

CAT® PAVING PRODUCTS

GUIDA ALLA COMPATTAZIONE DEL SUOLO

CATERPILLAR®



WARNING
Always use proper tie-off technique. See the operator's manual for details.
WARNING
Always use proper tie-off technique. See the operator's manual for details.

STUBBLESS



CAT CS78B

CAT® PAVING PRODUCTS

GUIDA ALLA COMPATTAZIONE DEL SUOLO

GUIDA ALLA COMPATTAZIONE DEL SUOLO

CATERPILLAR®

La *Guida alla compattazione del suolo* è pubblicata da Caterpillar® Paving Products. È stato posto il massimo impegno per garantire che le specifiche e le informazioni in essa contenute fossero corrette. Le informazioni sulle prestazioni vengono fornite esclusivamente per scopi di stima. A causa delle numerose variabili specifiche dei singoli progetti di compattazione del suolo (tipologia e caratteristiche del medesimo, additivi, tenore di umidità, specifiche di progetto, apparecchiature disponibili, efficienza degli operatori, preferenze applicative dei proprietari, condizioni del terreno, altitudine e così via), Caterpillar Inc. e i suoi concessionari non garantiscono che le macchine e le metodologie descritte nel presente documento forniscano le prestazioni indicate. Poiché i materiali e le specifiche delle apparecchiature sono soggetti a variazioni senza preavviso, occorre verificare con il proprio concessionario CAT le informazioni più recenti sui prodotti e le opzioni disponibili per i medesimi. È possibile che le macchine raffigurate nel documento includano apparecchiature opzionali e/o aggiuntive. CAT, CATERPILLAR, i rispettivi loghi, il colore "Caterpillar Yellow", il marchio POWER EDGE e le identità aziendali e dei prodotti utilizzati nel presente documento sono marchi di fabbrica di Caterpillar e non possono essere utilizzati senza autorizzazione.

Nota: per informazioni specifiche sui prodotti, consultare sempre il rispettivo Manuale di funzionamento e manutenzione. È possibile che alcune delle apparecchiature raffigurate includano opzioni post-vendita che non sono prodotte o collaudate da Caterpillar.

ISBN: 978-1-939945-10-5

QLBQ1705

© 2013 Caterpillar Inc. - All rights reserved.

SOMMARIO

| | | |
|-----------------|--|-----|
| Unità 1: | NOZIONI DI BASE SULLA COMPATTAZIONE DEL SUOLO | 8 |
| Unità 2: | TIPOLOGIE E CLASSIFICAZIONI DEI SUOLI | 30 |
| Unità 3: | FISICA DELLA COMPATTAZIONE | 38 |
| Unità 4: | APPLICAZIONE E CONTROLLO DELLA QUALITÀ | 58 |
| Unità 5: | COMPATTAZIONE INTELLIGENTE | 90 |
| | APPENDICE | 112 |
| | GLOSSARIO TERMINOLOGICO | 118 |

PREMESSA

Il terreno fornisce da sempre la stragrande maggioranza dei materiali da costruzione. Dalla costruzione delle strade ad opera dei Romani con materiali provenienti dal terreno alla realizzazione delle dighe dei nostri giorni, la corretta esecuzione delle operazioni di compattazione presenta una stretta correlazione con le prestazioni dei terrapieni e delle costruzioni realizzate sui medesimi. Progetti quali strade, argini, dighe e terrapieni strutturali, nonché la gestione dei pendii, richiedono oggi un controllo rigoroso delle attività di compattazione, per garantire il rispetto dei criteri tecnici di qualità. Quando la qualità di compattazione raggiunta durante le attività di costruzione non è sufficiente, i costi delle riparazioni necessarie durante la vita utile dei manufatti può risultare superiore ai costi iniziali di costruzione.

Oltre a essere molto abbondanti, i materiali da costruzione provenienti dal terreno sono estremamente variabili. A tale variabilità contribuiscono nel loro complesso le dimensioni e la forma delle particelle, la mineralogia, il tenore di umidità, la miscelazione e il tempo. Questa guida descrive le cause di tale variabilità e si concentra sulla scelta delle apparecchiature corrette per mantenere sempre efficaci e produttive le attività di compattazione. Le prassi adottate per la scelta delle apparecchiature di compattazione e dei processi di posa dei materiali provenienti dal terreno si sono sempre basate in larga misura su regole approssimative e su quanto aveva fornito

buoni risultati in precedenza. Con l'accelerazione dei programmi di costruzione e la transizione a specifiche di prestazioni orientate ai risultati, le attività di compattazione stanno diventando sempre più essenziali per il buon esito dei progetti, pur rappresentando una piccola parte dei costi complessivi di costruzione.

Questa guida descrive gli aspetti fondamentali dei processi di compattazione, della scelta di macchine di compattazione efficaci e delle tecnologie emergenti per le prove di valutazione della qualità, con l'obiettivo di ottimizzare i tempi di compattazione e di controllare i costi dei progetti. La guida alla scelta delle macchine si basa sul tipo di materiali, sullo spessore target degli strati, sulle esigenze di produttività e sui requisiti relativi ai criteri di valutazione della qualità (ad esempio la compattazione relativa e il modulo di reazione delle fondazioni).

Questa guida è particolarmente utile per gli appaltatori che desiderano acquisire e utilizzare le informazioni sul suolo prima dell'avvio dei progetti, in modo da poter definire prezzi di offerta specifici per i cantieri in questione nonché piani dei processi di compattazione mirati a un'esecuzione corretta delle attività al primo tentativo, onde evitare rilavorazioni e ritardi di costruzione costosi.

Le tecnologie di misurazione della compattazione, come quella denominata Controllo della



compattazione CAT®, consentono oggi il monitoraggio dell'avanzamento della compattazione in termini di spessore dello strato, copertura delle passate, Compaction Meter Value (CMV) e Machine Drive Power (MDP). Il parametro CMV è un indicatore consolidato che consente di utilizzare le macchine compattatrici come dispositivi di misurazione per ottenere i valori dei parametri meccanici del suolo (ad esempio rigidità e portanza) analizzando le vibrazioni dell'insieme costituito da macchina e terreno. La nuova tecnologia innovativa MDP di Caterpillar potenzia ulteriormente le capacità di tali sistemi.

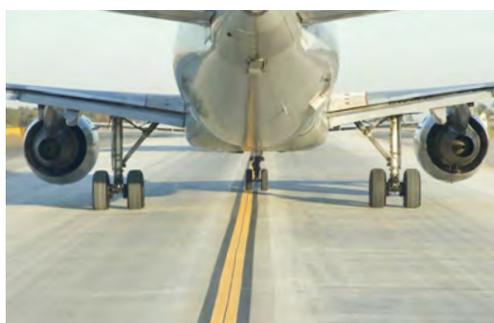
Misurando in tempo reale le caratteristiche meccaniche dei materiali compattati e utilizzando informazioni di posizione ricavate dal sistema di posizionamento satellitare GNSS (Global Navigation Satellite System), si possono generare mappe di valutazione della qualità codificate per colore, che è possibile collegare ai valori di progettazione in modo da garantire che il livello di compattazione dei materiali soddisfi i requisiti di qualità prestabiliti. Tale approccio alla valutazione della qualità di compattazione è in anticipo di anni luce sul vecchio metodo di ispezione visiva dei cedimenti. Mentre in passato le specifiche di compattazione erano orientate all'indicazione di metodi e processi, l'impiego di tecnologie integrate permette oggi di adottare specifiche di prestazioni mirate ai risultati, con una copertura del 100 per cento in tempo

reale. Le tecnologie di compattazione intelligenti costituiscono in effetti la base di un ripensamento della valutazione della qualità di compattazione da parte di enti di tutto il mondo.

Questa guida riunisce esperienze e conoscenze maturate da Caterpillar grazie all'impegno profuso per migliorare le apparecchiature e le attività di compattazione. Ad essa hanno inoltre contribuito molti appaltatori, tecnici, autorità riconosciute e ricercatori in attività. Le tecnologie di compattazione emergenti, in particolare il monitoraggio intelligente integrato della compattazione e i metodi di previsione dei parametri operativi, stimoleranno nel campo della valutazione della compattazione i cambiamenti più significativi verificatisi dal 1933, quando Proctor definì gli standard di controllo dell'umidità.

Coloro che utilizzeranno questa guida avranno a portata di mano una pratica fonte di informazioni sui principi di compattazione del suolo, nonché di competenze professionali per la scelta delle macchine e di indicazioni per ottimizzare le attività di compattazione. Implementando le informazioni contenute in questa guida sarà possibile ridurre i rischi e migliorare la qualità di compattazione.

David J. White, Ph.D.
Professore associato
Iowa State University





INTRODUZIONE

Chi vuole costruire deve compattare.

Caterpillar è lieta di presentare questa *Guida alla compattazione del suolo*. Essa è intesa come una guida ai principi di tale compattazione, alle tecniche di prova e alle procedure lavorative. Il suo contenuto offre un approccio pratico a un argomento teorico particolarmente complesso. Si tratta del frutto di decenni di esperienza nel settore delle macchine movimento terra, nonché delle conoscenze accumulate dalla miriade di professionisti che hanno collaborato con Caterpillar nel corso degli anni.

Che siano professionisti delle costruzioni, funzionari pubblici, insegnanti o studenti, oppure semplicemente persone interessate a conoscere meglio le metodologie di costruzione, i lettori scopriranno che questa guida è una risorsa preziosa.

Il concessionario CAT di zona è un'altra valida risorsa da consultare in relazione alle applicazioni di movimento terra o di compattazione. Il personale dei concessionari è in possesso di una formazione impartita da esperti Caterpillar per consentirgli di fornire assistenza ai clienti offrendo loro le apparecchiature, i servizi e le conoscenze necessari per assicurare la massima produttività.



Unità 1 NOZIONI DI BASE SULLA COMPATTAZIONE DEL SUOLO

La possibilità di analizzare la composizione del suolo è essenziale per il processo di definizione delle specifiche di compattazione e il successivo raggiungimento della portanza richiesta.



[CHE COS'È LA COMPATTAZIONE?]

In termini semplici, la compattazione è il processo meccanico di aumento della densità di un materiale. Il suolo viene reso più denso riducendo i vuoti presenti fra le sue particelle costitutive. Con l'andare del tempo, i materiali sciolti si assestano e si compattano naturalmente. L'applicazione di varie forze meccaniche permette tuttavia di ridurre da anni a ore il tempo necessario per la compattazione.

La compattazione è un processo necessario per ogni tipo di progetto di costruzione, compresi quelli relativi a strade, ferrovie, aeroporti,

cantieri/fondazioni, oleodotti, dighe, canali, fognature e altri ancora. Se il suolo deve sostenere una struttura, occorre di solito compattarlo per garantire la stabilità della stessa.

La compattazione del suolo viene ottenuta utilizzando una forza o una combinazione di forze, quali pressioni statiche, impatti, manipolazioni e vibrazioni.





[PERCHÉ LA COMPATTAZIONE È IMPORTANTE?]

I materiali compattati in modo corretto sono in grado di sostenere carichi maggiori senza subire deformazioni (flessioni, screpolature e spostamenti). Il materiale del substrato che sostiene una struttura pesante deve essere molto denso, poiché in caso contrario si compatta ulteriormente una volta sotto carico, causando assestamenti della struttura in questione. I materiali densi presentano una minore permeabilità, che a sua volta riduce gli effetti negativi delle infiltrazioni d'acqua. La compattazione livella inoltre le superfici, rivelandone le aree deboli dal punto di vista strutturale.

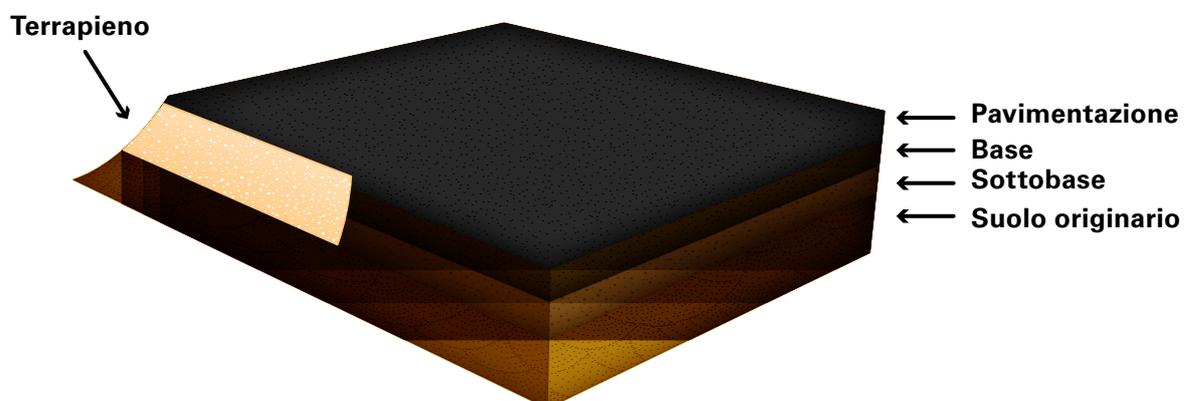
Un buon modo per illustrare l'importanza della compattazione consiste nell'esaminare i vari strati di una strada tipica. Ciascuno strato di una strada è studiato per sostenere il peso poggiato su di esso assolvendo uno scopo tecnico specifico.

Ogni strato deve pertanto essere dello spessore corretto, realizzato con il materiale giusto e dotato della rigidità appropriata. Se la resistenza di uno strato non è sufficiente, la strada si deteriora.

La compattazione avviene durante tutte le fasi della costruzione di una strada. La qualità della compattazione influisce in misura considerevole sulla durata della strada, esercitando inoltre un profondo effetto sul comfort, ed eventualmente sulla sicurezza, di coloro che la usano.

Il processo di compattazione è il fattore meno costoso in assoluto per estendere la vita utile delle strade. L'aumento della densità degli strati di una strada durante il processo di costruzione ha un costo minimo per metro cubo di suolo. Il rispetto delle specifiche relative alla densità permette di ridurre in seguito gli ingenti costi di manutenzione e/o rifacimento del manto stradale.

TIPICA SEZIONE DI UNA STRADA



[CHE COS'È IL SUOLO?]

I suoli sono materiali non consolidati, formati da particelle minerali e contenenti eventuali sostanze organiche. Si tratta sostanzialmente di depositi di rocce disintegrate, sbriciolate lentamente da processi fisici e chimici.

Fra i processi fisici figurano congelamento, disgelo, rotolamento, frantumazione e soffiatura.

I processi chimici danno origine a suoli argillosi. L'azione disgregante a lungo termine degli agenti atmosferici e quella della pioggia rivestono un

ruolo di rilievo nella creazione delle argille. L'argilla differisce dalla sabbia e dalla ghiaia in quanto è costituita da minuscole particelle piatte dotate di strutture simili a piastre e provenienti da varie tipologie di rocce.

Alla formazione del suolo contribuisce inoltre la materia organica. Quando le piante muoiono, i loro residui entrano a far parte del suolo. I suoli con un elevato tenore di materiali organici sono di solito troppo morbidi e spugnosi per poter essere utilizzati per scopi di costruzione.

FORMAZIONE DEL SUOLO



1 Suoli residuali
Roccia preesistente frantumata

2 Depositi glaciali
Materiali trasportati o creati dalle calotte glaciali

3 Depositi glacio-fluviali
Materiali trasportati dalle acque di fusione delle calotte glaciali

4 Depositi fluviali

5 Sedimenti lacustri

6 Suoli alluvionali
Suoli a grana fine depositati sulle pianure e negli estuari dai flussi d'acqua

7 Sedimenti dilavati dalle onde

8 Depositi trasportati dal vento

9 Suoli organici
Vegetazione decomposta

10 Suoli creati dall'uomo
Lavorati mediante processi esplosivi o di frantumazione

[TIPI DI SUOLO]

Benché la costituzione fisica e chimica dei suoli possa presentare notevoli variazioni, ai fini ingegneristici vengono riconosciuti sei tipi fondamentali, vale a dire sassi, ciottoli, ghiaia, sabbia, limo e argilla.

I sei tipi di suolo sono di solito organizzati in base alle dimensioni delle particelle, che vengono determinate mediante una prova di vagliatura. Anche se i dettagli specifici degli impieghi ingegneristici possono variare da un paese all'altro, le misure dei vagli sono solitamente definite

mediante sistemi sviluppati da una delle seguenti due fonti, vale a dire l'Organizzazione internazionale per la standardizzazione (ISO, International Organization for Standardization) [www.iso.org] o la Società americana per le prove e i materiali (ASTM, American Society for Testing and Materials) [www.astm.org]. Pur non essendo perfettamente concordi, i due sistemi sono comunque molto simili. Le frazioni del suolo troppo fini per poter essere classificate tramite i vagli vengono determinate mediante prove con idrometri (vedere pagina 14).

TIPI DI SUOLO



Sassi



Ciottoli



Ghiaia



Sabbia

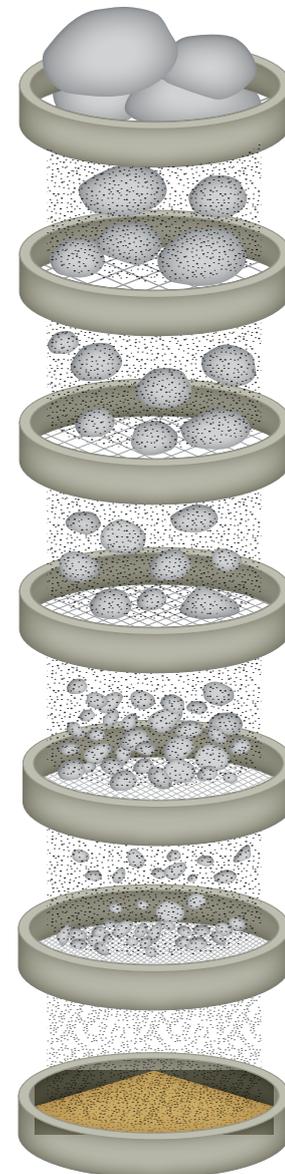


Limo

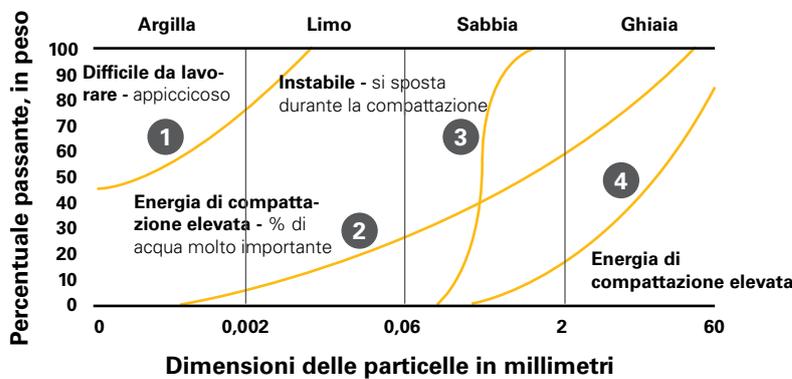


Argilla

PROVA DI VAGLIATURA



DISTRIBUZIONE DELLE DIMENSIONI DELLE PARTICELLE



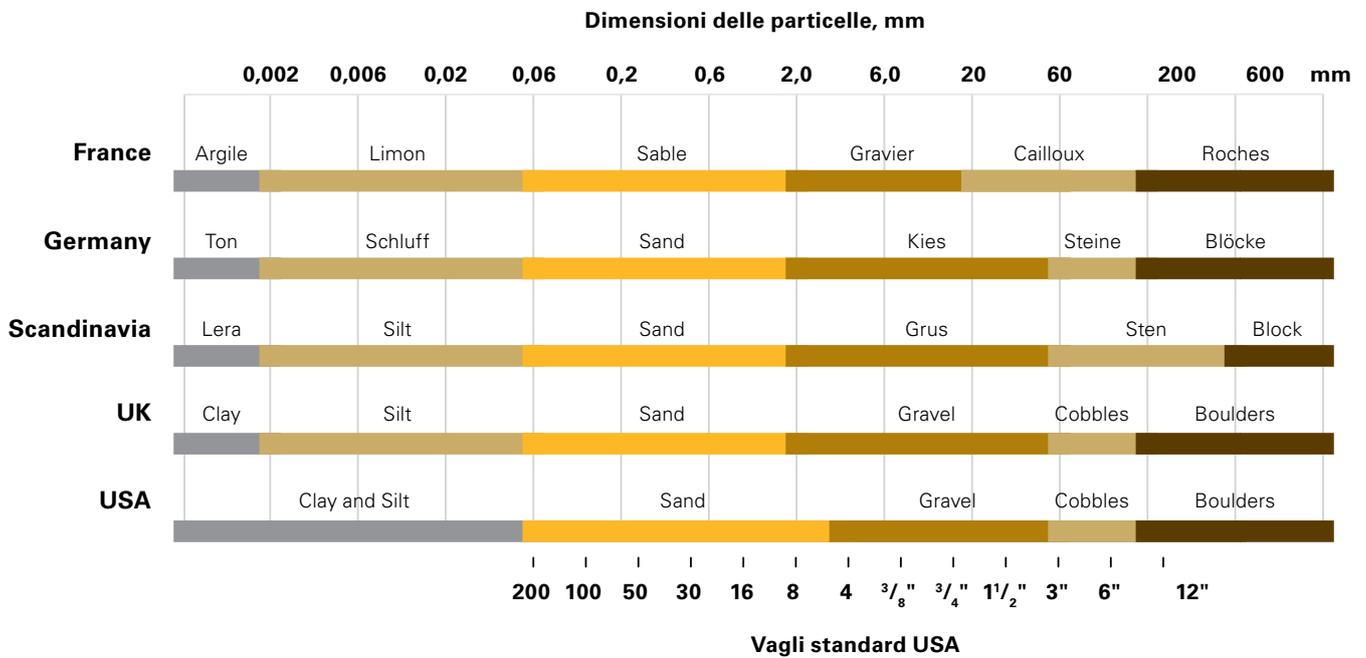
- 1 limo - argilla
- 2 ghiaia - limo
- 3 sabbia uniforme
- 4 ghiaia - sabbia



Prova con idrometro

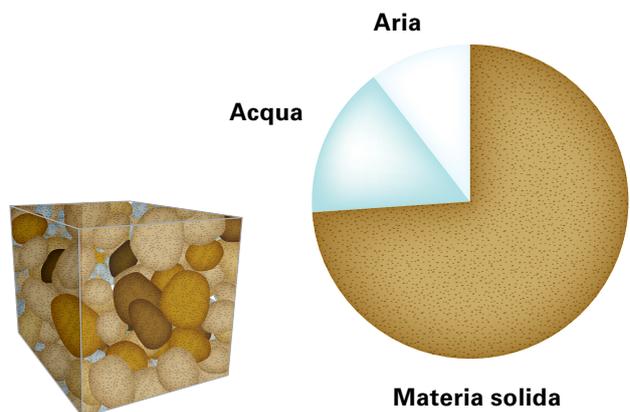
Il campione di suolo viene disperso (messo in sospensione) in acqua all'interno di un cilindro graduato. Il tempo necessario affinché il materiale si depositi sul fondo permette di identificare le diverse dimensioni dei granuli. Viene rilevato sull'idrometro un valore relativo alla sospensione, per determinare il peso specifico, che a sua volta consente di calcolare la percentuale di granuli di una determinata dimensione.

TABELLA DI CONFRONTO DEI SUOLI



Il materiale di un suolo è sostanzialmente una miscela costituita da percentuali variabili dei tipi di terreno menzionati in precedenza. È importante rendersi conto che il materiale di un suolo non è formato unicamente da materiali solidi, ma consiste in una miscela di materiali solidi (qualunque combinazione di tipi di suolo), acqua e aria.

MISCELA DEL SUOLO

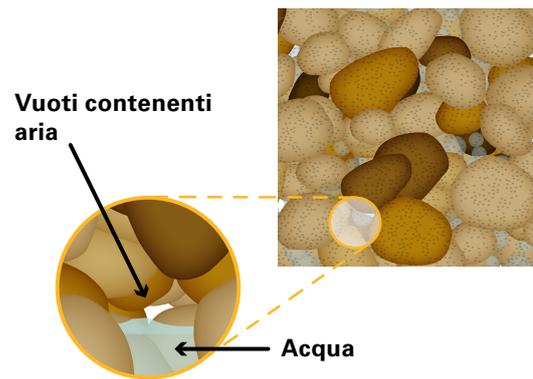


I suoli naturali od "originari", vale a dire quelli che si trovano naturalmente depositati nel terreno, variano da luogo a luogo. Il materiale di un suolo, ad esempio, non è mai formato da argilla o sabbia al 100 per cento: sono sempre presenti piccole percentuali altri tipi di suolo. I materiali del suolo migliori dal punto di vista costruttivo sono spesso composti, vale a dire costituiti da percentuali specifiche di tipi di suolo scelti in base alle caratteristiche tecniche desiderate.

Specificando le percentuali di ciascun tipo di suolo, gli ingegneri geotecnici sono in grado di progettare miscele di suoli in grado di fornire tali caratteristiche. I tipi di suolo assenti in un suolo originario vengono aggiunti nelle proporzioni necessarie e miscelati con il medesimo per creare un suolo ingegnerizzato. Tali materiali aggiuntivi vengono spesso determinati mediante un'analisi poco costosa dei materiali del suolo disponibili nelle vicinanze.

