indipendentemente dall'importanza del lavoro da eseguire.

La direzione della vibrazione è regolabile da orizzontale a verticale. Il BVC permette l'uso di ampiezze molto più grandi rispetto a quelle prodotte da sistemi convenzionali. La direzione della vibrazione in verticale fornisce la massima energia utilizzabile dal rullo e

quella orizzontale fornisce la minima. Questa flessibilità migliora la compattazione del terreno negli strati superficiali e riduce i vuoti.

BTM-E è la versione modificata del Bomag Terrameter, è dotato di un display computerizzato nel quale vengono visualizzati molti parametri importanti tra i quali il valore del modulo vibratorio  $E_{vib}$  [MPa], dell'ampiezza e della frequenza delle vibrazioni e la velocità mantenuta dal rullo.

Il rullo Bomag può lavorare in due modalità differenti:

- 1) In modalità automatica, nella quale l'operatore imposta il valore di  $E_{vib}$  max che ci si prefigge di raggiungere a fine compattazione;
- 2) In modalità manuale, nella quale vengono impostati i valori di ampiezza della vibrazione.

L'operatore può preselezionare sei valori minimi ( $E_{vib} = 45, 80, 100, 120, 150$  MN/m<sup>2</sup> e massimi) che variano a seconda delle caratteristiche del terreno e del grado di compattazione che si vuole raggiungere.

Durante la compattazione il modulo dinamico e la velocità vengono misurati continuamente, i loro valori vengono registrati e visualizzati sul display. Quando viene raggiunto il valore minimo o quello massimo della compattazione, il sistema Variocontrol aumenta o riduce l'ampiezza delle vibrazioni e sul display dell' $E_{vib}$  si accende una luce verde che indica l'avvenuta fine della compattazione. Per il controllo della compattazione il sistema BTM-E è provvisto di una stampante per la stampa immediata dei dati e del tracciato del rullo. Il sistema intelligente è mostrato in Fig.1.12.

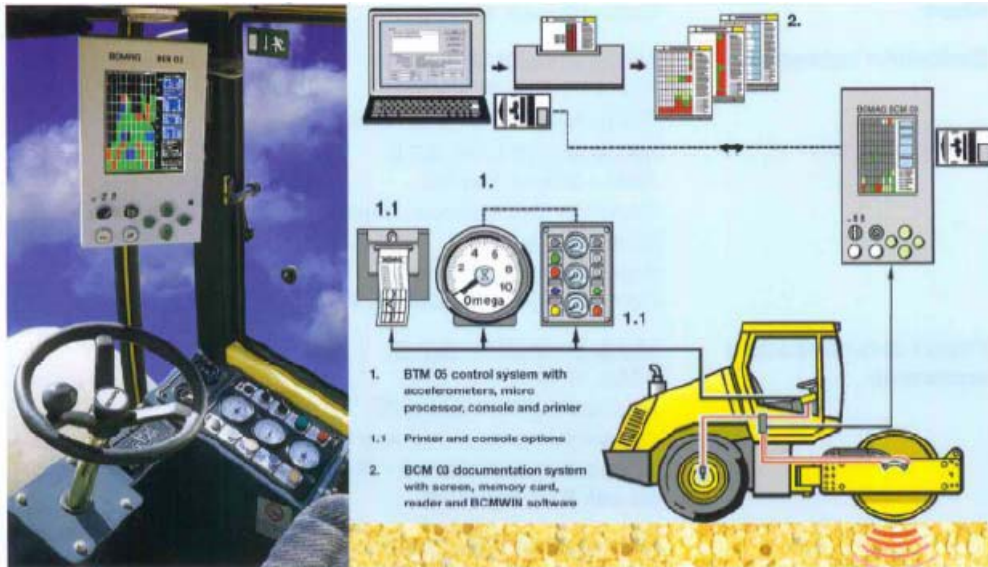


Fig.1.12 Rullo Bomag

In Fig.1.13 si nota come all' aumentare delle passate si assista ad un considerevole aumento di  $E_{vib}$  che denota l'aumento del grado di compattazione raggiunto dal terreno. Ogni incremento di  $E_{vib}$  viene rappresentato aumentando il gradiente della retta ottenuta mettendo in relazione la forza di contatto terreno-rullo e il corrispondente abbassamento di terreno.

Le curve disegnate rappresentano l'energia di compattazione trasferita nel terreno, ovviamente maggiore è l'area sottesa da tali curve maggiore risulterà essere il grado di compattazione ottenuto.

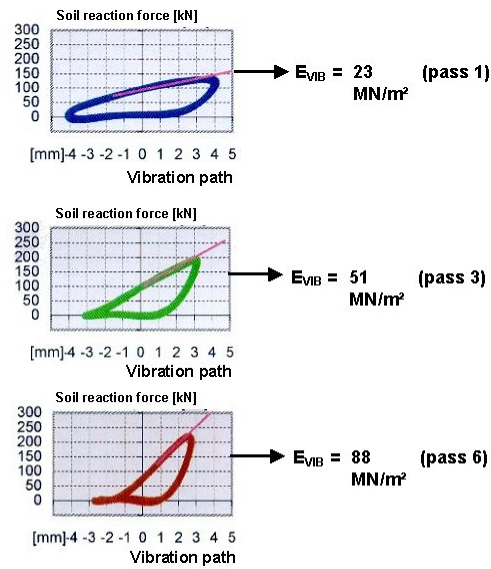


Fig.1.13 Relazione tra  $E_{vib}$  e l'energia trasferita al terreno durante la compattazione

#### 1.4.2 AMMANN (Svizzera)

Anche l'Ammann Compaction Expert (ACE) è una parte di apparecchiatura che è incorporata nei rulli.

ACE mette in evidenza la rigidità del terreno.

Quando il valore è stato raggiunto il rullo continua a misurare la rigidità senza compattare il terreno. I dati del terreno e le dimensioni del sito vengono memorizzati nel sistema computerizzato del CCC (Continuous Compaction Control).

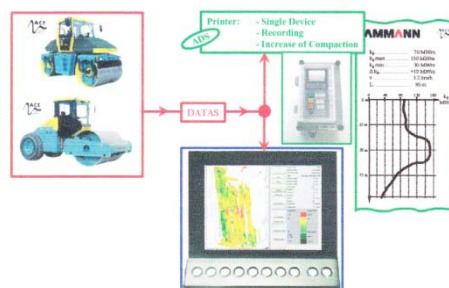


Fig.1.14 Sistema Ammann



Insieme ai valori di controllo di un rullo vibrante con singolo tamburo, la Fig.1.14 mostra in pratica l'effetto di un controllo automatico.

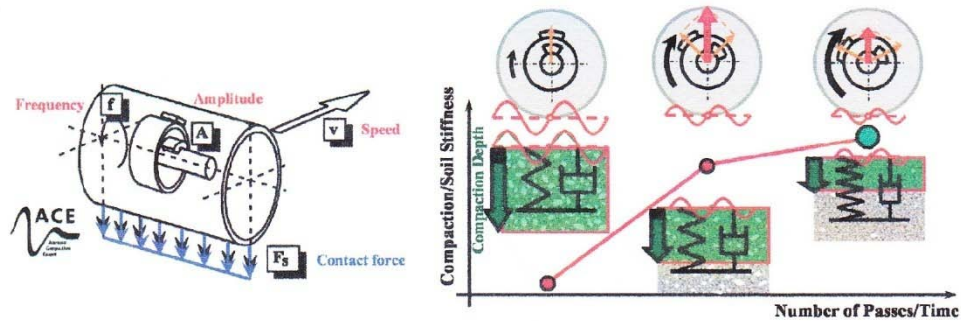


Fig.1.14 Effetti del passaggio del rullo Ammann

Nella prima passata del rullo, il macchinario si muove a basse frequenze e ampiezze massime e l'effetto dell'intensità del lavoro di compattazione viene massimizzato. Nelle passate successive, la frequenza eccitatoria aumenta automaticamente così come la capacità del terreno degli strati superficiali e le ampiezze si regolano raggiungendo valori più bassi.

L'energia della compattazione è trasmessa in modo crescente negli strati più superficiali del terreno. L'ultima passata viene utilizzata per trasferire in superficie valori massimi di frequenza e bassi valori di ampiezza.

### 1.4.3 GEODINAMIK (Svezia)

Geodynamic fornisce i compattometri nel CCC (Fig.1.15)

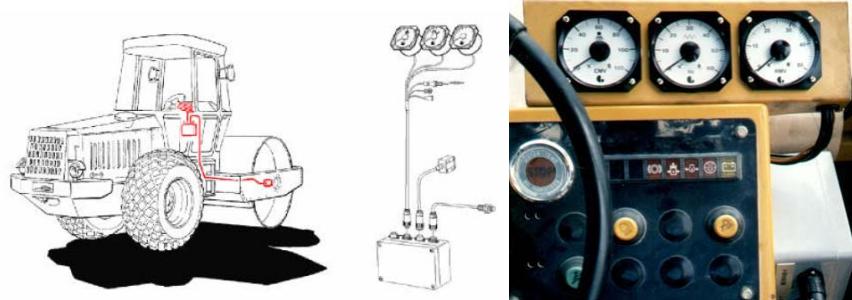


Fig.1.15 Rullo Geodinamik

Un sensore montato sul tamburo principale misura continuamente le accelerazioni quando il tamburo vibrante sta lavorando.

I segnali sul display cambiano a seconda del grado di compattazione raggiunto dal terreno. Questi segnali vengono convertiti in valori che indicano una misurazione relativa del comportamento del terreno (CMV).

Il sistema che documenta la compattazione (CDS-012J<sup>TM</sup>), mostra i risultati della compattazione (CMV) mentre il rullo sta ancora lavorando.

Alla fine di una passata completa sopra l'intera area il sistema CDS mostra il CMV per tutte le passate registrate passo dopo passo (Fig.1.16).

Questo rende la compattazione più efficiente e riduce al minimo il numero delle passate.



Fig.1.16 Pannello all'interno di un rullo Geodinamik

### ***1.5 CONFRONTO DEI VALORI DI $E_{VIB}$ , $K_S$ , $CMV$ , $\Omega$***

L'asse  $y$  in Fig.1.17 descrive l'ampiezza relativa della vibrazione del tamburo in funzione del rapporto di  $z_d$  con il valore teorico massimo  $z_{d,max}$  fornito dall'equazione sopra. Il valore massimo teorico dello spostamento del tamburo  $z_{d,max}$  è determinato considerando la vibrazione del tamburo nell'aria.

$$z_{d,max} = \frac{m_o e_o}{m_d}$$

La Fig.1.17 mette in evidenza le diverse modalità di contatto tamburo-terreno, il loro aspetto in funzione dello spostamento relativo del tamburo e del terreno, e come vengono influenzati dall'ampiezza relativa e dal modulo del terreno.

Come mostrato in Fig.1.17  $CMV$  è un valore molto basso e costante quando il rullo sta lavorando a contatto con il terreno (senza salti) trascurando il modulo del terreno. Dopo che il terreno viene approssimato ad un modello elastico-lineare, solo le curve di interazione tamburo/terreno non lineari contribuiscono al valore di  $CMV$  durante il contatto continuo;  $CMV$  aumenta all'aumentare di  $E$  del terreno.

Se il modulo del terreno è costante,  $CMV$  è dipendente dall'ampiezza, quindi ad un valore più ampio della forza eccentrica corrisponde un valore maggiore di  $CMV$  nello stesso terreno.  $CMV$  dipende dall'ampiezza in modo più evidente nei terreni più cedevoli rispetto quelli più rigidi.

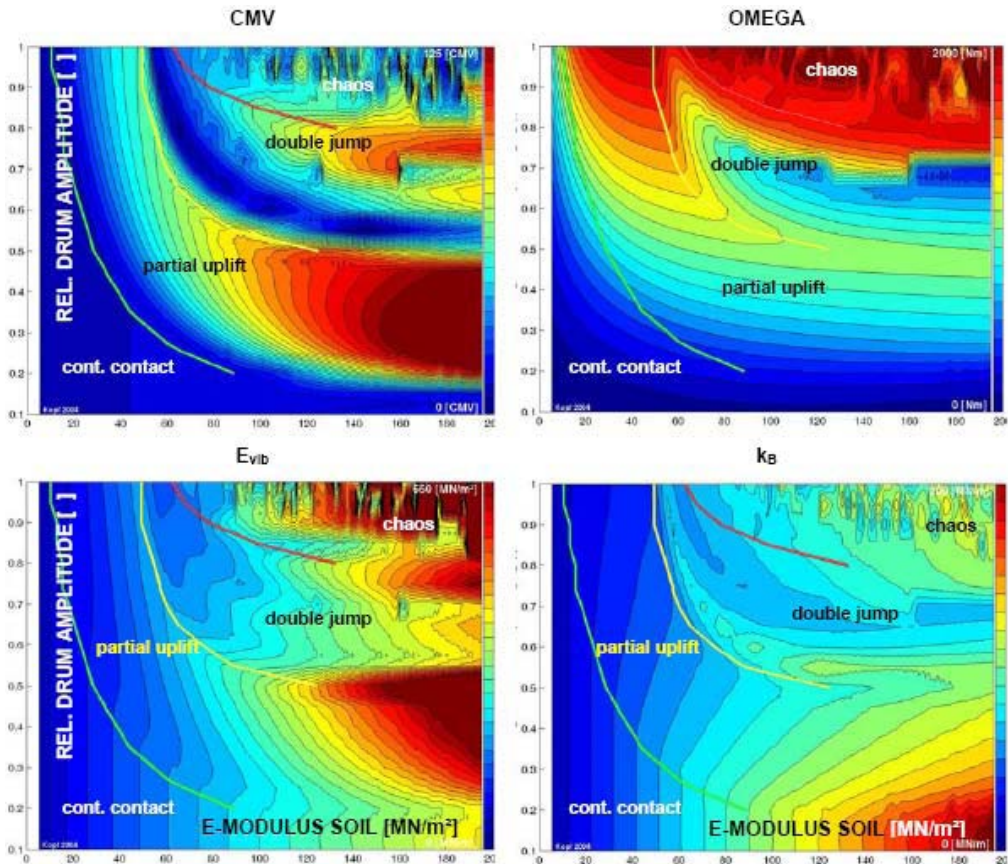


Fig.1.17 Confronto valori di  $E_{vib}$ ,  $k_s$ , CMV, Omega

$E_{vib}$  risente del cambiamento del modulo del terreno durante il contatto continuo, un incremento del modulo del terreno porta ad un aumento di  $E_{vib}$ .

$E_{vib}$  aumenta con l'aumento dell'ampiezza durante il sollevamento parziale.

Questo aumento è più evidente nei terreni rigidi.

$k_s$  ha un comportamento simile ad  $E_{vib}$  infatti aumenta proporzionalmente al modulo del terreno e durante il sollevamento parziale aumenta l'ampiezza.

Infine il valore di  $\Omega$  si è trovato essere molto meno sensibile del valore della rigidezza per ampiezze costanti nei terreni profondi.

CMV,  $E_{vib}$ ,  $k_s$ , risultano essere funzione del modulo costante del terreno.

La Fig.1.18 rappresenta i valori dei dati ottenuti tramite misurazioni in funzione del modulo del terreno per un dato valore di ampiezza.

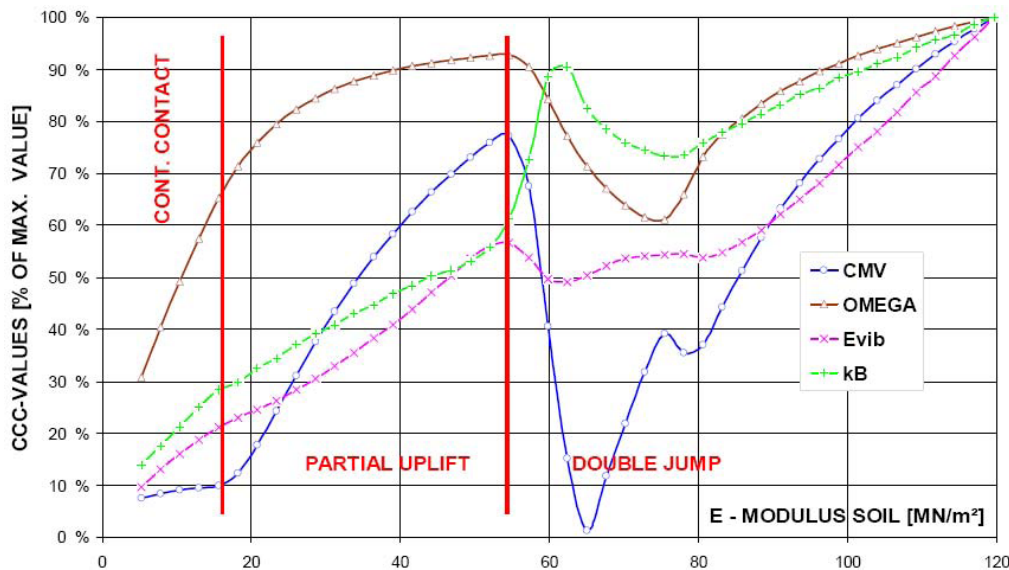


Fig.1.18 Valori relativi di CCC ottenuti con un'ampiezza di 0.8.

La Fig.1.18 dimostra che  $\Omega$ ,  $E_{vib}$ ,  $k_s$ , sono linearmente dipendenti dal modulo del terreno durante il contatto con il terreno stesso e che il valore di CMV rimane costante.

Durante il sollevamento parziale CMV è il valore più suscettibile al cambiamento del valore del modulo del terreno. In ultimo, i valori delle misurazioni durante il doppio salto non sono rilevanti considerando le tecnologie dei rulli odierne.

In generale, l'intensità della misurazione rilevata con metodo CCC (che dipende anche dal carico totale del rullo), è più elevata dell'intensità rilevata con i metodi di compattazione tradizionali e con i metodi puntuali.

Inoltre, tramite CCC, è possibile identificare strati di terreno cedevole posti in profondità, cosa che non è possibile fare con i metodi tradizionali.

Tutte queste informazioni servono per ottenere i risultati mostrati in Fig.1.19:

- Il valore minimo rilevato con CCC serve per determinare aree/punti caratterizzati da terreno cedevole.
- Il valore massimo rilevato con CCC serve per determinare strati di terreno con alte rigidità.
- La deviazione standard serve per valutare l'uniformità dell'area interessata.

- L' aumento del valore di CCC serve a mettere in evidenza la maggiore compattazione degli strati di terreno ottenuta.
- Il valore che mette in evidenza una diminuzione repentina di CCC serve come indicatore di una saltellamento del rullo durante la compattazione o presenza di acqua interstiziale.

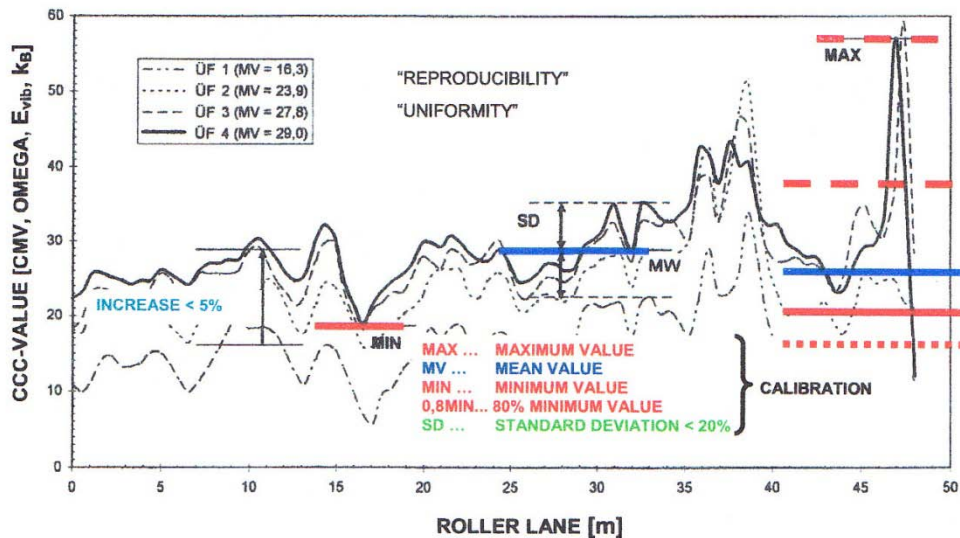


Fig.1.19 Criteri di controllo per applicazioni standard con CCC

## 1.6 CONCLUSIONI

In questo capitolo si è cercato di confrontare i tradizionali metodi per la compattazione dei terreni con le nuove tecnologie della compattazione intelligente che stanno prendendo sempre più piede. Alla fine di questa trattazione è utile evidenziare i vantaggi e gli svantaggi legati alla compattazione intelligente.

La compattazione intelligente presenta i seguenti vantaggi:

- Una maggiore efficienza e produttività grazie al controllo automatico di ampiezza, frequenza, e velocità
- Riduce al minimo il numero di passaggi
- Maggiore capacità di adattamento
- Gamma di applicazione più ampia

- Risultati ottimali di compattazione, una migliore qualità
- Compattazione più uniforme
- Meno inerti di frantumazione
- Una migliore planarità
- Misurazione dinamica della rigidità del suolo
- Nessun pericolo di Overcompaction
- Compattazione di controllo sul lavoro
- Facile da usare
- Il prolungamento della durata del rullo riducendo al minimo la situazione doppio salto.

La compattazione intelligente ha i seguenti svantaggi:

- Richiede apparecchiature sofisticate
- E' più costosa della compattazione tradizionale

Questi inconvenienti in realtà non hanno molto rilievo rispetto ai benefici che questa metodologia offre.



## CAPITOLO 2

### *FONDAMENTI DI COMPATTAZIONE VIBRATORIA*

#### **2.1 PREMESSA**

Con le loro masse eccentriche vibranti (masse non bilanciate) montate su uno o numerosi alberi-motori, le macchine vibratorie realizzate per la compattazione vibratoria, producono vibrazioni omogenee ed uniformi. Queste vibrazioni sono trasferite al terreno, raggiungendo anche gli strati più profondi .

Le vibrazioni si comportano come forze dinamiche distribuite nello spazio, si riesce così a compattare il terreno tramite pressione e vibrazioni e allo stesso tempo si riesce a ridurre le deformazioni e a migliorare le caratteristiche fisico-meccaniche di rigidità.

L'interazione tra l'eccitatore di vibrazione ed il terreno che deve essere compattato può essere rappresentato con il modello mostrato in Fig.2.1:

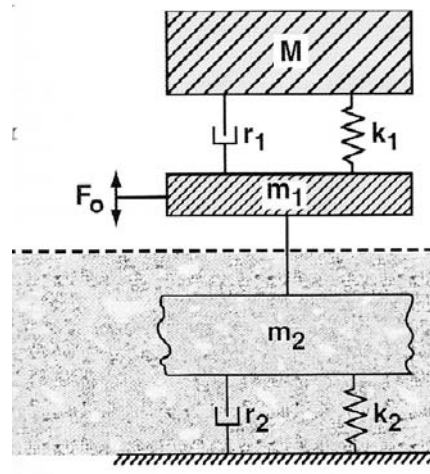


Fig.2.1 Modello compattatore-terreno



$M$  = massa sospesa del macchinario

$m_1$  = massa eccitatoria

$m_2$  = massa di terreno risonante

$r_1$  = smorzamento del macchinario

$r_2$  = smorzamento del terreno

$k_1$  = valore di elasticità del macchinario

$k_2$  = valore di elasticità del terreno

$F_0$  = forza eccitatoria

La variazione nel tempo della sinusoide delle vibrazioni è definita e descritta dalle funzioni seno e coseno (Fig.2.2).

Le vibrazioni che si possono propagare nel terreno possono essere di diversa natura:

- vibrazione periodica se si ripete con continuità trascorso un certo periodo di tempo. Una vibrazione periodica può essere rappresentata graficamente come la sovrapposizione di curve seno distinte o oscillazioni della curva coseno, la sua frequenza risulta essere un multiplo della frequenza fondamentale.
- vibrazione stazionaria se è rappresentata da funzioni caratteristiche temporaneamente costanti. I temporanei processi di vibrazione rappresentano vibrazioni transitorie, che si dissipano nel corso del tempo o evolveranno verso una situazione stazionaria.
- vibrazioni deterministiche sono quelle che non si sviluppano a caso, possono essere rappresentate matematicamente prima che si sviluppino.
- vibrazioni casuali o aleatori mostrano variazioni irregolari nel tempo, possono essere solamente descritte con l'utilizzo di parametri statistici o probabilistici.

La Fig.2.2 mostra una oscillazione sinusoidale che descrive il processo di trasferimento delle vibrazioni nel terreno in funzione del tempo  $a' = f(t)$ .

La successione dei movimenti dovuti alla vibrazione è generalmente caratterizzato dalle definizioni che seguono:

$f$  = frequenza (inverso di  $T$  = periodo)

$\omega$  = frequenza radiante, numero di vibrazioni in  $2\pi$  secondi.  $\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T}$

$a$  = ampiezza (mm)

$a'$  = vibrazione trasferita nel terreno  $a' = a \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$

La velocità di vibrazione  $v$  e l'accelerazione della vibrazione  $b$  sono la derivata rispetto al tempo del trasferimento della vibrazione nel terreno  $a'$ :

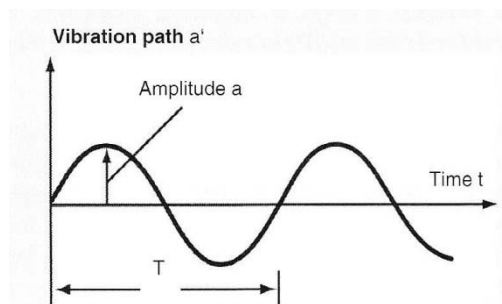


Fig.2.2 Andamento sinusoidale della vibrazione

## 2.2 VIBRAZIONI DI RISONANZA E NATURALI

Le vibrazioni naturali definiscono un sistema di vibrazioni intrinseche che dipende unicamente dalle proprietà del sistema compattante (le proprietà delle macchine da compattazione sono: dimensioni, parametri del materiale, l'area di contatto ma anche situazioni marginali) e si adatta dopo un breve periodo di compattazione vibrante indipendentemente da quanto sia grande il modulo di eccitazione.

Fino a quando queste vibrazioni naturali si possono rappresentare come delle vibrazioni armoniche allora si possono descrivere come quelle illustrate nella premessa: dopo un periodo pari a  $T$  si riproduce una vibrazione con la stessa ampiezza della precedente. Ad ogni periodo  $T_0$  corrisponde un valore inverso  $f_0 = 1/T_0$  che rappresenta la frequenza naturale. Il valore della frequenza naturale  $f$  moltiplicato per  $2\pi$  è chiamato frequenza naturale radiante  $\omega_0$ .

Se un sistema di vibrazioni presenta molte frequenze naturali ognuna di esse ha il proprio tipo di vibrazione. Quando si eccita tale sistema con una frequenza che è più o meno identica a una frequenza naturale, occorreranno allora frequenze di risonanza con ampiezza più ampia.

In accordo con la teoria della risonanza (Hertwig 1933) gli effetti di una compattazione ottimale si ottengono mantenendo valori costanti della frequenza durante la compattazione per non alterare il sistema macchina-substrato. In questa condizioni il substrato si comporta in modo elastico, può infatti essere rappresentato come una molla, allo stesso modo la frequenza radiante naturale  $\omega_0^2$  dipende tramite una relazione lineare dalla rigidità della molla C e dalla massa totale vibrante m del sistema:

$$\omega_0^2 = c \cdot m$$

Le frequenze naturali dipendenti dal terreno e dai parametri della macchina sono collocate in un intervallo compreso tra 13-27 Hz (800-1600 vibrazioni al minuto).

### ***2.3 VIBRAZIONI ARMONICHE E SUB-ARMONICHE***

Le vibrazioni eccitatorie e le masse oscillanti del sub-strato che deve essere compattato rappresentano un sistema vibratorio collegato. Durante il processo di compattazione la vibrazione iniziale del sistema eccitatorio del macchinario viene modificata dalla rigidità della massa che si collega dinamicamente. Queste variazioni nella periodica sequenza del moto provocano vibrazioni armoniche, che rappresentano un multiplo della vibrazione iniziale generata dalla vibrazione eccitatoria.

L'ampiezza di queste vibrazioni armoniche aumenta durante il processo di compattazione a causa della rigidità del terreno. Questo processo raggiunge il valore limite quando il macchinario si solleva dal terreno (doppio salto) o raggiunge valori di rigidità troppo elevati.

In questa condizione di "salto", così vengono denominate le vibrazioni sub-armoniche, il cui valore è pari alla metà di una vibrazione iniziale, deve essere sommato il valore delle vibrazioni iniziali generate dall'eccitatore.

Per esempio, un compattatore vibrante usato per compattare il terreno, ha un'energia iniziale di compattazione circa uguale a 30 Hz, le vibrazioni armoniche saranno di 60 Hz e le vibrazioni sub-armoniche di 15 Hz.

#### ***2.4 PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI***

Negli strati accoppiati dinamicamente l'energia generata dalle vibrazioni si propaga sotto forma di onde profonde (onde di compressione e di deformazione) e onde superficiali o anche come combinazione di entrambe.

L'ampiezza di questo tipo di onde dipende dalla posizione della massa eccentrica e dall'energia impiegata. Siccome la causa dell'eccitazione dovuta alla compattazione vibratoria degli strati del terreno appena descritta si localizza sulla superficie, le vibrazioni si propagano principalmente sotto forma di onde superficiali. Siccome dipendono dalla distanza dall'origine dell'eccitazione, queste onde superficiali hanno ampiezze di vibrazione più elevate delle onde profonde.

Localmente la propagazione delle vibrazioni potrebbe essere notevolmente disturbata o ostacolata per esempio dall'alta densità di costruzioni, dalle fessure nel terreno etc.

#### ***2.5 FORZE DINAMICHE***

Le forze che variano nel tempo e nello spazio sono definite forze dinamiche. Se l'effettiva durata della forza è breve rispetto alla durata periodica della naturale vibrazione del sistema, la forza si comporta come un colpo e dipende dalla grandezza dell'impulso.

Le grandezze della vibrazione (velocità, ampiezza, accelerazione) sono calcolate in funzione del tempo dai misuratori di accelerazione posti sul compattatore. Dalla misura delle accelerazioni si determina una funzione che si deriva da una formula matematica che mette in relazione l'area di contatto del terreno e l'integrale dell'accelerazione e viene rappresentata in un diagramma indicatore. L'energia liberata rappresenta l'inverso della rigidità del terreno.

## ***2.6 SISTEMI ECCITATORI VIBRANTI PER I COMPATTATORI CON RULLI VIBRANTI***

La vibrazione e i movimenti di un compattatore a rulli vibranti 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. I compattatori a rulli vibranti lavorano utilizzando diverse modalità di costipazione, queste ultime variano in funzione del tracciato, dipendono dalle vibrazioni prodotte dalle masse eccentriche.

### ***2.6.1 SISTEMA DI VIBRAZIONE***

Il sistema eccitatorio è costituito da una spinta centrale e un asse eccitatorio al quale è attaccata una massa non equilibrata.

La velocità della rotazione dell'asse del generatore genera una forza centrifuga che ruota di 360° con vibrazioni senza direzione. Questo modello di eccitatore vibrante è anche conosciuto con il nome asse singolo di rotazione vibrante. (Fig.2.3)

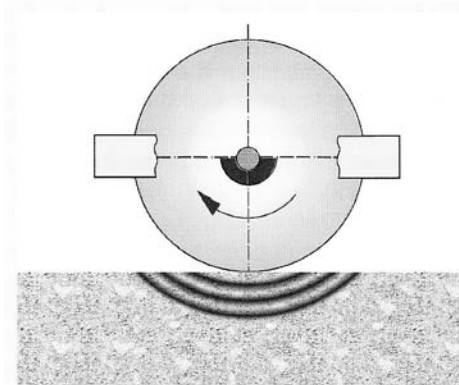


Fig 2.3 Vibrazione circolare

### 2.6.2 SISTEMA OSCILLATORIO

Il sistema eccitatorio è costituito da un asse di spinta centrale e due assi eccitatori che ruotano con lo stesso verso di rotazione. Le masse non equilibrate sollecitate dagli assi eccitatori, unite tramite cinture dentate, sono sfalsate di  $180^\circ$  l'uno rispetto l'altra, generando in questo modo un momento diverso attorno all'asse centrale. Questo sistema eccitatorio produce delle oscillazioni, per mezzo del quale il tamburo è continuamente in contatto con il terreno, senza urti e impatti (Fig.2.4). Tramite il principio delle oscillazioni, del quale si è parlato fino ad ora, e che viene usato in particolari compattatori (oscillometri), si assume che il movimento oscillatorio del tamburo insieme al peso effettivo dell'asse produce una forza di taglio dovuta alla compattazione sugli strati superficiali.

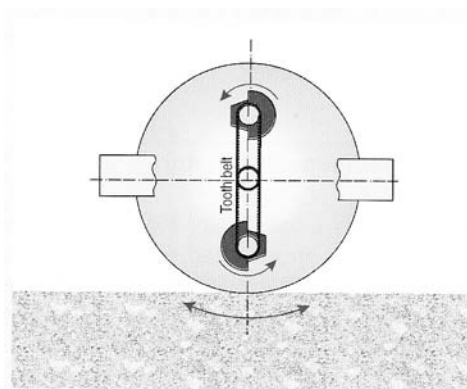


Fig.2.4 Sistema oscillante

### 2.6.3 DIFFERENZE NELL'USO DEL SISTEMA OSCILLANTE E DI QUELLO VIBRATORIO NELLA COMPATTAZIONE

Le Fig.2.5 e 2.6 mostrano i risultati di misurazioni ottenute con i due diversi metodi.

La Fig.2.5 mostra chiaramente che le pressioni verticali massime ottenute con il sistema vibratorio hanno valori molto più elevati rispetto a quelli ottenuti con il sistema oscillante e che l'oscillatore lavora in modo statico senza mai perdere aderenza con il terreno.

La Fig.2.6 mostra inoltre che l'oscillatore riesce a trasferire solamente accelerazioni verticali più basse rispetto a quelle prodotte dal sistema vibratorio.

Dalla Fig.2.6 la conclusione che possiamo trarre è che le accelerazioni orizzontali dell'oscillatore risultano essere meno importanti di quelle ottenute con il sistema vibratorio.

Le differenze riportate possono essere spiegate dal fatto che il sistema vibratorio produce gli stessi effetti che produrrebbero un sistema oscillante e uno vibratorio combinati insieme.

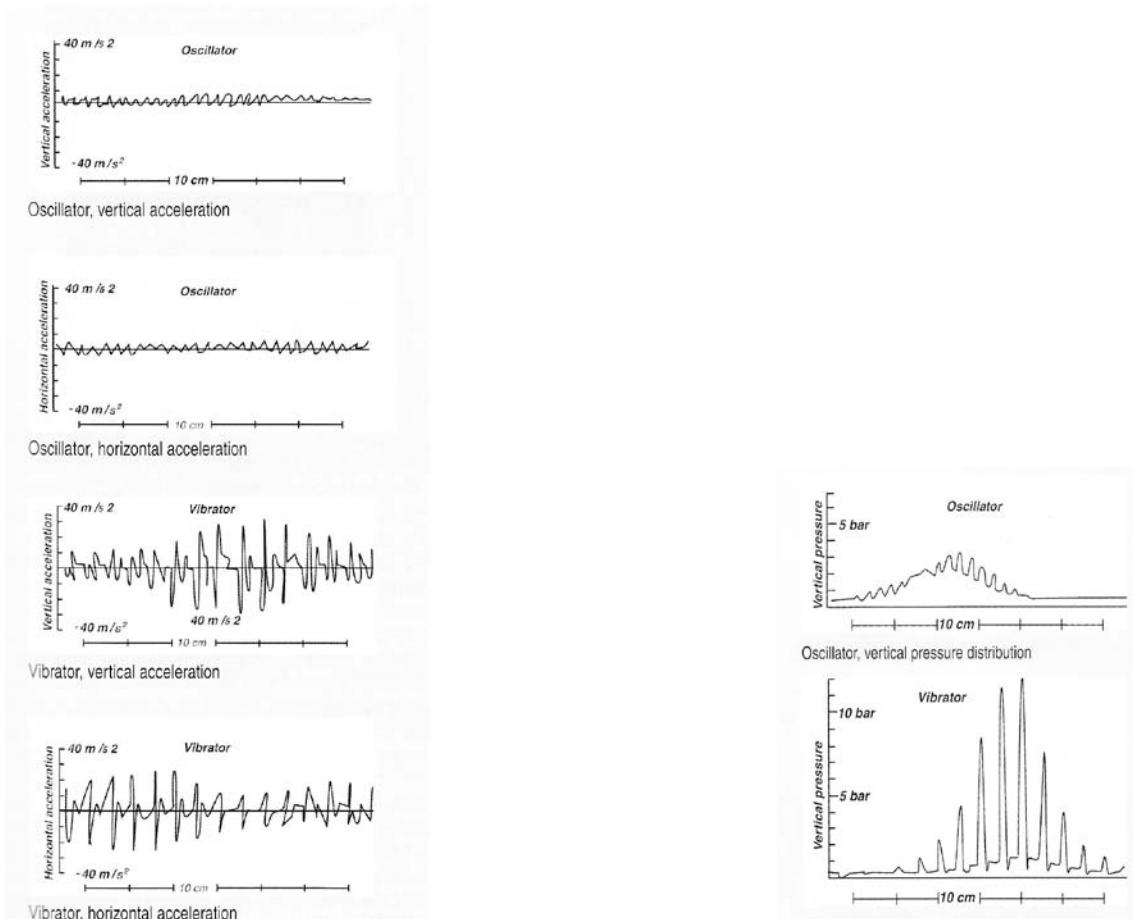


Fig.2.5-2.6 Confronto tra sistema oscillatorio e vibrante

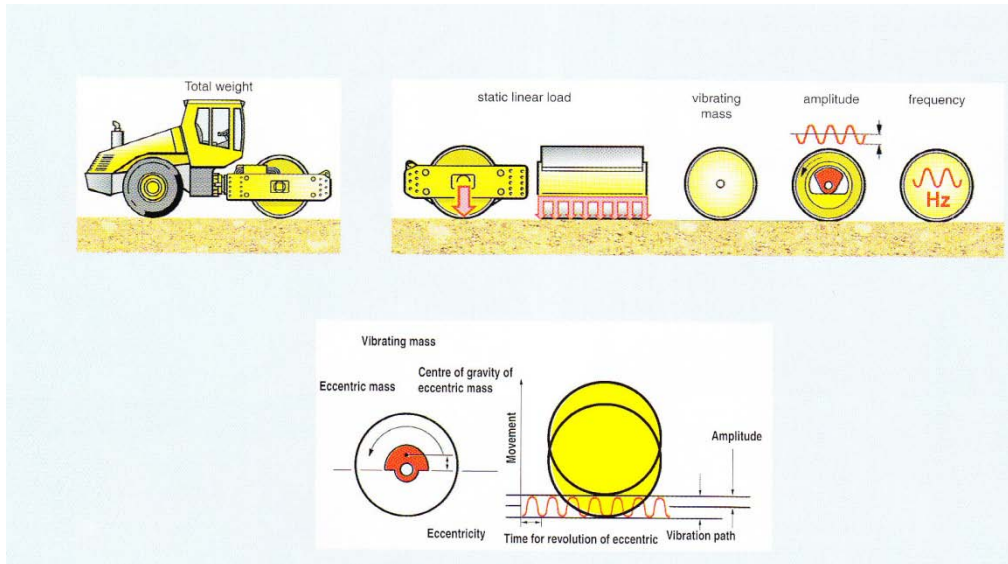


Fig.2.7 Componenti del sistema vibratorio

#### 2.6.4 PARAMETRI CHE CARATTERIZZANO LA VIBRAZIONE

In Fig. 2.7 sono rappresentati alcuni parametri che caratterizzano la vibrazione.

Carico sull'asse, tamburo ( $F_{stat}$ ) = carico statico del tamburo e telaio del tamburo [kg]

Carico statico lineare =  $\frac{\text{carico sull'asse,tamburo (kg)}}{\text{larghezza del tamburo (cm)}}$  [kg/cm]

Massa vibrante  $M_o$  = massa del tamburo sotto movimento vibratorio [kg]

Frequenza (f) =  $\frac{\text{numero di giri della massa eccentrica}}{\text{unit\`a di tempo}}$   $f = 1/T \cdot n$  [ Hz]

Velocità angolare ( $\omega$ ) =  $2\pi f$  [1/sec]

Massa non equilibrata ( $m_e$ ) = massa eccentrica [kg]



Eccentricità (e) = distanza tra il centro di gravità eccentrico e l'asse di rotazione [mm]

Momento eccentrico ( $M_e$ ) = momento non equilibrato  $M_e = m_e \cdot e$  [kg · mm]

Forza centrifuga ( $F_c$ )  $F_c = m_e \cdot e \cdot \omega^2 = m_e \cdot e \cdot (2\pi f)^2$  [N]

Ampiezza teorica (a) =  $\frac{\text{momento eccentrico } M_e}{\text{massa vibrante } M_0}$  [mm]

### ***2.7 CARICO STATICO APPLICATO SULL'ASSE E MASSA VIBRANTE***

La massa staticamente efficace è composta dal carico sull'asse del tamburo (kg). Il carico statico lineare è calcolato matematicamente dal carico statico sull'asse  $F_{stat}$  diviso per la larghezza del tamburo (kg/cm).

Il diametro del tamburo influenza il carico statico lineare fino a che non si ha a disposizione un carico statico del tamburo elevato che necessita di un diametro più grande.

La profondità di propagazione che riesce a raggiungere l'onda vibratoria, dipende anche dal peso del rullo.

La massa vibrante  $M_0$  comprende tutte le parti vibranti del macchinario, come il tamburo, le parti idrauliche, la massa eccentrica etc.

Il rapporto della massa vibrante con la massa staticamente efficace del tamburo influenza gli effetti della compattazione e della profondità di compattazione.

L'effetto della compattazione aumenta con l'aumentare dell'ampiezza della massa vibrante, mentre gli altri parametri rimangono praticamente costanti, perché la massa vibrante è dinamicamente sommata alla massa degli strati di terreno.

La massa vibrante cambia con l'ampiezza della vibrazione prodotta dalla forza centrifuga.

L'incremento dell'ampiezza della vibrazione, unito ad una diminuzione della frequenza mobilita anche le particelle di terreno dotate di minore motilità.

### **2.8 FORZA CENTRIFUGA, FREQUENZA , AMPIEZZA**

La forza centrifuga, la frequenza e l'ampiezza sono grandezze fondamentali riferite al rullo che controlla l'energia trasferita al terreno durante la compattazione.

Poiché tali grandezze sono funzione del tipo di terreno e della sua rigidità, 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, dove si indica con  $e$ , i giri per minuto.

Il centro di gravità della massa eccentrica si trova ad una distanza pari ad  $e$  dal centro dell'asse di rotazione.

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  $f = 1/T$  (la frequenza si misura in Hz o vibrazioni per unità di tempo).

L'ampiezza della vibrazione  $a$  (mm) dipende dal valore del momento eccentrico  $M_e$  (kg · mm).

Il tamburo si muove mentre la massa eccentrica sta ruotando. Questo movimento è fuori fase di  $180^\circ$  (Fig.2.8).

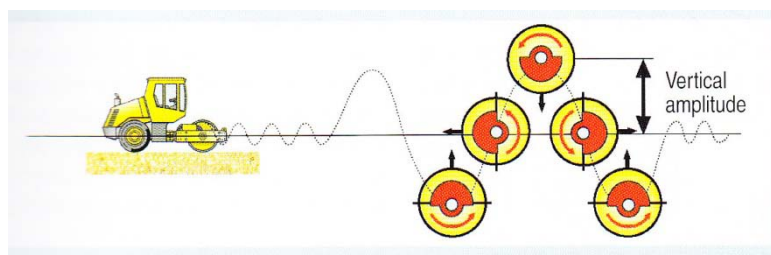


Fig.2.8 Ampiezza della vibrazione in funzione della posizione della massa eccentrica

La forza vibratoria che agisce sul terreno è il risultato di una interazione complicata tra il tamburo ed il sub-strato.

Da una parte la forza centrifuga è un valore fondamentale per il calcolo della forza di vibrazione, ma dall'altro lato non ci sono rapporti tra le due grandezze.

L'effettiva forza di vibrazione dipende principalmente dall'ampiezza della vibrazione che, comunque, non è determinata dalla forza centrifuga.

Allo stesso tempo però la forza centrifuga controlla l'intensità della vibrazione (accelerazione) del tamburo. La forza centrifuga può essere solamente utilizzata per confrontare i vari tipi di rulli ma solo nel caso abbiano la stessa massa statica e frequenza identica, perché in questo caso si potrebbero notare le differenze di ampiezza.

Il diagramma in Fig.2.9 conferma che l'influenza della frequenza è limitata e che non c'è alcuna relazione tra la forza vibratoria e la 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.

Solamente le variazioni della frequenza hanno un effetto limitato sulla forza di vibrazione. L'energia che viene trasferita in profondità aumenta proporzionalmente alla forza di vibrazione e all'aumento di frequenza.

Per questo motivo l'energia di compattazione per unità di volume  $V_E$  può essere calcolata in questo modo:

$$V_E = f_1 (F'_{stat}) + f_2 \left( \frac{a \cdot f}{V} \right)$$

$f_1, f_2$  = valori della funzione

$F_{stat}$  = peso statico lineare [kg/cm]

$a$  = ampiezza

$f$  = frequenza

$v$  = velocità di rullatura

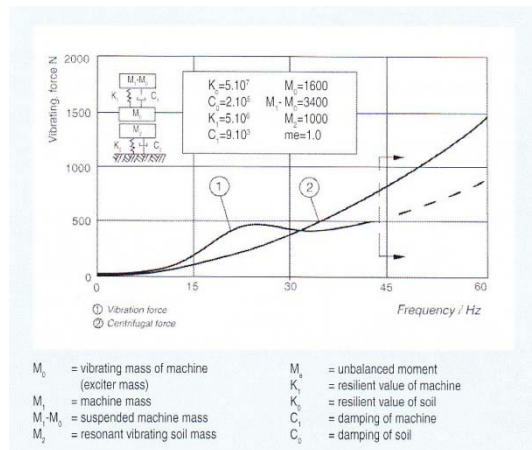


Fig.29 Forza vibratoria/Frequenza

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).

Utilizzando i valori della frequenza compresi in questo intervallo, sia il grado di compattazione che l'intensità della forza non raggiungono i valori massimi all'aumentare della frequenza, ma piuttosto sono l'ampiezza e il carico sull'asse del tamburo a raggiungere valori elevati.

Questa situazione è evidente 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 effetti scarsi di

compattazione negli strati più profondi, ma trasferisce valori di energia elevati negli strati più superficiali di terreno.

A seconda delle caratteristiche del materiale del quale è costituito, il terreno reagisce in modo diverso all'energia di compattazione trasferita tramite i compattatori vibranti. Ecco alcuni esempi:

- Per la compattazione degli strati di terreno con una portanza relativamente alta o un grande volume di terreno così come un terreno costituito da materiale roccioso: l'intervallo di ampiezza ottimale cade tra 1,5 e 2,0 mm e l'intervallo ottimale di frequenza risulta essere fra 25 e 30 Hz (1500-3000 vibrazioni al minuto). La velocità mantenuta costante dal rullo durante le passate, ha una influenza fondamentale ai fini della compattazione.
- Il numero di colpi vibranti sul terreno diminuisce con l'aumentare della velocità del rullo compattante, in questo modo sono necessarie più passate per ottenere lo stesso effetto di compattazione. Se il rullo durante le passate riesce a mantenere una velocità costante e idonea alla tipologia di terreno che si sta compattando e si muove con parziale perdita di contatto rullo-terreno evitando "doppi salti" allora, il trasferimento di energia nel terreno è pressoché proporzionale al rapporto tra il numero di passate e la velocità di rullaggio.
- Quindi raddoppiando la velocità del rullo, anche il numero di passate del rullo di conseguenza dovrebbe raddoppiare. Generalmente la velocità del rullaggio che si consiglia varia da 1 a 2,5 km/h sui materiali rocciosi e sui terreni argillosi e da 2 a 4 km/h sui terreni non coesivi.

## 2.9 TRASFERIMENTO DI ENERGIA

Il trasferimento di energia attraverso l'area di contatto tra il rullo e il terreno è influenzata dalla forza di reazione e dalla rigidità dinamica degli strati di terreno che devono essere compattati.

Durante i movimenti verticali del tamburo le forze dovute al carico statico, alla forza centrifuga, le forze d'inerzia e la forza dovuta al contatto sono forze efficaci così come mostrato in Fig.2.10.

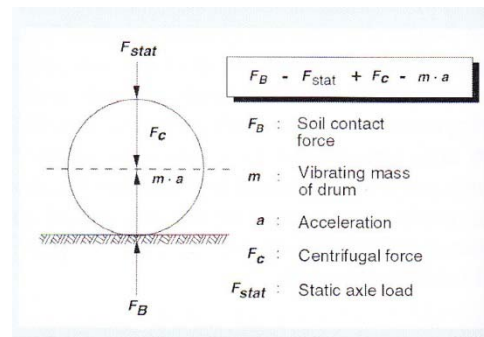


Fig.2.10 Forze efficaci

La forza di contatto tiene conto della reazione dinamica del terreno.

In Fig.2.11 è stato rappresentato un diagramma nel quale vengono messe in relazione la forza di reazione del terreno con la forza di vibrazione che agisce sul terreno stesso.

La Fig. 2.11 individua due curve, una relativa alle forze di compressione (riferita al momento in cui il terreno si trova ad essere compattato dal rullo), l'altra a quella di espansione (individuata dai valori ottenuti a compattazione ultimata).

Il processo può essere considerato simile alla forza di carico-scarico di un campione di terreno soggetto alla prova di carico su piastra.

La curva di compressione evidenzia una pendenza molto spiccata rispetto a quella di espansione perché in tale fase le forze di contatto rullo-terreno sono più elevate.

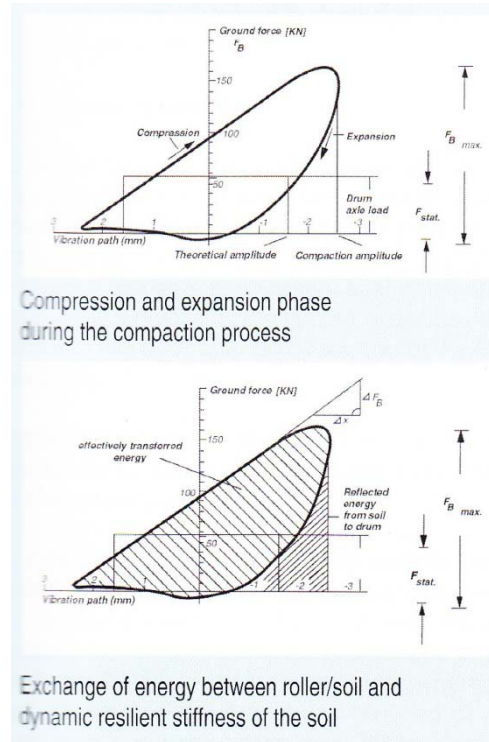


Fig.2.11 Energia trasferita al terreno

La curva mostra inoltre, un andamento particolare relativo a valori di ampiezza compresa tra 1,6 e 2,5 mm.

Durante questa fase di compattazione l'ampiezza aumenta da 1,6 mm a 2,5 mm e la forza di contatto con il terreno diventa almeno tre volte più grande del carico statico sull'asse del tamburo.

Il diagramma permette di esaminare l'energia trasferita e la rigidezza del terreno. L'area d'isteresi compresa tra la curva di compressione e quella di espansione mette in evidenza il valore dell'energia trasferita nel terreno. L'area sottesa dalla curva di espansione rappresenta le reazioni del tamburo. L'inclinazione della curva di compressione  $\Delta F_B / \Delta x$  è usata per determinare la rigidezza.

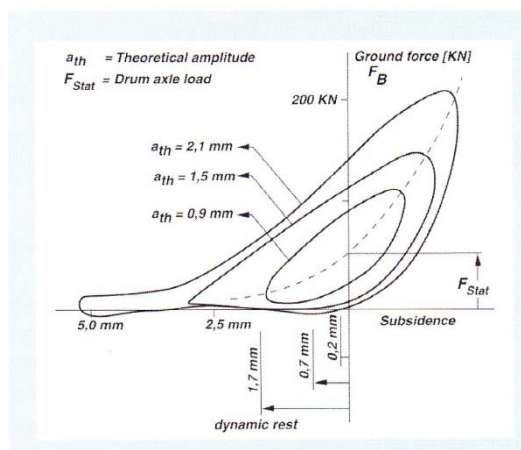


Fig.2.12 Energia trasferita al terreno in funzione della variazione delle ampiezze

La Fig. 2.12 mette in evidenza il rapporto che intercorre tra l'aumento dell'ampiezza della vibrazione e la corrispondente energia trasferita al terreno.

Si nota subito, come, aumentando il valore dell'ampiezza aumenti l'energia trasferita al terreno, e quindi come migliori la compattazione.

Questo fenomeno accade, perché, utilizzando ampiezze elevate si vanno a coinvolgere anche gli strati di terreno 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, generando il fenomeno del "doppio salto" che produce vibrazioni non periodiche ma casuali che denotano una cattiva compattazione.

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).



### **2.10 CONCLUSIONI**

Si può quindi affermare, che il raggiungimento di un buon grado di compattazione del terreno dipende da vari fattori:

- ampiezza e frequenza della vibrazione: si utilizzano ampiezze elevate per la compattazione dei terreni argilloso-sabbiosi e basse per quelli rigidi.
- velocità del rullo: maggiore è la velocità minori sono i valori di rigidità raggiunti a seguito della compattazione.  
Questo fatto vale soprattutto per terreni argilloso-sabbiosi, quelli più rigidi risentono meno di tale situazione.
- forza di contatto rullo-terreno
- forza statica e quindi peso del rullo
- comportamento del tamburo: si deve mantenere una parziale perdita di contatto rullo-terreno per il raggiungimento di un buon grado di compattazione. L'effetto "doppio salto" causato da discontinuità del terreno o da materiali particolarmente rigidi con i quali il rullo viene a contatto, provoca disgregazione delle particelle del terreno, producendo, quindi, una cattiva compattazione.

## **CAPITOLO 3**

### ***DETERMINAZIONE DEL MODULO VIBRATORIO $E_{VIB}$***

#### ***3.1 PREMESSA***

Come descritto nei precedenti capitoli, la casa di produzione Bomag, ha dotato alcuni suoi rulli di un sistema Variocontrol, che permette di valutare istantaneamente le caratteristiche del terreno in termini di rigidzze, variando in automatico i valori di ampiezza, frequenza delle masse eccentriche laddove necessario.

Il valore, rispetto al quale si fa riferimento, per capire le condizioni del terreno e agire di conseguenza, è quello relativo alla rigidzza del terreno che il rullo Bomag esprime tramite il Modulo Vibratorio Evib misurato in MPa.

Qui di seguito si cercherà di spiegare meglio le caratteristiche di Evib.