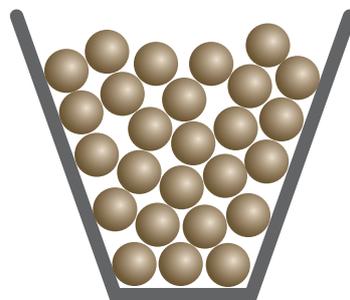
Esaminando con attenzione un campione di suolo, si nota che le singole particelle hanno forme e dimensioni molto diverse. Gli spazi fra le particelle

VUOTI CONTENENTI ARIA/ACQUA

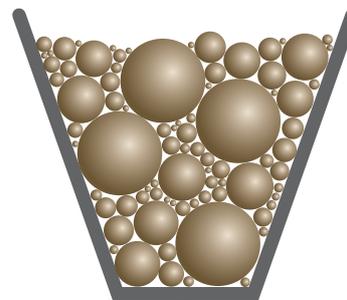


sono detti "vuoti", e al loro interno possono essere presenti aria o acqua. Quando il materiale di un suolo contiene una quantità eccessiva di aria o di acqua per la presenza di un grande numero di vuoti, il suolo risulta instabile. Il processo di compattazione riordina le particelle del suolo in modo da ridurre al minimo il volume e le dimensioni dei vuoti, rendendo più denso e stabile il materiale.

GRANULOMETRIA



Granulometria uniforme o insufficiente



Buona granulometria

Le dimensioni delle singole particelle del materiale di un suolo presentano variazioni, anche se la variabilità è contenuta. L'intervallo di dimensioni delle particelle è detto "granulometria", o a volte "distribuzione delle dimensioni delle particelle" o "distribuzione delle dimensioni dei granuli". In linea di principio vi sono quantità simili di granuli di tutte le dimensioni, senza che alcuna di esse predomini. Un materiale che possiede tale intervallo ideale di dimensioni è detto a "buona granulometria".

I materiali costituiti da particelle di dimensioni quasi uguali sono detti "a granulometria uniforme" o "a granulometria insufficiente". Se una o più dimensioni sono assenti dal materiale, quest'ultimo è detto "a granulometria discontinua". Un suolo dotato di una buona granulometria risulta più agevole da compattare di uno caratterizzato da una granulometria insufficiente, in quanto la presenza di una variabilità delle dimensioni dei granuli fa sì che quelli più piccoli si inseriscano alla perfezione nei vuoti presenti fra quelli più grandi.

[QUATTRO TIPI DI MATERIALI DEL SUOLO]

Benché sia a volte utile conoscere la composizione esatta del materiale di un suolo, a livello pratico è più importante capire in quale modo esso reagisce quando gli vengono applicate varie forze. A tale scopo, i professionisti che lavorano con il suolo ne suddividono i materiali in quattro tipi fondamentali, vale a dire in suoli:

- 1. Coesivi**
- 2. Semi-coesivi**
- 3. Non coesivi**
- 4. Organici**

Quando gli vengono applicate delle forze, ogni tipo reagisce in modo diverso. Le modalità di reazione di ciascuno di essi ne definiscono l'ideoneità per le diverse finalità ingegneristiche nel campo delle costruzioni, nonché i tipi di mezzi da utilizzare per lavorare su ciascun suolo. Come indicato in precedenza, i materiali organici del suolo non sono adatti per gli scopi del settore delle costruzioni.

Quando il materiale di un suolo non è adatto per le finalità tecniche, esso viene sostituito oppure si utilizzano vari mezzi per migliorare le sue caratteristiche, secondo un processo detto "stabilizzazione". Fra le soluzioni adottate possono figurare la stabilizzazione chimica, ad esempio tramite l'inclusione di cemento di Portland, calce, cenere ventilata o cloruro di calcio, e la stabilizzazione meccanica, ivi compresi l'aggiunta di aggregati selezionati o l'uso di materiali geosintetici per rafforzare il suolo.

TIPI DI MATERIALI



| Tipo di suolo | Aspetto / sensazione | Scorrimento dell'acqua | Condizioni umide | Condizioni secche |
|--|--|---|---|--|
| Suoli granulari, sabbie fini e limo | Sono visibili granuli grossolani. Quando lo si strofina fra le dita, il materiale sembra sabbioso. | Quando vengono scossi nel palmo della mano, acqua e suolo si mescolano. Quando le scosse si interrompono, essi si separano. | La plasticità è molto bassa o nulla. | La forza di coesione è bassa o assente in condizioni secche. I campioni di suolo si sbriciolano facilmente. |
| Suoli coesivi, miscele e argille | I granuli sono invisibili a occhio nudo. Quando lo si strofina fra le dita, il materiale sembra liscio e unto. | Quando vengono scossi nel palmo della mano, acqua e suolo non si mescolano. | Il materiale è plastico, appiccicoso e può essere arrotolato. | In condizioni secche, il materiale ha una resistenza elevata. Si sbriciola con difficoltà. La saturazione in acqua avviene lentamente. |

[IMPORTANZA DEL TENORE DI UMIDITÀ]

È impossibile esagerare l'importanza dell'acqua per il processo di compattazione del suolo. Ogni tipo di suolo possiede caratteristiche fisiche che ne definiscono la reazione all'umidità. Per ogni materiale del suolo esiste un tenore di umidità che ne ottimizza le caratteristiche tecniche per una determinata energia di compattazione. In generale, l'influenza dell'acqua sulla compattazione aumenta al diminuire delle dimensioni delle particelle.

Se il tenore di umidità del suolo è insufficiente, il materiale risulta difficile da lavorare, in quanto le particelle non dispongono della lubrificazione necessaria per ridisporsi in uno stato più denso. La loro coesione non è inoltre sufficiente per mantenerle nella posizione di assetamento raggiunta.

Viene pertanto aggiunta acqua per migliorare la coesione e la lubrificazione. Una quantità eccessiva di acqua può tuttavia causare fenomeni di saturazione. Quando il suolo è saturo, i vuoti



si riempiono d'acqua, riducendo la portanza della struttura. Le particelle presentano inoltre una lubrificazione eccessiva, che consente loro di spostarsi facilmente.

Come esempio semplice del modo in cui l'acqua può influire sulle caratteristiche tecniche di un suolo, si immagini di costruire un castello di sabbia sulla spiaggia. L'acqua presente nella sabbia le conferisce una coesione sufficiente per poterla sagomare, creando alte torri e spesse mura. Si immagini ora di costruire il medesimo castello di sabbia nel deserto. Il suolo arido di quest'ultimo è privo di coesione, rendendo pertanto difficile realizzare più che pochi cumuli di sabbia.



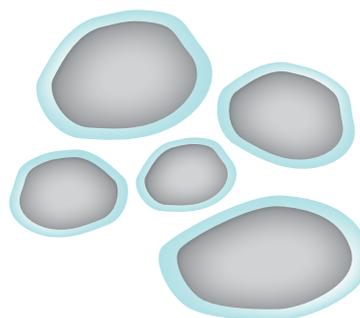
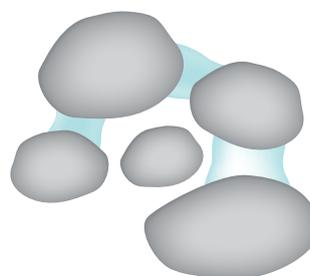
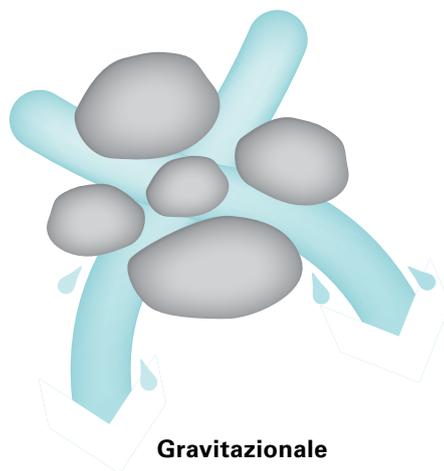
L'acqua ha anche altri effetti: essendo incompressibile, essa sposta i materiali del suolo, causando fenomeni di instabilità. Quando congela, l'acqua si espande, spostando il suolo circostante. Quando fonde, l'acqua ghiacciata finisce per occupare un volume minore, creando spazi che permettono assetamenti.



L'acqua è presente in ogni suolo allo stato naturale. Essa si presenta sotto tre forme.

1. L'acqua gravitazionale è libera di fluire verso il basso sotto l'azione della forza di gravità. Essa può pertanto fuoriuscire naturalmente dal suolo per drenaggio.
2. L'acqua capillare è trattenuta all'interno del suolo da porosità o piccoli vuoti. Essa viene considerata acqua libera, e può essere estratta soltanto abbassando la falda freatica o per evaporazione.
3. L'acqua igroscopica è quella che rimane in un suolo dopo avere estratto dal medesimo l'acqua gravitazionale e quella capillare. I singoli granuli del suolo trattengono tale acqua sotto forma di una pellicola molto sottile, dotata di affinità fisica e chimica per i granuli in questione. In questo caso si parla anche di tenore di umidità "con essiccamento all'aria". Per determinare il peso secco reale del suolo, occorre estrarre tale acqua essiccandolo in forno.

Un tenore di umidità del suolo troppo elevato causa una lubrificazione eccessiva del medesimo e rende instabili le sue particelle, mentre un tenore di umidità troppo basso impedisce alle particelle di cambiare facilmente orientamento per raggiungere uno stato più denso. Per ogni tipo di suolo esiste un tenore di umidità ideale, che permette di raggiungere la massima densità con una determinata energia di compattazione. La prova Proctor è stata sviluppata come supporto per la definizione del tenore di umidità ottimale per l'energia di compattazione selezionata.



[LA PROVA PROCTOR]

Il valore della compattazione del suolo di base e sottobase è ormai noto da tempo. Soltanto nel 1933, tuttavia, Ralph R. Proctor, dell'Agenzia per le opere idrauliche di Los Angeles (Los Angeles Bureau of Water Works), riuscì a sviluppare un metodo standardizzato per determinare il tenore di umidità ottimale e la massima densità secca corrispondente. La prova Proctor utilizzava un maglio ad azionamento manuale per compattare tre strati di suolo collocati in un cilindro chiuso.

La procedura standard determina il valore ottimale del tenore di umidità di un materiale che permette a una data forza di compattazione di ottenere la massima densità secca di tale materiale. Tale risultato viene utilizzato per definire una specifica di compattazione in cantiere. Poiché le condizioni sul campo non corrispondono a quelle ideali di laboratorio, la compattazione target viene riscalata a una percentuale della densità secca determinata in quest'ultimo. Tale fattore di scala può variare fra il 90 e il 100 per cento.

Sono inoltre state introdotte prove di compattazione modificate per strutture che richiedono una maggiore portanza al fine di sostenere carichi molto elevati o limitare l'assestamento. La prova di compattazione modificata applica un'energia circa quadrupla rispetto a quella standard, e produce solitamente valori inferiori del tenore di umidità "ottimale".



Kit per prove Proctor in laboratorio

Superamento del 100 per cento della densità secca

Com'è possibile che la densità target sia superiore al 100 per cento? La massima densità secca definita mediante la prova Proctor non coincide con la massima densità che è possibile raggiungere sul campo con un determinato suolo. Una densità secca Proctor del 100 per cento rappresenta la massima densità raggiunta in laboratorio con un determinato campione, utilizzando una forza di compattazione specifica e un tenore di umidità ideale. Le prove Proctor standard e modificate utilizzano pesi diversi e ottengono valori di densità secca diversi per il medesimo campione. Sul campo, i "colpi" provengono da grandi compattatori, che esercitano una forza diversa da quella dei magli utilizzati nelle prove Proctor. Non è quindi insolito raggiungere densità sul campo comprese fra il 100 e il 115 per cento della massima densità secca Proctor. Gli ingegneri geotecnici sono in grado di stabilire che a causa dei requisiti di portanza e delle caratteristiche del suolo, una densità di compattazione superiore al 100 per cento del valore Proctor è giustificata.

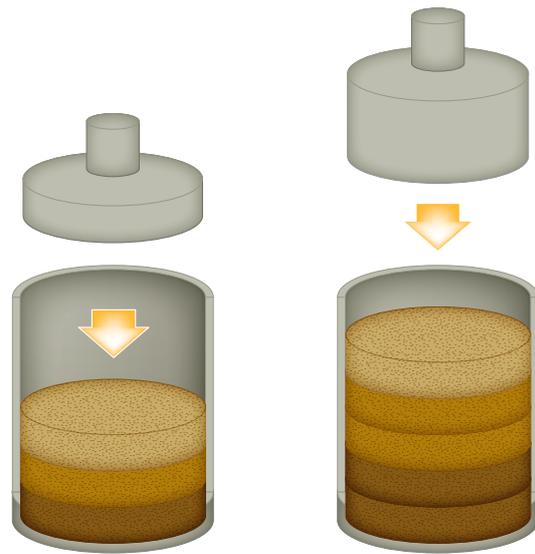
Per un dato campione di suolo, viene eseguita cinque volte la prova Proctor standard o modificata. A ogni ripetizione della prova viene utilizzata la medesima procedura, variando tuttavia il tenore di umidità.

La serie inizia con il suolo in condizioni di umidità in qualche misura al di sotto del probabile tenore di umidità ottimale. Una volta compattato il primo campione in un contenitore cilindrico, viene anzitutto misurato il peso bagnato, quindi una parte del campione viene collocata in un forno di essiccazione. Quando è completamente secco, il campione viene nuovamente pesato. La differenza fra il peso bagnato e quello secco fornisce il tenore di umidità, espresso in percentuale del peso secco.

Viene poi compattato un secondo campione con un tenore di umidità più elevato, e viene ripetuto il processo di pesatura ed essiccazione. Vengono preparati ulteriori campioni con valori crescenti del tenore di umidità, fino a quando il peso bagnato unitario diminuisce o il suolo diventa troppo bagnato per poter essere lavorato.

I valori della densità secca e del tenore di umidità vengono riportati su un grafico, e viene tracciata una curva regolare. Il punto più elevato della curva indica la massima densità secca e il tenore di umidità ottimale per il campione di suolo in questione.

PROVE PROCTOR



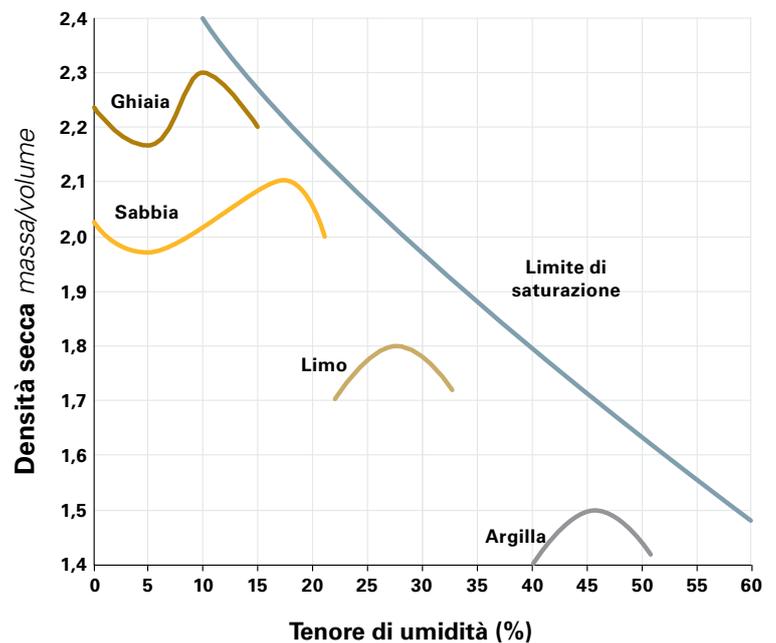
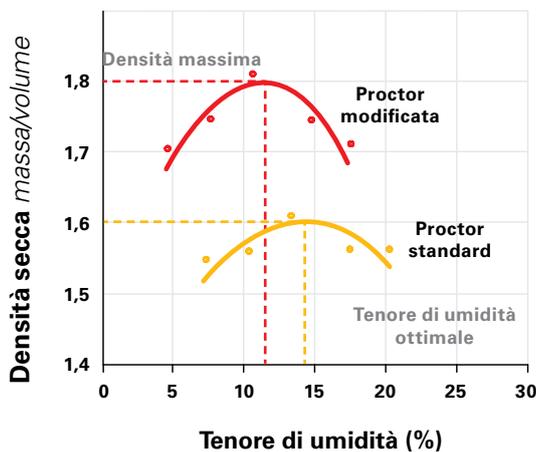
Standard

Modificata

Ciascuno strato riceve 25 colpi di un maglio da 2,5 kg (5,5 lb) che parte da una distanza di 305 mm (12 in)

Ciascuno strato riceve 25 colpi di un maglio da 4,5 kg (10 lb) che parte da una distanza di 457 mm (18 in)

CURVE PROCTOR

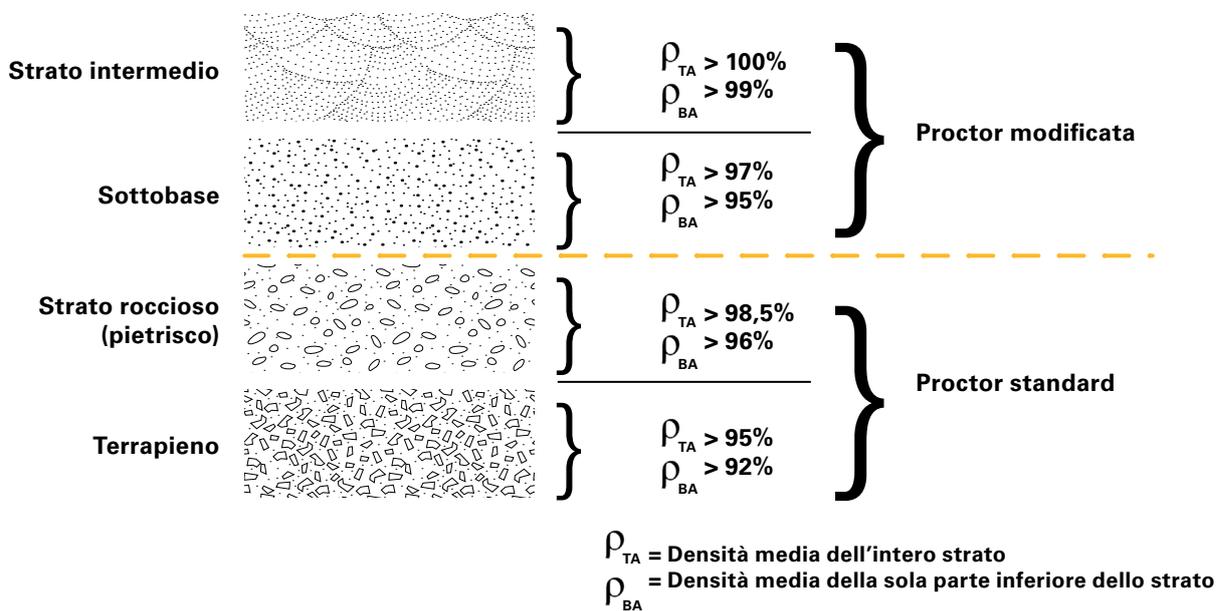


Le prove di laboratorio determinano il tenore di umidità in corrispondenza del quale è possibile raggiungere la massima densità per il materiale del suolo in questione. I valori di densità target sul campo vengono espressi come percentuali della massima densità secca raggiunta in laboratorio. Per la densità sul campo sono di solito richiesti valori

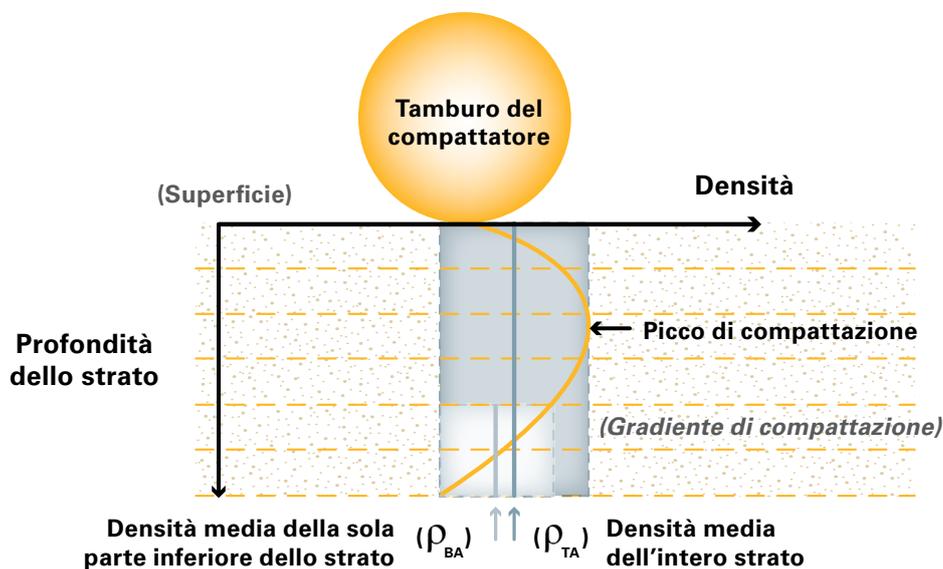
compresi fra il 95 percento del risultato della prova Proctor standard nel caso dei terrapieni, e il 100 percento del risultato della prova Proctor modificata nel caso delle strutture stradali. Analogamente, il tenore di umidità deve essere compreso entro un intervallo centrato sul valore ottimale determinato in laboratorio.

TARGET DI DENSITÀ

Questo esempio mostra come la densità aumenti all'avvicinarsi del materiale alla superficie.



Questa illustrazione del gradiente di compattazione confronta la densità media dell'intero strato (ρ_{TA}) con la densità media della sola parte inferiore dello strato (ρ_{BA}).



[PROPRIETÀ DEL SUOLO]

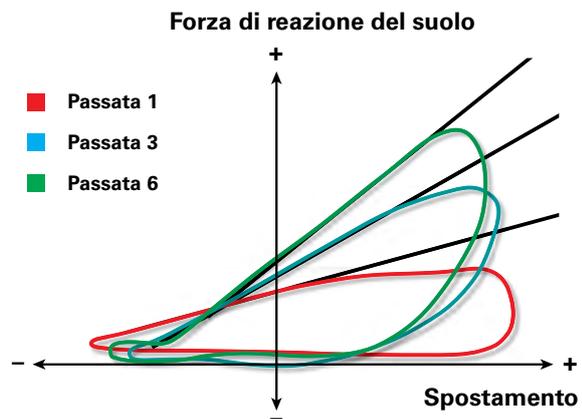
Nel definire le caratteristiche e le proprietà dei diversi tipi di suolo, gli ingegneri i progettisti si servono tipicamente di un certo numero di termini. La conoscenza di tali termini è essenziale per comprendere i principi e le tecniche di compattazione del suolo.

La **portanza** è la proprietà essenziale di una struttura stradale. In termini semplici, essa indica la capacità di una struttura di sostenere il carico cui è soggetta. La valutazione della portanza viene di solito effettuata eseguendo una compattazione di prova con un autocarro carico e osservando i solchi formatisi, oppure mediante prove di carico con piastre. Nel settore delle costruzioni stradali, per definire un target operativo di portanza si utilizzano tipicamente altre proprietà, come il modulo, la rigidità e la densità.

La **rigidità** di un materiale dotato di una data forma indica la sua capacità di resistere alla flessione sotto carico, e viene calcolata prendendo il quoziente fra la sollecitazione e lo spostamento. A differenza del modulo elastico, la rigidità non è una proprietà intrinseca del materiale del suolo. Essa è viceversa una caratteristica di una certa quantità, forma e composizione di un materiale del suolo, e indica l'entità della flessione sotto carico di tale sagoma del materiale. Proprio per questo motivo, la rigidità è ormai accettata come un modo valido di stimare la portanza di un suolo.



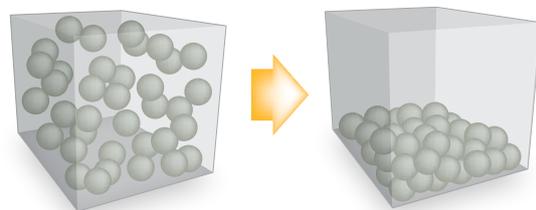
RIGIDITÀ



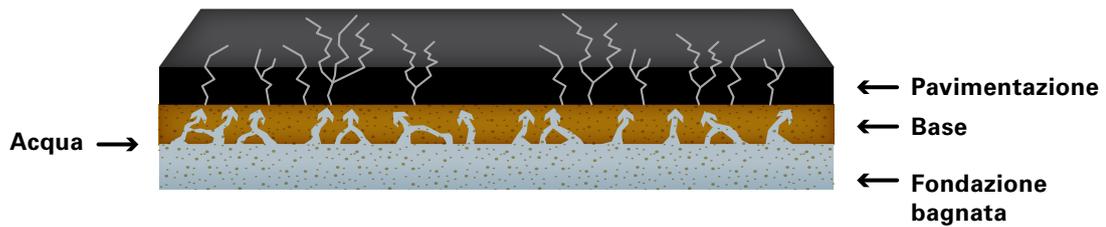
La rigidità del suolo aumenta al crescere della pendenza della curva.

La **densità** di un materiale è data dal rapporto fra la sua massa e il suo volume. La massima densità di un determinato materiale corrisponde al minimo volume che una massa di tale materiale è in grado di occupare. Essa corrisponde a uno stato privo di vuoti, vale a dire a una massa totalmente solida. I materiali del suolo vengono resi più densi compattandoli da un volume iniziale a uno inferiore. La densità è stata a lungo la proprietà standard utilizzata tradizionalmente dagli ingegneri per stimare la portanza; poiché l'aumento della densità non è associato a un pari aumento della resistenza alla flessione, e può causare fragilità o deterioramento dei materiali, la preminenza della densità come parametro primario di valutazione della portanza è diminuita. Si tratta comunque di una proprietà necessaria e affidabile, da utilizzare per determinate ipotesi sulle capacità di sostegno delle strade.