#### ***3.2 BASI FISICHE DEL PRINCIPIO DI MISURAZIONE***

Trasduttori di accelerazione, sono utilizzati per misurare la vibrazione del tamburo. Questi trasduttori misurano le accelerazioni assolute della massa vibrante in funzione del tempo. Con la disposizione dei trasduttori di accelerazione possono essere analizzate tutti le oscillazioni. La determinazione del modulo  $E_{vib}$  si basa puramente su un'analisi di tipo verticale, attraverso relazioni tra forza e spostamento (Fig.3.1). Oltre alla massa del rullo, ci sono altre forze che hanno influenza in senso verticale:

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

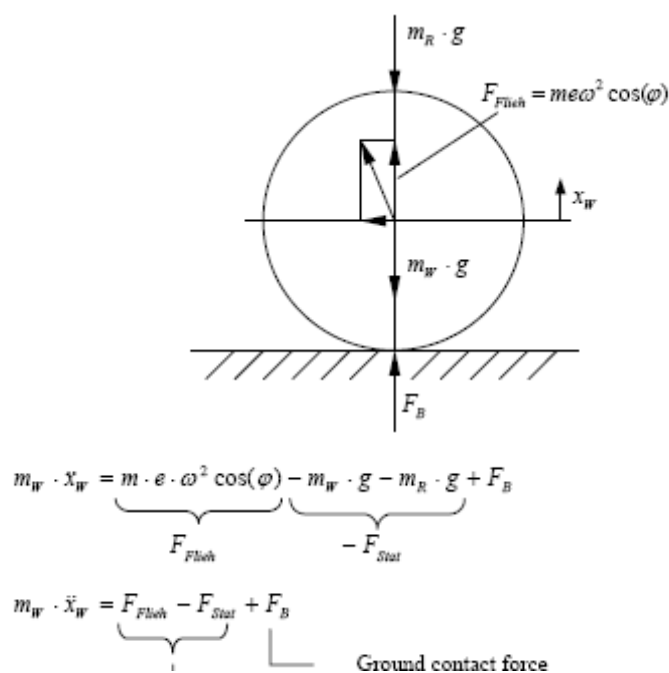


Fig.3.1 Forze che equilibrano il sistema vibratorio del rullo

La valutazione è inizialmente basata sulla misurazione temporale lungo il percorso dell'accelerazione o della proporzionale forza di massa. La massa è suddivisa in due componenti:

- La componente sinusoidale della forza centrifuga spostata verso il basso dal carico statico per asse;
- La forza di contatto con il terreno.

Lo spostamento dell'oscillazione del rullo vibrante è determinato dalla doppia integrazione alla base dell'accelerazione, in linea con il calcolo della forza di contatto del terreno.

Per la valutazione si utilizza la forza di contatto effettiva tra il terreno ed il rullo che dipende o dallo spostamento del rullo o dalla deformazione impressa nel terreno.

Il risultato così ottenuto si chiama diagramma indicatore (Fig.3.2). L'area indicata corrisponde all'energia di compattazione trasferita al terreno durante le rotazioni della massa eccentrica o l'energia di compattazione liberata.

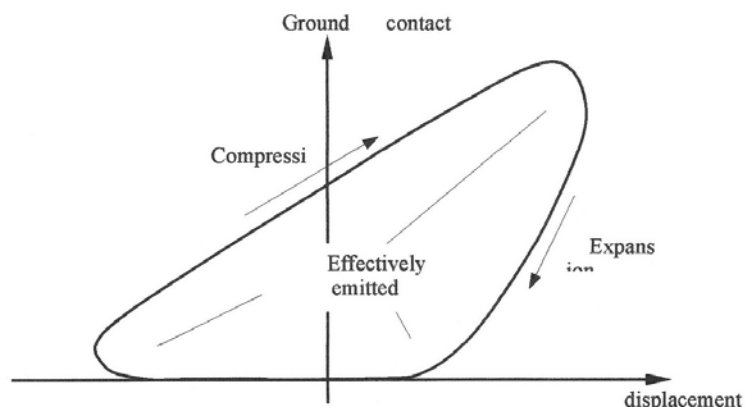


Fig.3.2 Diagramma indicatore

Comunque questa ulteriore indagine non si basa sull'area indicata ma sul gradiente della curva caratteristica forza-spostamento durante la fase di compressione del terreno, che altri non è che il valore della rigidità  $k$ .

E' plausibile che la curva della forza di compressione sarà piatta quando la rigidità del terreno sarà bassa e che il rullo venendo a contatto con il terreno, verrà a contatto con una resistenza più elevata dovuta all'aumento della rigidità del terreno che aumenta durante la fase di compressione.

Il rapporto di  $\Delta F_B$  (variazione forza di contatto rullo-terreno) con  $\Delta x$  (abbassamento del terreno dovuto alla compattazione) rappresenta perciò una quantità caratteristica per la valutazione della rigidità del terreno.

$$k = \frac{\Delta F_B}{\Delta x}$$

Questa quantità caratteristica presenta diversi svantaggi: la rigidità  $k$  aumenta con l'ampiezza del rullo e il diametro del rullo.

Inoltre  $k$  dipende dalla massa vibrante, dalla massa della struttura intelaiata e dalla massa non bilanciata. Complessivamente si può riassumere che, in contrasto con i comuni metodi utilizzati (valore  $\Omega$  sul Terrameter), la rigidità è una grandezza caratteristica

fisicamente verificabile, ma che il valore misurato non può essere direttamente trasferito da un tipo di rullo ad un altro.

Il nuovo metodo per la valutazione della rigidità qui introdotto non utilizza la rigidità  $k$  del sottofondo, ma utilizza come principio la definizione del modulo  $E$ . Come nome identificativo verrà utilizzato il termine di modulo di vibrazione  $E_{vib}$ .

Oltre alla valutazione del gradiente, in Fig.3.2 è facile distinguere una fase di compressione, durante la quale il rullo è intento a costipare il terreno, e una fase di espansione durante la quale, a compattazione già avvenuta, i grani del terreno si ridistribuiscono e l'energia assorbita durante la compattazione si diffonde in tutti gli strati di terreno.

Queste due fasi possono essere associate alle fasi di carico e scarico cui il terreno è soggetto in laboratorio durante la prova di carico su piastra.

Questo è il motivo per cui il modulo vibratorio  $E_{vib}$  può essere messo in relazione al modulo di deformazione  $E_v$  ottenuto durante la prova di laboratorio.

È comunque da evidenziare il fatto che  $E_{vib}$  è un modulo dinamico mentre  $E_v$  è statico.

Inoltre si può mettere in evidenza la versatilità del modulo  $E_{vib}$  che può essere facilmente confrontato con  $E_v$  a differenza degli altri parametri utilizzati nella compattazione intelligente dalle altre case costruttrici.

Prima di tutto si introduce una spiegazione relativa alla determinazione del Modulo di Deformazione  $E_v$ .

Il test della prova di carico su piastra è una procedura di test durante la quale un piatto circolare viene gradualmente caricato e scaricato. Il suo modulo di deformazione è ottenuto dal ciclo o dai cicli di carico.

In questo caso il punto d'inizio è rappresentato dall'equazione dell'assestamento iniziale sopra il piano circolare.

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{4 \cdot G \cdot r}{1 - \nu}$$

$G$  = Modulo dello sforzo

$r$  = Raggio del piatto

$\nu$  = coefficiente di Poisson

Questa equazione si basa su una soluzione limitata a condizioni elastiche, lineari, isotrope interpretate come segue.

Alla base di relazioni nelle quali vengono considerati forza-spostamento ( $\Delta F, \Delta s$ ) e in presenza di una certa geometria ( $r$ ), si possono raggiungere queste conclusioni per il terreno ( $G, \nu$ ).

In questa equazione deve essere restituita la grandezza seguente:

$$G = \frac{E}{2(1-\nu)} \qquad \Delta F = \Delta \sigma \cdot \pi \cdot r^2$$

con  $(1-\nu) \cdot (1+\nu) = (1-\nu^2)$  da qui ottengo E:

$$E = \frac{\pi(1-\nu^2)}{2} \cdot r \cdot \frac{\Delta \sigma}{\Delta s}$$

Da questa formula si ottiene il valore ottenuto tramite la prova di carico su piastra:

$$E_0 = 1,5 \cdot r \cdot \frac{\Delta \sigma}{\Delta s}$$

Senza dubbio il terreno non può essere considerato lineare, elastico e isotropo. Se fossero soddisfatte queste condizioni, il modulo di deformazione dovrebbe uguagliare il modulo E.

Una ulteriore differenza tra  $E_{vib}$  ed  $E_v$ , è che il modulo vibratorio si ottiene compattando il terreno con un rullo cilindrico, mentre nella prova di carico su piastra, la forma del piatto è circolare per cui si è cercata una valida approssimazione per poter confrontare l'area di contatto rullo-terreno con quella piatto-terreno.

Il calcolo dell'area di contatto del cilindro con il terreno è stato formulato da Hertz (1895). La larghezza di contatto può essere determinata in funzione della forza, della geometria e delle proprietà del materiale. Frequentemente è stato fatto notare che l'area

compattata non può essere calcolata utilizzando la formula di Hertz. La questione relativa all'abbassamento del terreno fu pubblicata da Lundberg.

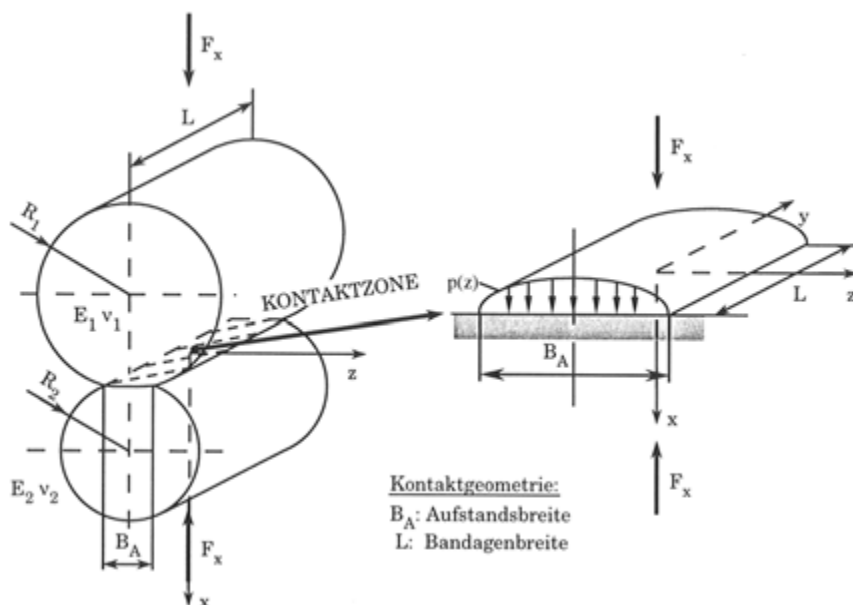


Fig. 3.3 Confronto area contatto rullo-terreno, piatto-terreno

Questo permise il calcolo di una serie di forze interagenti e anche lo studio del rullo cilindrico, considerato simile al piatto della prova di carico su piastra Fig.3.3.

Le formule di Lundberg possono essere esplicitate riuscendo a calcolare il cedimento del terreno  $\delta$  se la forza, la geometria e le proprietà del materiale sono note. Nel primo caso l'area di contatto è determinata conoscendo il valore del cedimento del terreno (Fig.3.4).

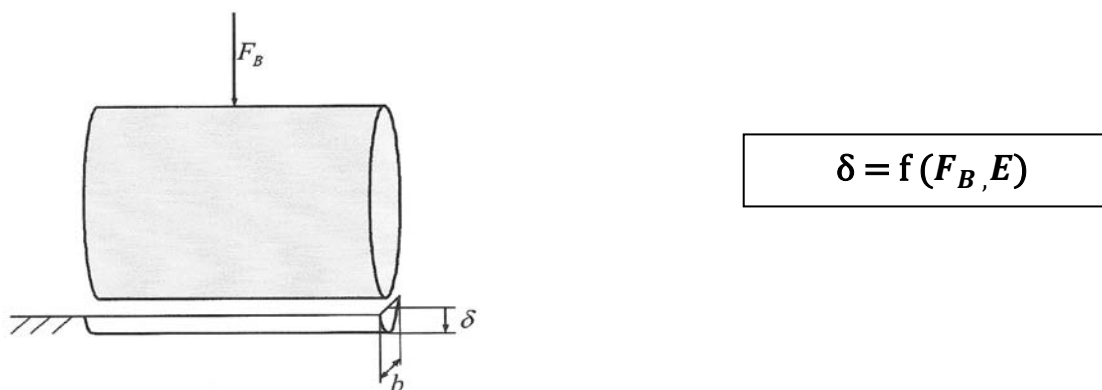


Fig.3.4 Rapporto Forza-cedimento

H. HERTZ 1895

$$b = \sqrt{\frac{16}{\pi} \cdot \frac{R(1-\nu^2)}{E} \frac{F_B}{l}}$$

LUNDBERG

$$\delta = \frac{1-\nu^2}{E} \cdot \frac{F_B}{l} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \left(1,8864 + \ln \frac{L}{b}\right)$$

E = modulo di Young (MN/m<sup>2</sup>)

L = lunghezza del tamburo(m)

R = raggio del tamburo (m)

$\nu$  = coefficiente di Poisson ( $\nu = 0,25$ )

Per ragioni di completezza si deve notare che tali formule fanno riferimento ad un'area di carico parabolica lungo la zona di contatto, che la zona di contatto deve essere sempre più piccola della larghezza del rullo e che la massa cilindrica del rullo deve avere una forma leggermente sferica.

Anche la rigidezza del suolo  $k_B$ , varia al variare dell'area di contatto infatti esprime il rapporto tra il carico e il conseguente cedimento e dipende dalla superficie sulla quale viene applicato il carico.

Il modulo E del terreno è un parametro necessario per determinare  $k_B$ .

La rigidezza del terreno dipende dal tipo di rullo, il modulo dipende dalle proprietà del terreno.

Hertz e Lundberg sono riusciti a dimostrare la relazione che intercorre tra la rigidezza del terreno ed il modulo E sia per via teorica sia sperimentale, facendo sempre riferimento al confronto con la prova di carico su piastra e rimanendo nell'ipotesi di sistema elastico-lineare.



**3.2.2 DALLA RIGIDEZZA AL MODULO (TEORICO)**

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

L = lunghezza del tamburo

$\nu$  = coefficiente di Poisson

$m_f, m_d$  = contributo delle masse del macchinario e del tamburo

r = raggio del tamburo

g = accelerazione di gravità

Questo risultato può essere usato per trovare la relazione tra la rigidezza del terreno  $k_B$  e il modulo E del materiale compattato dal rullo.

La relazione tra la rigidezza  $k_B$  e il modulo E può anche essere determinata in via sperimentale effettuando prove con rulli e su piastra in parallelo Fig.3.5.

**3.2.4 DALLA RIGIDEZZA AL MODULO (SPERIMENTALE)**

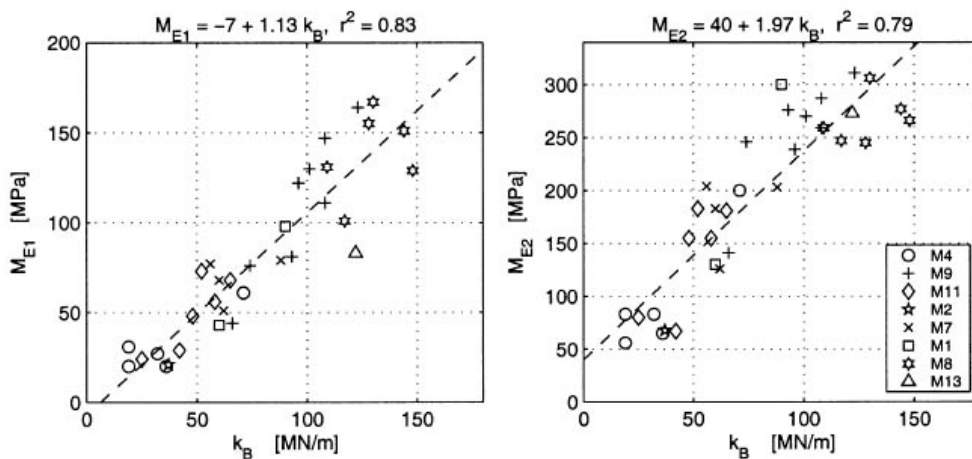


Fig.3.5 Relazione tra il modulo E e la rigidezza  $k_B$

Quando si conoscono i valori geometrici (R,l) queste formule permettono di determinare la relazione con  $\delta = f(F_B, E)$ . Il coefficiente di Poisson può in questo modo essere costantemente considerato pari a 0,25. Il termine  $(1-\nu^2)$  può essere trascurato considerando il semplice coefficiente di Poisson  $\nu$ .

Inizialmente la formula  $\delta = f(F_B, E)$  forniva il risultato riportato in Fig.3.6.

Nel diagramma qui riportato  $\delta$  è in ascissa e  $F_B$  in ordinata.

Il parametro che viene cercato è il modulo E.

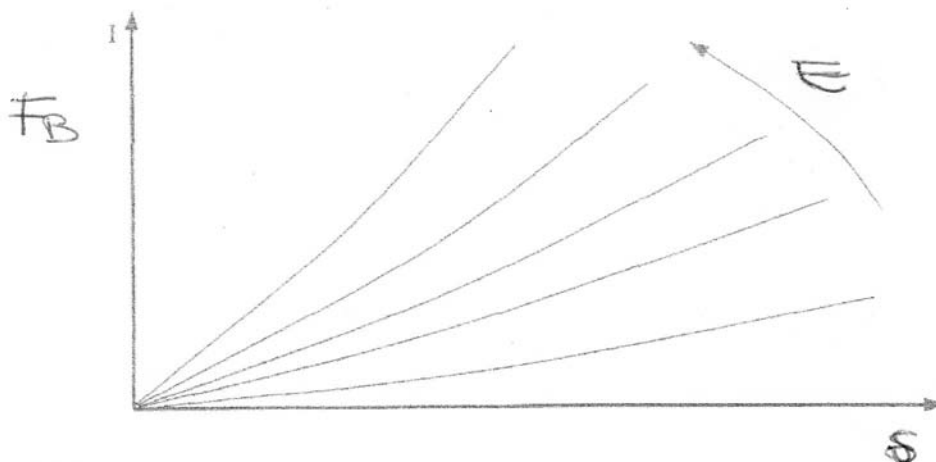


Fig.3.6 Rapporto forza di contatto rullo terreno e corrispondente cedimento

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.

Analogamente durante la prova di carico su piastra per la valutazione del modulo E, si fa riferimento alla forza impiegata nella fase di carico e al conseguente abbassamento ottenuto. Il gruppo di curve mostrato in Fig.3.6 fa riferimento ad una sola curva forza-cedimento che più si avvicina alla curva di compressione del diagramma indicatore (Fig.3.2).

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.

### 3.3 TEST DI COMPATTAZIONE E CONFRONTO CON IL TEST DELLA PROVA DI CARICO SU PIASTRA

Qui di seguito sono state fatte delle considerazioni relative ad un ulteriore confronto tra  $E_{vib}$  e  $E_v$  riferiti ad un terreno ghiaioso-limoso.

I diagrammi indicatori mostrati come esempio mostrano un aumento di rigidezza progressivo da una passata all'altra, effettuate con rullo compattatore.

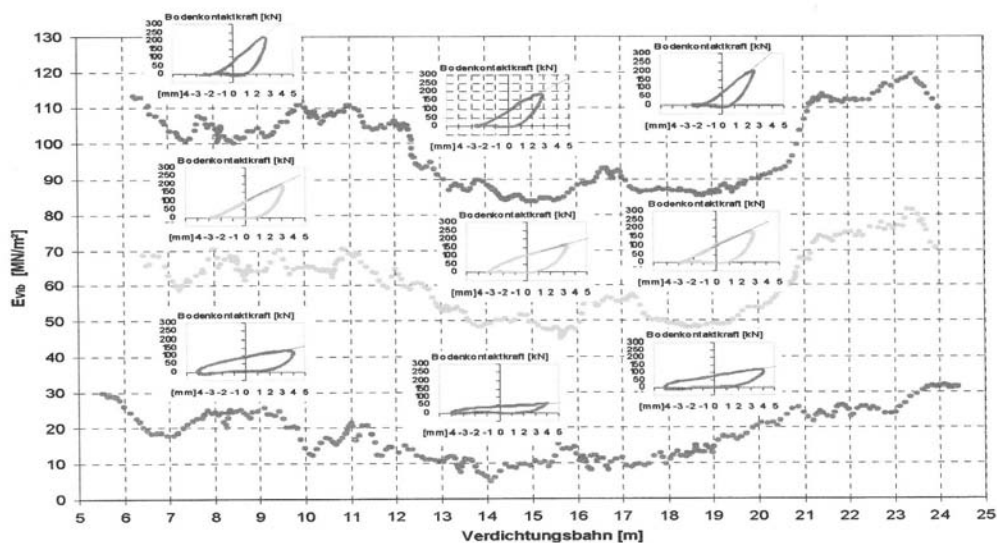


Fig.3.7

In Fig. 3.7 vengono messi in relazione i valori di  $E_{vib}$  [MPa], posti in ordinata, in funzione della progressiva [m], posta in ascissa, che evidenzia la lunghezza del sito investigato.

I tracciati mostrati in figura, descrivono l'andamento di  $E_{vib}$  rilevato dal rullo su tutto il sito e permettono di evidenziare zone più rigide, soprattutto nella parte iniziale e finale del campo, e meno rigide nella parte centrale, sintomo probabilmente di strati di terreno più cedevole disposti nel sottofondo.

All'aumentare delle passate, si nota, un incremento di  $E_{vib}$  su tutto il campo, anche nelle aree centrali del sito, anche se in tali punti si raggiunge un grado di compattazione inferiore.

Con la prova di carico su piastra, si è provveduto a valutare i valori di  $E_v$  ottenuti studiando campioni di terreno prelevati dal sito in questione.

Per poter paragonare il modulo di vibrazione  $E_{vib}$  con il convenzionale modulo di vibrazione  $E_{v1}$ ,  $E_{v2}$ , entrambe le misurazioni sono mostrate in Fig.3.8 in funzione delle passate.

Specialmente durante la prima passata il valore di  $E_{v2}$  è relativamente alto rispetto  $E_{vib}$ , perché la piastra caricata causa, durante l'iniziale applicazione di carico, una ulteriore compattazione locale. Siccome il compattatore con meccanismo vibratorio passa sempre su terreni non ancora compattati, il modulo di vibrazione  $E_{vib}$  ha inizialmente valori che tendono a  $E_{v1}$ . Con l'aumentare del numero di passate questo effetto diminuisce e il modulo di vibrazione  $E_{vib}$  tende al valore di  $E_{v2}$ .

La curva caratteristica che permette di mettere in evidenza come varia il valore del modulo di vibrazione  $E_{vib}$  con l'aumentare delle passate è vantaggiosa per molti aspetti poiché fornisce un metodo che presenta una sensibilità maggiore.

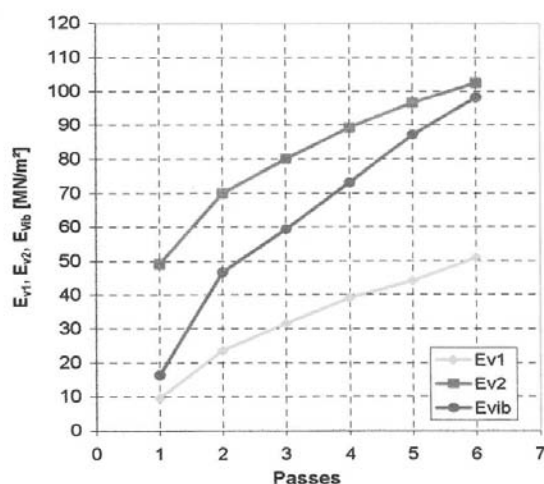


Fig.3.8 Confronto  $E_{vib}$ - $E_v$

### 3.4 DETERMINAZIONE DELLA FORZA DI CONTATTO RULLO-TERRENO $F_B$

La misurazione integrata del lavoro e la tecnologia di controllo nei rulli vibratori si basa sull'analisi delle dinamiche non lineari del sistema terreno-macchinario.

Ad ogni fase della compattazione corrisponde una continua variazione dei parametri di ampiezza, frequenza e velocità del rullo del macchinario e del suo meccanismo di induzione della vibrazione.

Questi fattori, come è stato ampiamente detto, permettono di determinare il valore del modulo vibratorio Evib. Un altro fattore importante nello studio del comportamento del rullo è rappresentato dalla forza di contatto rullo terreno  $F_B$ , che ci si appresta a determinare in questo paragrafo.

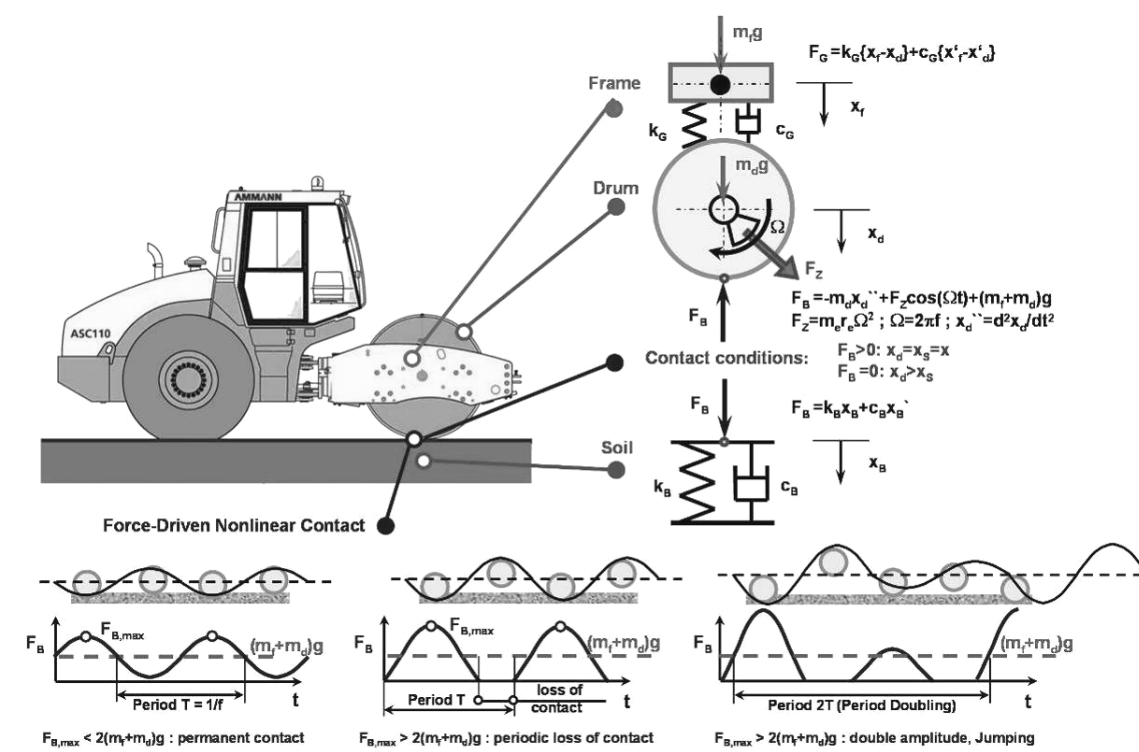


Fig.3.9

Usando termini analitici, il comportamento del sistema terreno-macchina è descritto con l'aiuto dell'equazione qui di seguito riportata.

Se si prende in considerazione il terreno nell' ipotesi elastico-lineare questo reagisce con una forza che tiene conto della sua rigidità, dello smorzamento e dello spostamento dovuto al comportamento del rullo vibratorio.

Allo stesso tempo il rullo trasferisce nel terreno una forza che tiene conto dei momenti derivanti dalle forze statiche e dalla forza centrifuga risultante dal comportamento delle masse vibratorie all'interno del tamburo che assumerà valori più o meno elevati a seconda della posizione assunta dalla massa vibratoria in funzione dell' ampiezza della vibrazione impostata al fine di ottenere il grado di compattazione preventivato.

Uguagliando i valori di  $F_B$  è possibile ottenere il valore di rigidità del terreno.

$F_B$ , forza di contatto terreno-tamburo viene definita come segue:

$$F_B = -m_d \ddot{x}_d + m_e r_e \Omega^2 \cdot \cos(\Omega t) + k_G(x_d + x_f) + c_G(\dot{x}_d - \dot{x}_f) + m_d \cdot g \quad (1)$$

$$0 = -m_f \cdot \ddot{x}_f + k_G(x_f + x_d) + c_G(\dot{x}_f - \dot{x}_d) + m_f \cdot g$$

Dove:

$m_d$  = massa del tamburo [Kg]

$\ddot{x}_d$  = accelerazione verticale del tamburo [m/sec<sup>2</sup>]

$m_f$  = massa del telaio [Kg]

$m_e$  = massa non bilanciata [Kg]

$r_e$  = distanza radiale alla quale  $m_e$  fa riferimento [m]

$m_e r_e$  = momento statico dell'asse che ruota [Kg· m]

$\Omega = 2\pi \cdot f$  [Hertz]

$g$  = accelerazione di gravità [m/sec<sup>2</sup>]

$t$  = tempo trascorso [sec]

$f$  = frequenza di rotazione dell'asse

$k_G$  = rigidità della sospensione [MN/m]

$x_f$  = spostamento del tamburo

$c_G$  = smorzamento della sospensione [MN/m]

Nell' equazione (1) la forza che agisce nella direzione positiva (verso il basso) ha un segno +.

La forza d'inerzia  $m_d \ddot{x}_d$  deve sempre essere indirizzata negativamente perché si tratta di una forza inerziale.

Se il suolo è descritto come un sistema elastico, l'equazione della forza di interazione terreno-tamburo è anche data da:

$$F_B = k_B x_d + c_B \dot{x}_D \quad (2)$$

Dove:

$k_B$  = rigidezza del suolo [KN/m]

$c_B$  = coefficiente di smorzamento [KN· s/m]

(il rapporto di smorzamento è assunto generalmente pari a 0,2)

$\dot{x}_D$  = velocità del tamburo [m/s]

Si può misurare l'accelerazione del tamburo e l'angolo di fase tra il sistema eccitatorio e quello oscillante.

Con queste informazioni, è possibile calcolare  $F_B$  usando l'equazione (1).

Se uguagliamo la (1) e la (2) possiamo ricavare la rigidezza del terreno  $k_B$  funzione di tutti i parametri che conosciamo escluso il coefficiente di smorzamento. Questo parametro è generalmente assunto mediante un rapporto di smorzamento pari al 20%.

In alternativa si può tracciare la curva dell'energia di compattazione, la pendenza della curva sulla porzione di carico può essere calcolata come la rigidezza dinamica del materiale da compattare.

In Fig. 3.9, è inoltre, rappresentato il diverso comportamento tenuto dal rullo dovuto alle diverse caratteristiche del terreno da compattare e alle possibili discontinuità.

In funzione delle condizioni del terreno e della forza di contatto rullo-terreno, il macchinario inizia il suo lavoro di compattazione cercando di coinvolgere anche gli strati di terreno del sottofondo, in modo da garantire un grado di compattazione elevato, cercando di eliminare possibili discontinuità del terreno, causate per esempio dalla presenza di materiale

roccioso caratterizzato da rigidità molto elevata, o da umidità, grande nemica dei materiali argillosi.

La presenza di materiale roccioso, infatti, provoca situazioni di non linearità, che possono essere evidenziate graficamente da picchi riferiti ad  $E_{vib}$  o incremento delle frequenze.

In definitiva il comportamento del compattatore dinamico può essere diviso in un comportamento lineare finché il rullo rimane in contatto con il terreno, in un comportamento periodico non lineare quando c'è parziale perdita di contatto con il terreno e infine in un comportamento dinamico-caotico quando viene a contatto con materiale roccioso o discontinuità.

In Fig. 3.9 sono inoltre spiegati nel dettaglio i comportamenti che possono essere tenuti dal rullo durante la compattazione.

1- Se la superficie del tamburo mantiene sempre il contatto con il suolo, la frequenza della rotazione  $f$  è determinata con l'analisi di Fourier.

Questo processo di compattazione è chiamato operazione di caricamento.

È un processo ottimale per la stesa dell'asfalto ma non è ritenuto idoneo per la compattazione degli strati di terreno perché in questo modo non si riesce a trasferire energia al materiale da compattare.

In questo caso, si nota, come l'onda che si diffonde nel terreno sia periodica e si ripeta con continuità per un periodo pari a  $T = 1/f$ .

La forza di contatto rullo-terreno massima raggiunge valori minori a 2 volte la forza statica.

2- Se la superficie del tamburo si solleva periodicamente da terra, con perdita di contatto rullo-terreno, il risultato è una compattazione efficace degli strati di terreno. Questo sollevamento da terra periodico del tamburo è segno di un modo ottimale di operare perché in questo caso le forze trasferite al terreno sono più efficaci che nel caso 1, quindi la compattazione ne trae vantaggio.



In questo caso si nota come l'onda vibratoria che si propaga nel terreno, generando la compattazione, sia continua, uniforme e caratterizzata da un periodo  $T$ . Nel grafico viene messo in evidenza la parte che identifica la perdita di contatto tra rullo e terreno, che genera la vibrazione.

Il valore della forza di contatto rullo-terreno massima è maggiore a 2 volte la forza statica.

3- Se il rullo mostra segni di saltellamento, ciò significa che il telaio del macchinario sta iniziando a mostrare vibrazioni intorno alla sua posizione fissa, alle onde dell'armonica con il valore più alto si sommano le oscillazioni con ampiezza pari a metà del valore della frequenza  $\Omega$  della massa non in equilibrio. Questa situazione non è stabile e potrebbe potenzialmente scompattare il terreno, inoltre il telaio del macchinario potrebbe iniziare a vibrare intorno al suo asse longitudinale.

In questo caso si nota come l'onda vibratoria si propaghi nel terreno in modo casuale, in un periodo uguale a  $2T$ , generando il fenomeno del doppio salto.

Per evidenziare ancora meglio il comportamento del tamburo si fa riferimento anche alla Fig. 3.10.

In Fig. 3.10 vengono messi in relazione frequenza ed ampiezza della vibrazione, considerando valori differenti del momento derivante dalla rotazione delle masse nel tamburo.

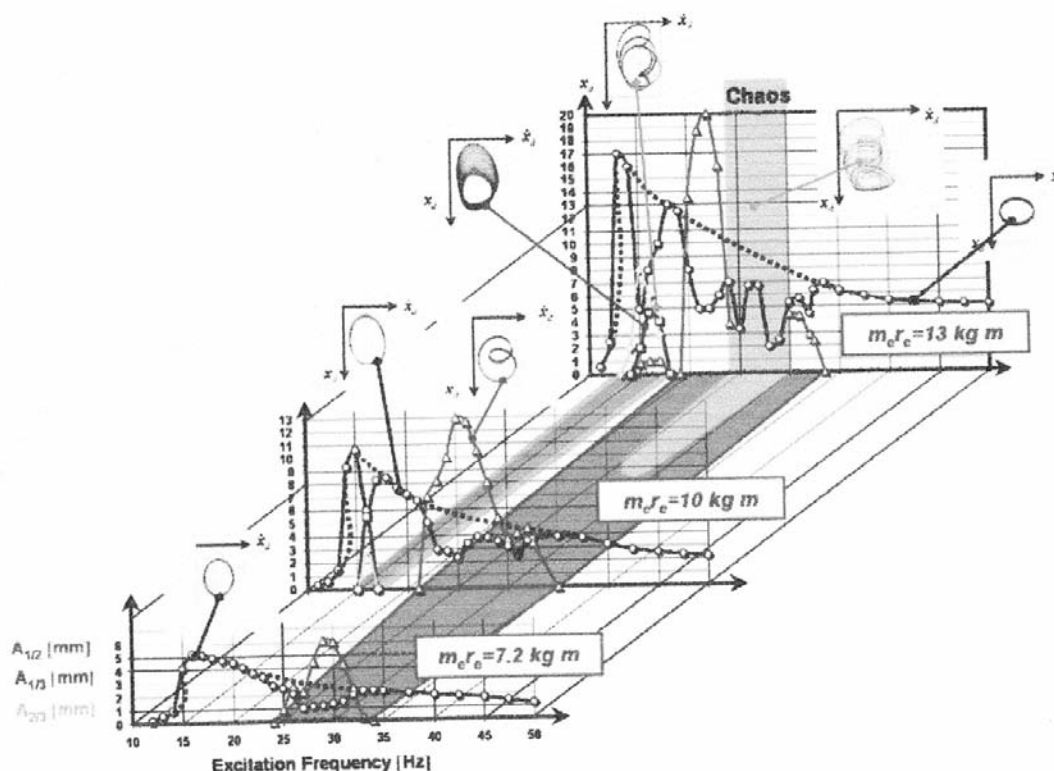


Fig.3.10 Comportamento del tamburo

Si nota come inizialmente con forza centrifuga ridotta, l'andamento della curva risulti essere costante, non si assiste a perdita di contatto tra rullo e terreno, si ha una graduale diminuzione di ampiezza in corrispondenza di un aumento di frequenza. L'energia trasferita al terreno è costante.

Se si aumentano i valori della forza centrifuga, si assiste ad un comportamento della propagazione della vibrazione nel terreno periodico non lineare sintomo di parziale perdita di contatto tra rullo e terreno.

Finchè il valore della frequenza rimane basso, si ha un incremento costante delle ampiezze con conseguente trasferimento omogeneo di energia di compattazione nel terreno.

Per valori di frequenza più elevati, intorno ai 28-30 Hz che si considerano ottimali per la compattazione di strati di materiale inerte e terreno argilloso – sabbioso, si nota che il comportamento del rullo produce onde vibratorie periodiche non lineari che producono

parziale perdita di contatto tra rullo e terreno, infatti nascono delle onde sub-armoniche caratterizzate da ampiezze pari ad  $1/3$  dell'armonica iniziale che si sommano alle prime.

In questo caso tali sub-armoniche costituiscono solo un miglioramento per la compattazione.

Aumentando ulteriormente la forza centrifuga, si assiste ad un aumento sproporzionato delle ampiezze vibratorie, che genera un comportamento caotico dinamico.

Le sub-armoniche che nascono, con ampiezza pari circa a  $1/2$  di quelle iniziali, sommate alle prime, causano il saltellamento del rullo sul terreno. A causa di tale situazione si assiste ad una cattiva compattazione dovuta ad un trasferimento disomogeneo di energia nel terreno.

### **3.5 CONCLUSIONI**

Durante la trattazione del Cap.3 si è cercato di studiare più nel dettaglio il modulo vibratorio o modulo dinamico  $E_{vib}$ .

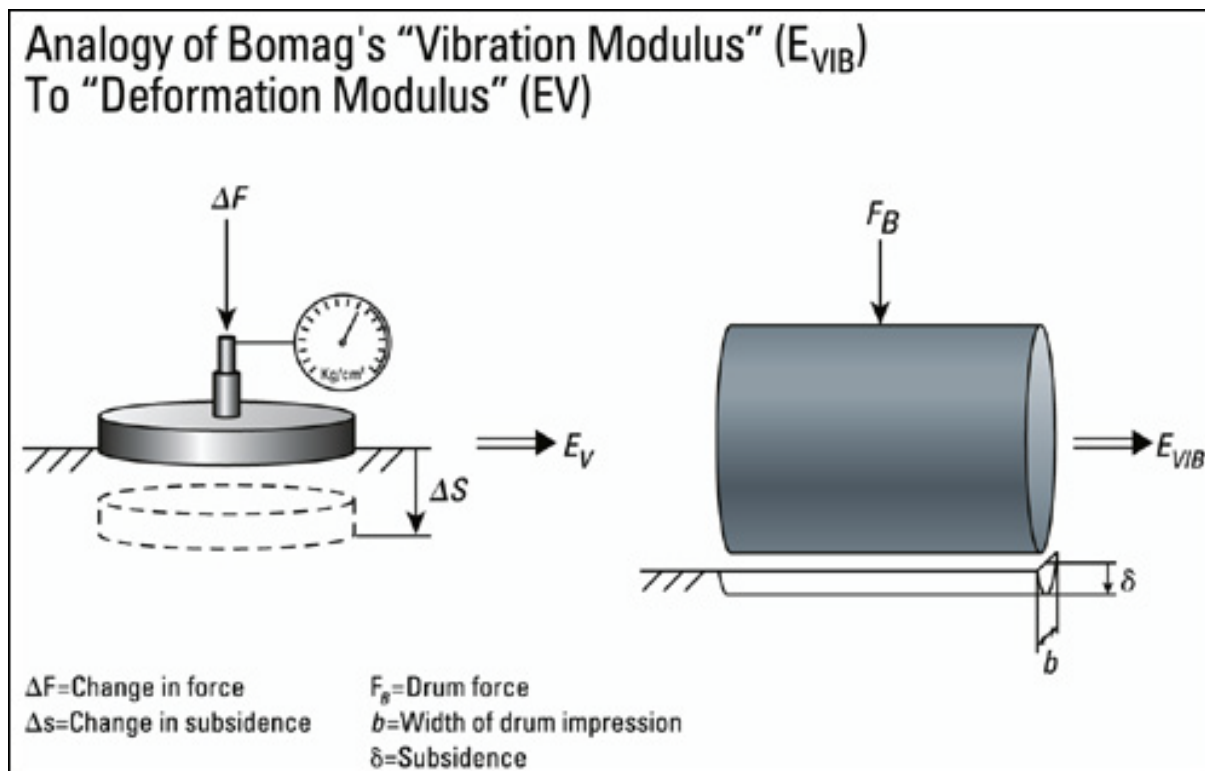
Si è visto come tale modulo, sia facilmente confrontabile con il modulo di deformazione  $E_v$  ottenuto tramite prova di carico su piastra.

La Fig.3.11 mostra i due metodi messi a confronto.

Nella rappresentazione grafica in Fig. 3.11 Bomag spiega il modo in cui valuta la rigidità che i terreni raggiungono in seguito alla compattazione ottenuta con sistemi di compattazione intelligente.

La rappresentazione mette in evidenza le congruenze tra la prova di carico su piastra e la compattazione tramite sistema di compattazione intelligente; in entrambe le prove viene determinato un modulo definito vibratorio o di elasticità dinamica  $E_{vib}$  per il macchinario Bomag, e di elasticità statica o  $E_v$  per la prova di carico su piastra. In entrambi i casi la misurazione si basa sulla determinazione dell'abbassamento del terreno in seguito al carico cui è stato sottoposto.

Bomag valuta oltre all'abbassamento del terreno anche la forza  $F_B$  di contatto tra terreno e rullo.


 Fig. 3.11 Confronto  $E_v$  -  $E_{vib}$ 

La differenza fra questi due moduli che si ottengono ossia quello di elasticità dinamica ( $E_{vib}$ ) e quello di elasticità statica ( $E_v$ ) è da ricercarsi nel fatto che il primo deriva dallo studio della propagazione di onde vibratorie nel terreno che vengono valutate effettuando delle passate continue con il macchinario sul terreno da studiare, il secondo viene valutato tramite delle prove puntuali.

I moduli dinamici, infatti, sono ottenuti mediante prove che sfruttano la relazione per cui il quadrato della velocità di propagazione di un'onda elastica di taglio nel terreno è direttamente proporzionale al rapporto tra il modulo di elasticità tangenziale e la densità del terreno.

Inoltre è da mettere in evidenza la maggiore affidabilità che deriva dallo studio di  $E_{vib}$  rispetto  $E_v$  visto che quest'ultimo deriva da prelievi effettuati nel terreno soggetti a rimaneggiamento, mentre  $E_{vib}$  viene valutato effettuando delle passate omogenee su tutta la striscia di terreno oggetto di studio.

Bomag ha due sistemi di compattazione intelligente, uno per la stesa dell'asfalto, l'altro per la compattazione dei terreni.

I due sistemi sono simili in quanto in entrambi è contenuto un meccanismo eccitatorio all'interno del tamburo, caratterizzato da una massa battente che ruota con un range di 90 gradi che viene modificato in base al grado di compattazione da raggiungere, massimo se la massa battente è posta in direzione verticale, minimo se in posizione orizzontale.

Appena il sistema rileva un aumento della rigidità del terreno, la forza di contatto terreno-tamburo si stabilizza mantenendo costante l'ampiezza e la frequenza.

Entrambi i sistemi Bomag, nella loro modalità automatica, consentono all'operatore di pre-selezionare i massimi livelli di forza di compattazione, e nella modalità manuale, il sistema permette all'operatore di scegliere tra sei diverse posizioni della massa battente.

Bomag per mettere in evidenza la rigidità del materiale utilizza il modulo di vibrazione o  $E_{vib}$  calcolato in  $MN/m^2$ .

Possiamo, inoltre, notare in base ai risultati ottenuti che il modulo di vibrazione  $E_{vib}$ , può essere considerato una buona alternativa al Modulo di Deformazione  $E_v$  ottenuto tramite prova di carico su piastra.

Con l'avvento del Variocontrol è possibile raggiungere ottimi gradi di compattazione del terreno, fissato un determinato modulo  $E_{vib}$ .

Con la compattazione vibratoria controllata è possibile ottenere ottimi risultati e soprattutto una eccellente compattazione con un numero minimo di passate.

Benefici con il nuovo valore di misura  $E_{vib}$ .

- Determinazione diretta della rigidità sotto forma di modulo di vibrazione  $E_{vib}$  [ $MN/m^2$ ] già durante il processo di compattazione.
- $E_{vib}$  è direttamente collegato a  $E_{v1}$ ,  $E_{v2}$  (riferiti alla prova di carico su piastra).
- Con i rulli Variocontrol e Variomatic, il processo di misurazione viene effettuato in modo automatico.

## CAPITOLO 4

### *SITO SPERIMENTALE ALTOPASCIO (LU)*

#### **4.1 PREMESSA**



Fig.4.1 Posizione del rilevato sperimentale

In data 6 – 7 ottobre 2009, il DISTART, settore stradale dell' Università degli studi di Bologna, insieme all' Università degli studi di Pisa e a Bomag, si è effettuato in località Altopascio (LU) una campagna di rilievo su un rilevato sperimentale realizzato con terre A<sub>2-5</sub> e materiali C&D (Fig.4.1).

Lo studio è stato effettuato tramite l'impiego di un compattatore Bomag equipaggiato con Variocontrol.

Le indagini sono state realizzate su di un sito sperimentale in modo da poter studiare alcuni aspetti del funzionamento del macchinario che permette di determinare le caratteristiche di rigidità del terreno sia negli strati più superficiali, sia in quelli più profondi.

I materiali utilizzati sono stati selezionati tra quelli comunemente utilizzati nelle costruzioni stradali, includendo anche materiali di riciclo provenienti da attività di costruzione e demolizione (C&D).

La Fig.4.2 schematizza il sito sul quale è stata effettuata la sperimentazione.

Si evidenziano le tre fasce compattate con 2, 4, 8 passate di rullo, i corridoi laterali per il passaggio dei macchinari e lo spessore dello strato di terreno sul quale è stata effettuata la sperimentazione.

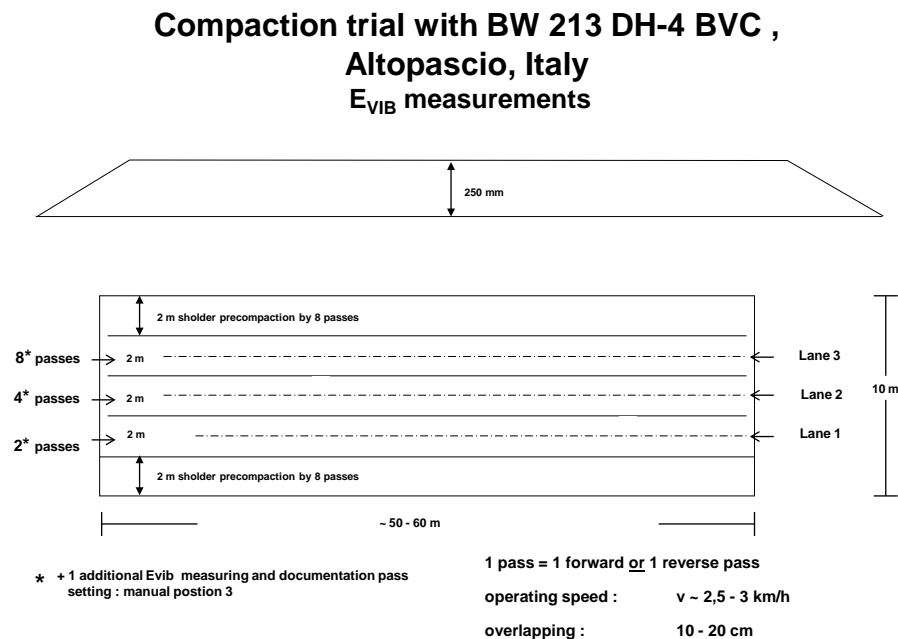


Fig.4.2 Descrizione del sito

Nella Fig.4.3 è possibile osservare il rilevato sperimentale nella sua completezza prima della compattazione.

È possibile suddividere il campo in due zone, la prima posta in primo piano è quella costituita da terreno A2-5, la seconda sullo sfondo rappresenta il sito costruito in materiale C&D.





Fig.4.3 Rilevato sperimentale ad Altopascio prima della compattazione



Fig.4.4 Rilevato sperimentale ad Altopascio dopo la compattazione



Nella Fig.4.4 è possibile vedere un'immagine del rilevato sperimentale a compattazione avvenuta.

Sono chiaramente visibili le fasce che indicano le varie passate di rullo compattatore. Lateralmente si notano i due corridoi laterali, al centro partendo da destra verso sinistra si individuano le tre fasce rispettivamente compattate con 2, 4 e 8 passate di rullo Bomag.

#### **4.2 CARATTERISTICHE DEL MATERIALE C&D**

- Resistenza

Gli aggregati riciclati sono principalmente costituiti da grani litici o frammenti laterizi ricoperti parzialmente da malte o da intonaci, ovvero materiali disomogenei. Essi presentano, infatti, nuclei compatti e parti friabili, facilmente separabili per azione d'urto e sfregamento. L'esperienza mostra che le miscele ben assortite manifestano un'evidente tendenza alla stabilizzazione della granulometria. È possibile, però, che dalle demolizioni edilizie siano originate partite di prodotto ricche di malta o intonaci e molto carenti di elementi litici: in questo caso la miscela tenderebbe alla polverizzazione, perdendo così capacità portante. Al fine di evitare tale inconveniente da Normativa si fissa il limite superiore per il coefficiente Los Angeles pari a 45% per i sottofondi stradali e 30% per gli strati di fondazione.

- Composizione

Per quanto concerne la composizione degli aggregati riciclati si è puntato sulla qualità dei materiali costituenti la miscela. È stata infatti inserita una limitazione alla presenza di materiali di natura non strettamente inerte. In particolare, la percentuale di questi “*materiali deperibili e/o plastici cavi*” viene limitata allo 0,1% in massa in tutti gli usi. Gli inconvenienti tecnici più rilevanti, determinati dalla presenza di materiali deperibili, derivano dal fatto che il volume occupato inizialmente da questi si trasforma in vuoti interstiziali dopo la degradazione delle sostanze organiche e l'evaporazione dei liquidi in essi contenuti provocando, nel tempo, cedimenti. Per quanto riguarda, invece, vetro e scorie vetrose, conglomerati bituminosi e altri rifiuti minerali dei quali sia ammesso il recupero nel corpo stradale ai sensi della legislazione

vigente, i limiti presenti non dovrebbero preoccupare l'operatore a meno che non si stia trattando flussi di rifiuti di natura particolare e omogenea.

- Forma

Le caratteristiche di forma degli aggregati possono influenzare la costipabilità della miscela e ridurre di conseguenza la portanza. Le norme vigenti per i materiali naturali non prevedono specifiche prescrizioni per lo strato di sottofondo, né per quello di fondazione, ma molti capitolati esprimono l'esigenza di limitare la presenza di elementi piatti e allungati nella miscela di aggregati. Gli aggregati riciclati, per la loro stessa provenienza, possono contenere elementi piatti. Se tali elementi non sono prevalenti e sono convenientemente dispersi nella massa, non si verificano problemi riguardo le caratteristiche tecniche, al contrario, se essi costituiscono un'ampia frazione del materiale riciclato si possono verificare vespai e zone diversamente costipate. Tale valutazione giustifica quindi l'imposizione di un limite superiore per gli indici di forma e appiattimento degli aggregati riciclati destinati ai sottofondi stradali e agli strati di fondazione, rispettivamente pari a 40 e 35 in entrambe le destinazioni d'uso.

- Caratteristiche Granulometriche

Come per gli aggregati naturali, anche per i riciclati la curva granulometrica può essere variata in funzione delle esigenze di produzione. *La Circolare n.5205/2005 impone limiti superiori ed inferiori per le percentuali di passante ai setacci di prova secondo la norma EN 933-1 ed, inoltre, definisce un valore minimo per l'Equivalente in sabbia pari a 20% per il corpo dei rilevati e 30% per gli strati di sottofondo e fondazione.*

Focalizzando ora l'attenzione sui rifiuti da C&D è possibile asserire che essi vengono classificati con il codice CER 17 xx xx (Rifiuti provenienti da attività di costruzione e demolizione), come mostra l'esempio riportato in Fig. 4.5.

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 e, come tali, possono essere identificati:

- le prime due cifre individuano *la classe* ovvero le tipologie industriali o i tipi di attività che hanno generato i rifiuti;
- le seconde due cifre individuano *la sottoclasse* cioè i singoli processi all'interno delle tipologie industriali o attività che hanno generato il rifiuto;
- le ultime due cifre individuano *la categoria* ovvero la tipologia del rifiuto generato: essa può essere pericolosa, individuata da un asterisco, o non pericolosa.

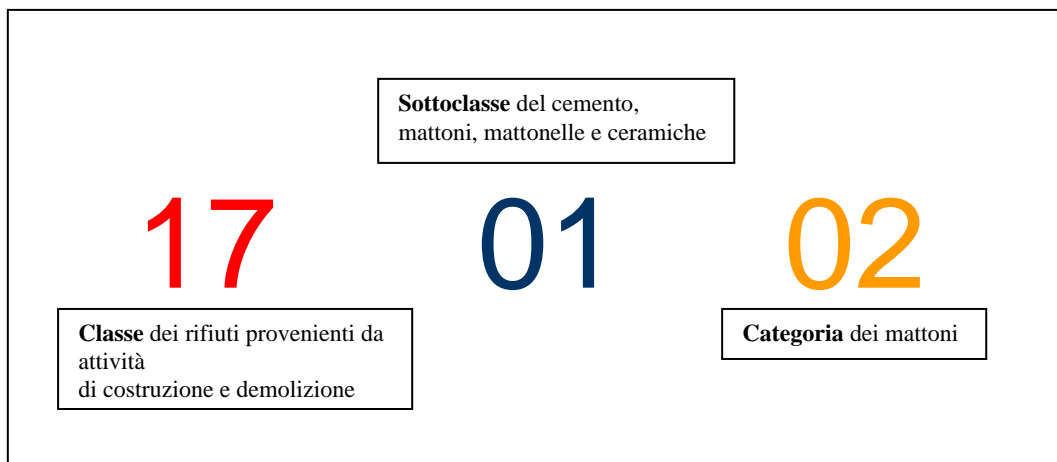


Fig.4.5 Classifica materiali C&D

### 4.3 CARATTERISTICHE TERRENO A2-5

La classificazione delle terre che è stata adottata dal CNR nel 1963 (fascicolo CNR-UNI 10.006), divide le terre in 8 gruppi (con alcuni sottogruppi) in base alla granulometria (passante al setaccio 0,075 UNI), al limite liquido e all'indice di plasticità.

I gruppi sono contraddistinti dalla lettera A e le terre dei gruppi A-1, A-3, A-2, terre che hanno al massimo il 35% di passante al setaccio 0,075 UNI, sono da ottime ad accettabili, mentre le terre dei restanti 5 gruppi sono da valutarsi mediocri o scadenti.