DENSITÀ



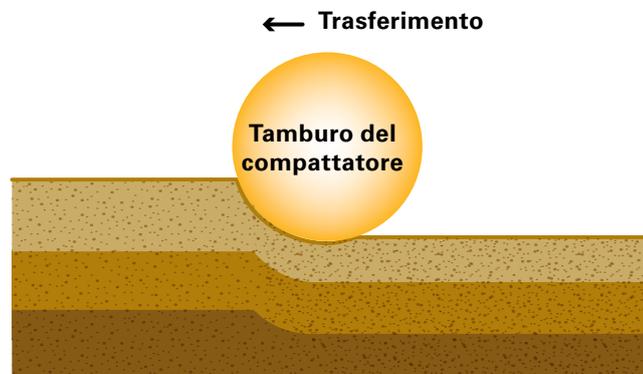
CAPILLARITÀ



La **capillarità** di un suolo indica la sua capacità di sospingere l'acqua verso l'alto o lateralmente. Una caratteristica desiderabile per il materiale di base utilizzato come strato intermedio fra la fondazione e la pavimentazione di una strada è la capacità di fungere da barriera capillare che impedisca all'acqua di risalire per capillarità dalla fondazione. Una base granulare permette inoltre il drenaggio dell'acqua dalla fondazione. L'acqua capillare è trattenuta nei pori o nei piccoli vuoti presenti nel suolo. Essa viene

considerata acqua libera, ma può essere estratta soltanto abbassando la falda freatica, applicando carichi elevati e costanti o per evaporazione. In assenza di una barriera capillare nella base, l'acqua imprigionata ammorbidisce e fa espandere la fondazione, dando origine a un supporto inadeguato della superficie stradale e a un deterioramento prematuro della strada.

COMPRESSIBILITÀ

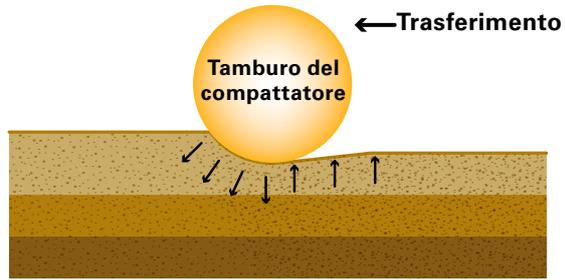


La **compressibilità** di un suolo indica il tasso di riduzione del suo volume per effetto di una forza applicata. I suoli con un'elevata compressibilità contengono particelle in grado di cambiare facilmente orientamento per ridurre lo spazio a disposizione dei vuoti contenenti aria o acqua. In condizioni bagnate, i suoli argillosi presentano di solito una maggiore compressibilità di quelli

granulari. La loro permeabilità è tuttavia inferiore; il drenaggio e la compressione dei suoli argillosi sono pertanto molto lenti. Quando i carichi vengono applicati rapidamente, come nel caso di quelli su ruote in movimento, la pressione dell'acqua all'interno dei suoli a grana fine aumenta, dando luogo a una maggiore compressibilità.

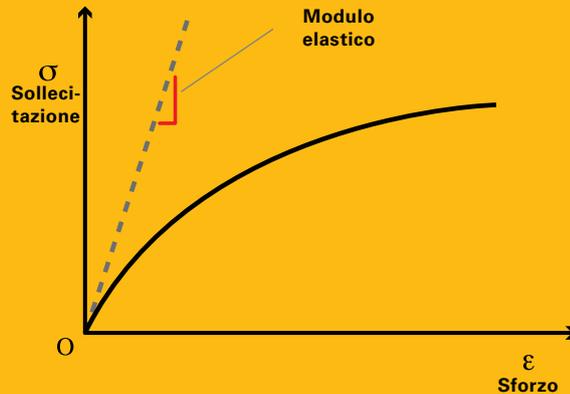
L'**elasticità** di un suolo indica la sua tendenza a deformarsi sotto l'azione dei carichi di compressione, ma in seguito a riprendere o quasi la forma originale quando tali carichi vengono rimossi. L'elasticità può risultare una caratteristica desiderabile dei suoli, ad esempio per sostenere carichi variabili senza accumulare deformazioni permanenti. Se il modulo elastico è troppo basso, le strade con basi o fondazioni molto elastiche possono fornire prestazioni scadenti, dando origine a sforzi elevati all'interno degli strati della pavimentazione. Per controllare il comportamento elastico dei suoli e della base si utilizza spesso una stabilizzazione chimica o meccanica. I suoli organici presentano di solito un'elasticità molto elevata ma un modulo elastico basso.

ELASTICITÀ



Modulo elastico

Questo valore viene calcolato prendendo il rapporto fra la sollecitazione applicata e il relativo sforzo del materiale del suolo. Il modulo elastico è considerato una caratteristica del campione specifico oggetto della prova, e può cambiare al variare della composizione del materiale del suolo. Esso viene spesso utilizzato come indicazione della portanza del materiale in questione. Lo spessore dello strato della pavimentazione si basa solitamente su una valutazione del modulo elastico sottostante.



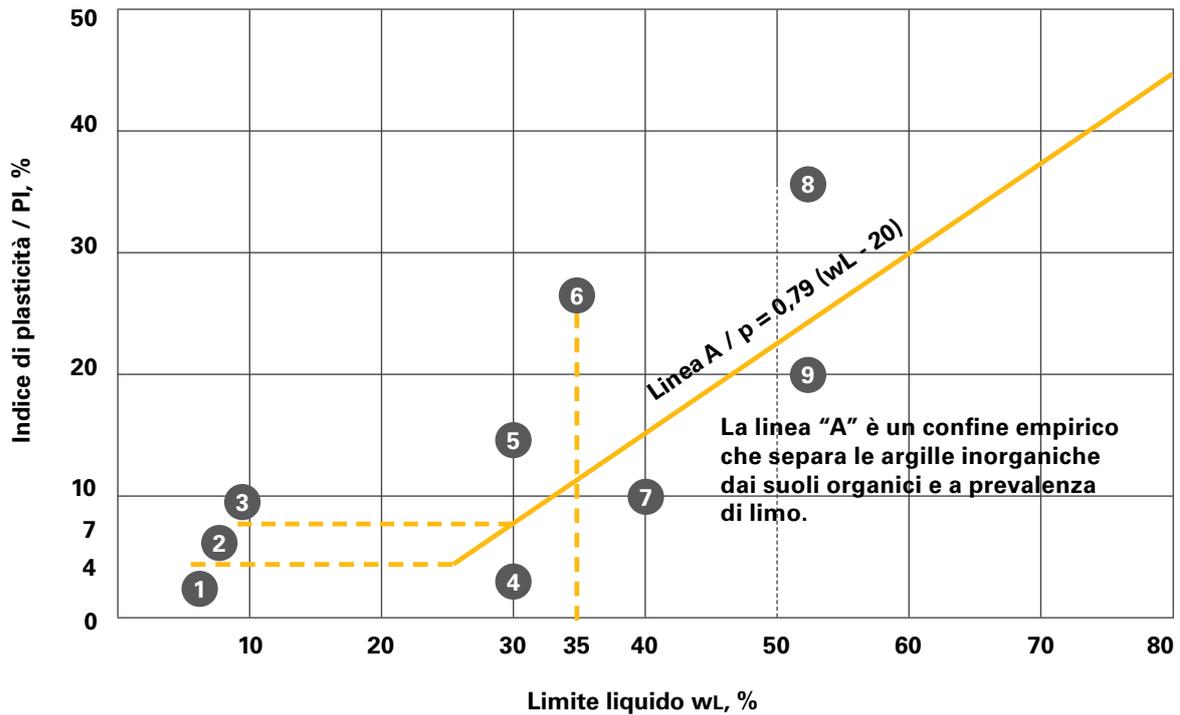
PERMEABILITÀ



La **permeabilità** indica la facilità con cui l'acqua scorre attraverso un suolo. Questo parametro è diverso dalla capillarità, che rappresenta la capacità di un suolo di assorbire l'acqua. La consistenza, la granularità e il grado di compattazione del suolo influiscono sulla sua permeabilità. Quest'ultima

è il parametro del suolo che presenta la massima variabilità, con valori che variano di oltre 10 ordini di grandezza. I suoli a grana grossa sono di solito più permeabili di quelli a grana fine, in quanto presentano vuoti più grandi fra le particelle.

PLASTICITÀ

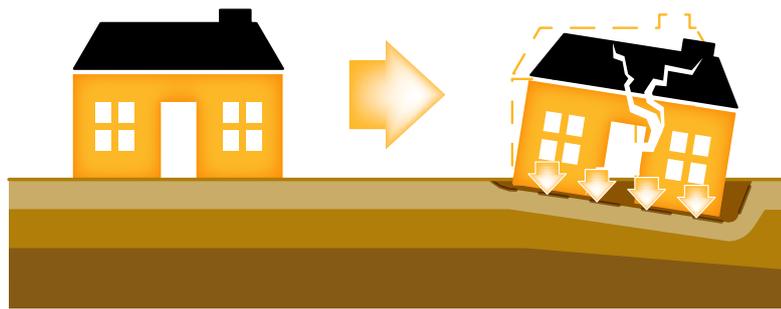


- | | |
|--------------------------------------|---|
| ① Miscela sabbia - limo | ⑥ Argille con una plasticità media |
| ② Intervallo intermedio | ⑦ Limo mescolato ad aggiunte organiche, limo organogenico e limo a media plasticità |
| ③ Miscela sabbia - argilla | ⑧ Argille con una netta plasticità |
| ④ Limo con una leggera plasticità | ⑨ Argille mescolate ad aggiunte organiche e tipi distinti di limo compressibile |
| ⑤ Argille con una leggera plasticità | |

La **plasticità** denota il grado di coesività e deformabilità di un suolo. Essa viene espressa tramite l'Indice di plasticità (PI, Plasticity Index). Molti suoli argillosi sono caratterizzati da un PI elevato, sono piuttosto compressibili e presentano

un alto livello di coesione. Un suolo con PI pari a zero è privo di coesione e non plastico. Sul PI di un suolo influisce anche il suo tenore di umidità.

ASSESTAMENTO

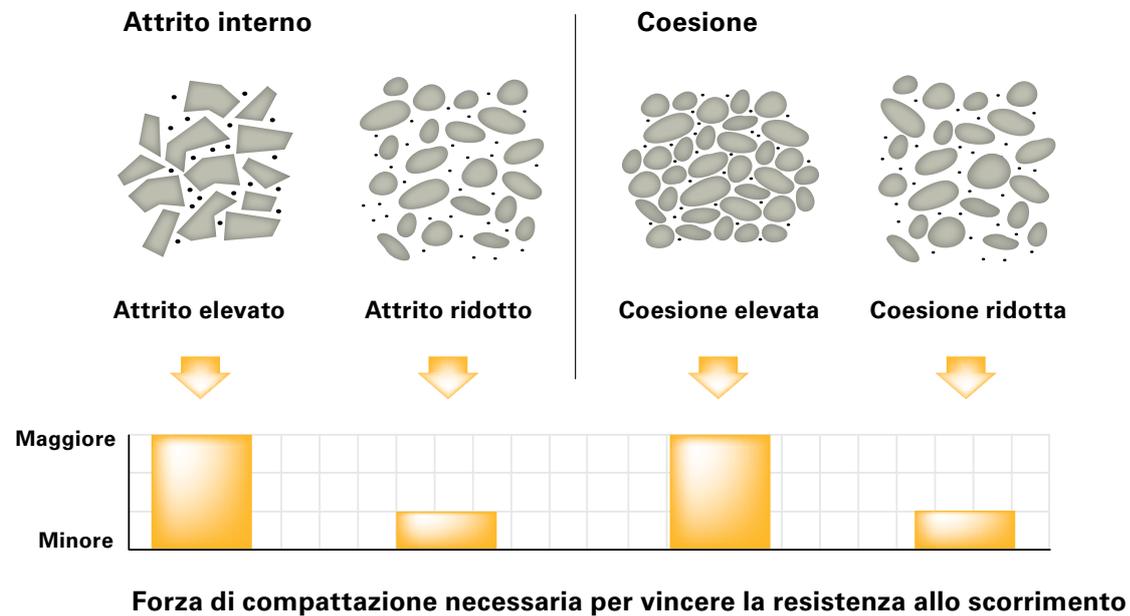


Assestamento

L'assestamento è il processo di riduzione dell'altezza di una superficie a causa del consolidamento del materiale di riempimento. Esso è spesso il risultato di una compattazione inadeguata. Con l'andar del tempo, le particelle

di un suolo sottoposto a una compattazione imperfetta si riorientano, causando una riduzione dello spazio disponibile per l'aria o l'acqua. Ne deriva un assestamento direttamente proporzionale alla riduzione del volume dei vuoti.

LA RESISTENZA ALLO SCORRIMENTO DIPENDE DA ...



La resistenza allo scorrimento misura la difficoltà con cui le particelle del suolo scorrono l'una rispetto all'altra quando viene loro applicata una forza, ad esempio di vibrazione o compattazione. La resistenza di un suolo allo scorrimento è prodotta dall'attrito interno (resistenza allo scivolamento delle particelle l'una sull'altra) e della coesione (attrazione

reciproca). Le particelle di forma irregolare presentano una resistenza allo scorrimento più elevata di quelle con una forma liscia e regolare. Al crescere della resistenza allo scorrimento, aumenta anche la forza di compattazione necessaria per raggiungere una data densità.

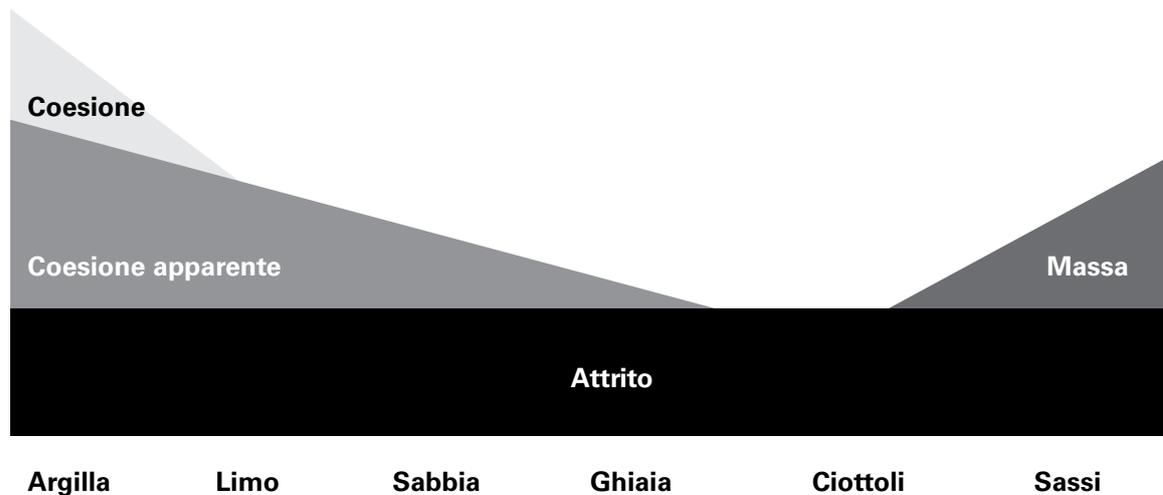
RITIRO



Un **ritiro o un'espansione visibili** indicano che il suolo è a grana fine, come l'argilla. Il ciclo di ritiro ed espansione è dovuto al rilascio e all'accumulo dell'umidità all'interno del suolo. I suoli che presentano questo tipo di comportamento

costituiscono fondazioni scadenti, perché le continue variazioni del volume possono causare cedimenti strutturali in edifici o pavimentazioni che necessitano di un supporto stabile.

COMPATTABILITÀ



Compattabilità: durante il processo di transizione di un suolo da uno stato sciolto a uno denso, la facilità o il tasso di compattazione sono spesso indicati con il termine "compattabilità". La compattabilità può essere quantificata calcolando la differenza fra la densità finale e quella iniziale e dividendola per la densità iniziale. Al crescere del rapporto di compattabilità, aumentano anche la facilità e la rapidità di variazione della densità per effetto dell'energia di compattazione applicata. Fra i fattori che influiscono sulla compattabilità del

suolo figurano la granulometria (i suoli con una buona granulometria tendono a presentare una maggiore compattabilità di quelli a granulometria discontinua), il tenore di umidità e la resistenza allo scorrimento (alla deformazione), nonché l'energia e il metodo di compattazione. La conoscenza dei fattori che contribuiscono all'aumento della compattabilità garantisce la scelta delle attrezzature corrette e lo svolgimento efficiente delle attività di compattazione.

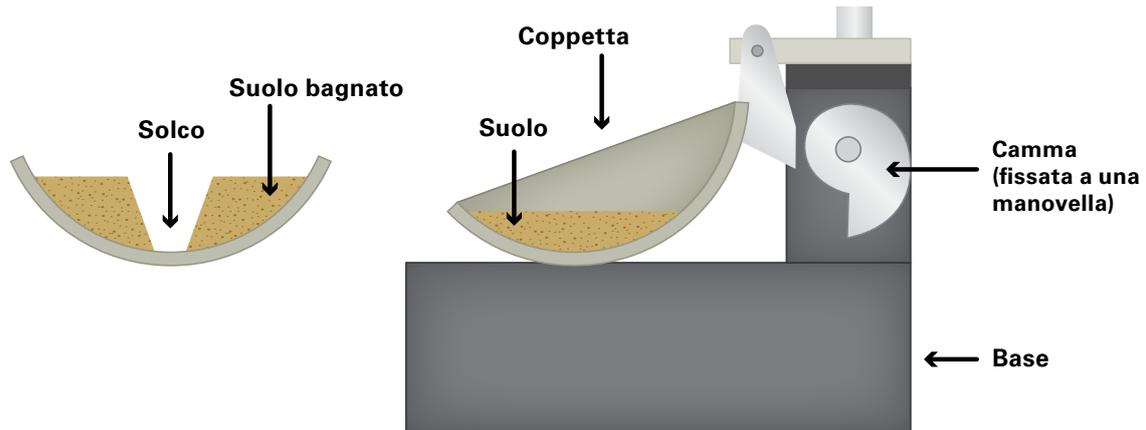
[LIMITI DEI SUOLI]

L'esame dei limiti dei suoli permette di comprendere meglio in quale misura il tenore di umidità influisce sulla compattabilità dei suoli coesivi (argillosi).

Il chimico svedese Albert Atterberg fu il primo a definire alcuni limiti per la consistenza del suolo,

vale a dire il limite liquido, il limite plastico, l'indice di plasticità e il limite di ritiro. Tali limiti, detti a volte Limiti di Atterberg, costituiscono la base per distinguere gli uni dagli altri i materiali altamente plastici, poco plastici e privi di plasticità.

PROVA DEL LIMITE LIQUIDO (LL)



Dispositivo semplice per prove del limite liquido

Limite liquido (LL)

Il tenore di umidità in corrispondenza del quale un suolo passa dallo stato plastico a quello liquido è detto Limite liquido. Ciò significa che è presente un livello di umidità sufficiente a vincere gli attriti interni e le forze di coesione.

Per determinare il limite liquido di un suolo è stata sviluppata una prova semplice. Collocare in una coppetta un campione umido del suolo da analizzare, appiattendolo in una qualche misura. Tracciare nel campione un solco profondo, quindi battere sul fondo della coppetta 10 - 30 volte osservando il comportamento del solco. Se la distanza fra le pareti di quest'ultimo non varia, prelevare il campione, aggiungere acqua e ripetere la procedura. Quando la distanza fra le pareti del solco si avvicinano per un tratto di 15 mm ($\frac{1}{2}$ "), il campione è diventato liquido in qualche misura e ha raggiunto il suo limite liquido.

Ai suoli con un'elevata compressibilità sono

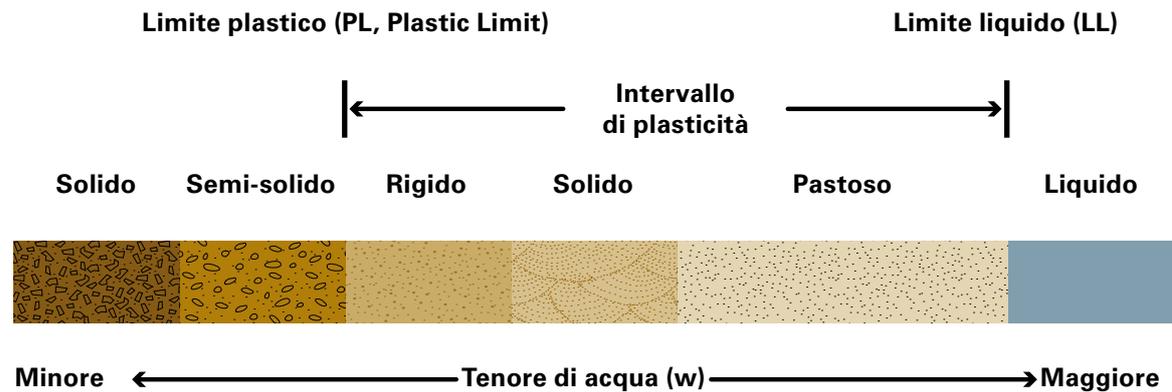
associati valori elevati di LL. Le argille hanno ad esempio valori elevati di LL, mentre i suoli sabbiosi sono caratterizzati da bassi valori di LL.

Limite plastico (PL, Plastic Limit)

Questa condizione corrisponde al punto in cui un suolo passa da uno stato semisolido a uno plastico. Tale transizione si verifica quando il suolo contiene una quantità di umidità appena sufficiente a permettere di arrotolarne una piccola quantità per formare un filo del diametro di circa 3 mm ($\frac{1}{8}$ ") senza romperlo.

Il PL di un suolo è importante perché indica il tenore di umidità in corrispondenza del quale le particelle scorrono l'una sull'altra, mantenendo tuttavia ancora una certa coesione. Si tratta del punto in cui si ottiene la massima compattazione di un suolo con un elevato tenore di argilla. Quando il tenore di umidità supera il valore corrispondente al limite plastico, la resistenza del suolo diminuisce rapidamente.

INDICE DI PLASTICITÀ (PI, PLASTICITY INDEX)



Indice di plasticità (PI, Plasticity Index)

Differenza fra i valori numerici del limite plastico e del limite liquido di un terreno. I suoli con un PI elevato sono piuttosto compressibili e presentano una coesione elevata. Quando il tenore di umidità è prossimo al valore corrispondente al limite liquido, il suolo presenta una coesione minima o nulla, mentre quando il tenore di umidità è prossimo al valore relativo al limite plastico la coesione è notevole. Il PI offre pertanto uno strumento per stimare la compressibilità e la coesione dei suoli.

Esso è inoltre correlato alla permeabilità: al crescere del PI quest'ultima diminuisce e, viceversa, al diminuire del PI la permeabilità aumenta. In molti progetti di costruzione su suoli con un elevato tenore di argilla, le specifiche prescrivono l'uso di un materiale con una determinata granulometria e valori massimi specifici di LL e PI.

Limite di ritiro (SL, Shrinkage Limit)

Quando viene essiccato al di sotto del limite plastico, il suolo si ritira e diventa fragile. Il limite di ritiro è il tenore di umidità in corrispondenza del quale cessano le variazioni del volume del campione. Il valore di SL rappresenta il livello di umidità ideale per compattare molti suoli non plastici (sabbiosi). La compattazione ideale dei suoli contenenti una quantità di argilla sufficiente per innalzare il PI si ottiene in corrispondenza di un valore compreso fra i limiti SL e PL.



Unità 2 TIPOLOGIE E CLASSIFICAZIONI DEI SUOLI

Ove possibile, le prove di laboratorio sul suolo rappresentano l'opzione migliore per classificare i suoli. Se tale via non è praticabile, è possibile eseguire una o più prove sul campo a supporto dell'identificazione dei suoli e della definizione di un approccio alla compattazione.



[SISTEMI DI CLASSIFICAZIONE DEI SUOLI]

Nel mondo vengono attualmente utilizzati vari sistemi di classificazione dei suoli. Tutti utilizzano i termini ghiaia, sabbia, limo e argilla, associandoli tuttavia a sistemi di numeri e lettere leggermente

diversi. Lo scopo delle classificazioni dei suoli consiste nel creare degli standard che permettano di identificare i medesimi e le loro caratteristiche tecniche.