Le terre dei 4 sottogruppi A-2 sono costituite da un misto di ghiaia e sabbia, ma con presenza di materiali plastici (limo ed argilla) sia pure in misura non superiore al 35% ancora idonee per formare rilevati. È interessante osservare la curva granulometrica tipica di tali terreni.

#### ***4.4 CARATTERISTICHE DEL COMPATTATORE BOMAG VARIOCONTROL***

Il valore della rigidità del terreno è stato ottenuto tramite l'utilizzo di un "compattatore intelligente", Bomag Variocontrol Fig. 4.6.

Il Bomag Variocontrol è un sistema di compattazione intelligente che può essere installato su alcuni rulli Bomag monotamburo per l'adattamento continuo automatico dell'energia di compattazione allo stato del terreno. I rulli vibranti della serie BVC (Bomag VarioControl) sono dotati del sistema di vibrazione Bomag Vario che genera una vibrazione orientata del tamburo, adatta continuamente ed in automatico le ampiezze di vibrazione, e quindi l'energia di compattazione, consentendo il massimo aumento della forza compattante ed aumentando la produttività della macchina. Il VarioControl è abbinabile ai sistemi di misurazione e documentazione della compattazione BTM plus, BTM prof, BCM 05. Il valore di misura, denominato modulo di vibrazione,  $E_{vib}$  misurato in MPa, viene rilevato e visualizzato in continuo unitamente ad altri parametri (valore minimo di compattazione preimpostato, ampiezza e frequenza di vibrazione utilizzate al momento, velocità della macchina), consentendo di verificare in tempo reale il risultato del lavoro ed eventualmente stampare i dati di misura raccolti. Il dispositivo è collegabile anche a sistema GPS per una maggior precisione nel rilevamento dei dati di compattazione. I rulli possono essere di varie dimensioni, quello in uso ad Altopascio pesava 12 t se si considera tutta l'intelaiatura si arrivava a 14 t.



Fig.4.6 Bomag Variocontrol in azione presso Altopascio

#### ***4.5 CAMPI PROVA***

I rilievi sono stati effettuati su:

- campo di materiale A2-5 (Fig.4.7-4.8);



Fig.4.7 Campo in materiale A2-5 prima della compattazione





Fig.4.8 Campo in materiale A2-5 dopo la compattazione

- campo di materiale C&D (Fig.4.9-4.10).



Fig.4.9 Campo in materiale C&D prima della compattazione



Fig.4.10 Campo in materiale C&D dopo la compattazione

Ogni campo è stato suddiviso in fasce, al fine di compattare il materiale con un diverso numero di passaggi del rullo . Sono state create due fasce esterne (Fig.4.11) per assestare le estremità del rilevato prima di operare la compattazione intermedia, consentire il passaggio dei mezzi ed evitare disturbi di bordo.



Fig.4.11 Compattazione delle fasce esterne del sito sperimentale

Al centro sono state individuate tre zone compattate con un diverso numero di rullate, rispettivamente 2-4-8 passate per ogni campo (Fig.4.12). Le strisce nel campo in materiale A2-5 hanno una dimensione pari a 2x50 m, nel campo in C&D 2x40 m.





Fig.4.12 Divisione in fasce di rullaggio di entrambi i campi prove

Nel campo di materiale A2-5 sono state individuate delle zone ad alto tasso di umidità, avvallamenti del terreno ed è presente nel rilevato uno strato di geotessile Fig.4.13.



Fig.4.13 Zone umide, avvallamenti e geotessile presente nel campo A2-5



Sia il campo in materiale A2-5 sia quello in C&D sono stati compattati con le modalità riportate in Tab.1.1:

<b>2 passate</b>	<b>4 passate</b>	<b>8 passate</b>
1°-2 passate modalità automatica	1°-4 passate modalità automatica	1°-8 passate modalità automatica
3°-2 passate modalità manuale (proof-rolling)	3°-4 passate modalità automatica	3°-8 passate modalità automatica
	5°-4 passate modalità manuale (proof-rolling)	5°-8 passate modalità automatica
		7°-8 passate modalità automatica
		9°-8 passate modalità manuale (proof-rolling)

Tab.4.1 Modalità delle passate

#### 4.5.1 CAMPO A2-5 GIORNO 6 OTTOBRE

Si sono immediatamente riscontrati problemi di rilievo presenti nella fascia compresa tra i 28 e i 37 m, causa imperfezioni del campo e umidità. Le stesse difficoltà si sono poi riproposte durante le varie passate e sono state la causa del raggiungimento di valori di Evib non troppo soddisfacenti.



Fig. 4.14 Rilievo fascia a 2 passaggi



Fig. 4.15 Zona irregolare tra 28 e 37 m fascia a 2 passate



Fig. 4.16 Rilievo fascia a 4 passaggi



Fig. 4.17 Rilievo fascia a 8 passaggi

Qui di seguito (Fig. 4.18) si riportano tre esempi di scontrini forniti dal rullo Bomag al termine rispettivamente delle 2, 4 e 8 passate in modalità manuale su terreno A2-5.

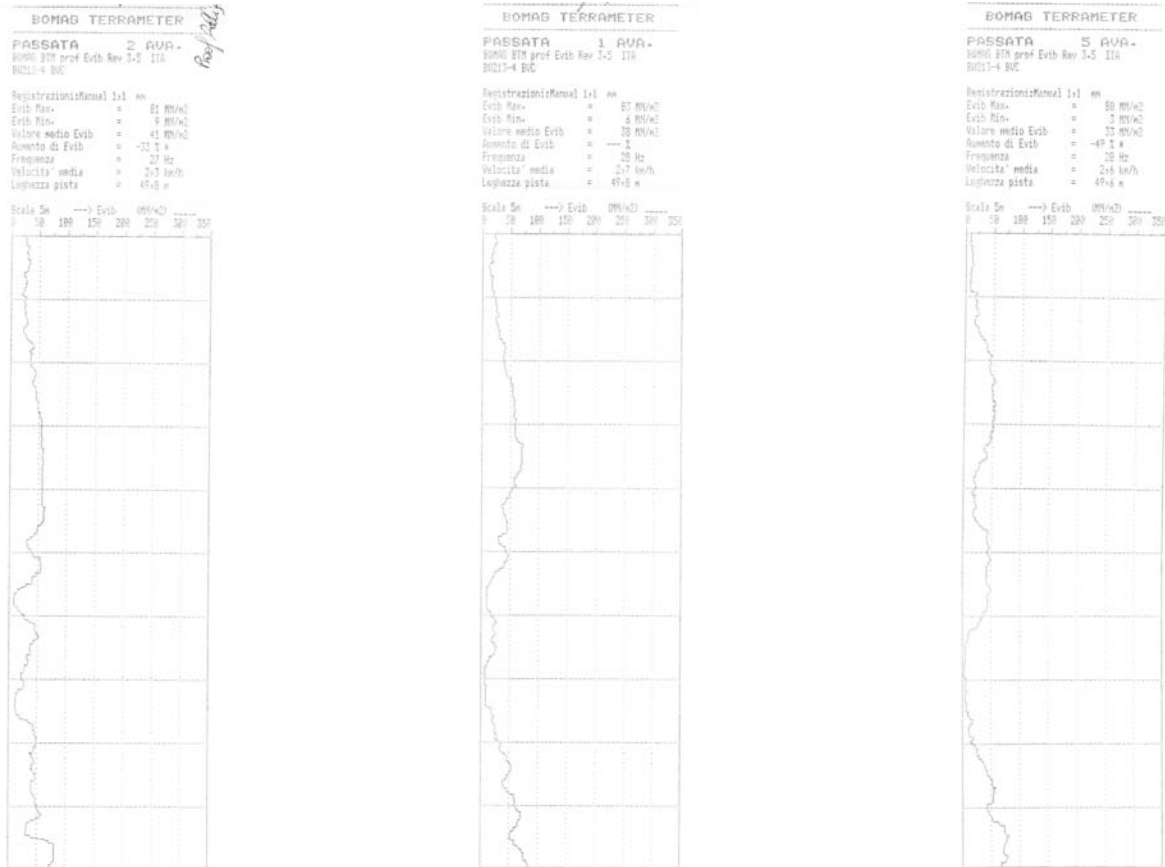


Fig.4.18 Esempi di scontrini stampati dal rullo Bomag al termine delle 2,4 e 8 passate

**4.5.2 CAMPO C&D GIORNO 7 OTTOBRE**



Fig.4.19 Particolare campo pre-compattazione



4.20 Compattatore dotato di Variocontrol



Fig.4.21 Rilievo fascia a 2 passaggi di rullo



Fig.4.22 Rilievo fascia a 4 passaggi di rullo



Fig.4.23 Rilievo fascia a 8 passaggi di rullo



Fig.4.24 Particolare C&D compatto e non.

Qui di seguito (Fig.4.25) si riportano tre esempi di scontrini forniti dal rullo Bomag al termine rispettivamente delle 2, 4 e 8 passate in modalità manuale sul materiale C&D.

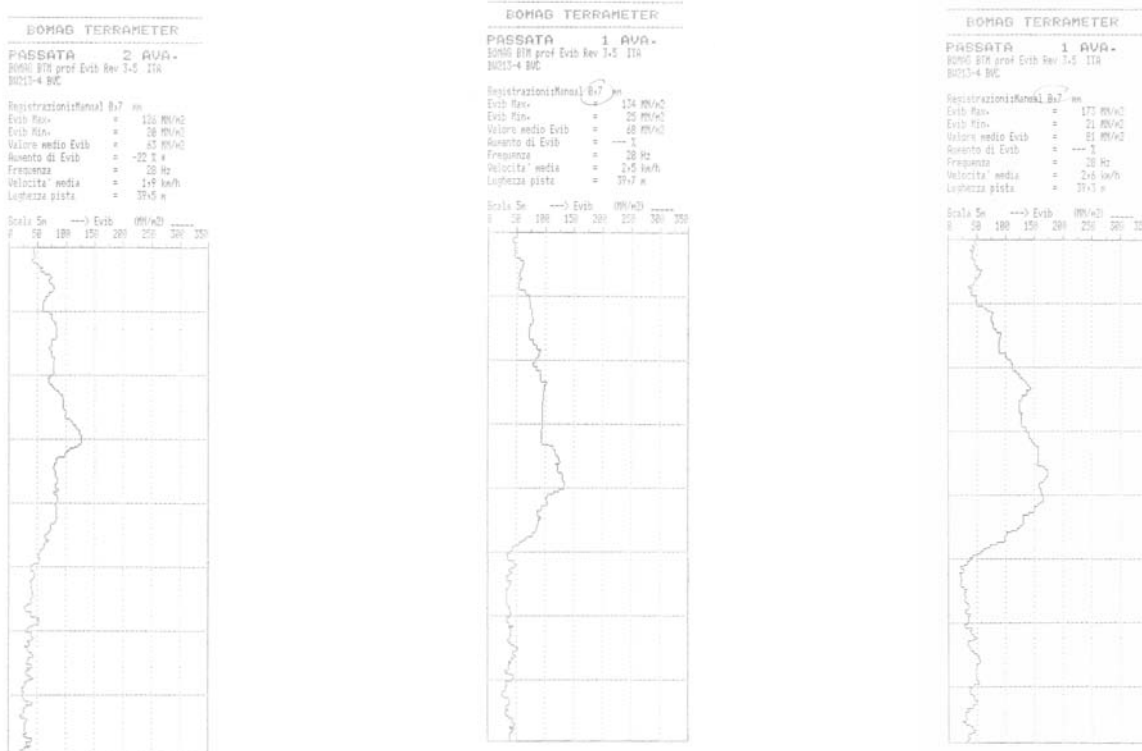


Fig.4.25 Esempi di scontrini stampati dal rullo Bomag al termine delle 2,4 e 8 passate

#### 4.6 CONFRONTO GRAFICI IN MODALITÀ AUTOMATICA

Si è proceduto studiando gli scontrini forniti dal macchinario Bomag Variocontrol al termine di ogni passata su entrambi i siti, misurando gli incrementi di Evib, sia in modalità automatica che in modalità manuale, lungo il percorso ogni 20 cm. Da ognuno di essi si sono estrapolati i relativi grafici che mettono in relazione in ascissa il valore della progressiva misurata in metri relativa alla lunghezza del sito considerato ed in ordinata il corrispondente valore di Evib misurato in MPa.

Per arrivare a tale risultato si sono prima scansionati ed importati in autocad gli scontrini originali stampati dal rullo Bomag.



Successivamente sono state fatte misurazioni del valore di Evib ogni 20 cm, quindi sono stati riportati i valori in excell dai quali si sono ottenuti i grafici a dispersione che mettono in relazione la lunghezza in metri del sito e i valori di Evib in MPa rilevati, che sono diventati il nostro oggetto di studio.

Nella giornata del 6 ottobre si sono confrontate le passate eseguite sul sito in materiale A2-5 e su quello C&D. Le passate sono state effettuate con macchinario Bomag Variomatic in automatico, preselezionando un valore di Evib massimo da raggiungere durante la compattazione pari a 150 MPa per il terreno A2-5 e 120 MPa per il terreno C&D, con una frequenza costante uguale a 28 Hz, mantenendo la velocità costante intorno ai 2-3 km/h.

#### 4.6.1 VERIFICHE SU TERRENO A2-5

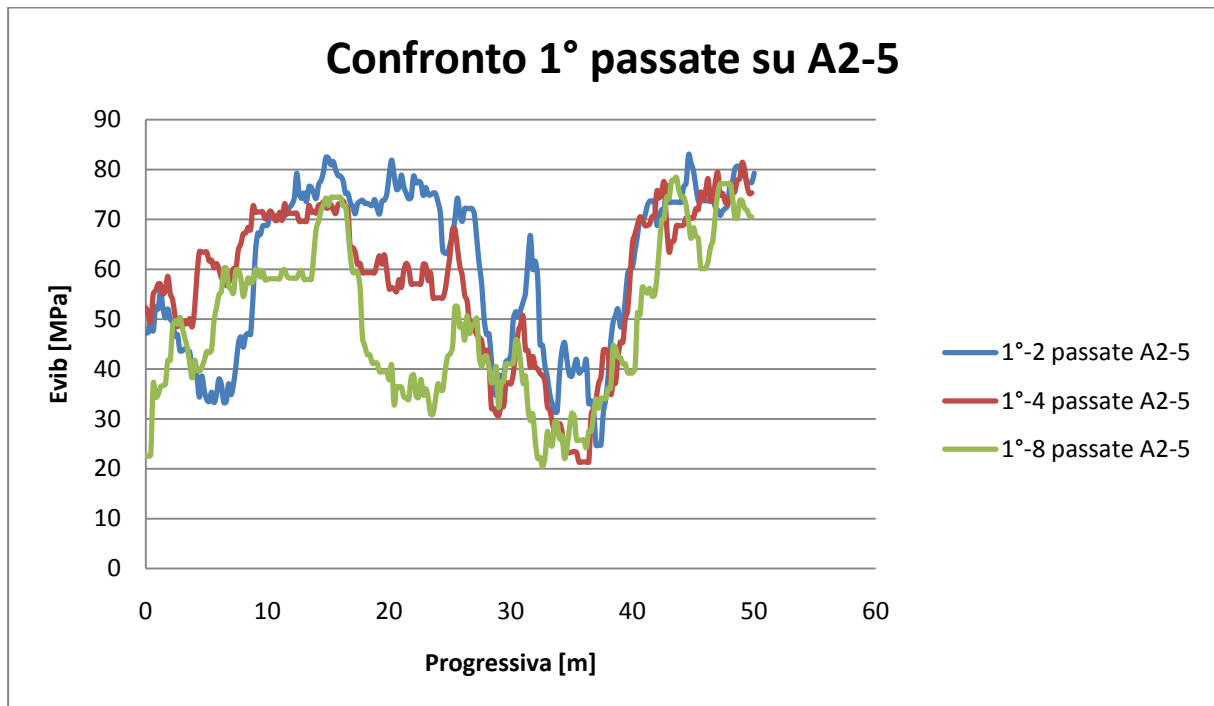


Fig.4.26 Valori Evib prime passate sulle tre fasce di terreno A2-5

<b>Passate</b>	<b>Evib max [MPa]</b>	<b>Evib min [MPa]</b>
1°- 2 passate	82	25
1°- 4 passate	83	21
1°- 8 passate	79	22

Tab.4.2 Evib max e min sulle prime passate

I dati relativi alle prime passate effettuate su ogni striscia del sito di materiale A2-5 (Fig. 4.26), evidenziano che i valori minimi e massimi di Evib ottenuti durante le 2, 4, 8 passate si equivalgono.

Studiando il grafico nel particolare, si individuano punti, tra i 15-23 metri e tra i 28-37 metri, nei quali il valore di Evib è basso. Questi valori potrebbero far pensare ad un alto tasso di umidità che impedisce il raggiungimento di valori più elevati del modulo vibratorio. In questi punti si è rilevata una considerevole presenza di acqua che ha probabilmente impedito il corretto svolgimento dell'operazione di compattazione.

In altri punti si nota come, invece, il valore di Evib mantenga valori pressochè costanti, e superiori ai 60 MPa.

La stessa situazione è facilmente riscontrabile anche nel confronto tra le terze passate effettuate dal compattatore sulle fasce a 4 e a 8 passate (Fig.4.27).

Da tutte queste considerazioni si deduce, che, il sito si comporta bene o male in maniera uniforme in senso trasversale, non longitudinalmente dove continua ad essere evidente la carenza di rigidità nella zona umida.

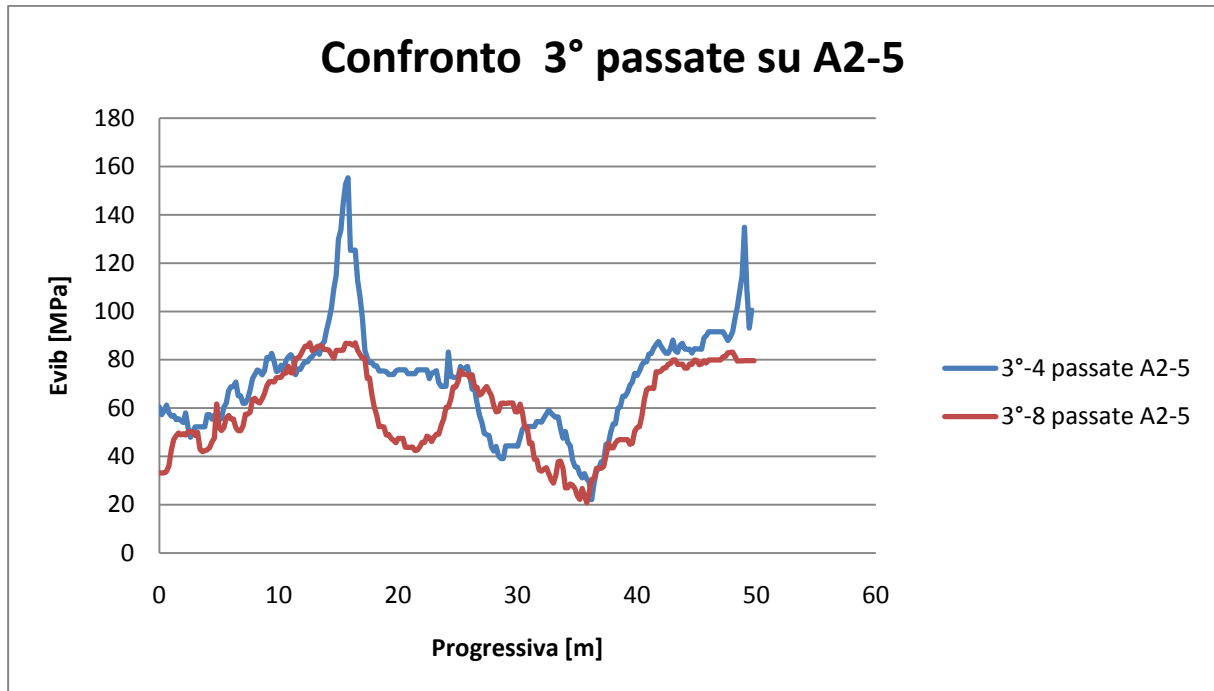


Fig. 4.27 Valori Evib terze passate sulle fasce a 4 e 8 passate su terreno A2-5

Passate	Evib max [MPa]	Evib min [MPa]
3°- 4 passate	156	23
3°- 8 passate	87	21

Tab.4.3 Evib max e min sulle tre passate

Il valore di Evib pari a 156 MPa riscontrato che supera il valore di Evib uguale a 150 MPa impostato inizialmente dall'operatore, probabilmente è dovuto alla presenza di terreno caratterizzato da rigidità elevata (materiale roccioso). Il rullo compattatore venendo a contatto con tale terreno sarà soggetto a sobbalzi che genereranno un aumento di ampiezza delle vibrazioni e un successivo comportamento a doppio salto del tamburo, producendo vibrazioni non periodiche ed omogenee sintomo di cattiva compattazione.

Per ovviare a tale problema, il compattatore automaticamente risponde cambiando la posizione delle masse vibratorie e, quindi, variando l'ampiezza della vibrazione da massima a minima, motivo per il quale dopo aver raggiunto un picco pari a 156 MPa il valore di Evib scende drasticamente a 78 MPa.



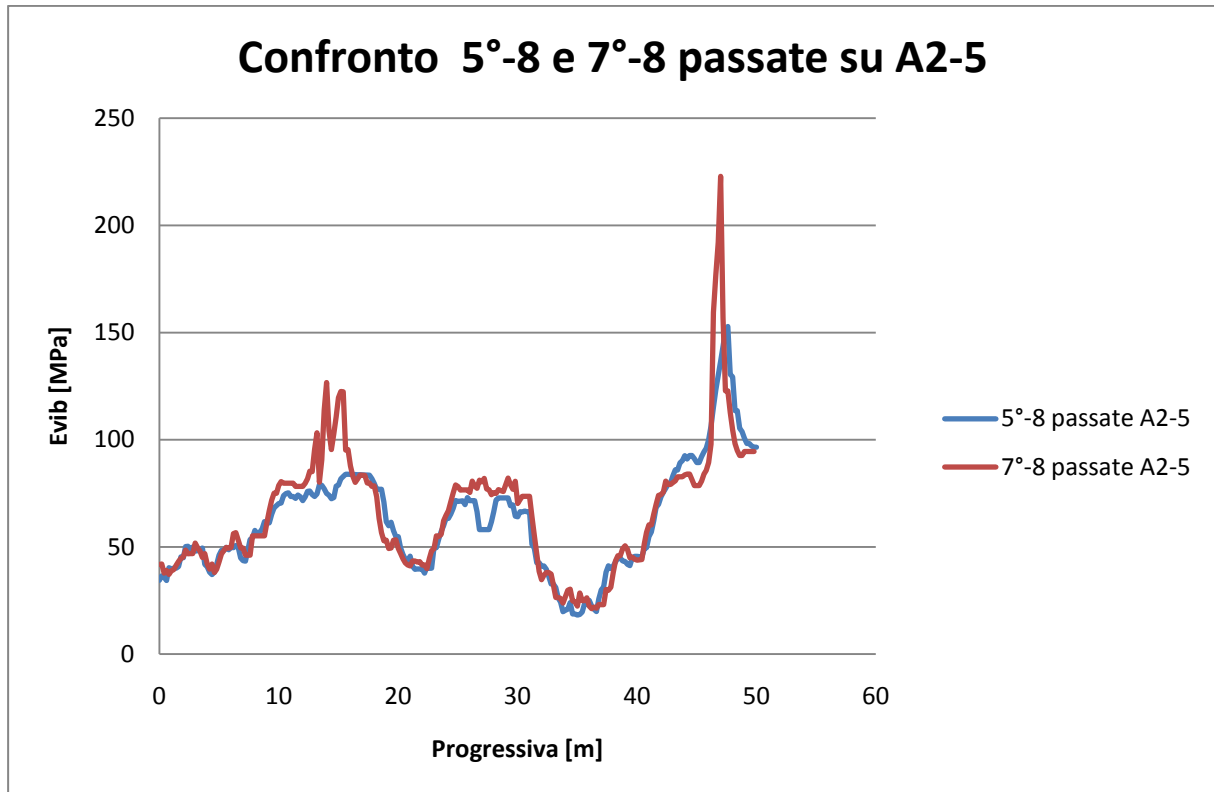


Fig.4.28 Valori Evib 5°-7° passata sulla fascia ad 8 passate su terreno A2-5

Passate	Evib max [MPa]	Evib min [MPa]
5°- 8 passate	153	18
7°- 8 passate	157	19

Tab.4.4 Evib max e min sulle passate 5°-7°/8

Confrontando i grafici di Fig.4.28 relativi alla 5°-7°-8 passate, anche in questo caso si notano valori di Evib molto bassi nelle zone nelle quali si è messo in evidenza la presenza di umidità, e allo stesso tempo si nota un incremento di Evib tra la 5° e la 7° passata sintomo della avvenuta compattazione.

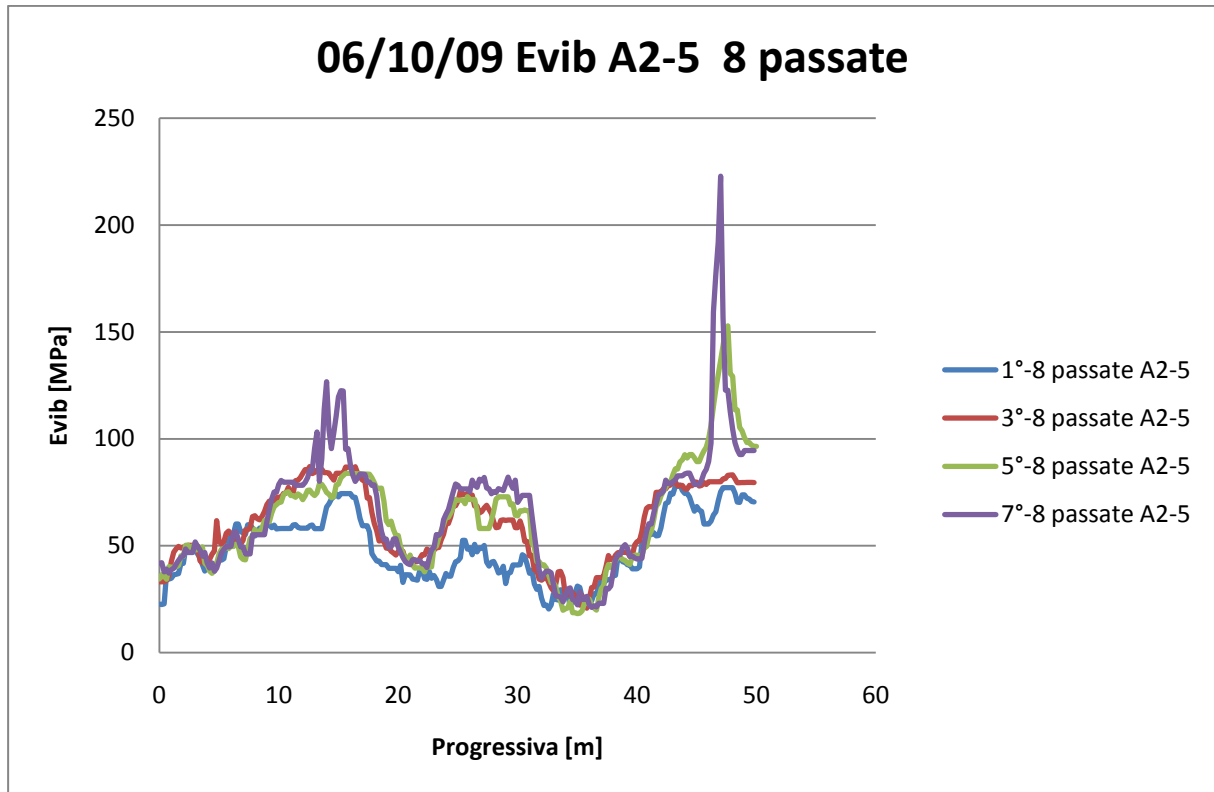


Fig.4.29 Valori di Evib a 2-4-8 passate su terreno A2-5

Passate	Evib max [MPa]	Evib min [MPa]
1°- 8 passate	79	22
3°- 8 passate	87	21
5°- 8 passate	153	18
7°- 8 passate	157	19

Tab.4.5 Evib max e min 8 passate

Se si studia il grafico di Fig.4.29 dove sono rappresentate le curve relative a tutte le passate effettuate sulla fascia ad 8 passate, si nota un incremento di Evib segno dell' incremento di compattazione, soprattutto nelle zone meno umide, rispetto a quelle caratterizzate da umidità nelle quali le linee si sovrappongono e i valori sono molto ravvicinati.