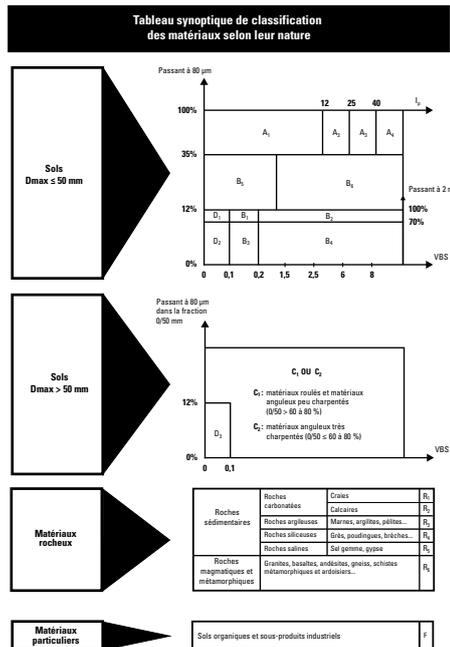
Sistema AASHTO di classificazione dei suoli – Il sistema di classificazione dei suoli dell'Associazione americana dei funzionari pubblici della viabilità e dei trasporti (AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials), ampiamente utilizzato, si basa sulle prestazioni sul campo dei suoli per costruzioni stradali. Tale sistema suddivide i materiali in sette gruppi principali con alcuni sottogruppi. I gruppi sono a loro volta riuniti in due categorie principali, vale a dire materiali granulari e materiali limo-argillosi.

| AASHTO CLASSIFICATION OF HIGHWAY SUBGRADE MATERIALS (with suggested subgroups) | | | | | | | | | | |
|---|---|-------|--------------|---------------------------------|-------|-------|--|--------|--------------|--------|
| General Classification | Granular Materials (35% or less passing #200) | | | | | | Silt-Clay Materials (more than 35% passing #200) | | | |
| | A-1 | | A-3 | A-2 | | | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 |
| Group Classification | A-1-a | A-1-b | | A-2-4 | A-2-5 | A-2-6 | A-2-7 | | A-7-5 | A-7-6 |
| Sieve Analysis Percent Passing: | | | | | | | | | | |
| # 10 | 0-50 | 0-50 | 51-100 | 0-35 | 0-35 | 0-35 | 0-35 | 38-100 | 38-100 | 38-100 |
| # 40 | 0-30 | 0-25 | 0-10 | | | | | | | |
| # 200 | 0-15 | 0-25 | 0-10 | | | | | | | |
| Characteristics of Fraction Passing #40: | | | | | | | | | | |
| Liquid Limit | | | N.P. | 0-40 | 41+ | 0-40 | 41+ | 0-40 | 41+ | 0-40 |
| Plasticity Index | 0-6 | | | 0-10 | 11+ | 0-10 | 11+ | 0-10 | 0-10 | 11+ |
| Group Index | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0-4 | 0-8 | 0-12 | 0-16 | 0-20 |
| Usual Types of Significant Constituent Materials | Stone Fragments Gravel and Sand | | Fine Sand | Silty or Clayey Gravel and Sand | | | Silty Soils | | Clayey Soils | |
| General Rating as Subgrade | Excellent to Good | | | | | | Fair to Poor | | | |

**Per le tabelle complete,
vedere l'appendice.**

Sistema francese di classificazione dei suoli

– Questo sistema suddivide i materiali in classi e sottoclassi sulla base di un'analisi meccanica di caratteristiche quali distribuzione dimensionale dei granuli, plasticità ed equivalente sabbioso.



Sistema tedesco di classificazione dei suoli –

La norma DIN 18196 suddivide tutti i materiali provenienti dal terreno e destinati alle costruzioni in gruppi basati sulle dimensioni delle particelle secondo la norma DIN 4022, sui rapporti di massa, sulla plasticità e sulla presenza di componenti organici e calcarei. In generale, le particelle grossolane e quelle fini vengono valutate in modo diverso, poiché le prime sono soggette a un criterio di distribuzione dimensionale, mentre le seconde a un criterio di plasticità.

| Hauptgruppe | Korngrößenanteil < 0,06 mm | Korngrößenanteil > 2,0 mm | Gruppe (allgemein) | Gruppe (detailliert) | Kurzzeichen, Gruppenzusatz |
|---------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------------|---|----------------------------|
| Cobblinger Boden | < 5 | < 40 | Kies | Enggestuhter Kies | GE |
| | | | | Mittelgestuhter Kies-Sand-Gemische | EW |
| | | | | Trennmaterial gemauhter Kies-Sand-Gemische | EL |
| Gesteiniger Boden | 5 bis 40 | < 40 | Sand | Enggestuhter Sand | SE |
| | | | | Mittelgestuhter Sand-Kies-Gemische | EW |
| | | | | Trennmaterial gestuhter Sand-Kies-Gemische | SL |
| | | | | 5 bis 15 Gew.-% < 0,06 mm | SU |
| | | | | 15 bis 40 Gew.-% < 0,06 mm | SU* |
| | | | | 5 bis 15 Gew.-% < 0,06 mm | ST |
| Feldsteiniger Boden | < 40 | – | Sand-Schluff | 5 bis 15 Gew.-% < 0,06 mm | ST* |
| | | | | 15 bis 40 Gew.-% < 0,06 mm | SU |
| | | | | 5 bis 15 Gew.-% < 0,06 mm | SU* |
| | | | | 15 bis 40 Gew.-% < 0,06 mm | ST |
| | | | | 5 bis 15 Gew.-% < 0,06 mm | ST* |
| | | | | 15 bis 40 Gew.-% < 0,06 mm | SL |
| Organischer Boden | < 40 | – | Schluff | Leichte plastische Tone W_LS | LS |
| | | | | Mittelschwere Schluffe W_S bis Sd | LSM |
| | | | | Leichte plastische Tone W_LS | TL |
| | | | | Mittelschwere Tone W_S bis Sd | TM |
| Organischer Boden | < 40 | – | Ton | Mittelschwere Tone W_S bis Sd | TS |
| | | | | Leichte plastische Tone W_LS | TL |
| | | | | Mittelschwere Tone W_S bis Sd | TM |
| | | | | Mittelschwere Tone W_S bis Sd | TS |
| Organischer Boden | < 40 | – | Nicht beanspruchbar und schwer | Organische Schluffe W_S bis Sd | OS |
| | | | | Organische Tone W_S bis Sd | OT |
| | | | | Erob bis gemischtschichtige Böden mit humosen Beimengungen | OH |
| | | | | Erob bis gemischtschichtige Böden mit kalkigen, kieseligen Beimengungen | OK |
| Organischer Boden | – | – | Brenn- und schwer | Nicht bis mäßig verwitterte Torfe | HN |
| | | | | Verwitterte Torfe | HT |
| Aufüllung | – | – | – | Müden (Faschlamme) | F |
| | | | | Auffüllung aus Fremdstoffen | A |

* Eine Auffüllung ist eine unter menschlicher Einwirkung entstandene Schüttung aus natürlichen Böden oder Fremdstoffen.

Sistema unificato di classificazione dei suoli –

Il sistema unificato di classificazione dei suoli (USCS, Unified Soil Classification System) è un metodo ampiamente utilizzato per la classificazione dei suoli nei progetti di costruzione. Questo sistema è stato sviluppato dal Genio militare dell'esercito degli Stati Uniti (U.S. Army Corps of Engineers) e dall'Agenzia USA per il risanamento (U.S. Bureau of Reclamation), e utilizza la consistenza come termine descrittivo.

| USCS SOIL CLASSIFICATION SYSTEM | | | |
|---------------------------------|-------------|-----------------------------------|----------|
| SOIL FRACTION | SYMBOL | SIZE RANGE | |
| Boulders | None | Greater than 12" | |
| Cobbles | None | 75 mm (3") to 12" | |
| 1- Coarse Grained Soils: | | | |
| Gravel | G | 75 mm (3") to #4 Sieve (4.25 mm) | |
| Course Gravel | | 75 mm to 19 mm | |
| Fine Gravel | | #4 Sieve to 19 mm | |
| Sand | S | #4 Sieve to #200 Sieve (0.075 mm) | |
| Course Sand | | | |
| Medium Sand | | | |
| Fine Sand | | | |
| 2- Fine Grained Soils: | | | |
| Fines | | Less than #200 Sieve | |
| Silt | M | Use Atterberg Limits | |
| Clay | C | Use Atterberg Limits | |
| 3- Organic Soils | | | |
| | O | Use Atterberg Limits | |
| 4- Peat | | | |
| | Pt | Visual Identification | |
| Gradation Symbols | | | |
| Well-graded | W | Liquid Limit Symbols | |
| Poorly-graded | P | High LL | H |
| | | Low LL | L |

Sistema britannico di classificazione dei suoli –

Il sistema di classificazione a norma britannica (BS, British Standard) è un protocollo per l'identificazione della composizione del suolo. Quest'ultimo viene anzitutto classificato come grossolano o fine in base alle dimensioni delle particelle. I suoli granulari vengono ulteriormente classificati utilizzando la distribuzione di tali dimensioni. I suoli fini vengono suddivisi in sottogruppi basati sui valori di plasticità.

| SOIL GROUPS | | SUB-GROUPS and in laboratory classification | | | |
|--|---|---|------------------|--|--------------|
| | | GROUP SYMBOL | SUB-GROUP SYMBOL | FINES % < 0,05 mm | LIQUID LIMIT |
| GRAVELS AND SANDS more than 75% of the material is finer than 4,75 mm | GRAVELS More than 75% of the material is finer than 4,75 mm | Slightly silty or clayey GRAVEL | G | GW | 0 to 5 |
| | | Silty GRAVEL | GF | GF | 5 to 15 |
| | | Clayey GRAVEL | GC | GC | 15 to 35 |
| | | Very silty GRAVEL | GM | GM | 15 to 35 |
| | | Very clayey GRAVEL | GC | GC | 15 to 35 |
| | | | | | |
| | SANDS More than 75% of the material is finer than 4,75 mm | Slightly silty or clayey SAND | S | SW | 0 to 5 |
| | | Silty SAND | SM | SM | 5 to 15 |
| | | Clayey SAND | SC | SC | 15 to 35 |
| | | Very silty SAND | SM | SM | 15 to 35 |
| | | Very clayey SAND | SC | SC | 15 to 35 |
| | | | | | |
| FINE GRAINED SOILS more than 75% of the material is finer than 0,075 mm | GRAVELS AND SANDS More than 75% of the material is finer than 0,075 mm | Gravelly SILT | MG | MCL, etc. | < 35 |
| | | Gravelly CLAY | CG | CL, etc. | 35 to 70 |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | CLAYS AND SILTS More than 75% of the material is finer than 0,075 mm | Sandy SILT | MS | MCL, etc. | < 35 |
| | | Sandy CLAY | CS | CL, etc. | 35 to 70 |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| ORGANIC SOILS | | Description letter 'O' suffixed to any group or sub-group symbol | | Organic matter in significant amount e.g. MHO - organic silts of high LL | |
| PEAT | | Pt - consists predominantly of plant remains (fibrous or amorphous) | | | |

Classification v.1.00 Sept 2010

Primary Letter
 G = Gravel
 S = Sand
 M = Silt
 C = Clay
 O = Organic Soil
 Pt = Peat

Secondary Letter
 W = Well graded
 P = Poorly graded
 M = With non-plastic fines
 C = With plastic fines
 L = Of low plasticity (LL < 50)
 H = Of high plasticity (LL > 50)

[CLASSIFICAZIONE DEL SUOLO SUL CAMPO]

I sistemi di classificazione necessitano di misurazioni di laboratorio come l'analisi al vaglio o la prova dell'Indice di plasticità. Quando non sono disponibili strutture di laboratorio complete,

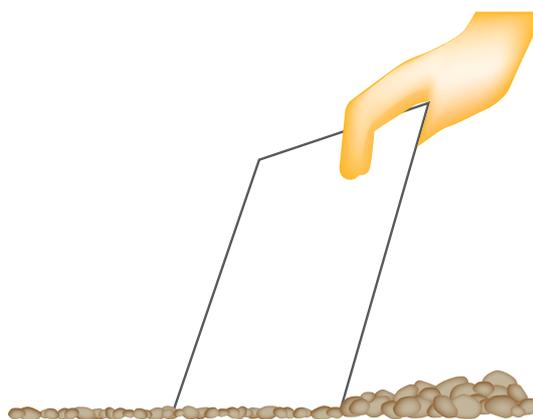
per classificare i diversi suoli è tuttavia possibile utilizzare alcune semplici prove sul campo al fine di determinare caratteristiche quali granulometria, plasticità e dispersione.

Granulometria /distribuzione delle particelle – Per eseguire una prova di granulometria di un suolo secco, spargere un campione del medesimo su una superficie piatta. Utilizzare quindi un pezzo di carta rigida o cartone come un rastrello per separare e mettere da parte le particelle di suolo più grandi. Stimare la percentuale di particelle di dimensioni superiori a 5 mm (3/16") e quella di materiali fini (troppo piccoli affinché i singoli granuli siano visibili a occhio nudo). Stimare inoltre se le particelle più grandi hanno dimensioni uniformi (granulometria insufficiente) oppure grandi, medie e piccole (buona granulometria).

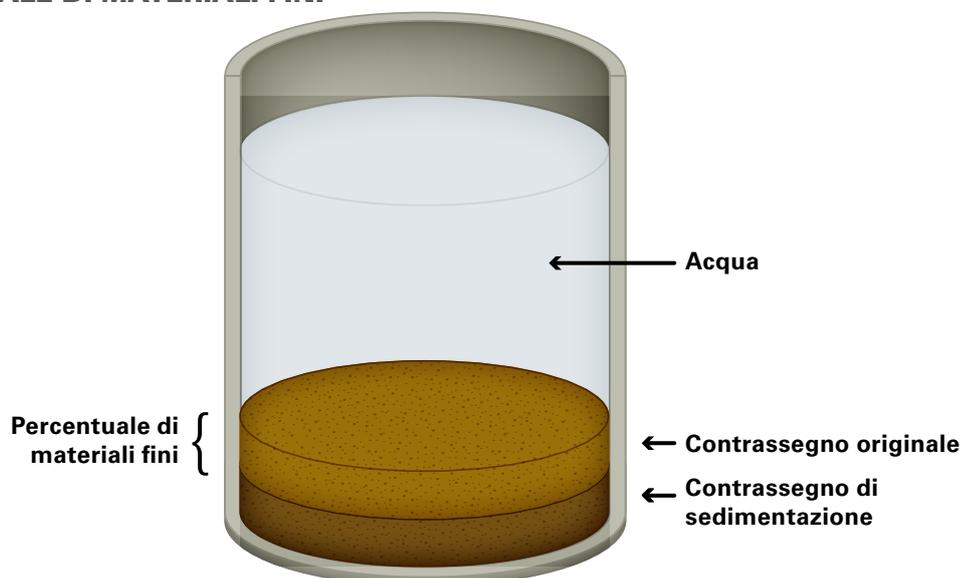
Se il suolo è bagnato, staccarne un grumo con una matita e stimare le percentuali secondo il metodo relativo al suolo secco. Per determinare la percentuale di materiali fini, introdurre in un bicchiere trasparente 3 mm (1/8") di acqua. Aggiungere quindi una quantità di suolo sufficiente per riempire il bicchiere fino a 1/4. Aggiungere acqua fino a coprire appena il suolo.

Contrassegnare tale livello con un elastico. Riempire il vaso fino a 3/4 con acqua e agitare energicamente la miscela ottenuta. Lasciare quindi sedimentare quest'ultima per circa un minuto e mezzo e contrassegnare l'altezza del suolo separatosi per sedimentazione. La differenza fra i due contrassegni indica la percentuale di materiali fini.

PROVA GRANULOMETRICA

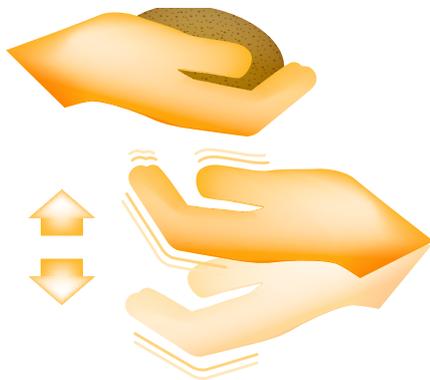


PERCENTUALE DI MATERIALI FINI



Plasticità dei suoli a grana fine – Per stimare la plasticità di un suolo è possibile eseguire una o più prove sul campo.

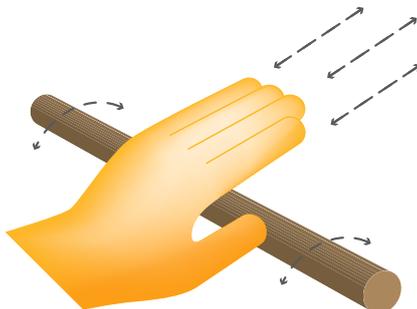
PROVA DI SCUOTIMENTO



- **Prova di scuotimento** – Prelevare un grumo di suolo a grana fine e impastarlo tutto insieme eliminando il maggior numero possibile di particelle a grana grossa. Aggiungere gradualmente acqua e impastare il suolo fino a quando inizia a diventare appiccicoso. Tenere la pallina di suolo sul palmo di una mano e battere sul dorso della stessa con le dita dell'altra mano.

Se diventa lucida e bagnata in superficie, la pallina è composta prevalentemente da sabbia o limo. Le argille non presentano quasi nessuna reazione a questa prova, e diventano semplicemente disordinate.

PROVA DI TENACIA

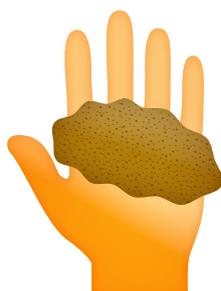


- **Prova di tenacia** – Prendere circa metà della pallina di suolo e impastarla fra il pollice e la punta delle altre dita per asciugarla. Provare quindi a formare con il campione di suolo un filo o un "vermicello". Se non si riesce in alcun modo a formare il vermicello, il suolo è sicuramente costituito da limo o sabbia fine. I suoli con un'elevata plasticità impiegano molto tempo ad asciugare. Essi diventano duri e cerosi, e occorre una notevole pressione per formare un vermicello, che tende inoltre a spezzarsi quando raggiunge un diametro di 3 mm (1/8").

- **Prova di resistenza a secco** – Prendere l'altra metà della pallina di suolo e impastarla formando una sferetta. Metterla da parte e lasciarla asciugare all'aria. Quando il suolo è secco, frantumarlo e selezionare un frammento frastagliato e appuntito. Provare a frantumare tale frammento fra il pollice e l'indice. Il limo si polverizza facilmente. L'argilla risulta dura come una pietra e quasi impossibile da frantumare con le dita.

- **Lavaggio delle mani** – Dopo avere maneggiato materiali a prevalenza di limo e sabbia, le dita sembrano impolverate e si puliscono quasi del tutto sfregandole le une con le altre. Un leggero flusso d'acqua è sufficiente per risciacquare e rimuovere il suolo. Quando si manipolano le argille, sulle dita si forma una crosta che una volta asciutta è impossibile da rimuovere semplicemente strofinandola. La crosta non viene rimossa neppure dall'acqua. Per pulirsi le mani occorre strofinarle l'una con l'altra sotto l'acqua.

PROVA ALLA MANO



- **Prova alla mano** – Prelevare una manciata di suolo, schiacciarlo e poi aprire la mano. Se è polveroso e non mantiene la forma conferitagli dalla mano, il suolo è troppo secco. Se si sbriciola lasciandolo cadere, è troppo secco. Il suolo contiene la quantità di umidità giusta per una compattazione corretta quando è possibile conferirgli una forma e si spezza in pochi frammenti se lo si lascia cadere. Se il suolo risulta plastico fra le mani, lascia tracce di umidità sulle dita e non si spezza quando viene lasciato cadere, il suo tenore di umidità è eccessivo per la compattazione.

TIPOLOGIE

- **Prova di dispersione** – Oltre alle prove sul campo appena descritte, è possibile utilizzare la prova di dispersione per determinare le percentuali delle varie dimensioni dei granuli del suolo e ricavare un'indicazione della difficoltà di compattazione del medesimo. Occorrono semplicemente un bicchiere trasparente, dell'acqua e un campione di suolo rappresentativo.

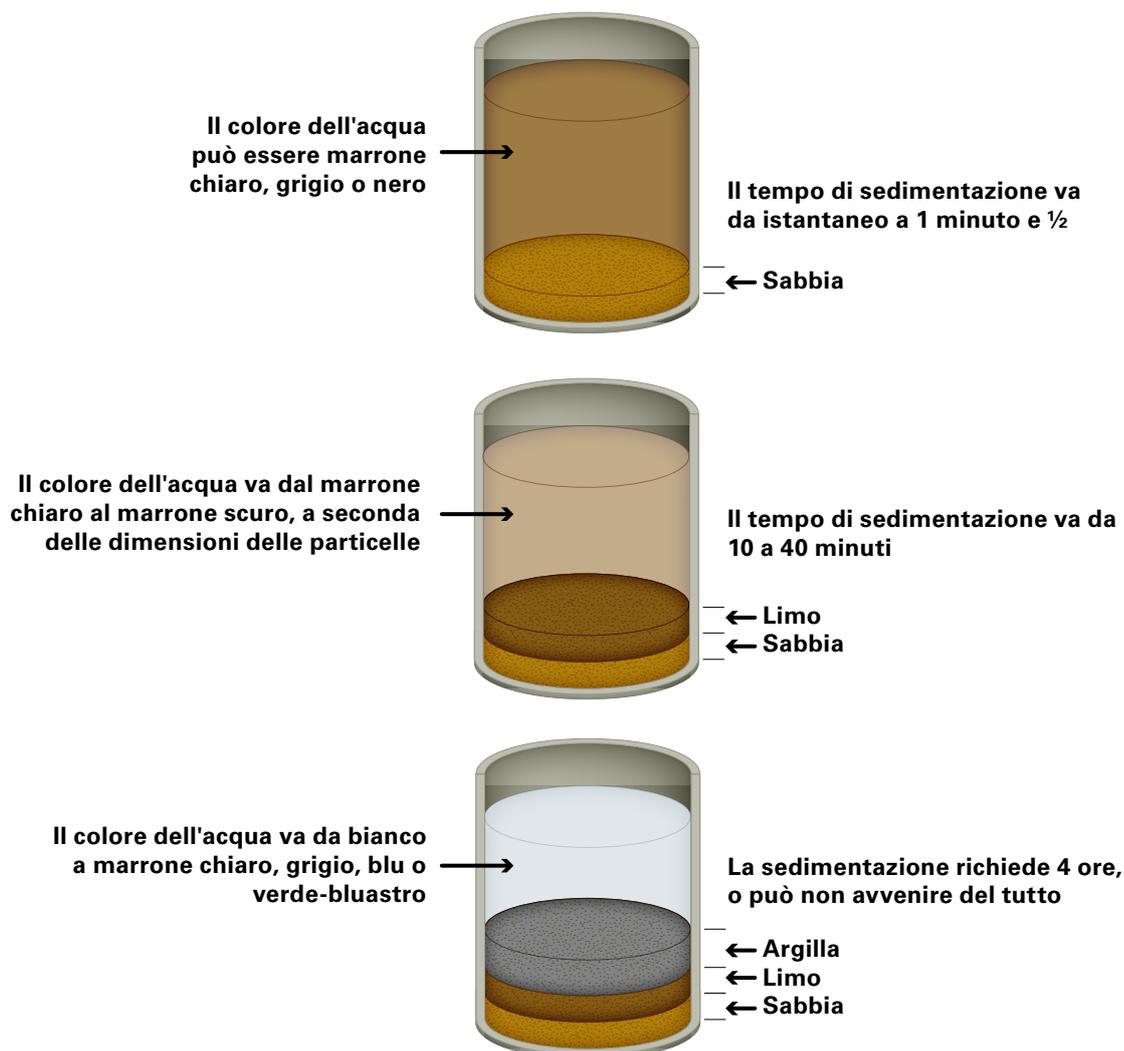
Riempire il bicchiere fra 1/4 e 1/3 con il materiale, quindi aggiungere acqua fino a 15 mm (1/2") dalla sommità. Agitare bene la miscela e osservare il modo in cui il materiale sedimenta.

Il materiale si deposita in tre strati distinti. La sabbia al fondo, quindi il limo e infine l'argilla. Oltre a evidenziare i vari gruppi, i risultati indicano se il suolo presenta una granulometria

buona o insufficiente. Anche se le particelle di limo e argilla sono invisibili a occhio nudo, le differenze di colore permettono di rilevare le variazioni della granulometria. Le particelle sono inoltre tanto più piccole quanto più è lungo il tempo di sedimentazione.

La prova di dispersione permette di ricavare varie informazioni. Essa rivela i materiali costituenti e la loro granulometria, mentre il tempo di sedimentazione indica quanto sono fini le loro particelle. Rispetto a un materiale con buona granulometria e particelle di ogni dimensione, la presenza di particelle di un'unica taglia (granulometria insufficiente) e di piccole dimensioni denota nella maggior parte dei casi un materiale da costruzione meno stabile. Un materiale di tale genere è difficile da compattare, perché i granuli si spostano continuamente sotto le macchine.

PROVA DI DISPERSIONE



[RIEPILOGO DELLE PROVE SUL CAMPO]

| Tipi di suolo | Descrizione |
|---|---|
| Argilla | Nessuna reazione alla prova di scuotimento; vermicello ruvido, che si asciuga lentamente; residuo crostoso, secco e difficile da rimuovere dalle mani. |
| Limo | Reazione rapida alla prova di scuotimento; vermicello fragile o prono a sbriciolarsi; residuo polveroso e facile da rimuovere dalla mani strofinandole o lavandole. |
| Miscele di limo e argilla | Reazioni intermedie o contraddittorie alle prove alla mano. |
| Sabbia o ghiaia con argilla fine | Argilla sufficiente a sporcare le mani se si impasta un campione bagnato, ma insufficiente per consentire la formazione di un grumo di argilla. |
| Sabbia o ghiaia con materiali fini di limo | Qualunque miscela contenente materiali fini polverosi o alquanto sabbiosi. |
| Sabbia e ghiaia pulite | L'acqua aggiunta a questi suoli si accumula rapidamente sul fondo senza formare fango di alcun genere. |
| Pietrisco o sfasciumi | Materiale frastagliato con una quantità di elementi di minori dimensioni insufficiente per riempire i vuoti. |





Unità 3 FISICA DELLA COMPATTAZIONE

Per rispettare le specifiche relative alla densità del suolo nel modo più vantaggioso sotto il profilo economico, è essenziale comprendere la fisica della compattazione dei vari tipi di suolo, gli effetti prodotti dalle varie macchine e le loro capacità di compattazione.