Anche in questo caso si evidenziano alcuni picchi del valore di Evib che corrispondono, sul sito, a materiale molto rigido presente nel sottofondo e a zone che presentano deformazioni del terreno.

In realtà ci si trova di fronte ad uno strato plastico sottile su un terreno sottostante umido.

Si sarebbe dovuto usare un rullo a punta che punzonasse lo strato di A2-5 espellendo l'acqua che invece è stata solo richiamata dalla vibrazione e spostata al passaggio del rullo.

Il risultato è che il materiale non si è ben addensato ed è rimasto tanto più plastico quanta più acqua localizzata c'era.

#### ***4.6.2 VERIFICHE SU MATERIALE C&D***

Si prendono in considerazione i grafici in Fig.4.30 relativi alle prime passate effettuate sulle varie fasce di terreno nel sito C&D.

Le curve presentano valori simili e le curve tendono a sovrapporsi nella parte iniziale del campo, ci sono invece variazioni nelle rigidità nelle zone dove è stato rilevato un terreno di sottofondo cedevole a ridotta portanza.

Tra i 15 e 25 m infatti si nota che la striscia a 8 passate è caratterizzata da valori di Evib molto elevati segno di terreno con rigidità superiori a quelle delle strisce a 2 e 4 passate.

Tra i 25-35 m si nota come invece i valori di Evib raggiunti dopo una prima passata siano inferiori. La spiegazione è da ricercarsi nel fatto che il substrato è caratterizzato da terreno cedevole, che risente notevolmente del forte tasso di umidità individuato su quel tratto.

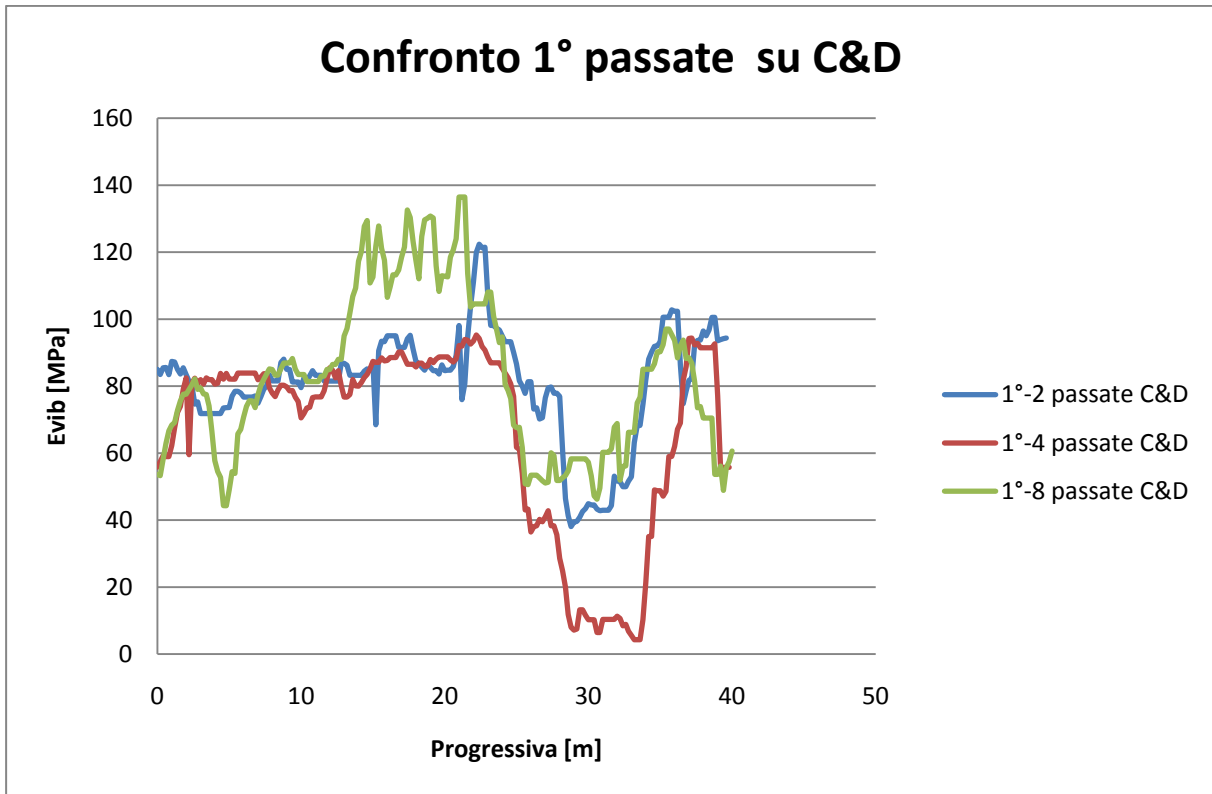


Fig.4.30 Valori Evib prime passate sulle tre fasce di materiale C&D

Passate	Evib max [MPa]	Evib min [MPa]
1°- 2 passate	123	38
1°- 4 passate	95	4
1°- 8 passate	139	44

Tab.4.6 Evib max e min sulle prime passate

Anche in Fig.4.31 si nota che le curve relative alle 3 passate condotte sulle strisce a 4 e 8 rullate, tendono a mostrare valori confrontabili di Evib.

Nel tratto compreso tra 15 e 25 m, si evidenzia come, dopo 3 passate, i problemi riscontrati nel grafico precedente ,dovuti alle elevate rigidzze di alcune aree del sito, siano stati superati. Il tratto, infatti, presenta una maggiore omogeneità e le curve relative alle 3°-4 e 3°-8 passate raggiungono valori simili. Questo fatto permette di evidenziare la sensibilità del compattatore Bomag Variomatic alle variazioni di rigidzza che ha generato.

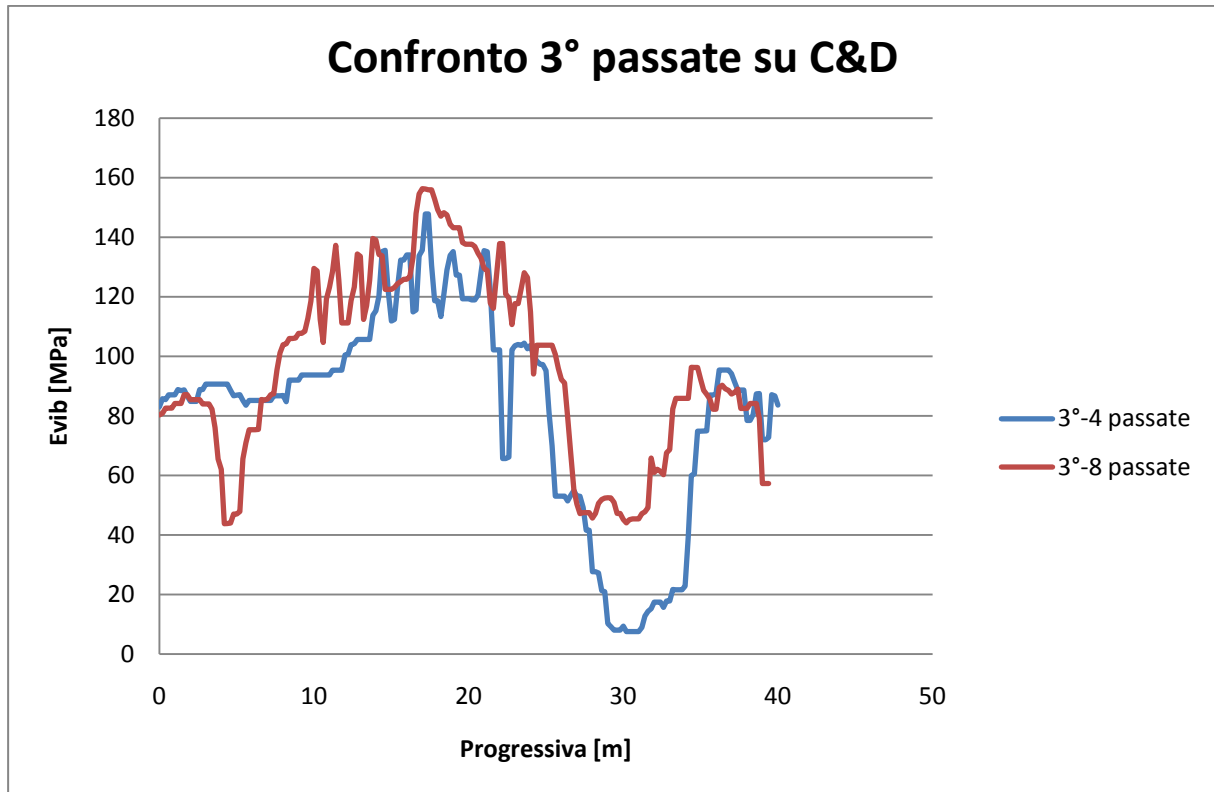


Fig. 4.31 Valori Evib terze passate sulle fasce a 4 e 8 passate su materiale C&D

Passate	Evib max [MPa]	Evib min [MPa]
3°- 4 passate	147	8
3°- 8 passate	156	43

Tab.4.7 Evib max e min sulle terze passate

In Fig.4.32 sono stati messi a confronto i grafici relativi alla 5°-7° passata sulla striscia di terreno a 8 passate.

È evidente un incremento di Evib e, quindi, del grado di compattazione raggiunto su tutto il sito, esclusa la zona già individuata tra i 28-35m.

La parte finale del campo non esibisce particolari incrementi di rigidezza, questo fatto fa supporre che non vi siano ulteriori risorse di portanza esplicabili con altre passate del rullo (che sarebbero inutili).

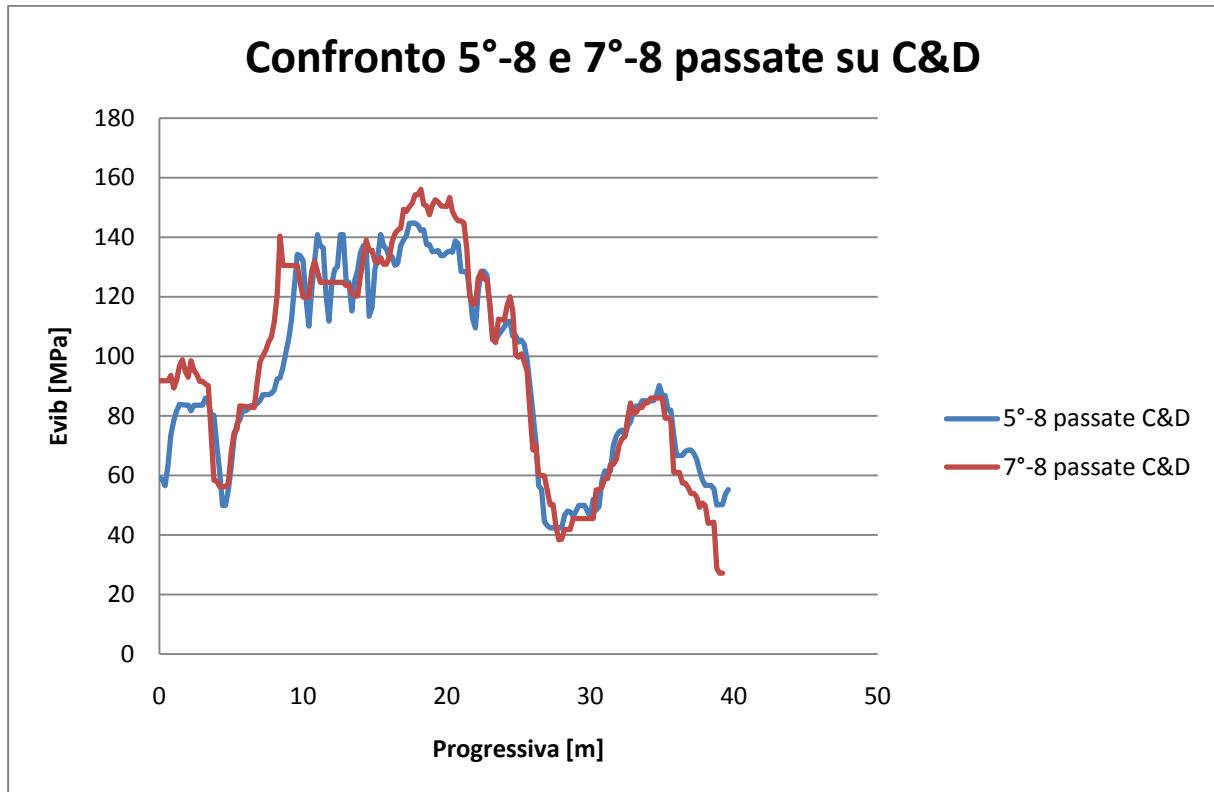


Fig.4.32 Valori Evib 5°-7° passata sulla fascia ad 8 passate su materiale C&D

Passate	Evib max [MPa]	Evib min [MPa]
5°- 8passate	145	42
7°- 8 passate	156	27

Tab.4.8 Evib max e min sulle passate 5°-7°/8

In Fig.4.33 sono rappresentate tutte le passate effettuate sul sito C&D nella striscia a 8 passate.

Anche in questo caso è facile individuare un incremento di Evib nella parte iniziale del tracciato, dove si sono raggiunti livelli più elevati di rigidità. I grafici mettono poi in evidenza un picco intorno ai 20 m, nel quale il valore di Evib raggiunge e supera il valore massimo pre-impostato dall'operatore.

A seguito di questo fatto, il macchinario automaticamente varia la posizione della massa eccentrica che genera le vibrazioni, impostandola verso la posizione orizzontale. In questo modo l'ampiezza della vibrazione verticale tenderà ad assumere valori più bassi, il

compattatore riprende il suo lavoro, spostando nuovamente la posizione della massa del sistema vibratorio e aumentando in questo modo l'ampiezza dell'onda vibratoria in direzione normale al terreno. Nel grafico si può infatti notare una brusca diminuzione di Evib intorno ai 28 m relativa allo spostamento in posizione orizzontale del sistema vibrante e un successivo aumento di Evib corrispondente allo spostamento automatico della massa vibrante dalla posizione orizzontale alla posizione necessaria per raggiungere il valore di Evib pre-impostato che per il terreno C&D è pari a 120 MPa.

I motivi del brusco abbassamento dei valori di Evib riscontrato tra i 25-30 m sono da individuarsi soprattutto nel fatto che quest'area presenta un tasso di umidità significativo del quale risente non tanto lo strato superficiale in materiale C&D quanto il terreno sottostante cedevole, perché posto in corrispondenza di un compluvio del piano di campagna originario.

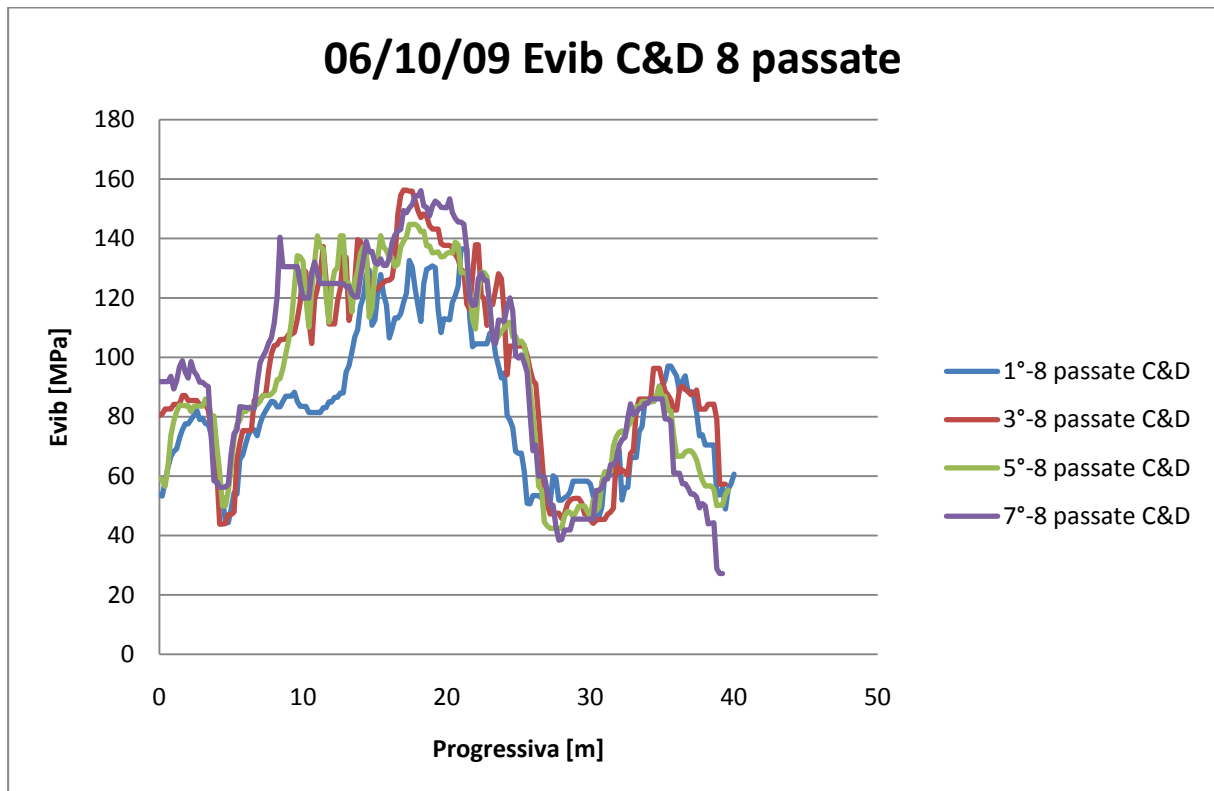


Fig.4.33 Valori di Evib a 2-4-8 passate su materiale C&D

Passate	Evib max [MPa]	Evib min [MPa]
1°- 8 passate	139	44
3°- 8 passate	156	43
5°- 8 passate	145	42
7°- 8 passate	156	27

Tab.4.9 Evib max e min sulle 8 passate

È importante sottolineare come, in questo caso, la compattazione spinta fino ad 8 passate non produca, di fatto, un significativo aumento dei valori massimi e minimi di Evib. Da ciò si deduce che il materiale può ritenersi compattato al meglio che può esibire, già, dopo 5 passate.

Anche nella compattazione del terreno A2-5, si nota, come già dopo 5 passate si siano ottenuti valori elevati di Evib, che si sono lievemente incrementati con l'8° passata. Anche in questo caso il terreno si può ritenere compattato già dopo 5 passate.

#### **4.7 INTRODUZIONE GEOSTATISTICA**

Si è provveduto ad affiancare ai risultati ottenuti con il rullo Bomag, la relativa indagine geostatistica che permette di ottenere la mappatura del sito, in modo molto semplice, evidenziando tutte le problematiche riscontrate e facendo un confronto molto più leggibile tra le varie passate.

La geostatistica studia le grandezze che si sviluppano su base spaziale a partire dai dati derivanti dal loro campionamento. In particolare, essa analizza la variabilità spaziale dei parametri che descrivono le suddette grandezze, definendo modelli volti alla loro quantificazione probabilistica. La geostatistica fu introdotta nella prima metà degli anni '60 da G. Matheron presso l'Ecole des Mines de Paris, per poi svilupparsi compiutamente negli anni '80 e '90 (Matheron, 1970).

In geostatistica si opera con la funzione variogramma, la cui stima viene effettuata sulla base dei dati provenienti dal campionamento del fenomeno oggetto di studio. Essa descrive l'andamento della variabile di interesse nel territorio misurando il grado di variazione dei dati campionari nello spazio. L' Experimental Variogram (EV) delinea la dipendenza spaziale nella forma di una funzione che mette in relazione la semivarianza ( $\gamma$ ) con la distanza



vettoriale ( $h$ ) tra coppie di dati sperimentali. La semivarianza è data dalla somma delle differenze quadrate tra i valori sperimentali separati da una determinata distanza, generalmente chiamata Lag ( $h$ ). Questo valore è diviso per il numero di coppie di punti sperimentali separati da una distanza inferiore o uguale al Lag( $h$ ). L' EV, essendo dipendente da una distanza vettoriale, è calcolabile secondo una precisa direzione, fornendo una tolleranza angolare e di distanza, o come media di più direzioni. Per quanto detto, la semivarianza  $\gamma(h)$  è data dall'espressione:

$$\gamma(h) = \frac{1}{(2m(h))} \sum_{i=1}^{m(h)} (Z(x_i + \vec{h}) - Z(x_i))^2$$

dove:

- $Z(x_i)$  = valore della variabile  $Z$  nel punto  $x_i$ ;
- $Z(x_i+h)$  = valore della variabile  $Z$  in un punto distante  $h$  rispetto a  $x_i$  del piano;
- $m(h)$  = numero di coppie di punti sperimentali separati da una distanza inferiore o uguale ad  $h$ .

Il Theoretical Variogram (TV) rappresenta la funzione (esponenziale, gaussiana, lineare, quadratica, etc.) che meglio descrive il trend della semi-varianza ( $\gamma$ ) sulla base della distribuzione dei punti nel EV. Il TV viene stimato coi dati di campionatura attraverso il calcolo, nelle diverse direzioni dello spazio. Il TV è definito da 4 parametri fondamentali, i cui valori sono necessari per una corretta applicazione delle procedure di interpolazione:

- sill, o altezza del variogramma, individua il valore di  $\gamma(h)$  in corrispondenza del quale la semi-varianza non mostra più apprezzabili variazioni;
- range è la distanza in corrispondenza della quale il variogramma raggiunge il sill. Il range fornisce un' indicazione sulla distanza di massima correlazione dei dati oltre la quale possono considerarsi statisticamente indipendenti;

- nugget effect è una componente strutturale a piccola scala del variogramma legata a potenziali errori nel campionamento e/o di misura della variabile;
- scale è pari a sill - nugget effect.

Una volta creato il TV un metodo per valutarne la validità è la Cross-Validation. La C-V è una procedura per cui iterativamente ogni campione viene escluso dal dataset ed interpolato attraverso il valore dei restanti, utilizzando il modello di variogramma prescelto. Il confronto tra il valore stimato ed il valore reale è detto residuo della C-V.

Al fine di poter restituire i valori stimati per l'area in esame, una volta validato il TV, è necessario interpolare i dati disponibili per stimare i valori dove non si hanno campioni e restituirli graficamente sulla cosiddetta mappatura. A tal fine si utilizza il metodo del kriging, che fornisce una soluzione al problema della stima basandosi su un modello continuo della variazione spaziale stocastica. Nel kriging, tramite un sistema di equazioni lineari, si pesano i campioni attorno al punto analizzato per minimizzare la varianza totale degli errori. I fattori che più influenzano i pesi sono la posizione del punto di stima rispetto ai restanti ed il TV adottato.

Questa metodologia è servita a realizzare le mappature relative al campo A2-5 con i dati ottenuti in modalità manuale il giorno 6 ottobre, e al campo in materiale C&D con i dati relativi al giorno 7 ottobre ottenuti in modalità manuale.

#### ***4.7.1 CONFRONTO DEI DATI OTTENUTI CON MODALITÀ MANUALE E MAPPATURE GEOSTATISTICHE***

Con l'utilizzo del rullo Bomag si riesce a compattare il terreno sia in modalità automatica, sia in modalità manuale (proof-rolling).

Se si lavora in modalità automatica, si imposta il valore di Evib che ci si prefigge di raggiungere.

Se si compatta in modalità manuale si impostano, invece, i valori dell'ampiezza vibratoria che nel nostro caso sono stati di 0,7 mm per il campo C&D e di 1,1 mm per il campo A2-5.

In entrambi i siti si è provveduto a compattare il terreno con 2,4 e 8 passate in modalità automatica e successivamente si è effettuata un'ulteriore passata in modalità manuale, proof-rolling, per verificare le reali condizioni del terreno.

A questo proposito si confrontano i dati ottenuti con il proof-rolling a 2-4-8 passate su materiale A2-5 del 6 ottobre (Fig.4.34) e quelli ottenuti con proof-rolling su materiale C&D del 7 ottobre con la mappatura ottenuta tramite studio geostatistico.

Nella mappatura è presente una scala di valori di Evib ognuno caratterizzato da un colore diverso.

Le mappature confrontano i valori di Evib ottenuti durante le 2-4-8 passate su strisce di terreno di larghezza pari a 2 m.

La mappatura rappresenta i due siti di lunghezza rispettivamente di 50 m per l'A2-5 e 40 m per il C&D.

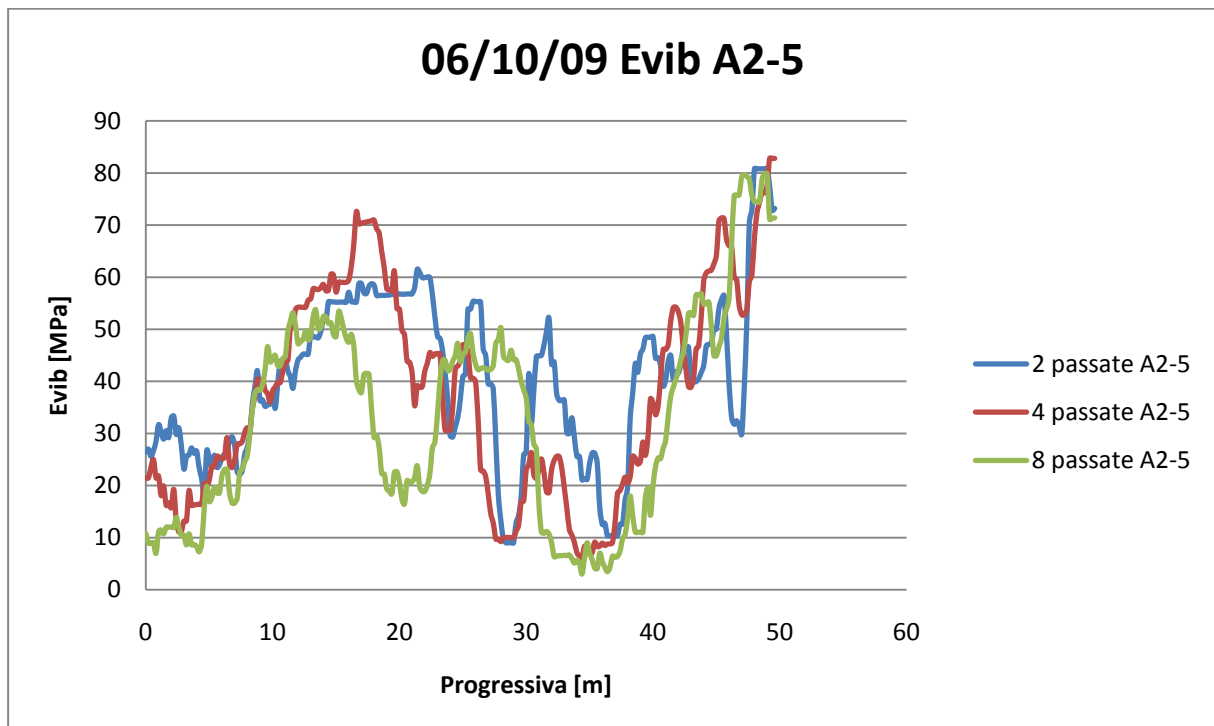


Fig.4.34 Valore Evib su terreno A2-5

Il grafico in Fig.4.34 che mette in relazione le curve ottenute tramite proof-rolling su terreno A2-5 evidenzia le zone che presentano un alto tasso di umidità presenti soprattutto tra

28-37 m nelle quali il valore di Evib raggiunge valori che con l'aumentare delle passate tendono a diminuire.