[FATTORI CHE INFLUISCONO SULLA COMPATTAZIONE MEDIANTE UN APPARATO VIBRANTE]

La compattazione del suolo mediante un apparato vibrante è un processo articolato. Sull'energia complessiva di compattazione influiscono numerosi fattori distinti, di cui occorre tenere conto nella loro totalità, non individualmente. A determinare l'energia di compattazione è infatti la combinazione di caratteristiche del compattatore e del suolo su cui il medesimo agisce. Le specifiche di progetto determinano inoltre l'adeguatezza o meno dell'energia di compattazione. I fattori o le

caratteristiche che influiscono sulla compattazione mediante un apparato vibrante possono essere suddivisi in tre categorie, vale a dire:

1. Caratteristiche associate al materiale e al cantiere
2. Caratteristiche associate alle specifiche del progetto
3. Caratteristiche associate alle macchine

Caratteristiche associate al materiale e al cantiere

- **Tipo di suolo** – Ogni tipo di suolo possiede caratteristiche di compattazione uniche nel suo genere; i suoli più difficili da compattare richiedono compattatori più pesanti.
- **Granulometria** – La granulometria di un materiale è data dall'intervallo di dimensioni delle particelle presenti. In linea di principio vi sono quantità simili di granuli di tutte le dimensioni, senza che alcuna di esse predomini.
- **Uniformità** – I materiali del terreno sono miscele di molti tipi di suolo e dimensioni delle particelle. L'uniformità può essere considerata un'indicazione della misura in cui tutti i materiali compositi sono ben mescolati e distribuiti uniformemente all'interno del terreno. Un suolo uniforme si presenta come una miscela omogenea e si compatta in modo coerente, mentre uno privo di uniformità manifesta una compattazione incoerente.

Nella meccanica dei terreni, il coefficiente di uniformità (C_u) è un parametro che descrive la distribuzione delle dimensioni delle particelle di un suolo (curva granulometrica). Esso fornisce informazioni sull'uniformità di tale distribuzione. La norma DIN EN ISO 14688-2:2004 definisce il coefficiente C_u come il rapporto fra il diametro d_{60} del vaglio, corrispondente a una percentuale passante del 60 per cento, e il diametro d_{10} , corrispondente a una percentuale passante

CALCOLO DEL COEFFICIENTE DI UNIFORMITÀ

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

Il valore di C_u permette di affermare quanto segue riguardo al suolo:

$C_u < 5$ = suolo uniforme

$C_u 5 - 15$ = suolo non uniforme

$C_u > 15$ = suolo con estrema disuniformità

del 10 per cento. Tale rapporto rappresenta la pendenza della curva delle dimensioni dei granuli nell'intervallo compreso fra una percentuale passante del 10 per cento e una del 60 per cento (attraverso il vaglio).



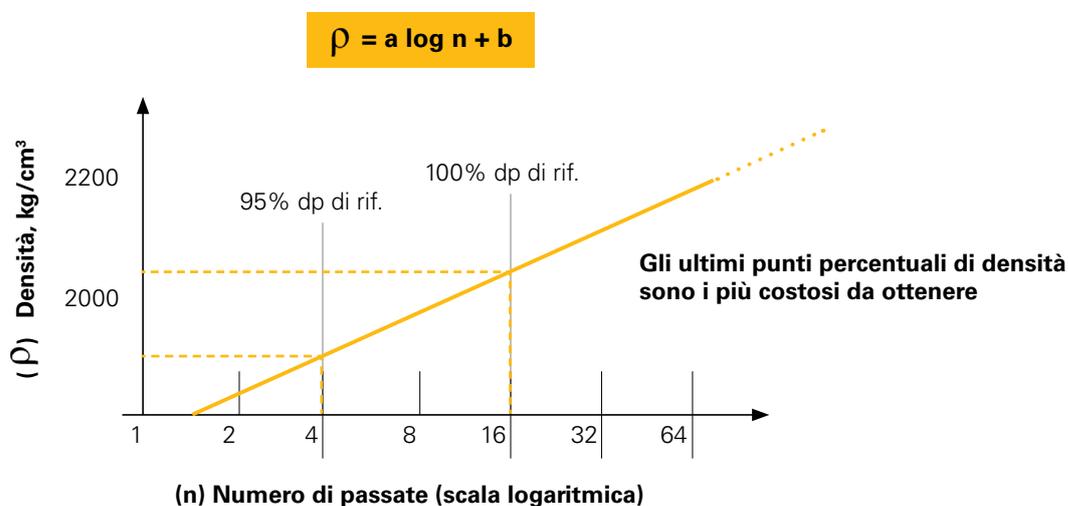
- **Consistenza** – I singoli tipi di suolo possiedono consistenze superficiali diverse, che influiscono sulle caratteristiche di compattazione del materiale. I suoli con una consistenza grossolana presentano un attrito elevato fra le particelle; il compattatore deve pertanto erogare un'energia maggiore per allentare i legami fra le stesse e consentire loro di riposizionarsi in uno stato più denso. Le particelle con una consistenza liscia scorrono più facilmente le une sulle altre, e per compattarle occorre un'energia inferiore.
- **Forma dei granuli** – Come la consistenza, anche la forma delle particelle può influire sulla compattazione di un suolo. Le forme frastagliate tendono a presentare maggiori legami di attrito, e richiedono una maggiore energia di compattazione. Le forme lisce e arrotondate scorrono più facilmente con un'energia di compattazione inferiore.
- **Densità iniziale** – I materiali con una maggiore densità iniziale richiedono un'energia di compattazione inferiore rispetto a quelli con una minore densità. Ciò influisce sulla produttività,

in quanto i materiali meno densi possono richiedere un maggior numero di passate.

- **Tenore di umidità** – L'umidità è il più importante fattore singolo di cui tenere conto durante la compattazione di un suolo. Se l'umidità è insufficiente le particelle non aderiscono l'una all'altra, mentre se è eccessiva esse si spostano facilmente. Per ogni tipo di suolo esiste un tenore di umidità ideale (definito mediante una prova Proctor) per una compattazione ottimale.
- **Caratteristiche di resistenza dell'aggregato** – Ogni tipo di suolo possiede una diversa resistenza alla compressione, che dipende dal modo in cui si è formato l'aggregato.
- **Base sottosuolo e sua capacità di sostegno** – La solidità e la resilienza di una struttura non possono essere superiori a quelle delle fondazioni che la sostengono. Se il sottosuolo non è in grado di sostenere una strada, è probabile che la compattazione degli strati di base e di sottobase risulti difficile. È possibile migliorare i suoli inadatti mediante una stabilizzazione chimica o meccanica.

IL COSTO DELLA DENSITÀ

La densità aumenta al crescere del numero di passate



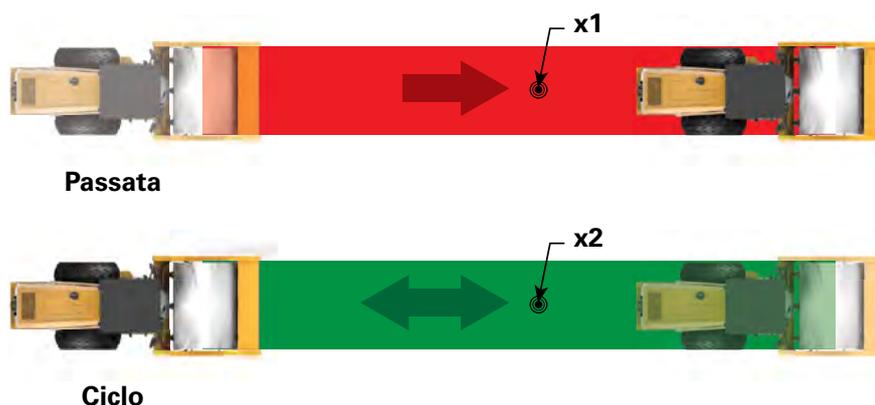
Caratteristiche associate alle specifiche del progetto

- **Target di compattazione** – Questo valore viene di solito definito eseguendo una prova Proctor standard o modificata, e viene specificato sotto forma di percentuale del massimo peso specifico secco ricavato da tale prova - nell'esempio, il 95 per cento del risultato di quella standard. In generale, al crescere del target di compattazione il numero di passate

richieste aumenta. Gli ultimi punti percentuali di compattazione sono sempre i più difficili da ottenere.

- **Spessore dello strato** – Quando si utilizza un compattatore di una determinata taglia, lo spessore dello strato influisce sulla produttività. Uno strato spesso richiede infatti più passate di uno sottile.

NUMERO DI PASSATE



- **Numero di passate** – Questo valore indica il numero di passaggi di un compattatore su una superficie del terreno. Caterpillar definisce “passata” un singolo passaggio su un’area, a marcia avanti o in retromarcia, e “ciclo” un insieme formato da due passate consecutive su un’area, di solito una a marcia avanti e una in retromarcia.

La conoscenza del numero di passate può essere importante, specialmente nel caso delle aree che non soddisfano le specifiche di compattazione. Se un cantiere riceve la medesima copertura (numero di passate), e

un’area non soddisfa le specifiche mentre tutte le altre sì, conoscere il numero di passate può aiutare a ridurre il novero delle cause possibili.

Nei casi in cui viene utilizzata una specifica di metodo, il numero di passate (con un compattatore di dimensioni appropriate su uno strato di spessore e composizione prescritti) viene specificato. In questi casi gli ingegneri hanno stabilito, basandosi sull’esperienza acquisita in precedenza, che il numero di passate in questione è sufficiente per raggiungere il target di compattazione.

Caratteristiche associate alle macchine

La configurazione della macchina è importante per la dinamica della compattazione. Fra i principali fattori figurano le dimensioni del telaio, il peso complessivo, il passo, il rapporto fra il peso della macchina che grava sul tamburo anteriore e quello sostenuto dalle ruote, e la distribuzione del peso della macchina fra il lato destro e quello sinistro della stessa. L’elenco prosegue con fattori quali il diametro, la lunghezza e la massa del tamburo, gli ammortizzatori, la massa del peso eccentrico e la distanza fra il suo baricentro e l’assale del tamburo. Influenzano le prestazioni dei compattatori anche il peso del carburante e dell’operatore. Nel progettare ogni macchina, il costruttore presta grande attenzione a tutti questi fattori.

La compattazione mediante un apparato vibrante comporta l’uso di un tamburo (peso statico) che si muove molto rapidamente (frequenza) verso l’alto e verso il basso (ampiezza) mentre avanza (velocità di lavoro) su un materiale non omogeneo. Frequenza,



ampiezza e velocità di lavoro sono ovviamente variabili sotto il controllo dell’operatore. Esse vengono illustrate in una parte successiva dell’unità 3.

L'esistenza di tutte queste variabili fa sì che non sia sempre facile configurare un compattatore per un dato lavoro in modo da ottenere risultati di compattazione ideali. L'obiettivo della compattazione mediante un apparato vibrante consiste nell'individuare un punto di massimo della

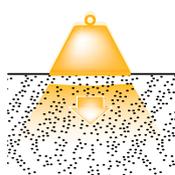
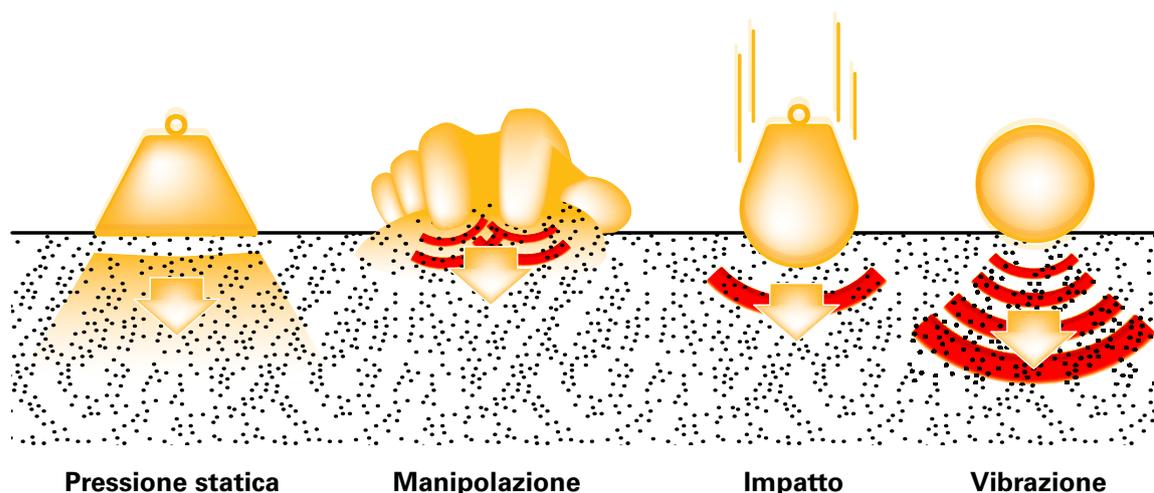
forza trasmessa al materiale da compattare. Ciò si verifica quando la somma di tutti i fattori, vale a dire caratteristiche del materiale e del compattatore, ampiezza, frequenza e velocità, contribuisce in modo ottimale all'opera di compattazione richiesta per rispettare le specifiche del progetto.

[**FATTORI CHE INFLUISCONO SULLA COMPATTAZIONE MEDIANTE UN APPARATO VIBRANTE**]

Si definisce compattazione il processo di compressione di un materiale da un dato volume a uno minore. Tale risultato viene raggiunto applicando una forza e un movimento a un'area di contatto, in modo da spezzare i legami naturali fra le particelle presenti all'interno del materiale, consentendo loro di avvicinarsi le une alle altre. Il materiale contenuto negli spazi vuoti presenti fra le particelle, vale a dire aria, acqua o una combinazione delle due, viene

espulso mediante una combinazione di forza e movimento. Nella compattazione vengono utilizzate quattro forze:

1. **Pressione statica**
2. **Manipolazione**
3. **Impatto**
4. **Vibrazione**



Pressione statica – Nella compattazione statica, la pressione esercitata dal peso del compattatore produce nel suolo sollecitazioni di scorrimento che fanno scivolare le particelle le rispetto alle altre. Si ottiene una

compattazione quando la forza esercitata causa la rottura dei legami naturali fra le singole particelle, che si riorientano raggiungendo una posizione più stabile. Tale forza di compattazione ha un effetto più marcato sui materiali superficiali e a bassa profondità. L'effetto è invece minimo sugli strati più profondi del suolo.

Per confrontare il potenziale di compattazione dei compattatori a tamburo liscio statico, nel settore si utilizza un parametro detto carico statico lineare. Le sollecitazioni di scorrimento necessarie per la compattazione sono prodotte dalla forza verticale che si esercita direttamente al di sotto del tamburo, su tutta la sua larghezza. Il carico in questione si calcola dividendo il peso a livello del tamburo (carico dell'assale) per la larghezza del tamburo stesso. Il carico statico lineare è espresso in chilogrammi per centimetro lineare (kg/cm) o libbre per pollice lineare (lb/in). I compattatori con un carico lineare più elevato hanno un potenziale di compattazione e una profondità di influenza maggiori.

CARICO STATICO LINEARE

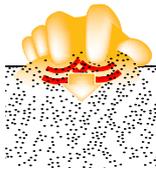


| Carico statico lineare | |
|--|--|
| Compattatori vibranti monotamburo | |
| 5 - 8 tonnellate | 16 - 22 kg/cm (90 - 120 lb/in) |
| 8 - 12 tonnellate | 20 - 30 kg/cm (100 - 200 lb/in) |
| 12 - 15 tonnellate | 30 - 45 kg/cm (180 - 250 lb/in) |
| > 15 tonnellate | > 45 kg/cm (> 250 lb/in) |
| Compattatori gommati | 1000 - 3200 kg/ruota (2200 - 7000 lb/ruota) |

Nel caso dei compattatori statici a tamburo artigliato, con artigli per costipamento e a piede di montone, il valore della pressione esercitata cambia continuamente al variare del numero e della superficie delle punte a contatto con il terreno. Sul calcolo può inoltre influire la profondità di penetrazione. La pressione esercitata dalle facce degli artigli è espressa in chilogrammi al centimetro quadrato (libbre al pollice quadrato).

La compattazione statica viene utilizzata nelle applicazioni in cui occorre un'azione delicata, per la presenza di edifici nelle vicinanze, di materiali fragili o di superfici con una portanza ridotta, nonché in quelle in cui una forza di compattazione eccessiva potrebbe richiamare in superficie l'acqua libera.





Manipolazione – La manipolazione è una forma di compattazione mediante un processo di lavorazione a impasto che riordina le particelle per formare una massa più densa. Tale processo è particolarmente efficace a livello della superficie dello strato di materiale. Le azioni di impasto longitudinale e trasversale sono essenziali quando si compattano suoli con una forte stratificazione, come quelli di tipo argilloso. I compattatori a piede di montone e quelli gommati con ruote sfalsate sono studiati specificamente per fornire questo tipo di forza di compattazione.

La forza di manipolazione esercitata dai compattatori gommati è il risultato di due fattori, vale a dire la pressione di contatto e il carico per ruota. La regolazione di uno di essi modifica le prestazioni del compattatore.



La compattazione mediante manipolazione è utile per creare superfici ben sigillate, che aiutano il materiale a resistere agli effetti dell'acqua e degli agenti atmosferici.

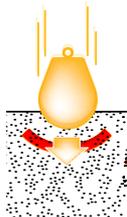
FORMULA DELLA PRESSIONE DI CONTATTO

$$\text{PRESSIONE DI CONTATTO} = \frac{\text{Carico per ruota (kg)}}{\text{Superficie di contatto degli pneumatici (cm}^2\text{)}}$$

kg/cm²: bar

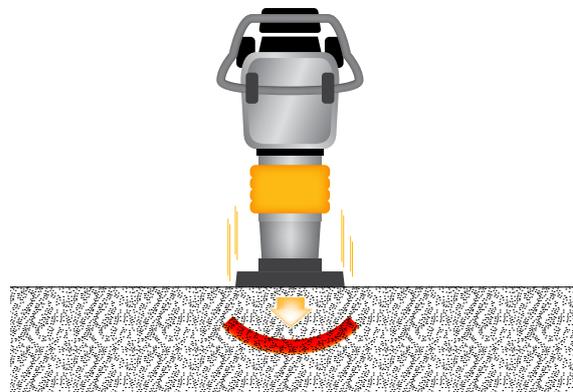
$$\text{CARICO PER RUOTA} = \frac{\text{Peso operativo del compattatore}}{\text{Numero di ruote}}$$

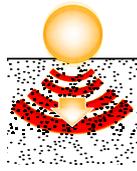
kg



Impatto – Gli impatti generano una forza di compattazione superiore a quella gravitazionale derivante dai carichi statici. Ciò è dovuto al fatto che una massa in movimento ha una velocità che viene convertita in energia al momento dell'impatto. Ogni impatto crea un'onda di

pressione che penetra nel terreno partendo dalla superficie. Gli impatti sono di solito dovuti a una serie di colpi. Quelli con una cadenza di 50 - 600 colpi al minuto sono considerati a bassa frequenza, e vengono utilizzati nei martelli pneumatici e nei tamper manuali. Gli impatti con una cadenza di 1400 - 3000 colpi al minuto sono ad alta frequenza e vengono utilizzati nei compattatori vibranti.





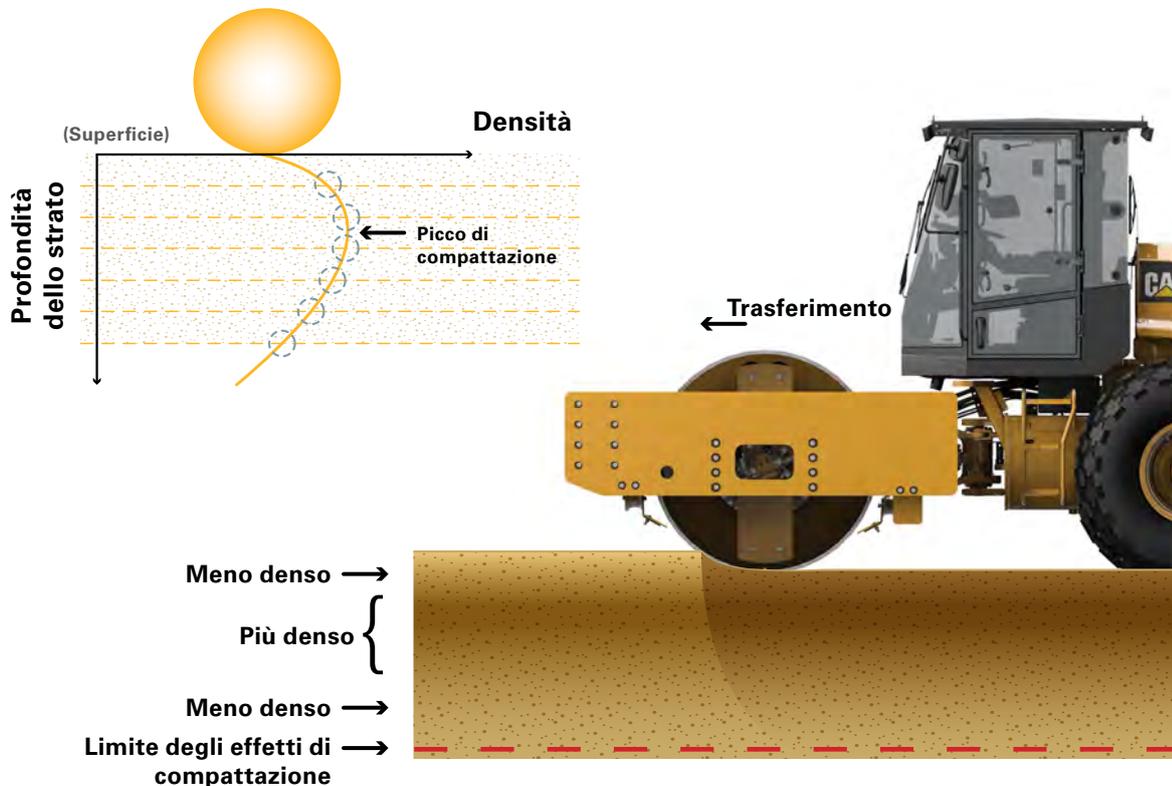
Vibrazione – Le vibrazioni rappresentano forse la forza di compattazione più complessa ed economicamente vantaggiosa. Oltre il 90 per cento dei compattatori venduti nel mercato attuale è di tipo vibrante. Questa situazione è dovuta al fatto che i compattatori vibranti sono in grado di assicurare ritmi di produzione uguali a quelli dei compattatori statici con una massa circa tripla. L'energia vibrante rende quindi più efficienti i compattatori vibranti rispetto a quelli statici di dimensioni paragonabili.

I compattatori vibranti generano una rapida successione di onde di pressione che si propagano in tutte le direzioni e vincono la resistenza allo scorrimento del materiale da compattare. Quando viene applicata una pressione, le particelle tendono a riorientarsi raggiungendo uno stadio più denso (con un minor numero di vuoti). Per comprendere le modalità di funzionamento dei compattatori vibranti, occorre capire la dinamica della compattazione mediante un apparato vibrante in termini di ampiezza, frequenza, carico statico lineare e rapporto fra massa vibrante e massa sospesa.

A mano a mano che un compattatore procede, il volume di suolo non viene compattato in modo uniforme dall'alto verso il basso. Un compattatore con una certa massa compatta il suolo fino a una data profondità, ma il grado di compattazione varia procedendo dalla superficie verso la massima profondità di influenza della compattazione stessa. In generale, il suolo risulta meno compatto in superficie, quindi presenta un picco di compattazione alle profondità intermedie e infine risulta nuovamente meno compatto alla massima profondità.

Variando i parametri operativi è possibile influire sulla profondità delle fasce di compattazione e cambiare la profondità di quella di massima compattazione, ma rimane il fatto che il grado di compattazione del suolo varia procedendo dall'alto verso il basso. Tale fenomeno è indicato con il termine "gradiente di compattazione", un dato che contribuisce a descrivere l'idoneità di un compattatore di una determinata taglia o impostazione operativa per applicazioni di compattazione specifiche.

GRADIENTE DI COMPATTAZIONE



Sembrerebbe logico che quando si utilizza un compattatore a rullo la parte più densa del suolo fosse quella superficiale; in realtà, la densità raggiunge il suo picco in un punto situato sotto della superficie, e diminuisce a mano a mano che la profondità riduce l'effetto del compattatore. Tale andamento è detto Gradiente di compattazione.

[DINAMICA DELLA COMPATTAZIONE MEDIANTE UN APPARATO VIBRANTE]

Ampiezza – L'ampiezza misura la distanza fra la posizione a riposo e quella di massimo spostamento del tamburo durante il suo movimento verticale. I costruttori promuovono questo valore nominale, misurato su un tamburo sospeso. L'ampiezza di lavoro effettiva è tuttavia data dal prodotto fra l'ampiezza nominale e il coefficiente di amplificazione, a sua volta pari al rapporto fra la frequenza trasmessa e quella di risonanza della macchina e del terreno che viene compattato. Può risultare più utile considerare l'ampiezza come la distanza percorsa dal tamburo nel terreno mentre sposta e compatta il suolo.