Le ragioni sono da ricercarsi nei motivi sopra citati relativi allo spessore di A2-5 rispetto all'ampiezza della vibrazione impostata oltre che a problemi di umidità e di deformazioni del terreno.

Tutte queste situazioni sono riscontrabili anche nella relativa mappatura ottenuta tramite indagine geostatistica.

Studiando la mappatura relativa al terreno A2-5 (Fig.4.35), si nota un incremento di Evib nella parte finale del sito contraddistinto dal colore rosso e sono soprattutto evidenziate le zone comprese tra 28-37 m caratterizzate da un alto tasso di umidità e da valori bassi di Evib evidenziati dal colore azzurro-verde.

Grazie alla rappresentazione geostatistica si evidenzia come l'area a bassa rigidità sia localizzata sulla parte sinistra del campo, mentre sulla destra i valori di Evib sono maggiori pur essendo state condotte meno passate.

Con la geostatistica ci si rende meglio conto del fatto che le carenze dello strato e l'influenza dell'umidità risalita capillarmente dal sottofondo abbiano interessato il lato sinistro e che probabilmente gli ulteriori passaggi fino a 8+1, hanno peggiorato le condizioni del terreno già carente proprio da quel lato.

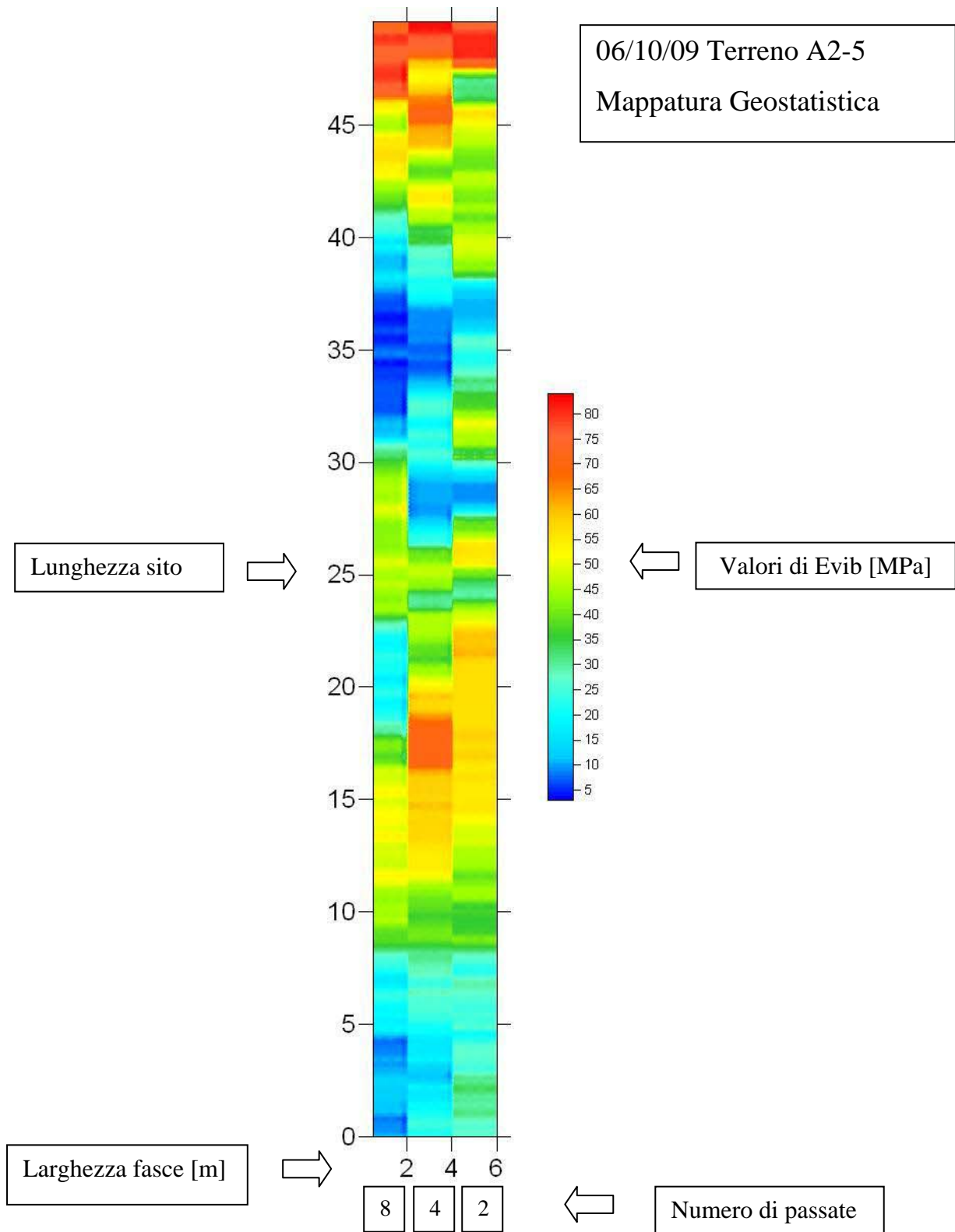


Fig.4.35 Mappatura sito terreno A2-5

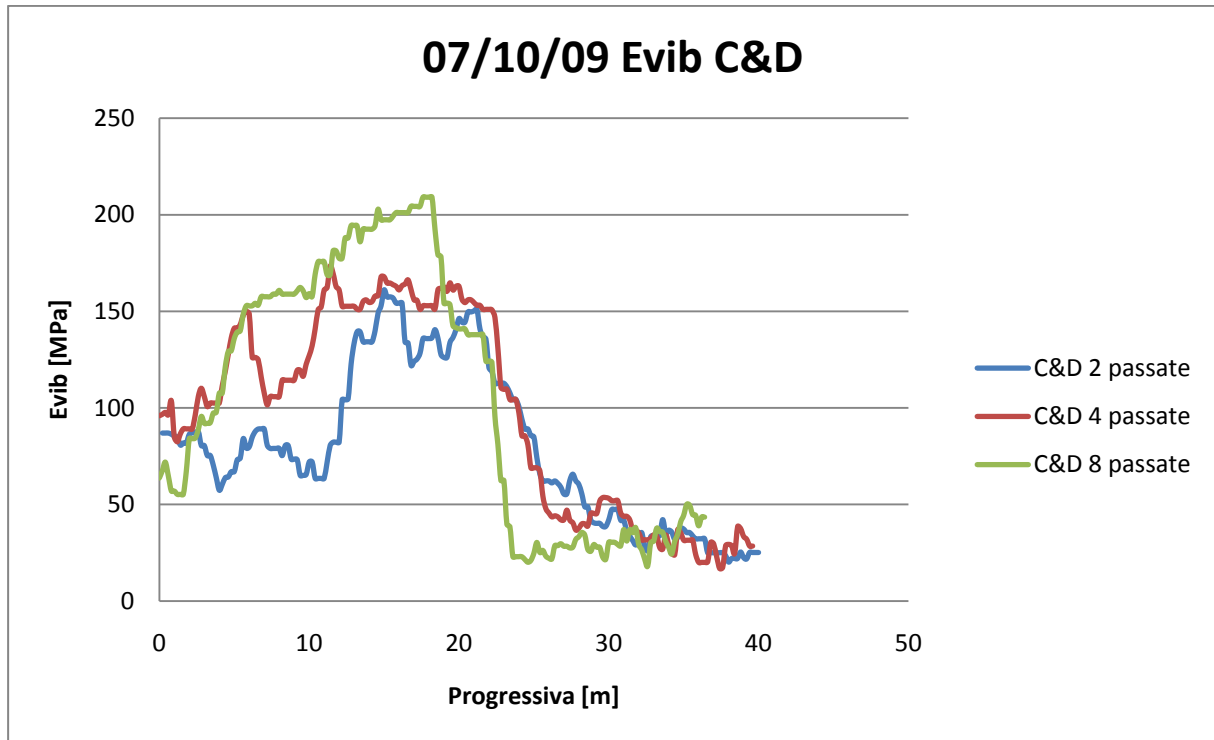


Fig.4.36 Valore Evib su materiale C&amp;D

Il grafico in Fig.4.36 mette in relazione i valori ottenuti con proof-rolling del 7 ottobre sul campo con C&D ed evidenzia un certo incremento di Evib dopo 8 passate e fino circa 23 m. Nella parte finale si assiste ad una brusca diminuzione dei valori che fanno pensare a strati di terreno cedevole nel substrato.

Nella corrispondente mappatura ottenuta tramite metodo geostatistico (Fig.4.37), nella parte finale (25-40 m), il campo esibisce rigidità minima se comparata a quella effettivamente raggiungibile dal solido stradale in altri punti (10-20 m).

Proprio in questa zona (25-40 m), il rilevato insiste su un'area di compluvio del piano di campagna ove il sottofondo, interessato dall'azione del rullo, non fornisce una portanza tale da consentire elevati valori di Evib (che sono relativi al substrato) e anche il corretto addensamento del C&D.

Tra i 10-20 m, si nota come l'Evib relativo al substrato sia elevato, per cui ci si rende subito conto che il rullo ha agito sullo strato di C&D addensandolo su un piano rigido di sottofondo.

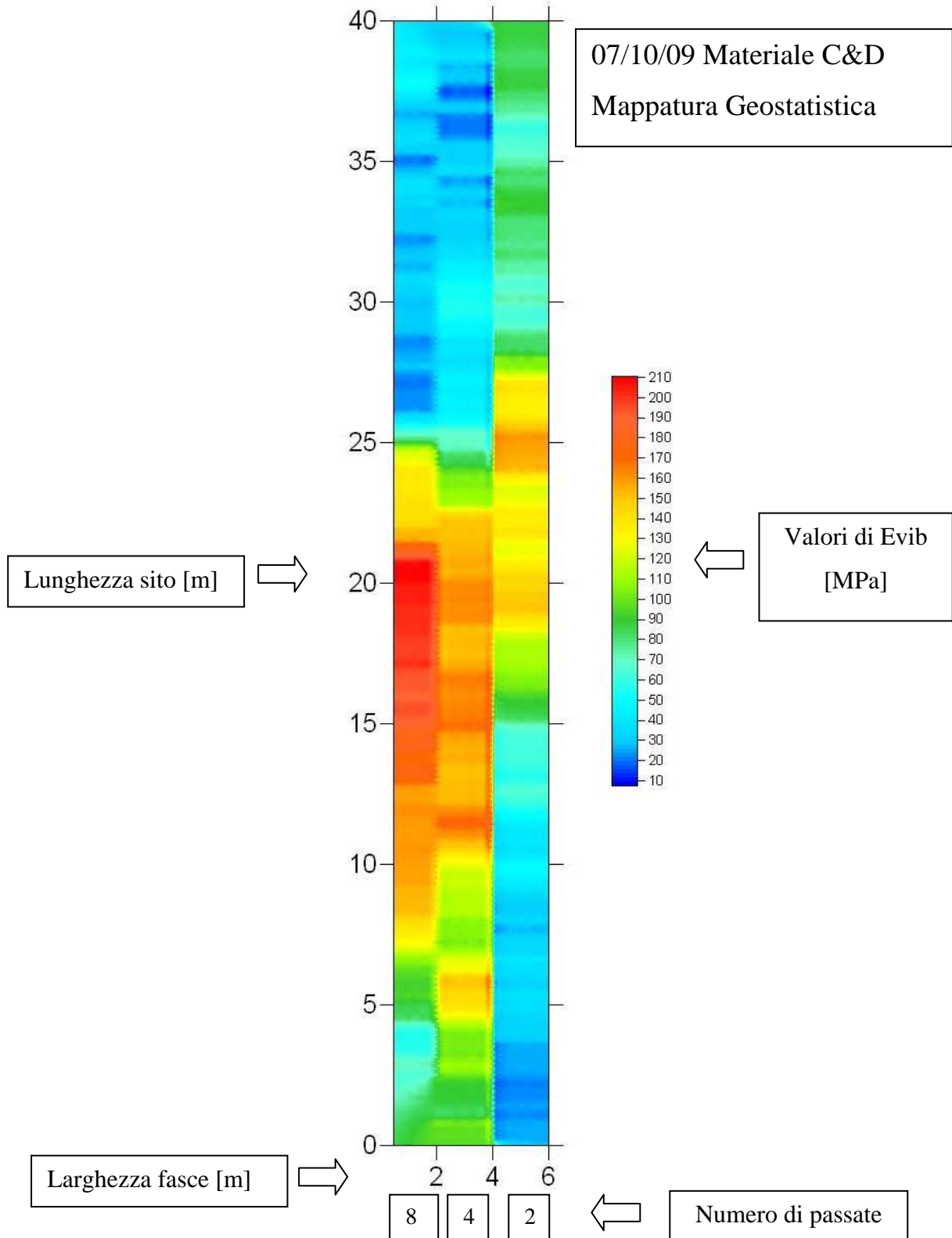


Fig.4.37 Mappatura sito materiale C&D

**4.8 CONFRONTO TRA I MATERIALI A2-5 E C&D TRAMITE I VALORI MEDI DI  $E_{VIB}$**

Viene di seguito affrontato un breve confronto tra i due diversi materiali utilizzati nel sito sperimentale di Altopascio nella giornata del 6 ottobre, sono stati, infatti, confrontati i valori di  $E_{vib}$  medi ottenuti misurando il valore del modulo vibratorio ogni 5 m, ottenuto con il rullo Bomag Variocontrol, su tutte e tre le fasce (a 2, 4, 8 rullate).

Il modulo di  $E_{vib}$  al quale si fa riferimento è stato ottenuto tramite proof-rolling e quindi impostando il compattatore in modalità manuale.

Progressiva [m]	2 pass	4 pass	8 pass
	$E_{vib}$ [MPa]	$E_{vib}$ [MPa]	$E_{vib}$ [MPa]
0	26,46	21,48	10,78
5	25,17	21,11	16,98
10	37,78	38,21	44,38
15	55,20	57,16	48,59
20	56,79	53,90	20,69
25	40,98	47,02	45,20
30	26,44	23,06	36,73
35	24,26	6,80	6,99
40	48,59	35,97	20,01
45	50,08	64,20	44,91

Tab.4.10  $E_{vib}$  medi registrati a 2-4 e 8 passate su campo A2-5



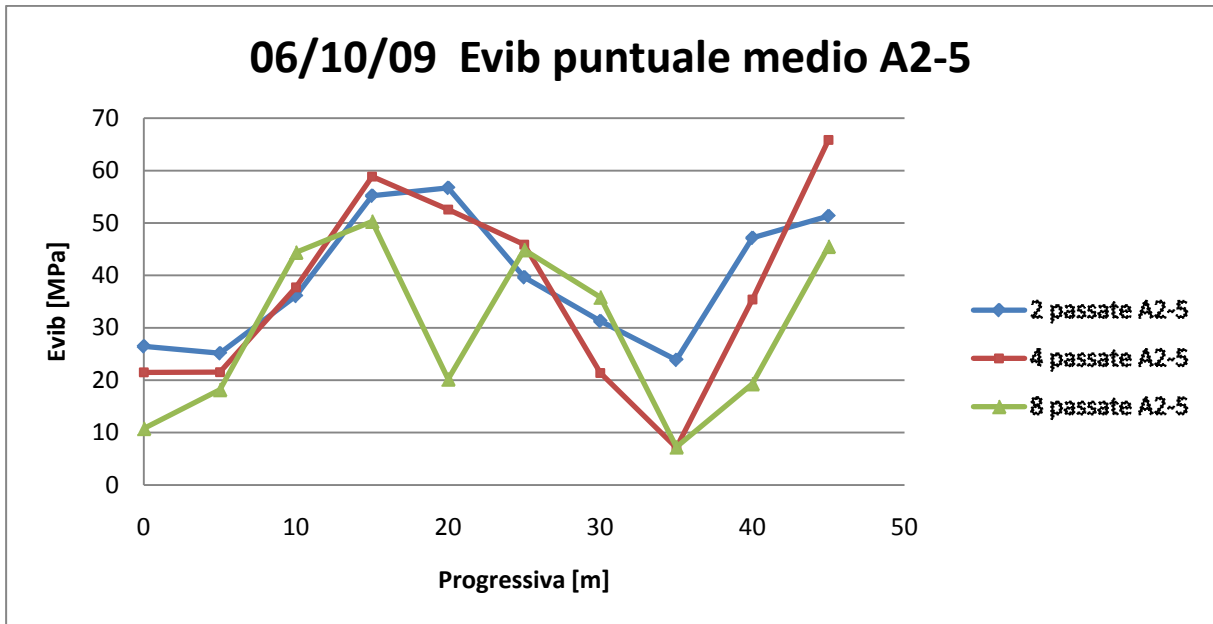


Fig. 4.38 Valore di Evib medio su terreno A2-5

Progressiva [m]	2 pass	4 pass	8 pass
	Evib [MPa]	Evib [MPa]	Evib [MPa]
0	43,22	51,63	47,05
5	61,41	72,15	48,88
10	75,78	78,78	112,24
15	125,81	94,85	137,23
20	56,96	123,72	165,56
25	38,29	34,32	38,38
30	32,69	32,71	33,79
35	25,10	31,44	38,27

Tab.4.11 Evib medi registrati a 2-4 e 8 passate su campo C&D

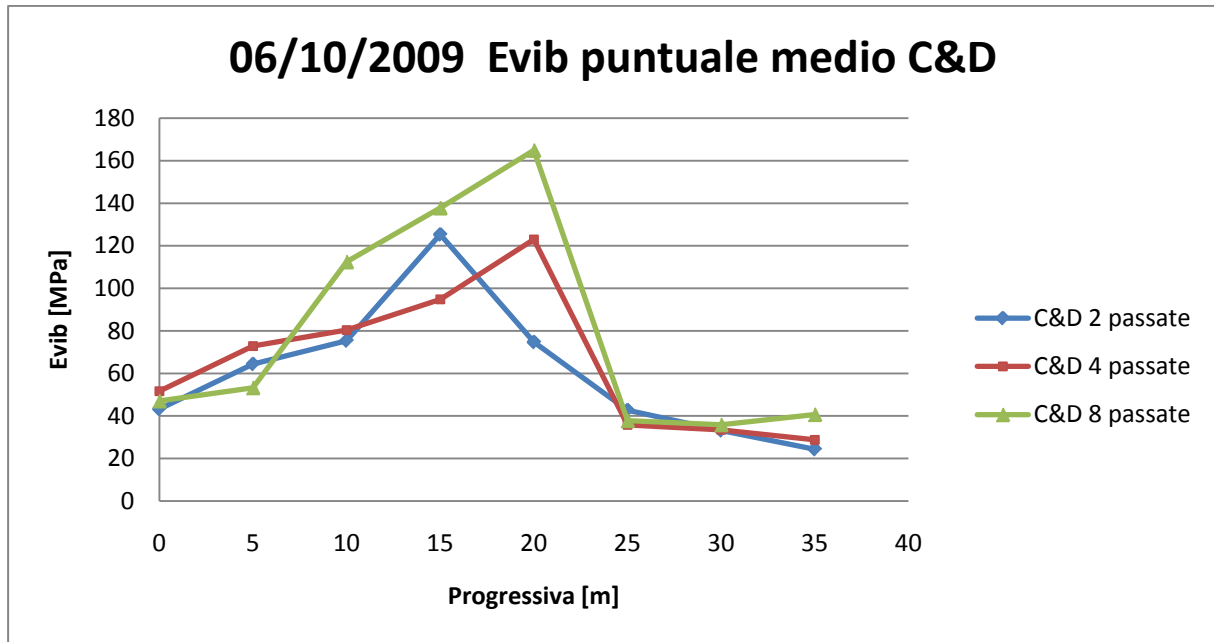


Fig.4.39 Valore di Evib medio su materiale C&D

Confrontando i dati relativi al valore medio di Evib ottenuti il 6 ottobre tramite proof-rolling del sito con materiale A2-5 (Fig.4.38) e quello con materiale C&D (Fig.4.39), si nota come dopo la compattazione con sistema Bomag Variocontrol, i valori di Evib relativi al sito con materiale C&D siano mediamente più elevati di quelli ottenuti sul campo A2-5.

Questa situazione è sicuramente dovuta al fatto che il materiale C&D essendo materiale di riciclo derivante da demolizioni è formato da aggregati riciclati che sono principalmente costituiti da grani litici o frammenti laterizi ovvero materiali disomogenei. Essi presentano, infatti, nuclei compatti e parti friabili, facilmente separabili per azione d'urto e sfregamento. L'esperienza mostra che le miscele ben assortite manifestano un'evidente tendenza alla stabilizzazione della granulometria.

Per questo motivo il materiale C&D presenta valori di rigidità molto più elevati rispetto un materiale sabbioso-argilloso come l'A2-5.

È, inoltre, importante mettere in evidenza come i due materiali abbiano reagito in maniera differente alle varie passate del rullo.

Il materiale A2-5, infatti, già dopo 5 passate aveva raggiunto i valori di Evib più alti, rendendo del tutto inutili le passate successive, che, al contrario, hanno prodotto solo peggioramenti.

Per quanto riguarda il comportamento tenuto dal materiale C&D, si nota come, l'incremento del numero delle passate, abbia contribuito all'aumento dei valori di Evib.

Già dopo 5 passate si è riscontrata una maggiore rigidità del materiale, aumentata poi con le successive passate.

È importante sottolineare, la forte sensibilità dimostrata dallo strumento alle variazioni di rigidità. Infatti, in entrambi i campi, si nota, che, le zone "carenti" per problemi di plasticità o compluvio, sono state evidenziate con il calo repentino di Evib.

Un altro fatto da analizzare riguarda gli spessori di terreno interessati dal passaggio del rullo e dal calcolo di Evib.

Ad Altopascio, gli esigui spessori degli strati posati (25 cm) e le condizioni dei sottofondi del rilevato, hanno senza dubbio giocato un ruolo importante nei risultati.

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

Nelle 8 passate dell' A2-5 il terreno un po' plastico dello strato, richiama acqua e le deflessioni sotto al rullo sono anche maggiori delle 2 passate per cui si ottengono valori di Evib più bassi.

#### ***4.9 STUDIO DEL COMPORTAMENTO DEL CAMPO C&D SOPRA A2-5***

In data 07/10/09 si è provveduto a stendere uno strato di materiale C&D sopra il materiale A2-5 negli ultimi 20 metri del sito.

Si sono quindi confrontati i grafici ottenuti tramite proof-rolling delle 2, 4, 8 passate e ne sono stati messi in evidenza i valori di Evib medi calcolati ogni 5 m.

Progressiva [m]	2 pass	4 pass	8 pass
	Evib [MPa]	Evib [MPa]	Evib [MPa]
30	40,95	38,03	37,22
35	58,79	41,15	30,00
40	51,11	47,81	43,64
45	78,69	111,66	73,38

Tab.4.12 Evib medi registrati a 2-4 e 8 passate su campo C&D sopra A2-5

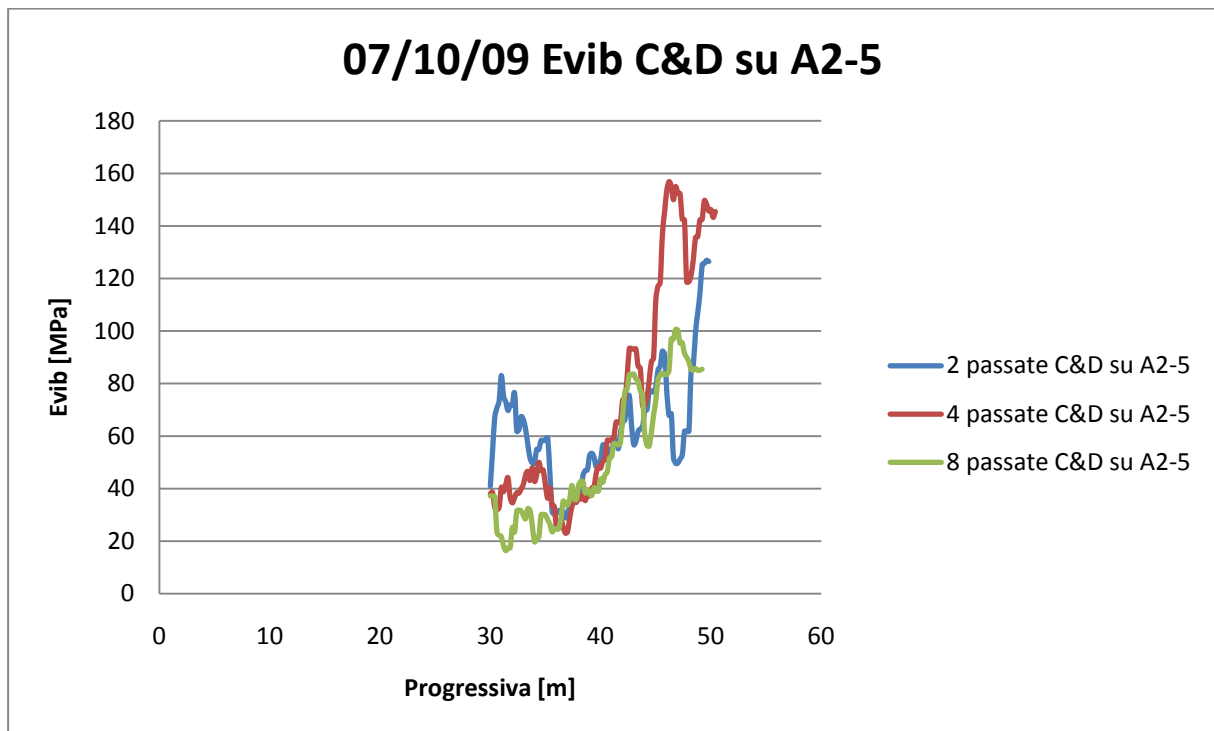


Fig.4.40 Valore Evib di materiale C&D su terreno A2-5

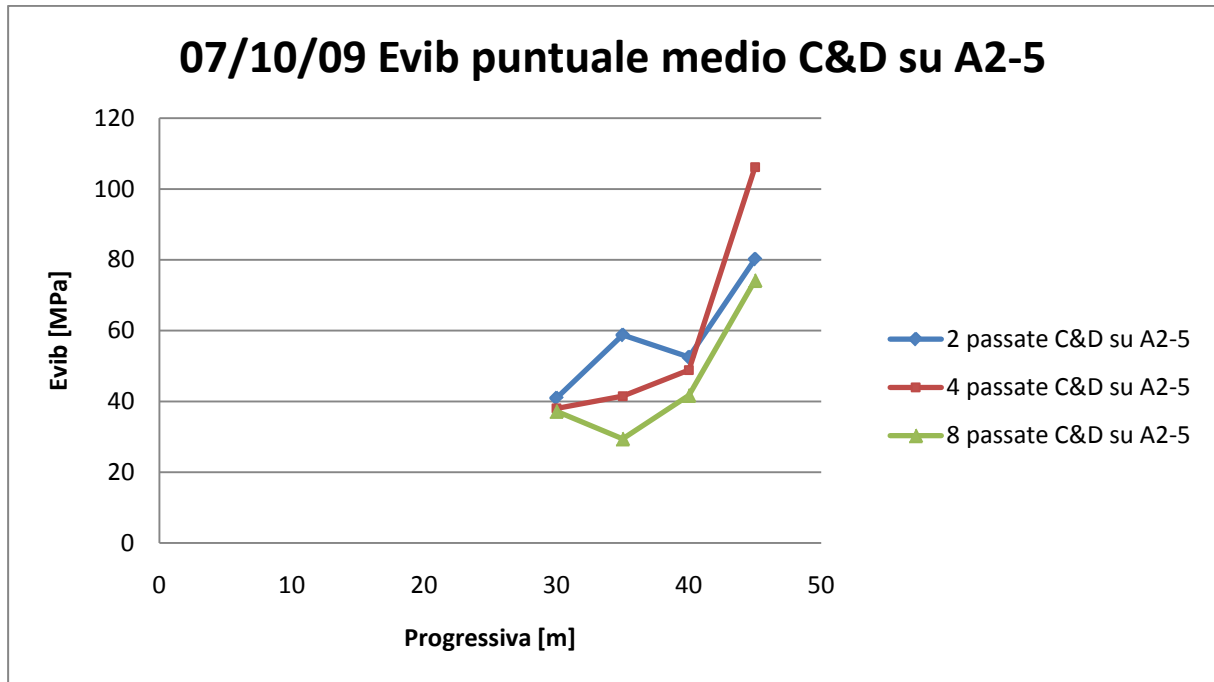


Fig.4.41 Valore di Evib medio di materiale C&D su terreno A2-5

Dai grafici in Fig.4.40-4.41 si nota come andando a compattare del materiale C&D su terreno A2-5, si abbiano degli incrementi modesti di Evib su tutta l'area. In particolare negli ultimi 5 m del sito si assiste a un forte aumento della rigidità del terreno dopo 2 e 4 passate e ad una brusca diminuzione dei valori dopo 8 passate.