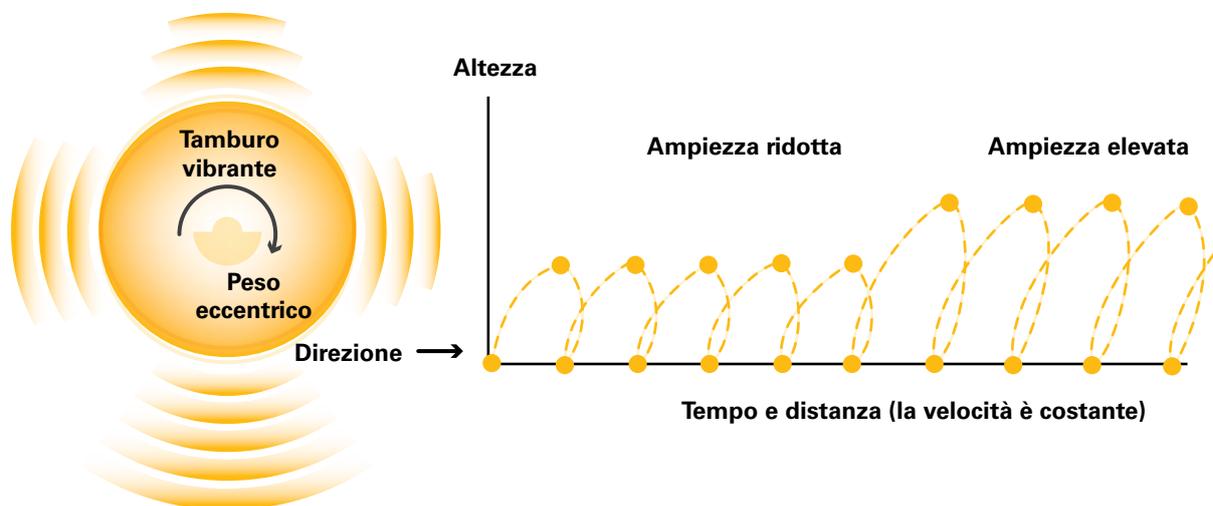
Variando l'ampiezza, l'operatore ha la possibilità di cambiare il movimento (l'accelerazione) del tamburo e la forza che esso esercita sul materiale.

A mano a mano che si avvicina alla densità massima, il suolo raggiunge un punto in cui non è

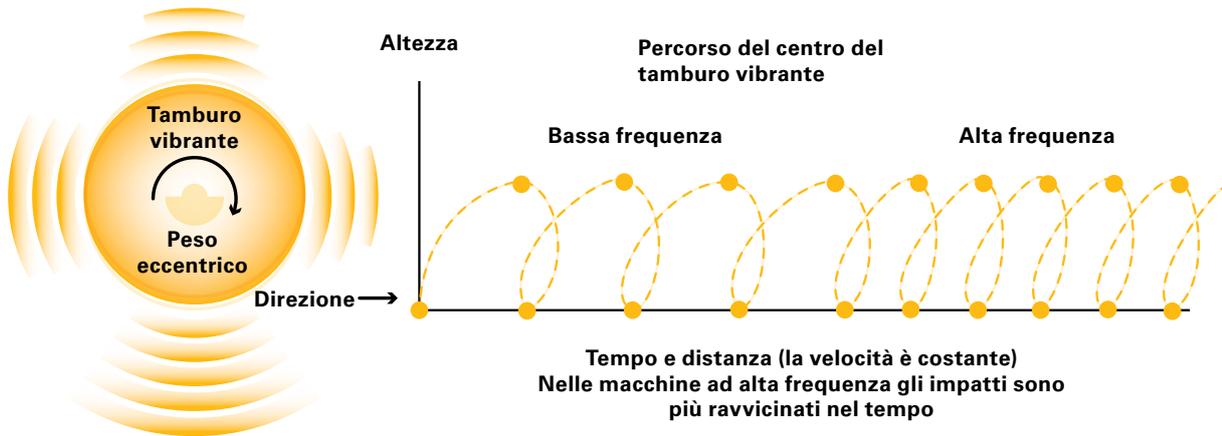
più in grado di assorbire l'energia di compattazione trasmessa dal compattatore vibrante. In tale condizione il tamburo può rimbalzare sulla superficie e il ciclo di vibrazione può avvenire mentre il tamburo è sospeso nell'aria. Tale fenomeno è detto "disaccoppiamento" o "doppio salto", ed è accompagnato da una vibrazione ben distinta e insolitamente energica dell'intera macchina. Il disaccoppiamento può danneggiare la macchina e avere risultati indesiderati sul suolo che si sta compattando, come una riduzione della sua decompattazione.

Per arrestare il disaccoppiamento, l'operatore deve ridurre l'energia che la macchina trasferisce al terreno; a tale scopo è sufficiente ridurre l'ampiezza della vibrazione, e di conseguenza la forza di compattazione esercitata sul suolo. In alternativa, l'operatore può lavorare in modalità statica.

AMPIEZZA



FREQUENZA



Frequenza e velocità – La frequenza è una misura del numero di rotazioni o cicli completi compiuti dai pesi eccentrici intorno all’asse di rotazione in un determinato intervallo temporale. La frequenza viene di solito espressa in Hertz (Hz) o vibrazioni al minuto (vpm). Le frequenze di uso comune sono di solito comprese fra 23 e 35 Hz (1380 - 2100 vpm), a seconda anche del materiale e dell’ampiezza impostata.

La relazione fra la frequenza e la velocità di lavoro viene a volte semplificata riducendola a una regola approssimativa secondo cui i rispettivi valori

devono essere impostati in modo da generare un impatto ogni 25 - 30 mm (1 - 1,2 in) circa. Se la velocità di lavoro è troppo elevata può verificarsi un effetto “asse da lavare” (distanza eccessiva fra gli impatti), mentre se è troppo bassa si ha una riduzione della produttività della macchina. Per ogni applicazione di compattazione esistono una velocità e una frequenza ottimali, ma è possibile che non diano origine a un impatto ogni 25 mm (1 in). È fondamentale mantenere l’uniformità della compattazione, e l’uso di funzioni di controllo automatico della velocità e della frequenza può contribuire ad assicurare tale costanza.

Rapporto fra massa vibrante e massa sospesa –

Si potrebbe pensare che se un compattatore vibrante con determinati valori di massa e ampiezza è in grado di compattare un dato suolo con un certo grado di efficienza, aumentando semplicemente la massa e l’ampiezza il compattatore risulterebbe più efficiente sul medesimo suolo. Ciò non è necessariamente vero.

Nei compattatori vibranti, la massa che vibra (tamburo) è isolata da quella sospesa (telaio posteriore), e il rapporto fra le due masse è un fattore fondamentale nella determinazione dei possibili valori di massa e ampiezza della macchina. Tale rapporto viene tarato con grande cura, in modo da consentire al compattatore di ottimizzare l’energia che è in grado di trasferire al terreno in condizioni di sicurezza.



Massa operativa totale



Massa sospesa (non vibrante)



Massa vibrante



Risonanza che contrasta l'energia di compattazione



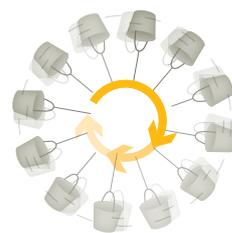
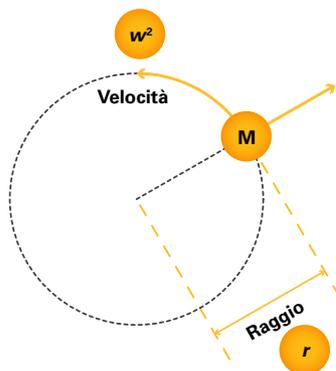
Risonanza che produce una sinergia: una convergenza armonica

Risonanza – Quando la frequenza delle vibrazioni applicate a un oggetto è uguale alla sua frequenza propria, l'oggetto vibra in risonanza. Nella compattazione mediante un apparato vibrante, la risonanza è molto importante.

L'interazione fra il materiale che viene compattato e la macchina vibrante produce vibrazioni in entrambi. I pesi eccentrici che ruotano all'interno del tamburo mantengono tali vibrazioni a una frequenza pari alla velocità di rotazione (giri/min.) del loro albero. In corrispondenza di alcuni valori

di frequenza, la macchina e il materiale vibrano in risonanza. Oltre che dalle caratteristiche della macchina, le condizioni che danno origine a una risonanza dipendono dalla natura del materiale da compattare e dal grado di compattazione raggiunto. La frequenza ideale per raggiungere la massima efficienza di trasmissione dell'energia di compattazione è superiore del 15 per cento circa rispetto a quella di risonanza.

FORZA CENTRIFUGA



Forza centrifuga = Mw^2r

Per calcolare la forza centrifuga occorre moltiplicare la massa (M) del peso eccentrico per il suo raggio di rotazione (r) e per il quadrato della sua velocità di rotazione (frequenza, w^2). In questa equazione, il fattore di maggior rilievo è la frequenza.

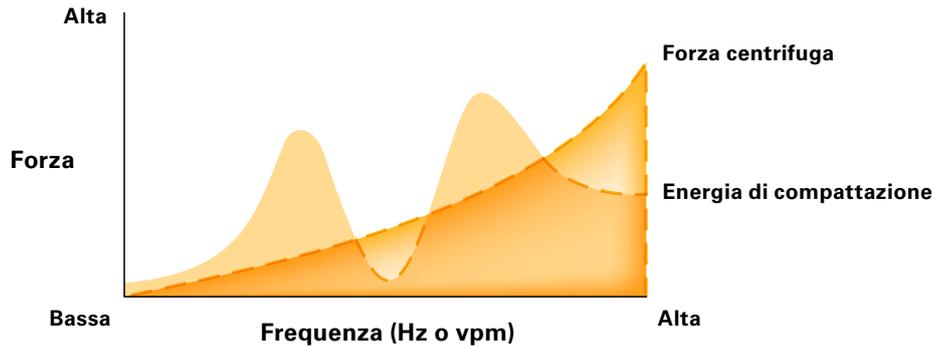
Forza centrifuga – I compattatori vibranti generano la forza centrifuga mediante uno o più pesi in rotazione all'interno di un tamburo. La forza centrifuga prodotta dal tamburo è analoga alla trazione che si percepisce quando si fa oscillare un secchio pieno d'acqua. A tale forza contribuiscono la massa dei pesi, la velocità di rotazione e la distanza fra il centro di rotazione e il baricentro. La forza

centrifuga teorica è un valore calcolato, utilizzato spesso per valutare la produttività dei compattatori vibranti monotamburo, ma non costituisce un modo preciso di giudicare le capacità di una macchina. La forza effettiva di vibrazione dipende da un'interazione totale fra il materiale che viene compattato e la macchina.

FORZA E FREQUENZA

Questo grafico illustra l'aumento della forza centrifuga teorica al crescere della frequenza. L'energia di compattazione effettivamente trasmessa al suolo varia tuttavia all'aumentare della frequenza, mostrando vari "picchi" e "valli".

Vi è di solito un primo picco che rappresenta il valore massimo dell'energia di compattazione, che diminuisce poi rapidamente, seguito da un secondo picco. Tale secondo picco produce generalmente il valore maggiore, e rappresenta la condizione di massima produttività della macchina.



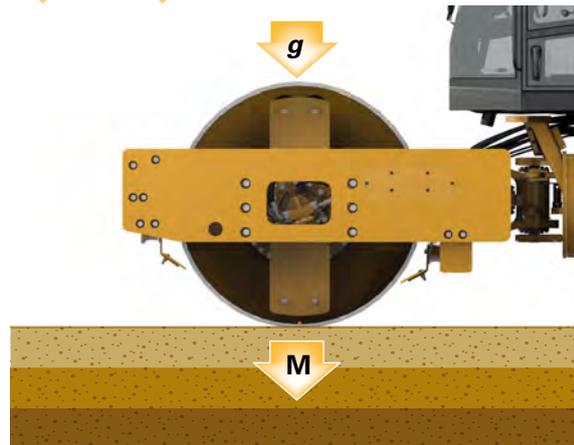
FORZA TOTALE APPLICATA (F_{TA})

$$F_{TA} = F_C + F_S$$

Dove: F_C è la forza centrifuga = $1100 \cdot \left(\frac{M}{1000}\right) \cdot \left(\frac{r}{1000}\right) \cdot \left(\frac{N}{1000}\right)^2$

e: F_S è il carico statico applicato dal tamburo = $M \cdot g$

- M** Massa del peso eccentrico (kg)
- r** Momento di eccentricità (m)
- N** giri/min.
- M** Massa statica applicata del tamburo (kg)
- g** Accelerazione di gravità $\left(\frac{\text{metri}}{\text{secondo}^2}\right)$



Forza totale applicata – La forza totale applicata è considerata la massima energia vibrante che un compattatore è in grado di applicare al terreno. Per calcolarla si deve aggiungere alla forza centrifuga

la massa statica del compattatore. Come nel caso della forza centrifuga, occorre essere cauti nell'utilizzare tale calcolo per confrontare le prestazioni di compattazione delle macchine.

[**ATTREZZATURE PER LA COMPATTAZIONE DEL SUOLO**]

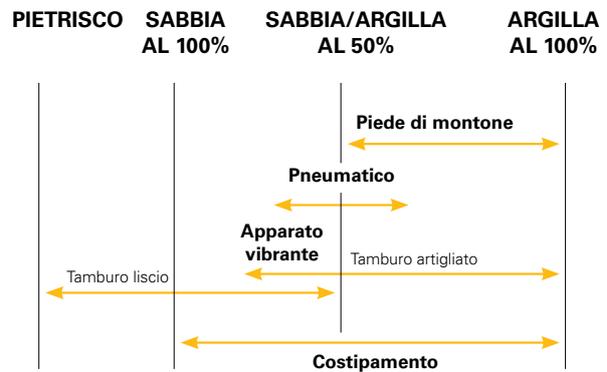
Sulla scelta delle attrezzature per la compattazione influiscono numerosi fattori. Il tipo di attrezzatura selezionato per un progetto dipende a volte dall'esperienza precedente dell'appaltatore, dal tipo di suolo, dalla specifica relativa al metodo o dai macchinari disponibili. Un'altra serie di considerazioni riguarda il grado di compatibilità della macchina con le operazioni di trasporto e di stesa. Sono importanti anche le condizioni climatiche e di trazione. Nel processo decisionale gioca a volte un ruolo anche l'interesse dell'appaltatore per la standardizzazione delle macchine della sua flotta.

La tabella delle applicazioni fornisce indicazioni per l'abbinamento delle attrezzature alle variabili del lavoro e ai tipi di suolo. Non esistono singoli compattatori in grado di svolgere tutte le attività per qualunque applicazione. Ogni tipo offre la massima economia in una gamma ben precisa di materiali e compiti. Vi sono spesso applicazioni nelle quali è possibile raggiungere l'obiettivo di compattazione con macchine di tipi e dimensioni diversi, ma la scelta di quella più adatta in assoluto permette di portare a termine il lavoro nel modo più efficiente ed economico grazie alla riduzione del numero di passate, dei consumi di carburante e dei tempi di lavorazione.

Compattatori vibranti – I compattatori vibranti si basano sul principio del riassetto delle particelle allo scopo di ridurre i vuoti e aumentare la densità e la portanza. Ne esistono di due tipi, vale a dire a tamburo liscio e artigliato. Per maggiore versatilità, è possibile dotare i compattatori a tamburo liscio di fasce artigliate opzionali che permettono di utilizzare i compattatori a tamburo liscio in applicazioni per tamburi artigliati, benché con prestazioni limitate.

I compattatori vibranti a tamburo liscio generano tre forze di compattazione, vale a dire pressione

TABELLA DELLE APPLICAZIONI



statica, impatti e vibrazioni. Le macchine a tamburo artigliato generano le stesse forze, più una forza di manipolazione. I compattatori vibranti assicurano una compattazione uniforme dell'intero strato.

La densità desiderata viene raggiunta grazie alle forze generate dagli impatti del tamburo vibrante con il terreno. I risultati di compattazione dipendono dalla frequenza, dall'ampiezza e dalla forza dei colpi, nonché dall'intervallo di tempo per cui i medesimi vengono applicati.





Gli artigli ovali sono particolarmente adatti per suoli coesivi e strati più spessi.

La relazione fra frequenza e tempo spiega le minori velocità di lavoro dei compattatori vibranti. La velocità di lavoro è importante perché determina il tempo necessario per compattare una data parte del materiale di riempimento. Nel caso dei compattatori vibranti, i migliori risultati si ottengono con velocità pari a 1 - 2,5 km/h (0,6 - 1,6 mph) per pietrisco e argilla, e a 2 - 5 km/h (1,2 - 3 mph) per ghiaia e sabbia.

I compattatori vibranti a tamburo liscio sono stati le prime macchine con apparato vibrante mai introdotte. Essi offrono la massima efficacia sui materiali granulari con particelle di dimensioni comprese fra quelle del pietrisco grossolano e quelle della sabbia fine, ma vengono utilizzati anche su suoli semi-coesivi con un tenore di materiale coesivo fino al 50 per cento. Lo spessore dello strato varia a seconda delle dimensioni del compattatore. Quando il materiale di riempimento è costituito da pietrisco di maggiori dimensioni, gli strati possono essere molto spessi; non sono insoliti valori di spessore fino a 1,2 m (4 ft). Occorre ricordare che quando nel materiale di riempimento è presente pietrisco molto grossolano, lo spessore dello strato deve essere superiore di circa 300 mm (12 in) rispetto alla taglia massima del pietrisco. Ciò consente di consolidare lo strato senza che dalla superficie sporgano pietre di grandi dimensioni.

Le macchine con tamburo artigliato ampliano la gamma di materiali fino a includervi terreni con oltre il 50 per cento di materiale coesivo e una maggiore percentuale di materiali fini. Quando penetra nella parte superiore dello strato, l'artiglio spezza i legami naturali fra le particelle dei suoli coesivi e permette di ottenere risultati di compattazione migliori. Gli

Caterpillar offre inoltre fasce artigliate opzionali per i compattatori a tamburo liscio. Gli artigli sono formati da due parti e vengono imbullonati sul tamburo liscio, consentendo di utilizzare il compattatore sui suoli coesivi come una normale macchina a tamburo artigliato. Sono disponibili fasce artigliate sia quadrate, sia ovali.



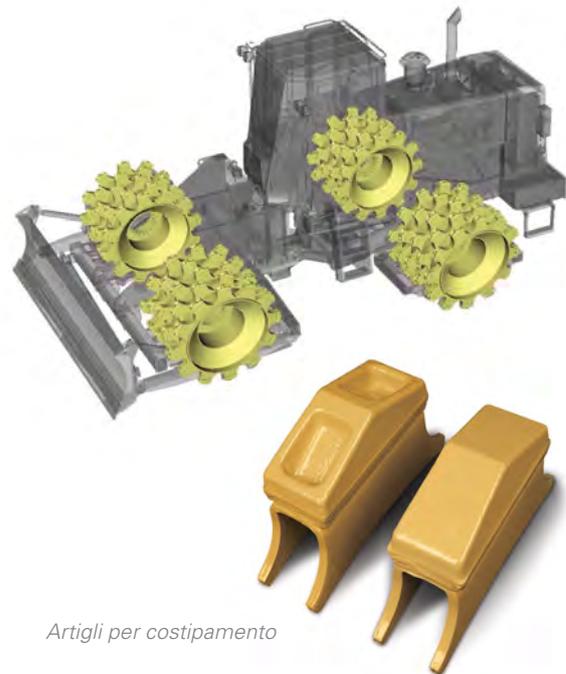
Gli artigli quadrati sono ideali per suoli semi-coesivi e strati più sottili.

artigli sono dotati di un profilo evolvente per poter fuoriuscire dallo strato senza ammorbidire il suolo, e sono conici per poter rimanere puliti più facilmente. In caso di impiego di unità a tamburo artigliato su suoli coesivi, lo spessore tipico degli strati è compreso fra 150 e 460 mm (6 e 18 in).

Caterpillar offre artigli con due conformazioni, vale a dire a faccia quadrata e ovale. Gli artigli quadrati forniscono buone prestazioni su suoli semi-coesivi e strati più sottili, con spessori inferiori a 150 mm (6 in), e assicurano una buona sigillatura della superficie.

Gli artigli ovali hanno una superficie minore di quelli quadrati, ed esercitano pertanto una maggiore pressione sul terreno. Ciò consente loro di penetrare più in profondità nello strato. Gli artigli ovali forniscono prestazioni migliori su suoli coesivi e strati più profondi, con spessori da 150 a 460 mm (da 6 a 18 in), ma non sigillano la superficie come quelli quadrati.





Artigli per costipamento

Compattatori artigliati per costipamento

– I compactatori artigliati per costipamento sono compactatori non vibranti semoventi ad alta velocità, solitamente dotati di quattro ruote artigliate in acciaio e di una lama di riempimento. I loro artigli sono conici e a faccia rettangolare.

I compactatori artigliati per costipamento compattano gli strati dal basso verso l'alto. Essendo conici, gli artigli sono in grado di fuoriuscire dallo strato senza ammorbidire il suolo. Viene pertanto compattata anche la parte superiore dello strato, e la superficie risulta relativamente liscia e sigillata. I compactatori artigliati per costipamento sono in grado di raggiungere velocità pari a 16 - 32 km/h (10 - 20 mph), ma operano di solito a una velocità di 10 - 15 km/h (6 - 10 mph).

In presenza di strati da 200 - 300 mm (8 - 12 in), i valori di densità desiderati vengono in genere raggiunti in 2 - 3 cicli (4 - 6 passate della macchina), ma nel caso di limo plastico con una granulometria insufficiente o di argilla molto fine possono

essere necessari 4 cicli. I compactatori artigliati per costipamento sono efficaci su tutti i suoli, ad eccezione della sabbia pulita.

Essi producono superfici sigillate e piuttosto lisce, che consentono alle unità di trasporto di procedere a velocità sostenuta sullo strato. Poiché i compactatori per costipamento con dispositivo di riempimento eseguono sia la stesa, sia la compattazione, gli appaltatori possono inoltre ridurre il numero di macchine di stesa cingolate.

I compactatori artigliati per costipamento sono ideali per i progetti di grande entità. Per raggiungere velocità in grado di generare una produttività elevata, essi necessitano infatti di lunghe passate ininterrotte. In presenza di strati di spessore superiore a 300 mm (12 in), i compactatori artigliati per costipamento offrono una produttività da doppia a tripla rispetto a quelli vibranti monotamburo. Il tipo di macchina ideale è determinato dall'applicazione, dalle dimensioni del cantiere e dagli aspetti economici alla base del processo decisionale.

Compattatori a piede di montone –

I compactatori a piede di montone devono il loro nome al fatto che gli antichi costruttori di strade romane facevano passare greggi di pecore avanti e indietro sul materiale della base fino a quando la strada non era compattata. L'espressione "a piede di montone" è così divenuta un termine generico per indicare tutti i tipi di tamburi artigliati. I compactatori a piede di montone sono in realtà

molto diversi da quelli con tamburo artigliato o con artigli per costipamento.

Gli artigli a piede di montone sono cilindrici e hanno di solito una lunghezza di 200 mm (8 in). L'artiglio è circolare e di diametro compreso fra 76 e 127 mm (3 - 5 in). Gli artigli presenti sui tamburi artigliati o per costipamento sono di forma ovale o rettangolare. La faccia dell'artiglio è inoltre più piccola della sua base, una differenza di rilievo.



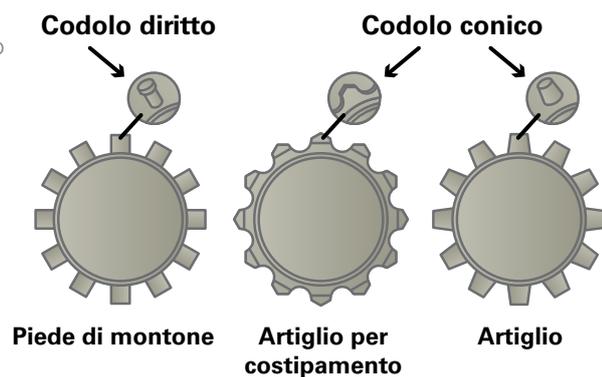
Gli artigli dei tamburi a piede di montone attraversano lo strato superiore, e compattano in realtà quello sottostante. Quando fuoriescono dal suolo, gli artigli sollevano o ammorbidiscono il materiale, creando uno strato superiore di materiale sciolto. Quando viene steso ulteriore materiale di riempimento, lo strato superiore viene ammorbidito e quello precedente viene compattato. I compattatori a piede di montone eseguono davvero la compattazione dal basso verso l'alto, offrendo un vantaggio ben definito.

Poiché lo strato superiore del suolo viene sempre ammorbidito, il processo contribuisce ad aerare ed essiccare l'argilla e il limo bagnati.

I compattatori a piede di montone presentano tuttavia numerosi svantaggi. In caso di pioggia, lo strato superficiale sciolto può comportarsi come una spugna, rallentando il processo di compattazione. Il materiale sciolto rallenta inoltre le unità di trasporto che depositano il materiale di riempimento, causando così un aumento dei tempi dei cicli di trasporto.

I compattatori a piede di montone sono inoltre in grado di lavorare soltanto a velocità comprese fra 6 e 10 km/h (4 - 6 mph), annullando qualunque vantaggio derivante da impatti e vibrazioni. Sul suolo vengono esercitate unicamente forze dovute a pressione e manipolazione. In presenza di strati da 200 mm (8 in), per raggiungere la densità target occorrono di solito 6 - 10 cicli (12 - 20 passate della macchina). I compattatori a piede di montone non sono più di uso comune.

CONFIGURAZIONI DEGLI ARTIGLI



Compattatori pneumatici – I compactatori pneumatici trovano impiego in attività di compattazione del suolo medio-piccole, principalmente su materiali di base granulari stesi mediante lame. Essi vengono spesso utilizzati come compactatori di finitura dopo che i compactatori a tamburo vibrante hanno portato a termine la compattazione dello strato. I compactatori pneumatici sono ideali per la sigillatura delle superfici, per applicazioni speciali come la compattazione di strati sottili o in presenza di requisiti speciali dettati dal tipo di lavoro.

Le forze di compattazione (pressione e manipolazione) prodotte dagli pneumatici in gomma producono l'addensamento desiderato dello strato procedendo dall'alto verso il basso. È possibile variare l'entità della forza di compattazione modificando la pressione degli pneumatici (metodo normale) o il peso della zavorra (metodo meno frequente). L'azione di impasto prodotta dalla disposizione sfalsata degli pneumatici contribuisce a lisciare e sigillare la superficie.

I compactatori pneumatici possono essere utilizzati su suoli e asfalto; si tratta di un vantaggio che permette agli appaltatori di costruzioni stradali di utilizzare un unico compactatore per più fasi di costruzione.





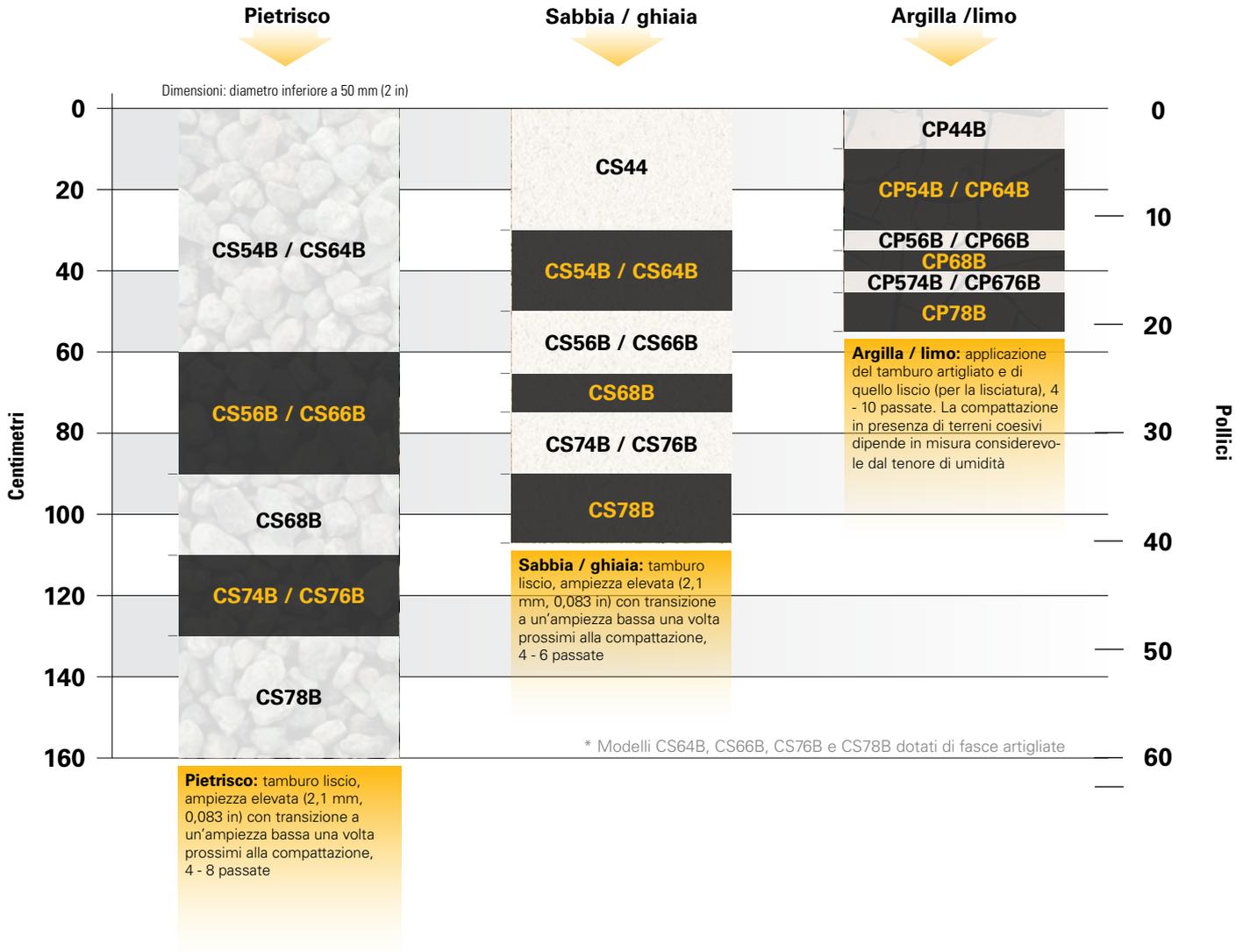
Piastre vibranti posteriori – In presenza di materiali non coesivi, è possibile equipaggiare i compattatori vibranti monotamburo con piastre vibranti posteriori che assicurano una sigillatura delle superfici impossibile da ottenere unicamente con i compattatori monotamburo. Ciò consente all'operatore di tenere conto del gradiente di compattazione: il compattatore vibrante monotamburo provvede alla compattazione in

profondità, mentre la piastra vibrante compatta e sigilla la superficie.

Quando le piastre vibranti non sono necessarie, è opportuno smontarle dalla macchina, poiché il loro peso può causare una riduzione del carico lineare del tamburo e rendere necessarie passate aggiuntive per raggiungere il target di compattazione.

PROFONDITÀ DI COMPATTAZIONE

Si assume una specifica della densità pari al 95% di quella Proctor standard; a seconda delle diverse condizioni del terreno, possono verificarsi variazioni considerevoli.



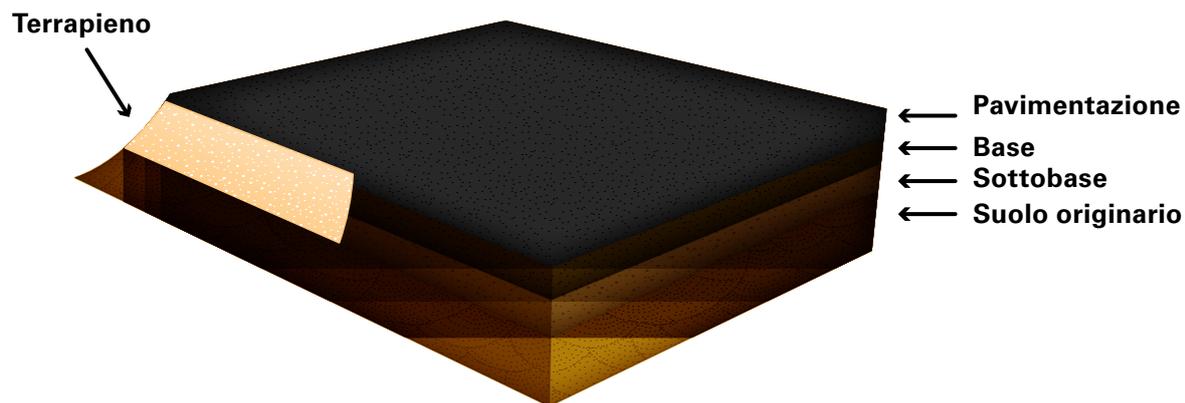


Unità 4

APPLICAZIONE E CONTROLLO DELLA QUALITÀ

I parametri di progetto influiscono in misura rilevante sul posizionamento e la compattazione dei diversi tipi di suolo. La conoscenza delle modalità di ottimizzazione dei risultati in un ampio ventaglio di condizioni aiuta a ottimizzare l'efficienza e ad evitare le rilavorazioni. Per contribuire a una migliore gestione dei progetti di compattazione risultano inoltre vantaggiosi alcuni metodi di misurazione sia nuovi, sia collaudati nel tempo.





[GLI ELEMENTI DELLA STRUTTURA DEL CANTIERE]

Come ogni tipo di struttura, le strade sono formate da componenti specifici con funzioni specifiche. La terminologia può presentare variazioni a livello locale, ma tali componenti collaborano per sostenere il carico del traffico che percorre la strada.

Suoli naturali od originari – Questo componente, detto di volta in volta “substrato”, “fondazione” o “suolo di base”, costituisce la fondazione della massicciata ed è formato dai suoli e dai materiali presenti naturalmente, senza interventi umani o modifiche chimiche. Nel corso dei processi di costruzione delle strade, i suoli superficiali vengono rimossi per assicurare un livellamento uniforme. I materiali così esposti al fondo dell’incisione sono i suoli naturali. Se non sono sufficienti a sostenere il carico esercitato dalla struttura della strada, tali materiali preesistenti vengono modificati o sostituiti con materiali idonei. La modifica può avvenire tramite misure meccaniche, fra cui compattazione, rinforzo con materiali geosintetici o incorporazione di aggregati, chimiche, fra cui incorporazione di binder come il cemento di Portland, oppure una combinazione di misure meccaniche e chimiche. L’obiettivo consiste nel migliorare le capacità portanti del materiale. In ultimo, tale fondazione deve fornire un supporto adeguato alla struttura che poggia su di essa.

Terrapieno – Un terrapieno è un accumulo di riempimento la cui sommità si trova più in alto delle superfici adiacenti. La massicciata è progettata in modo da avere una certa larghezza e da sostenere la strada con un’elevazione e una pendenza da progetto. In alcuni casi, le ondulazioni naturali del terreno possono richiedere l’uso di materiale di riempimento per assicurare alla massicciata una fondazione adeguata. I terrapieni vengono realizzati a tale scopo disponendo e compattando materiali aggregati appropriati in modo da sollevare il terreno fino a quando non soddisfa i requisiti di elevazione.

Sottobase – Le funzioni primarie di questo strato consistono nel distribuire all’interno del substrato il carico dovuto alla struttura che esso sostiene e nel fornire un livellamento relativamente uniforme sul quale collocare lo strato intermedio. La sottobase può tuttavia svolgere anche una serie di ulteriori funzioni, ad esempio di filtraggio o di barriera contro l’acqua capillare, che dipendono dalla composizione dei materiali del substrato. Di solito questo strato è formato da materiali modificati, se necessario, e compattati. Possono essere presenti più strati di sottobase, in quanto è possibile aggiungere strati secondari, se richiesto per sostenere carichi maggiori. In generale, gli aggregati impiegati nella sottobase hanno dimensioni maggiori di quelli utilizzati negli strati che essa sostiene.

Base – Gli strati della base svolgono una funzione simile a quelli della sottobase. Essi distribuiscono inoltre il carico cui sono soggetti e forniscono una protezione contro gli effetti dell’acqua e del ghiaccio. A seconda dei requisiti di carico, possono essere presenti uno o più strati di base. Quest’ultima è formata da una miscela di ghiaie ingegnerizzate con particelle di dimensioni più piccole rispetto a quelle utilizzate nella sottobase.

Gli strati di asfalto vengono posati su questa fondazione, la cui qualità influisce sulla loro durata. Per ulteriori informazioni sugli strati di asfalto, consultare il manuale Caterpillar dal titolo “Guida alla compattazione dell’asfalto”.

[**PROCEDURE DI COMPATTAZIONE DEL SUOLO**]

PIANIFICAZIONE DELLE ATTIVITÀ

Prima di procedere con la pianificazione di un lavoro di compattazione, un appaltatore deve porsi alcune domande essenziali, vale a dire:

- Quali sono la granulometria e la classificazione del suolo?
- Quali sono la massima densità secca e il tenore ottimale di umidità?
- Qual è il requisito (%) di compattazione?
- Quali sono le impostazioni e la velocità del compattatore?
- Qual è lo spessore dello strato?

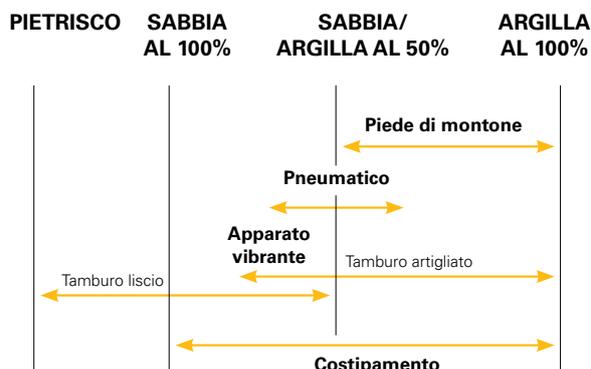
Un appaltatore deve conoscere il materiale, i requisiti e l'applicazione di ciascun tipo di attrezzatura. Una volta comprese tali variabili, l'appaltatore può iniziare a valutare l'approccio migliore per il lavoro, ed eventualmente quali delle tecnologie disponibili applicare.

Applicazione e dimensionamento del compattatore

– L'illustrazione mostra le caratteristiche operative dei vari tipi di compattatori. A titolo di confronto, la figura successiva mostra gli intervalli di applicazione in cui ciascun compattatore è più efficace. Le macchine possono presentare sovrapposizioni all'interno di tali intervalli, e non è insolito osservare macchine al lavoro su materiali che non rientrano nel loro campo di applicazione abituale. Le informazioni presentate in queste tabelle devono pertanto essere utilizzate esclusivamente come linee guida medie di applicazione.

Applicazioni per cantieri e terrapieni – Il termine cantiere indica un ampio ventaglio di attività di movimento terra per costruzioni, fra cui preparazione di fondazioni, livellamenti e riempimenti di scavi e bacini. Un cantiere può avere a che vedere con la realizzazione di un edificio, una strada o un'altra struttura o superficie.

TABELLA DELLE APPLICAZIONI



CARATTERISTICHE OPERATIVE DELLE ATTREZZATURE PER LA COMPATTAZIONE DEL SUOLO
Solo semoventi

| Macchina | Piede di montone | Pneumatica (15 tonnellate o più) | Artiglio per costipamento | Apparato vibrante |
|--|--------------------|----------------------------------|---------------------------|---------------------|
| Spessore dello strato compattato - mm (in) | 150 - 300 (6 - 12) | 150 - 300 (6 - 12) | 150 - 300 (6 - 12) | 150 - 600 (6 - 24)* |
| Velocità media di lavoro - km/h (mph) | 6 - 10 (4 - 6) | 6 - 19 (4 - 12) | 16 - 32 (10 - 20) | 2 - 8 (2 - 5) |
| Cicli (1 ciclo = 2 passate della macchina) | 6 - 10 | 3 - 8 | 4 - 8 | 2 - 4 |

*A seconda delle dimensioni del compattatore e del target di compattazione



Pietrisco di riempimento

– Il pietrisco viene utilizzato in misura crescente come materiale di riempimento di terrapieni per la costruzione

di autostrade e, in misura maggiore, anche di dighe, aeroporti, edifici e porti. Il pietrisco frantumato contiene spesso una quantità così elevata di materiali fini da dare origine ad assestamenti considerevoli in assenza di una compattazione appropriata del materiale di riempimento.

Il pietrisco di riempimento viene di solito steso in strati da 450 - 1200 mm (18 - 48 in). La modalità di stesa del materiale prima della compattazione riveste un'importanza vitale. La stesa in strati mediante trattori crea riempimenti uniformi, perché la lama causa un certo riorientamento del pietrisco e i cingoli producono una certa compattazione.

Ciò consente pertanto di preparare una superficie relativamente densa e uniforme a beneficio del compattatore.

Dopo le operazioni di stesa, per smuovere le pietre di grandi dimensioni e migliorare la densità e la stabilità sono necessarie forze di compattazione elevate. Per questo tipo di lavori vengono selezionati i compattatori vibranti a tamburo liscio più grandi, che sono comunque soggetti a grandi sollecitazioni sul pietrisco di riempimento. Il tamburo deve essere realizzato in acciaio spesso e di alta qualità. Se si osserva un effetto di frantumazione sul materiale della superficie, è possibile che occorra ridurre il numero delle passate. In alternativa, se la macchina è dotata di più impostazioni dell'ampiezza è possibile utilizzarne una inferiore per ridurre la deformazione del materiale della superficie.



Sabbia e ghiaia – Su sabbia e ghiaia, la compattazione con apparato vibrante mediante macchine con tamburo liscio risulta particolarmente adatta ed economica. Poche passate permettono di ottenere densità elevate e lo spessore dello strato è determinato dalle dimensioni del compattatore.

La sabbia e la ghiaia autodrenanti che contengono meno del 10 per cento di materiali fini sono facilmente compattabili, specialmente quando sono prossime alla saturazione. Nei casi in cui sono richieste densità elevate e gli strati sono spessi, è opportuno aggiungere acqua. Quest'ultima fuoriesce dallo strato durante il processo di compattazione.

Se la sabbia e la ghiaia contengono più del 10 per cento di materiali fini, il suolo non è più autodrenante e può diventare elastico in presenza di un tenore di acqua elevato. Per questo tipo di suolo esiste un tenore di umidità ottimale, che permette di ottenere la massima densità. Per raggiungere tale tenore ottimale è possibile che si renda necessario essiccare il suolo bagnato.

In presenza di sabbia e ghiaia con una granulometria insufficiente, risulta difficile ottenere una densità elevata in prossimità della superficie del materiale di riempimento. I suoli con una granulometria insufficiente presentano una bassa resistenza allo scorrimento, e lo strato superiore tende a sollevarsi dietro al tamburo. Ciò non rappresenta un problema quando si compattano più strati, poiché quello superiore precedente viene compattato durante la compattazione dello strato successivo. Quando si eseguono prove di densità, è tuttavia opportuno tenere presenti le difficoltà di compattazione della superficie.



Quando il tenore di umidità è inferiore al valore ottimale, è possibile aggiungere acqua per garantire il raggiungimento della compattazione corretta.

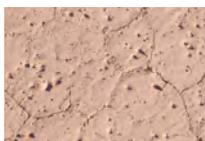


Limo – I vari tipi di limo sono materiali fini non plastici che vengono solitamente compattati mediante compattatori vibranti a tamburo liscio. È inoltre

possibile stenderli e compattarli in strati spessi.

Come per tutti i suoli a grana fine, la loro compattabilità dipende dal tenore di umidità. Per ottenere risultati di compattazione ottimali, il tenore di acqua non deve discostarsi eccessivamente

dal tenore di umidità ottimale. Se è presente una quantità eccessiva di acqua, il limo raggiunge rapidamente lo stato fluido, rendendo impossibile la compattazione. Ciò significa che è possibile che si renda necessario aerare gli strati mediante dischi, mescolarli con un suolo più asciutto (una procedura costosa) oppure drenare meglio il materiale di prestito. I suoli limosi contenenti anche argilla possono presentare una notevole coesione. Su tali suoli, si ottengono risultati migliori utilizzando compattatori a tamburo artigliato, pneumatici o con artigli per costipamento.



Argilla – Le argille hanno proprietà plastiche; ciò significa che le caratteristiche di compattazione dipendono in modo marcato dal tenore di umidità. Quando quest'ultimo

è basso, l'argilla diventa dura e compatta, mentre al di sopra del tenore di umidità ottimale l'argilla diventa sempre più plastica e difficile da compattare.

Nella compattazione delle argille, il problema principale risiede spesso nella necessità di regolare il tenore di umidità. L'aggiunta di acqua mediante autocisterne, dischi o stabilizzatrici è dispendioso in termini di tempo. L'infiltrazione di acqua nella cava di prestito può rappresentare un'alternativa migliore. L'essiccamento dell'argilla bagnata può avvenire esclusivamente in condizioni di caldo secco, anche in caso di impiego di dischi e stabilizzatrici. Per ridurre il tenore di umidità si eseguono a volte compattazioni prolungate con compattatori a piede di montone.

Anche quando il tenore di umidità è ottimale, l'argilla richiede energie di compattazione maggiori, e minori spessori dello strato, rispetto ai suoli non coesivi. I risultati migliori si ottengono con i compattatori a tamburo artigliato, perché quando penetrano nel suolo gli artigli spezzano i legami naturali di coesione fra le particelle. Sulle argille con indice di plasticità medio-basso è possibile utilizzare i compattatori pneumatici.

Nei progetti con requisiti di elevata produttività, e in cui si utilizza l'argilla come materiale di riempimento, è possibile ottenere buoni risultati servendosi di compattatori artigliati per costipamento abbinati a compattatori vibranti a tamburo artigliato. I compattatori artigliati per costipamento con lame di riempimento sono efficienti nello stendere il materiale di riempimento e nello sbriciolare i grandi grumi duri di argilla spesso presenti nei materiali di prestito argillosi. Queste macchine vengono impiegate per eseguire le prime passate. Per raggiungere la densità finale si utilizzano compattatori vibranti a tamburo artigliato.



Quando il tenore di umidità è eccessivo, l'apertura del suolo riduce i tempi di essiccamento.

Applicazioni per basi e sottobasi – Le basi e le sottobasi sono gli strati stesi sulla superficie dei terrapieni o dei terreni naturali. Tali strati fungono da fondazione per la posa di strutture superficiali come strade o edifici. La loro resistenza aumenta avvicinandosi alla superficie di finitura. Il materiale utilizzato in questi strati dipende dal tipo di carichi che la strada o l'edificio devono sostenere.

Suoli naturali (originari) – Da un punto di vista economico, è preferibile utilizzare i suoli disponibili localmente. Se tali suoli sono adatti, è possibile utilizzarli senza trattamenti o additivi chimici. Compattando correttamente i suoli in questione, si ottengono un notevole aumento della loro portanza e il controllo di altri fattori, quali permeabilità, azione capillare, ritiro ed espansione.

Suoli trattati (stabilizzazione del suolo) – Mescolando opportune sostanze chimiche con i suoli naturali o importati è possibile ottenere notevoli miglioramenti delle caratteristiche di stabilità e portanza dei terreni. Tale metodologia è detta stabilizzazione del suolo.

Dopo avere mescolato calce o cemento con il suolo, è opportuno compattare quest'ultimo mediante un compattatore vibrante. Il tipo di compattatore utilizzato dipende dalle caratteristiche originali del suolo non trattato, ma è in genere opportuno utilizzare un compattatore vibrante da 15 tonnellate (33000 lb) o più. In presenza di grandi volumi di suolo coesivo, un compattatore artigliato per costipamento può risultare più economico di uno vibrante. Per volumi più piccoli è possibile utilizzare un compattatore pneumatico.

Per garantire risultati adeguati, si consiglia di eseguire una prova di idoneità della stabilizzazione all'inizio delle attività.

Pietrisco frantumato – Le specifiche del lavoro da svolgere possono richiedere l'uso di pietrisco frantumato con una buona granulometria come materiale della base e della sottobase. L'uso di materiale frantumato permette di controllare la granulometria durante il processo di frantumazione, adeguandola alle specifiche. In generale, il pietrisco frantumato è più facile da stendere e compattare rispetto ai suoli fini. I risultati della compattazione sono inoltre più prevedibili. Tali vantaggi a livello di compattazione sono tuttavia controbilanciati dai costi di frantumazione e dalle distanze, spesso maggiori, da percorrere per il trasporto in cantiere.

Vengono di solito definite specifiche molto rigorose per i materiali della base e della sottobase, lo spessore dello strato, la densità richiesta e il modulo di deformazione.

La scelta dell'attrezzatura di compattazione dipende dal tipo di suolo. Come materiali per basi e sottobasi vengono generalmente specificati suoli granulari non coesivi. In questo tipo di applicazione vengono utilizzati in prevalenza compattatori pneumatici o a tamburo liscio.



La stabilizzazione migliora le qualità ingegneristiche dei suoli.

Il pietrisco frantumato viene solitamente trasportato nel punto di utilizzo mediante camion con cassone ribaltabile posteriormente, e viene steso sulla base mediante una motolivellatrice o una spanditrice. Il materiale della base viene poi steso e plasmato in strati di spessore pari a 150 - 250 mm (6 - 10 in). Una volta steso, il materiale viene compattato mediante compattatori a tamburo liscio (statico o vibrante) o pneumatici.

[SUGGERIMENTI PER LA COMPATTAZIONE DEL SUOLO]

Malgrado la sua apparente semplicità, la compattazione del suolo può rivelarsi uno dei compiti più difficili di qualunque progetto di costruzione. Molti produttori offrono per le proprie attrezzature di compattazione opzioni che consentono all'operatore di regolare l'ampiezza e la frequenza delle vibrazioni della macchina così da rispettare le specifiche del lavoro da svolgere.

Non esiste alcun modo semplice per regolare i parametri operativi dei compattatori in funzione dei materiali da compattare. Il metodo migliore consiste spesso nel procedere per tentativi. L'utente deve ovviamente selezionare un compattatore delle dimensioni appropriate (larghezza e peso del tamburo, e così via) per soddisfare i requisiti di produzione. La massima energia di compattazione, tuttavia, viene spesso raggiunta sperimentalmente, agendo sulle variabili che l'operatore è in grado di controllare, vale a dire ampiezza, frequenza e velocità di compattazione, quindi analizzando le prestazioni ed effettuando le regolazioni del caso.

Per aiutare gli operatori a ottimizzare l'efficienza, i costruttori introducono nelle proprie macchine un numero crescente di ritrovati tecnologici. Pur disponendo di un livello tecnologico e di sofisticazione sempre maggiore, per ottenere i migliori risultati di compattazione del suolo è tuttavia possibile che occorra riprendere in esame alcuni principi fondamentali di tale attività, che hanno dato buona prova di sé per anni in ogni sorta di progetti di costruzione. Si riportano pertanto di seguito, a titolo di guida di base, alcuni suggerimenti per la compattazione del suolo.

QUALE COMPATTATORE PER L'APPLICAZIONE?