È da notare che ci si trova nella parte finale del sito, dove si ha rigidità maggiore.

Probabilmente, quest' ultimo tratto è caratterizzato da materiale più rigido anche nel sottofondo, visto che i valori di Evib rimangono comunque più elevati rispetto gli altri 15 m.

Inizialmente, sicuramente, il forte grado di rigidità del materiale C&D viene trasferito a tutti gli strati del sottofondo, ancora di più dopo 4 passate. Probabilmente, continuando a compattare il terreno, viene richiamata acqua in superficie, che risulterà essere causa di valori più bassi di Evib nella fascia ad 8 passate dove oltretutto si erano già in precedenza manifestate discontinuità, proprio in quel tratto.

#### ***4.10 CONFRONTO MODALITA' AUTOMATICA – MODALITA' MANUALE (PROOF-ROLLING) SU TERRENO A2-5 E MATERIALE C&D***

È inoltre possibile confrontare i grafici nei quali sono rappresentate le curve che descrivono il comportamento dei piani compattati di entrambi i campi dopo 2, 4, 8, passate effettuate con rullo Bomag sia in modalità automatica, sia in modalità manuale (proof-rolling).

##### ***4.10.1 CAMPO IN TERRENO A2-5***

Analizzando i grafici relativi al terreno A2-5 ( Fig.4.42-4.43-4.44 ) si nota come le curve che rappresentano l'andamento di Evib lungo tutto il sito durante le 2, 4, 8 passate effettuate con il rullo in modalità manuale (proof-rolling), siano traslate verso il basso rispetto quelle ottenute in modalità automatica.

Le ragioni sono da ricercarsi nel fatto che quando si lavora in modalità manuale viene pre-impostato il valore relativo all'ampiezza vibratoria e, quindi del carico applicato dal rullo che per il sito in materiale A2-5 è di 1,1 mm.

Lavorando con queste ampiezze, l'intensità della compattazione raggiungerà circa i 60-100 cm di profondità.

Quando si lavora in modalità automatica viene invece impostato il valore relativo alla forza di compattazione massima che si vuole raggiungere che per il sito in materiale A2-5 è pari a 150 MPa.

In questo modo il compattatore ha lavorato utilizzando ampiezze più elevate di quelle raggiunte in modalità manuale, dell'ordine di 1,5 mm che hanno coinvolto una profondità pari a 1,5 – 2 m, superiore a quella precedente.

Questo sta a significare, che lavorando con ampiezze più elevate, si riescono a raggiungere valori di Evib più elevati, perché nella compattazione vengono coinvolti strati di terreno maggiore.

Da tutto ciò è possibile capire il motivo per il quale i valori di Evib raggiunti in modalità manuale risultano essere minori di quelli ottenuti in modalità automatica.

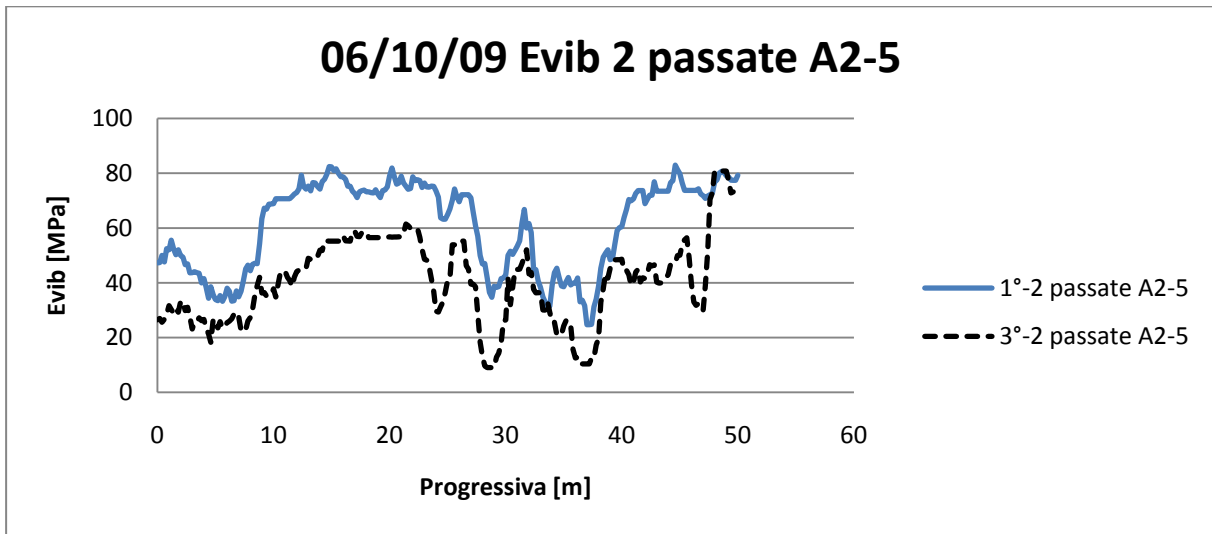


Fig.4.42 Confronto modalità automatica-proof-rolling su terreno A2-5 dopo 2 passate

Anche se le curve ottenute in modalità manuale presentano valori più bassi rispetto quelli raggiunti in modalità automatica, gli andamenti dei grafici vengono rispettati e rispecchiano il fatto che anche coinvolgendo spessori di rilevato e sottofondo minori si presenta comunque la medesima disomogeneità della quale risentono sia lo strato in A2-5 sia il materiale immediatamente sottostante che risulta l'anello debole del solido stradale, visto che se si coinvolgono strati più profondi i cedimenti calano e gli Evib aumentano portandosi dietro, però, i cedimenti cui sono soggetti gli strati più superficiali.

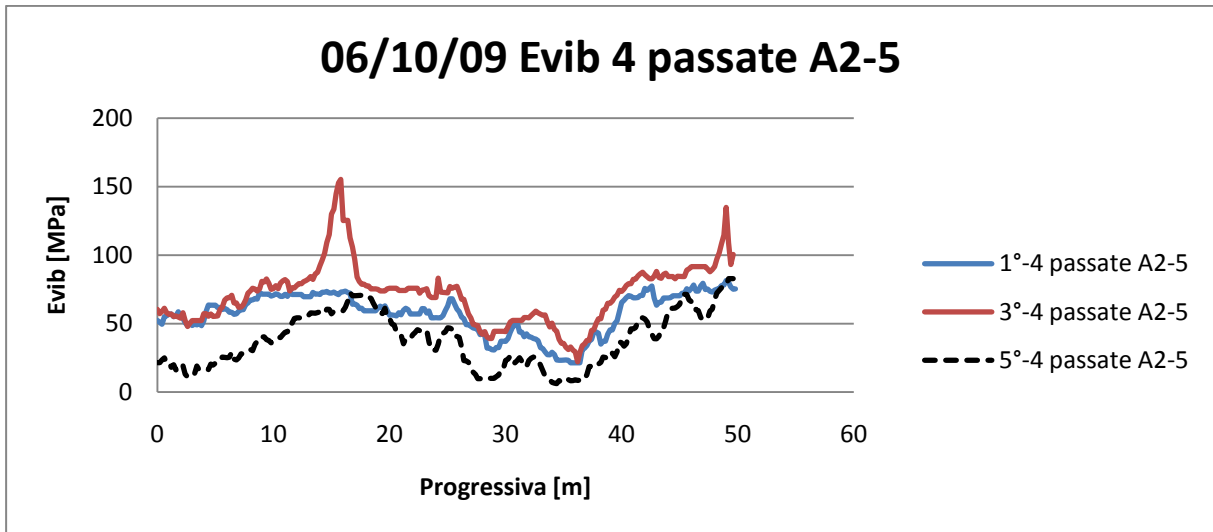


Fig.4.43 Confronto modalità automatica-proof-rolling su terreno A2-5 dopo 4 passate

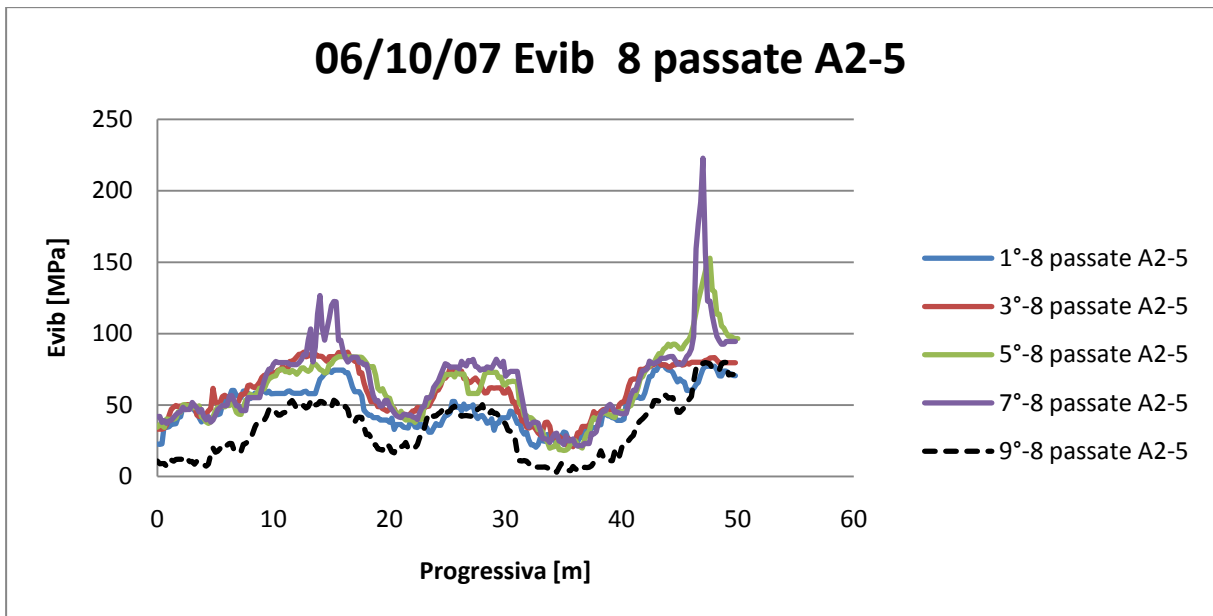


Fig.4.44 Confronto modalità automatica-proof-rolling su terreno A2-5 dopo 8 passate



#### 4.10.2 CAMPO IN MATERIALE C&D

Se si analizzano i grafici relativi alle curve che individuano i valori di Evib ottenuti durante le 2, 4, 8 passate sul sito in materiale C&D ( Fig. 4.45-4.46-4.47), si nota come non ci siano variazioni significative tra i valori ottenuti in modalità manuale e quella automatica.

Anche in questo caso il compattatore ha lavorato con ampiezze diverse a seconda del valore pre- impostato mantenendo una frequenza costante uguale a 28 Hz.

In modalità automatica la compattazione era finalizzata al raggiungimento di valore di Evib pari a 120 MPa, nel caso manuale l'ampiezza è stata impostata a 0,7 mm.

Tra i 25-40 m si individua però un'area nella quale le curve ottenute con proof-rolling sono traslate verso il basso rispetto quelle rilevate in modalità automatica. Il motivo è da ricercarsi nelle cattive condizioni del tracciato e soprattutto nella presenza di umidità della quale risente non tanto la superficie in materiale C&D molto rigido quanto il terreno più cedevole individuato negli strati sottostanti.

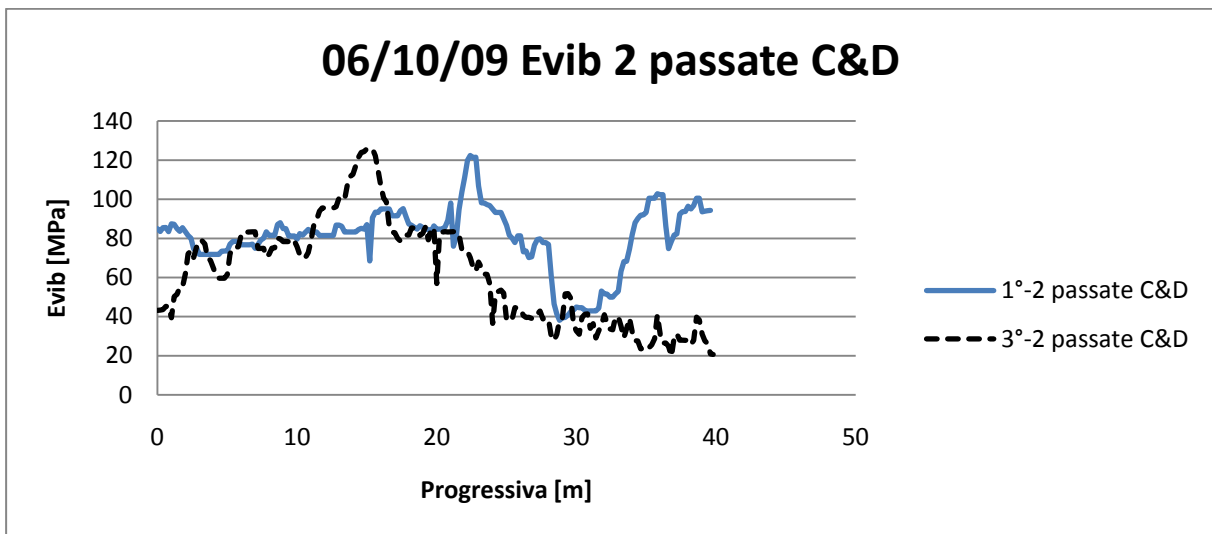


Fig.4.45 Confronto modalità automatica-proof-rolling su materiale C&D dopo 2 passate

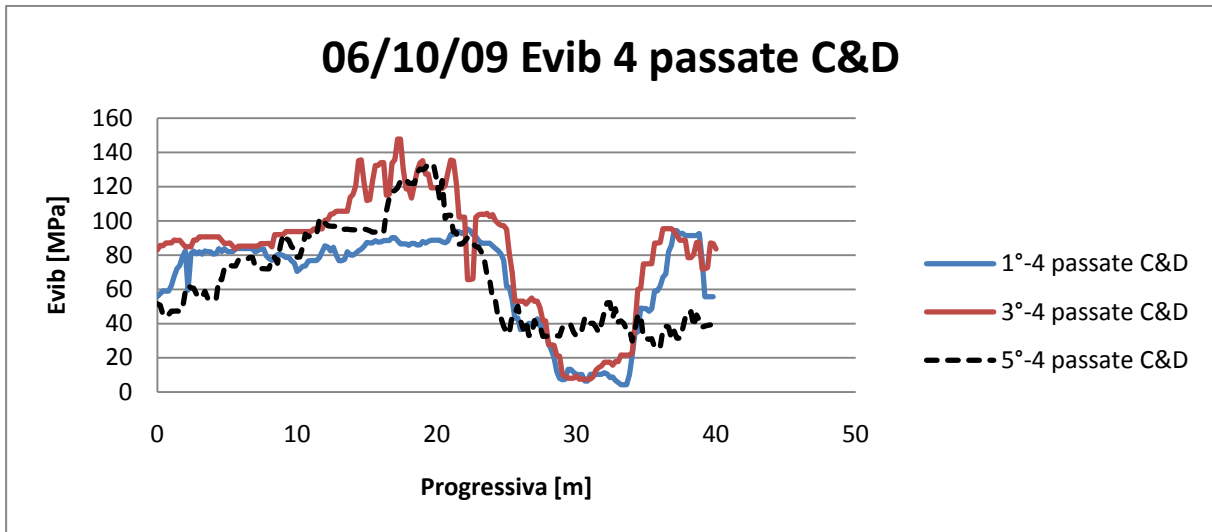


Fig.4.46 Confronto modalità automatica-proof-rolling su materiale C&D dopo 4 passate

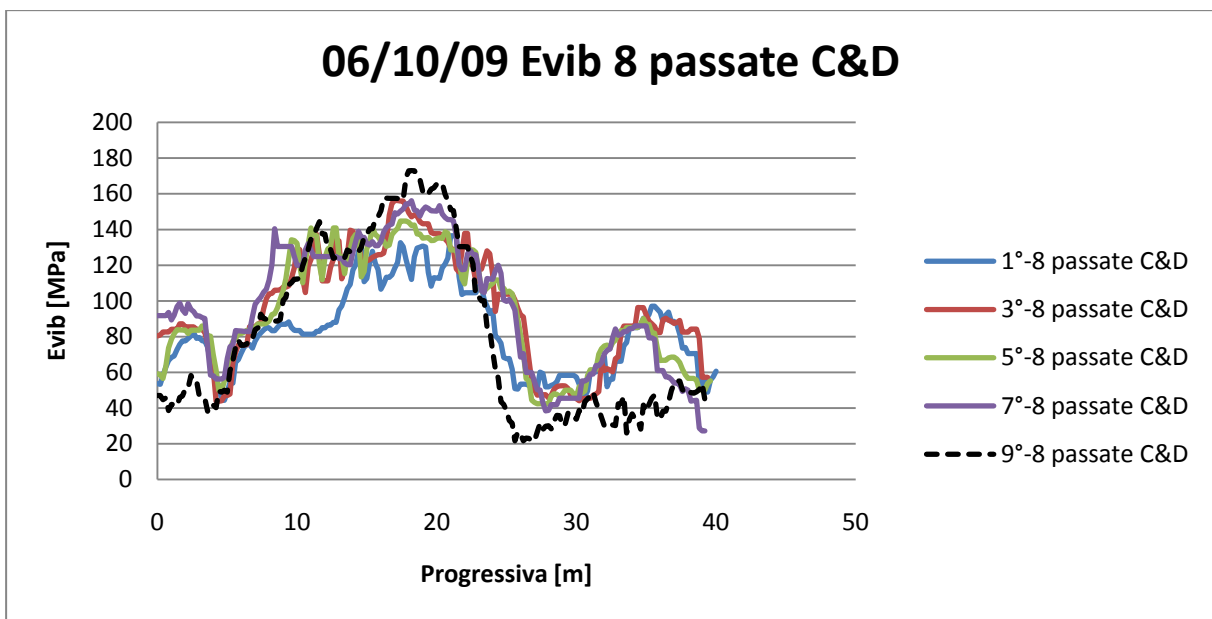


Fig.4.47 Confronto modalità automatica-proof-rolling su materiale C&D dopo 8 passate

Nell'ultima parte compresa tra 25-40 m si nota come i valori di Evib calino, il motivo è da imputarsi al fatto che probabilmente gli strati di terreno sottostante siano costituiti da materiale cedevole.

In questo caso i valori di Evib ottenuti nelle due differenti modalità sono molto vicini visto che vi è omogeneità di rigidità nel corpo del rilevato e nel sottofondo interessato dalle tensioni generate dal rullo. In pratica grazie alla rigidità dello strato fondante il C&D si è compattato bene e tutto il solido del rilevato, sottofondo compreso esibisce una rigidità uniforme.

#### **4.11 CONCLUSIONI**

Analizzando il rilevato sperimentale sito in Altopascio, è stato possibile mettere subito in evidenza le differenze riguardanti i due materiali utilizzati: l'uno, l'A2-5 argilloso-sabbioso, che risente molto della presenza di umido sul terreno, motivo per il quale, nonostante le diverse passate di rullo, non è stato possibile ottenere, in alcuni punti, i risultati che ci si era prefissati; l'altro, il C&D, materiale ricco di inerti, proveniente da demolizione, molto rigido.

Questa rigidità è poi ulteriormente aumentata grazie alla compattazione raggiungendo valori soddisfacenti. Anche in questo caso, si sono ottenuti valori più bassi di Evib nella parte finale del tracciato, probabilmente a causa di strati di terreno cedevole posti nel sottofondo.

Si è notata l'importanza della variazione delle ampiezze della massa eccentrica, che hanno portato ad ottenere valori differenti di Evib nelle due diverse modalità di lavorazione. Si è, infatti, constatato, come un incremento dell'ampiezza vibratoria abbia comportato un aumento dei valori di Evib per il materiale A2-5. Il materiale C&D, grazie alla sua rigidità non ha invece risentito della variazione dell'ampiezza della vibrazione.

Inoltre, è stato possibile evidenziare l'importanza della rappresentazione tramite mappatura geostatistica, che è riuscita a chiarire meglio le condizioni dei due campi e ne ha dato una lettura molto più efficace.

In conclusione, visti i miglioramenti, seppur esigui in alcuni tratti, di costipazione, di planarità e omogeneità del terreno che si sono ottenuti, nonostante le numerose problematiche riscontrare dovute a compluvi, umidità, terreni del sottofondo cedevoli, deformazioni, avvallamenti e presenza in alcuni tratti di materiale roccioso, si può affermare che la metodologia della compattazione intelligente tramite l'utilizzo di un compattatore Bomag con

apparecchiatura integrata Variocontrol, permette di ottenere risultati soddisfacenti, in breve tempo, con un numero limitato di passate.

## **CAPITOLO 5**

### **CONCLUSIONI**

I sistemi di compattazione intelligente ancora non troppo in uso in Europa, stanno però diffondendosi in maniera repentina. Sono, infatti, numerose le case produttrici che stanno adeguando i loro macchinari per renderli adatti al metodo della compattazione “intelligente”, visto soprattutto il diffondersi di tali sistemi nelle costruzioni stradali.

È importante evidenziare come sia necessaria una conoscenza approfondita di questa nuova metodologia, da parte degli operatori, che si stanno sempre più specializzando.

L’evoluzione della conoscenza dei vari parametri determinati con aspetti teorici, che stanno alla base del funzionamento, ha portato a sistemi sempre più accurati, che possono essere utilizzati vantaggiosamente per il controllo e la verifica delle informazioni di cantiere.

Con la sperimentazione attuata sul rilevato ad Altopascio, si è voluto dare un contributo alla validazione di questi sistemi e si è riscontrato che sono estremamente sensibili alle variazioni di portanza del solido stradale investigato.

Inoltre, si è notato come, grazie al controllo automatico di ampiezza, frequenza e velocità sia possibile ottenere una maggiore efficienza e produttività, riducendo al minimo il numero di passaggi e il pericolo di overcompaction.

Un aumento o una diminuzione di ampiezza e frequenza permettono di variare l’intensità della compattazione in modo molto evidente, soprattutto sul materiale A2-5.

Si è inoltre visto come sia fondamentale valutare la velocità con la quale il macchinario si appresta a compattare il terreno.

Di norma aumentare la velocità del macchinario genera una compattazione meno efficace. Se però il materiale da compattare è molto rigido, come nel nostro caso del C&D, un incremento della velocità, come si è rilevato, da 1,7 a 2,9 Km/h, non ha generato grosse variazioni nella compattazione, nel caso di terreno cedevole o sabbioso come l’A2-5 allora si sarebbero potuti avere decrementi di Evib anche pari al 30-50%.

A lavoro ultimato si è riscontrata una compattazione più uniforme e una migliore planarità, soprattutto in alcune aree che hanno presentato fin dall'inizio diverse problematiche dovute ad avvallamenti e deformazioni del terreno, ad umidità e probabile presenza di strati di terreno cedevole posti nel sottofondo.

Si sono confrontati i valori ottenuti dopo la compattazione delle tre fasce centrali in cui sono stati suddivisi i siti a 2,4 e 8 passate del rullo, evidenziando le differenze dei due diversi materiali impiegati nella sperimentazione.

Inoltre si è provveduto a confrontare i grafici ottenuti sia in modalità manuale, sia in modalità automatica.

Il problema principale riscontrato sul campo in materiale A2-5, è stato principalmente dovuto alla presenza di acqua sul sito.

La differenziazione sulle passate, è servita ad evidenziare tale situazione nella fasce ad 8 passate.

In questa fascia si è evidenziato il problema tipico di un materiale a matrice argillosa posato su strati di terreno umido risentendo della salita di acqua che sotto l'azione del rullo ha mostrato segni di sovra compattazione.

La possibilità di variare la profondità di investigazione attraverso le due diverse modalità di costipazione manuale ed automatica, ha consentito di attribuire al sottofondo l'andamento altalenante dei moduli, mentre si può direttamente attribuire al solo strato in A2-5 il motivo per cui i valori ottenuti tramite proof-rolling hanno fornito valori più bassi rispetto a quelli ottenuti con modalità automatica.

Neppure compattando uno strato di materiale C&D sopra quello in A2-5 si è riusciti a migliorare la situazione.

Nel campo C&D è evidente una forte sensibilità dello strumento alle variazioni portanti, portanza che è in questo caso più uniforme nella profondità perché i valori di proof-rolling sono alla stessa altezza.

Questo materiale tende a sgranare, quindi sotto l'effetto del rullo si comporta meglio e questo comporta il raggiungimento di una migliore planarità.

Paragonato all'A2-5 ha evidenziato moduli molto più elevati, in particolare nella zona iniziale.

Nella parte finale, dove il sito è collocato in una zona di raccolta dell'acqua, i valori del modulo scendono.

L'applicazione alla geostatistica, inoltre, ha permesso una migliore visualizzazione dei dati.

Sicuramente il metodo ha già raggiunto un buono stato di accuratezza; con il sistema GPS consente di fruire maggiormente il quadro di portanza del sito.

Esiste, tuttavia, il problema dell'accertamento dei valori ottenuti realizzato da terzi, estranei alla realizzazione dell'investigazione sperimentale.

Sarà necessario predisporre una metodologia che studi prove di portanza come l'LFWD, PFWD, che possono consentire di tarare il rullo e utilizzarlo direttamente come strumento di controllo.

**BIBLIOGRAFIA**

**Testi:**

- [1] Pofessor Dr.-Ing. E.h.Rudolf Floss, “*Compaction Technology in Earthwork and Highway and Transportation Engineering*”, Volume 1, Bomag.

**Pubblicazioni:**

- [2] 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.
- [3] AMMANN (1994). “German Specifications and Regulations - Surface Covering Dynamic Compaction Control Methods,” Specification, AMMAN Verdichtung AG, Langenthal, Swiss.
- [4] AMMANN (2003). “ACE-Soil Compaction and Compaction Control,” CD, AMMAN Verdichtung AG, Langenthal, Swiss.
- [5] AMMANN. “Compaction Equipment,” Brochure, AMMAN Verdichtung AG, Langenthal, Swiss.
- [6] AMMANN (2002). “European and U.S. Patents on the ACE-System”, AMMAN Verdichtung AG, Langenthal, Swiss.
- [7] Floss, R. and H.-J. Kloubert (2000). “Newest Developments in Compaction Technology,” European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials, Presses Ponts et Chaussées, Paris, France.
- [8] GEODYNAMIK. “System and Roller,” Catalog, GEODYNAMIK AB, Stochholm, Sweden.



- [9] Kröber, W., R. Floss, and W. Wallrah. "Dynamic Soil Stiffness as Quality Criterion for Soil Compaction." Technical Paper, BOMAG Schriftenreihe, Boppard, Germany.
- [10] 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.
- [11] " *Data Collection Technologies for Road Management* ", East Asia Pacific Transport Unit The World Bank, Washington D.C., USA, pp 31-47.