MATERIALE COESIVO

Strati sottili

Compattatore a tamburo singolo (con artigli)



MATERIALE FINE

Sensibile all'acqua

Compattatore a tamburo singolo liscio o con artigli



MATERIALE CON ATTRITO

*(sabbia da 0,063 - 2 mm / 0,002 - 0,07 in)
Autodrenante se il tenore di materiali fini < 7%*

Compattatore monotamburo, rullo tandem, rullo pneumatico



A GRANA FINE, AUTODRENANTE

Materiale con attrito

Compattatore monotamburo, rullo tandem



A GRANA GROSSA

*(ghiaia da 2 - 63 mm / 0,07 - 2,5 in)
Autodrenante*

Materiale con attrito

Compattatore monotamburo, rullo tandem



MATERIALI GROSSOLANI

Particelle pesanti

Piastre grandi, compattatore monotamburo di grandi dimensioni (> 12,7 tonnellate)



| | Permeabilità | Supporto per fondazioni | Fondazione per pavimentazione | Tendenza all'espansione | Difficoltà di compattazione |
|-----------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Ghiaia | Molto alta | Eccellente | Eccellente | No | Molto facile |
| Sabbia | Media | Buono | Buono | No | Facile |
| Limo | Medio - bassa | Scarso | Scarso | Limitata | Limitata |
| Argilla | Nessuna+ | Moderato | Scarso | Difficile | Molto difficile |
| Organico | Bassa | Molto scarso | Inaccettabile | Limitata | Molto difficile |

Uniformità dello strato, velocità e schema di compattazione

Le strutture di strade ed edifici poggiano su basi di suolo che oltre a essere compattate a specifica sono anche compattate in modo uniforme. Le variazioni della densità della base possono dare origine a buche, solchi e assestamenti delle fondazioni sotto gli edifici. Una delle principali cause delle variazioni di densità dei suoli risiede nell'uso di tipi di suolo diversi collocati fianco a fianco.

Poiché i vari tipi di suolo si compattano in modo differente, fornendo risultati di compattazione diversi, durante le attività di costruzione occorre prestare attenzione a utilizzare materiali simili per ciascuno strato. Se sono richiesti tipi diversi di materiale, cercare di adottare lo stesso tipo per ciascuno strato; non utilizzare materiali diversi in una spargitrice orizzontale. Questo aspetto può risultare critico per il conseguimento di risultati di compattazione uniformi.

Un'altra causa di variazione della densità è rappresentata da un tenore di umidità non costante. Poiché è più difficile compattare i suoli troppo secchi o troppo bagnati, durante le attività di compattazione in tutto il cantiere è opportuno assumere sempre come target il tenore di umidità ottimale determinato mediante la prova Proctor. Ciò aiuta a ottenere i massimi risultati possibili in termini di densità e uniformità.

Lo spessore degli strati non è di solito soggetto a un controllo severo, ad eccezione forse di uno strato intermedio sotto la superficie della pavimentazione.

Spessore dello strato – La tecnologia dei compattatori progredisce costantemente, offrendo continuamente nuove opzioni e variazioni del processo di compattazione. Anche con il compattatore più avanzato, tuttavia, una volta applicata in modo uniforme l'energia di compattazione, gli strati più sottili risultano più densi di quelli relativamente spessi. Benché questa regola presenti delle eccezioni, è opportuno adottare valori di spessore degli strati che ottimizzino i ritmi di produzione, in funzione della densità richiesta, riducendo al minimo il numero delle passate del compattatore.

Sul raggiungimento del target di compattazione influiscono anche le condizioni dello strato precedente o della base sottostante. In un substrato che non è stato compattato a fondo in modo sistematico sono presenti aree relativamente cedevoli. I risultati della compattazione dello strato



A parità di tutti gli altri fattori, come il tenore di umidità e il tipo di materiale, l'uniformità dello spessore degli strati dà origine a una densità uniforme in tutto il cantiere. Un'attenzione insufficiente per lo spessore degli strati può causare il mancato rispetto delle specifiche del lavoro.

Altri fattori in grado di influire sulla compattazione, e spesso oggetto di un'attenzione inadeguata, sono la copertura e il numero di passate. Quest'ultimo, la velocità del compattatore e le impostazioni di vibrazione sono parametri facili da controllare. Una tecnologia intelligente come il controllo della compattazione CAT con funzioni di mappatura GNSS è in grado di fornire un riferimento visivo per garantire una copertura e un numero di passate corretti. Una copertura uniforme è più efficiente e fornisce prestazioni migliori di una compattazione casuale del materiale.



successivo presentano a loro volta una variabilità indesiderata. Ogni strato deve essere compattato in modo completo e uniforme, per garantire la possibilità di compattare con buoni risultati anche gli strati successivi.

Energia di compattazione – L'energia di compattazione è l'energia trasferita al suolo per riorganizzarne e compattarne le particelle. Variando parametri della macchina quali il peso, la larghezza e la pressione degli pneumatici, nonché l'ampiezza e la frequenza delle vibrazioni, è possibile modificare l'energia di compattazione. Alcuni di tali parametri sono regolabili su ogni singola macchina. Altri, come la larghezza, possono richiedere l'adozione di una macchina diversa per poter variare l'energia di compattazione. Alcuni valori di tali parametri sono necessari per qualunque progetto.



Velocità di lavoro – La velocità di trasferimento riveste in generale un ruolo di rilievo per la produttività delle attività di costruzione, poiché all'aumentare della velocità delle macchine il tempo di completamento dei progetti si riduce. A differenza di quanto accade con tutti gli altri tipi di compattatori, tuttavia, nel caso di quelli vibranti la produttività aumenta in generale al diminuire della velocità di trasferimento. Dal punto di vista economico esiste una velocità ottimale che consente al compattatore di fornire la compattazione richiesta.



Regole generali di posizionamento e compattazione del suolo – Viene riportata di seguito una serie di regole generali che la direzione e gli operatori dei cantieri dovrebbero prendere in esame all'inizio di ogni progetto di compattazione.

- Quando si posiziona un nuovo strato di materiale del suolo, occorre stenderlo in modo uniforme sull'intera area. Evitare di stendere suoli con un tenore di umidità eccessivo. Stendere il materiale con un bulldozer che procede lentamente, e realizzare il profilo appropriato. Non seppellire strati saturi sotto nuovi materiali.
- Le aree della superficie che risultano concave o presentano una segregazione visibile devono essere rettificare aggiungendo materiale con la medesima composizione e una buona granulometria.
- Non appena ultimate le operazioni di stesa, compattare il suolo partendo dall'esterno e procedendo verso il centro dell'area.
- Compattare anche le aree dei terrapieni / delle banchine; compattare queste ultime partendo dai margini esterni e procedendo verso le zone centrali. Lisciare e sigillare la superficie.
- Quando si lavora con materiali sensibili agli agenti atmosferici, tutto il suolo posizionato deve avere una pendenza di scarpata pari al 6 per cento circa, per evitare accumuli di acqua in superficie.
- In caso di condizioni meteorologiche avverse, compattare ogni strato procedendo per strisce di larghezza pari a un singolo tamburo e lavorando ogni striscia fino a quando non è perfettamente compatta. Passare quindi alla striscia successiva, ripetendo il processo e spostandosi sullo strato fino a quando l'intera area non è compattata. A fine giornata, avere cura di lisciare e sigillare la superficie per evitare l'ulteriore penetrazione dell'acqua.
- Quando si compatta una base flessibile, se la sua rigidità è sufficiente conviene adottare un'ampiezza bassa e una frequenza elevata. Utilizzare invece un'ampiezza elevata e una frequenza medio - bassa quando si compattano contemporaneamente la base e il primo strato.
- È possibile ottenere i risultati migliori combinando, nell'ordine, la compattazione vibrante e quella statica.

[METODI DI MISURAZIONE DELLA COMPATTAZIONE]

La densità è per tradizione il parametro di quantificazione in laboratorio della compattazione del suolo, nonché quello di uso più comune a livello storico per definire e valutare mediante misurazioni sul campo i requisiti di compattazione. Le prove di laboratorio (come quelle Proctor) stabiliscono il tenore di umidità che permette di raggiungere la massima densità. I valori di densità target sul campo vengono espressi come percentuali della massima densità secca raggiunta in laboratorio.

Per la densità sul campo sono di solito richiesti valori compresi fra il 95 per cento del risultato della prova Proctor standard nel caso dei terrapieni, e il 100 per cento del risultato della prova Proctor modificata nel caso delle strutture stradali. Analogamente, il tenore di umidità deve essere compreso entro un intervallo centrato sul tenore di umidità ottimale determinato in laboratorio.

Per garantire che i due valori di rilievo, vale a dire il tenore di umidità e la densità target, vengano mantenuti a specifica in ogni punto di un determinato lavoro di costruzione, sono da sempre necessarie prove sul campo punto per punto. Tali prove sono inoltre in grado di fornire indicazioni sull'efficacia delle attrezzature di compattazione e sui metodi di costruzione utilizzati. Di recente, come strumento per la determinazione della qualità di compattazione in cantiere sono stati accolti con maggior favore metodi di misurazione della compattazione integrati nelle macchine.

Molte autorità richiedono ora la cosiddetta "compattazione intelligente", che consiste nel potenziamento dei sistemi di misurazione della compattazione integrati nelle macchine con sistemi di mappatura che associano le misure alla posizione in cantiere e forniscono dati per attività successive di analisi e documentazione.

LA STORIA IN EVOLUZIONE DELLA MISURAZIONE DELLA COMPATTAZIONE



Metodi storici

- Controllo dei processi / specifiche dei metodi
- Prove "punto per punto"
 - Sonda Trolox / densimetro nucleare
 - Penetrometri
 - Deflettometri
 - Prove di carico su piastra

Relativamente precisi

Viene tipicamente campionato meno dell'1% dell'area di lavoro complessiva



Misurazione della compattazione integrata nella macchina

- Accelerometro
- Machine Drive Power (MDP)

Indicazioni di rigidità o portanza disponibili in tempo reale per l'operatore

Difficoltà di correlazione con le misurazioni storiche punto per punto

Variabilità delle misurazioni in determinati tipi di suoli o applicazioni



Compattazione intelligente

- Aggiunta di funzioni di mappatura satellitare
- Potenziamento delle misurazioni di compattazione integrate nella macchina mediante la correlazione delle stesse e dei dati della macchina con la posizione esatta di esecuzione delle misurazioni
- Generazione di mappe dettagliate per la visualizzazione delle attività ultimate
- Disponibilità di dati per attività di analisi e documentazione

Le considerazioni esposte di seguito illustrano alcuni dei metodi di uso più comune. Occorre tenere presente che ogni metodo di prova misura proprietà diverse del suolo (ad esempio densità, resistenza e così via) e che, pertanto, i tentativi di correlare fra loro le prove devono essere effettuati sulla base di

una conoscenza delle differenze dal punto di vista fisico. La natura stessa della procedura di prova punto per punto richiede inoltre di ipotizzare che i risultati delle prove nei diversi punti siano validi in ogni punto delle aree adiacenti non sottoposte a prova, o in tutto il cantiere.

Metodi (storici) di misurazione sul campo –

Misurazioni relative alla densità del suolo – Per misurare sul campo la densità del suolo si utilizzano due metodi di base:

1. Misurazione della risposta del suolo alle particelle radioattive, eseguita mediante un dispositivo detto sonda Troxler o “densimetro nucleare”.

Questi dispositivi costituiscono ormai il metodo più utilizzato per misurare sul campo la densità del suolo, ma presentano uno svantaggio, in quanto per utilizzarli è richiesta una licenza e sono necessarie attività periodiche di monitoraggio e prova della sorgente di radiazioni presente nell'apparecchiatura. Per trasportarli, inoltre, sono spesso richiesti documenti e permessi.

Il dispositivo fornisce un'indicazione del tenore di umidità e della densità a profondità non superiori a circa 50 mm (2 in) e, rispettivamente, 300 mm (12 in); a tale scopo esso immette nel terreno oggetto della prova neutroni e, rispettivamente, raggi gamma. La prova è rapida e può essere eseguita senza perturbare il materiale. I risultati migliori si ottengono nel caso dei suoli omogenei.

Per la misurazione della densità mediante un dispositivo nucleare esistono tre procedure di base, vale a dire il metodo a trasmissione diretta, quello a retrodiffusione e quello “a distanza in aria”.

Il *metodo a trasmissione diretta* fornisce la massima precisione, il minimo errore di composizione e il minimo errore di rugosità della superficie. È possibile utilizzarlo per prove in un intervallo di valori di profondità compreso fra 50 e 300 mm (2 - 12 in). L'aspetto più importante del metodo a trasmissione diretta consiste nel fatto che l'operatore esercita un controllo diretto sulla profondità di misurazione.

Il *metodo a retrodiffusione* elimina la necessità di creare un foro di accesso nel suolo compattato, in quanto l'unità viene appoggiata sulla superficie. Ciò compromette tuttavia la



Una sonda Troxler o densimetro nucleare

precisione e aumenta la probabilità di errori di composizione. Questo metodo fornisce le massime prestazioni per bassi valori di profondità, vale a dire 50 - 75 mm (2 - 3 in).

Il *metodo a distanza in aria* assicura un miglioramento dell'errore di composizione, e può essere utilizzato sia nella modalità diretta, sia in quella a retrodiffusione. Il dispositivo viene sollevato al di sopra della superficie oggetto della prova, in modo da ridurre l'errore di composizione, ma la precisione non è comunque paragonabile con quella del metodo a trasmissione diretta.

Alcune limitazioni associate alle apparecchiature di prova nucleari sono costituite dalle precauzioni che devono essere adottate durante la movimentazione dei materiali radioattivi, nonché dal fatto che i suoli organici o i materiali con un tenore elevato di sale e/o radioattività forniscono a volte indicazioni falsate. In queste misurazioni, le vibrazioni del terreno dovute alle attrezzature di costruzione possono inoltre costituire una fonte di errori.



Il metodo del cono di sabbia offre una precisione collaudata.

2. Scavo e pesatura di un volume di suolo, e misurazione del volume del foro dal quale esso è stato estratto. La pesatura di un suolo è un metodo diretto, a condizione che sia disponibile una bilancia di precisione. La misurazione del volume del foro dal quale è stato estratto il campione di suolo non è altrettanto immediata, ma sono state sviluppate e utilizzate alcune procedure che offrono una precisione ragionevole. Nel seguito vengono descritti due esempi:

Metodo del cono di sabbia – Il metodo del cono di sabbia prevede una procedura in più fasi che richiede più tempo di quanto non occorra con le sonde Troxler o i densimetri nucleari, ma offre una precisione collaudata. Esso viene a volte utilizzato in combinazione con il metodo nucleare per verificare la taratura dei densimetri nucleari. Questo metodo si concentra sulla misurazione del volume di sabbia necessario per riempire la cavità dalla quale è stato estratto il campione di suolo. La sabbia è facile da introdurre nelle cavità e possiede una densità costante, nel senso che non mostra variazioni significative di tale parametro quando la si trasferisce da un contenitore a un incavo nel suolo.

Metodo del cuscino d'acqua – Il metodo del cuscino d'acqua è anche noto come prova con densimetro Washington. Le prime tre fasi della prova, vale a dire prelievo, pesatura ed

essiccazione di un campione, sono identiche a quelle del metodo del cono di sabbia. Ciò consente di calcolare il tenore di umidità.

In questo caso, tuttavia, in luogo del cono di sabbia per misurare il volume di suolo prelevato si utilizza un densimetro Washington, un dispositivo riempito con un fluido e posizionato sopra il foro. All'interno di quest'ultimo viene introdotto un cuscino fissato alla piastra di base dello strumento. Aprendo una valvola situata sul fianco del densimetro, all'interno del cuscino viene immesso un fluido tarato. A mano a mano che si riempie, il cuscino assume la forma del foro. Il densimetro è tarato in modo da consentire al dispositivo di misurare il volume del fluido immesso e, di conseguenza, quello del foro.

La densità (peso unitario bagnato) viene ricavata dividendo il peso del campione prelevato per il volume del foro, esattamente come nel metodo del cono di sabbia. Dividendo il peso unitario bagnato per un fattore pari a uno più il tenore di umidità è inoltre possibile ricavare il peso unitario secco.

Il metodo del cuscino d'acqua presenta alcune limitazioni, vale a dire il tempo necessario per ottenere i risultati e il fatto che la precisione dipende dalla capacità del cuscino di adattarsi alle irregolarità delle pareti del foro.



Un penetrometro a cono dinamico in uso.

Misurazioni relative alla resistenza e alla rigidità del suolo – La densità del suolo è la misura utilizzata storicamente per la compattazione del medesimo, sia per definire i requisiti, sia per qualificare i risultati. Si registra tuttavia una tendenza crescente all'uso di misure della compattazione del suolo caratterizzate da un legame più diretto con i requisiti ingegneristici, i quali riguardano nella maggior parte dei casi la resistenza del suolo. Sul campo vengono utilizzate varie misurazioni della resistenza: questa guida ne descrive alcune (ma non tutte). Le misurazioni della resistenza utilizzate sul campo rientrano in tre categorie fondamentali:

1. Resistenza del suolo alla penetrazione –

Le misurazioni di uso più comune in relazione alla penetrazione del suolo vengono eseguite mediante i *Penetrometri a cono dinamico (DCP, Dynamic Cone Penetrometer)*. La prova consiste in una misurazione della forza/energia o della resistenza di attrito / allo scorrimento necessarie per fare penetrare nel terreno un piccolo cono mediante un maglio di peso fissato, lasciato cadere da un'altezza nota. È possibile utilizzare tale dispositivo per stimare l'indice di portanza californiano e i valori di portanza, in Newton al millimetro quadrato (libbre al pollice quadrato), fino a una profondità di 1830 mm (72 in). Un uso errone del maglio a caduta, un conteggio errato dei colpi di maglio e la variazione della profondità per ogni colpo (o serie di colpi) danno tuttavia origine a misurazioni errate. Fornisce risultati discutibili anche l'impiego in suoli con pietrisco.

I coni di uso comune presentano una base da 20 mm (¾ in) e un angolo al vertice pari a 60 gradi. La penetrazione del cono avviene a seguito dell'impatto di una massa battente con una piastra, che a sua volta impartisce la forza dinamica al cono, facendolo penetrare nel suolo. Viene registrata la distanza di penetrazione per colpo. Nei suoli più duri, la penetrazione del cono richiede vari colpi; in questi casi vengono registrati il numero di colpi e la distanza di penetrazione.

Il metodo DCP offre il vantaggio di permettere la misurazione della resistenza del suolo a una profondità maggiore rispetto ad altre tecniche. È infatti possibile fare penetrare un cono per 1 m (39 in) o più, anche se l'attrito del suolo con l'albero del penetrometro a cono può influire sui valori ottenuti, specialmente a profondità superiori a un metro. Il metodo DCP non funziona su materiali molto duri, come i suoli stabilizzati con calce e induriti; esso richiede inoltre un certo sforzo fisico, e può risultare faticoso in caso di utilizzo ripetitivo.

2. Risposta del suolo a una massa battente

– Il principio alla base di queste misurazioni può essere espresso come segue: i suoli più rigidi causano un maggiore rimbalzo quando si lascia cadere un peso sulla loro superficie. Un dispositivo di questo genere è il deflettometro leggero a massa battente (LWD, Light Falling Weight Deflectometer). Una versione più pesante è detta deflettometro a massa battente (FWD, Falling Weight Deflectometer).

I deflettometri leggeri a massa battente (LWD) misurano la rigidità o il modulo elastico dei suoli lasciando cadere un peso fissato da un'altezza nota su una piastra di base dotata di uno o più accelerometri e altri sensori. Rilevando la flessione o il movimento della piastra di base, è possibile calcolare il modulo di elasticità dinamico in megapascal (MPa) fino a una profondità di circa 150 mm (6 in). L'uso del dispositivo richiede che la superficie del terreno sia piatta e liscia. Da una serie di prove è emerso che deflettometri di produttori differenti forniscono risultati diversi per il medesimo suolo.

Il deflettometro a massa battente (FWD)

è una versione più grande del dispositivo portatile esaminato in precedenza. I deflettometri FWD vengono montati su appositi rimorchi e non sono altrettanto facili da trasportare, ma si basano sui medesimi principi:

vengono colpite piastre molto più grandi, creando una zona di influenza più ampia e consentendo misurazioni fino a profondità maggiori. Mentre i deflettometri LWD sono in grado di effettuare misurazioni fino a una profondità di 150 mm (6 in), le versioni più grandi dei deflettometri FWD utilizzano livelli di energia in grado di trasmettersi facilmente fino a 1 m (39 in) all'interno del suolo, riproducendo con maggiore fedeltà l'impatto prodotto da un compattatore vibrante.



Un deflettometro leggero a massa battente

3. Resistenza del suolo a un peso statico

– Questo metodo è simile a quello delle prove con masse battenti, in quanto misura la rigidità dei suoli partendo dalla loro superficie, ma è diverso in quanto utilizza una pressione statica invece di una forza dinamica. Poiché lo scopo della compattazione consiste nell'ottenere un suolo rigido, occorre una forza molto elevata per ottenere una flessione misurabile del suolo utilizzando una pressione statica. La misurazione della rigidità del suolo richiede l'uso di piastre di dimensioni approssimativamente uguali alla profondità di misurazione desiderata; ciò significa che occorre utilizzare una piastra con un diametro prossimo a 30 cm (12 in) piuttosto che una con dimensioni dell'ordine del centimetro o del pollice.

Prova di carico su piastra – Sono disponibili vari dispositivi per l'esecuzione di prove di carico su piastra, con piastre di vari diametri. La forza necessaria per dare origine a uno spostamento misurabile della piastra all'interno del suolo aumenta al crescere del diametro della piastra stessa. A mano a mano che la piastra viene caricata, viene misurata e riportata su un grafico la flessione corrispondente a una determinata forza. Il grafico ottenuto fornisce il modulo (di rigidità) del suolo e indica la sua portanza. Le prove svolte con piastre



Preparazione di una prova di carico su piastra

di carico grandi richiedono forze dell'ordine di qualche tonnellata per spingere verso il basso la piastra, di solito del diametro di 300 mm (12 in), facendola penetrare nel terreno. Come sorgente del carico si utilizzano spesso le attrezzature di costruzione disponibili. Le misure ottenute mediante le prove di carico su piastra vengono utilizzate direttamente nella progettazione dello spessore delle pavimentazioni.



Un compattatore di prova

Altre misurazioni sul campo – Vengono infine utilizzati altri metodi di misurazione sul campo, che forniscono valori di compattazione ma non rientrano specificamente nelle categorie illustrate in precedenza. Tali metodi sono in uso da decenni, individualmente o in combinazione con altre prove di valutazione della capacità del suolo di sostenere un carico, e molti vengono utilizzati ancora oggi.

1. Compattatore di prova – La compattazione di prova è stata ampiamente utilizzata nel Nord America come alternativa al metodo di prova per punti, allo scopo di verificare in modo diretto la risposta delle superfici compattate ai carichi applicati. Questa prova è in grado di identificare i punti morbidi e di garantire una portanza uniforme. Il processo prevede di fare rotolare su una superficie una massa pesante dotata di ruote, misurando la profondità dei solchi o la flessione. La formazione di solchi eccessivi rivela una compattazione insufficiente.

La compattazione di prova non è una misura della resistenza dei suoli diretta come quelle fornite da alcuni dei metodi descritti in precedenza, ma può risultare una misura più diretta della qualità di compattazione nei casi in cui quest'ultima si prefigge unicamente di aumentare la rigidità del suolo a supporto di strutture quali strade e parcheggi. Se nella base del suolo non si formano solchi sotto l'azione di un compattatore di prova carico, non dovrebbero verificarsi flessioni per effetto del traffico, ovviamente nell'ipotesi che la strada disponga di un drenaggio adeguato e rimanga stabile nel tempo.

Fra tutte le procedure tradizionali di verifica del costipamento, la compattazione di prova è il metodo che fornisce la massima ampiezza di campionamento, in quanto permette di sottoporre a prova in modo poco costoso un'area molto più grande di quanto non siano in grado di fare le prove per punti.

2. Forno portatile per l'umidità del suolo

– Il forno portatile per l'umidità del suolo è un dispositivo utilizzato per fornire una misura del tenore di umidità del terreno per scopi di correlazione con le misure di portanza ottenute mediante altri dispositivi. Le misure fornite da altri dispositivi esaminati in questo documento non sono valide se non si conosce il tenore di umidità del suolo.



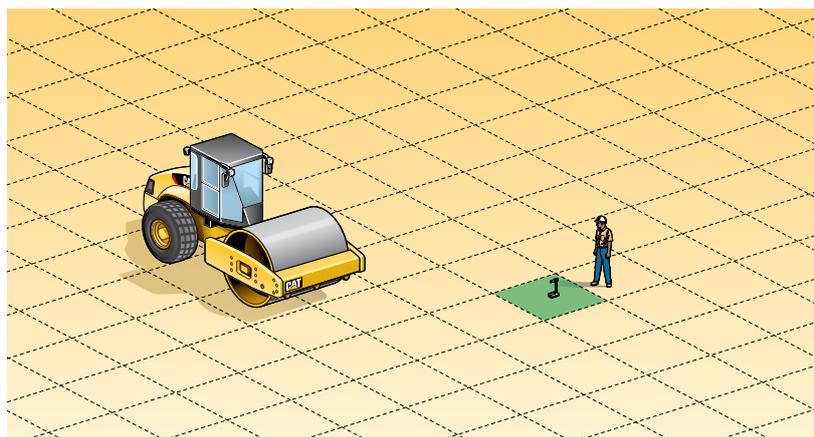
Un forno portatile per l'umidità del suolo

Metodi di misurazione della compattazione integrati nelle macchine

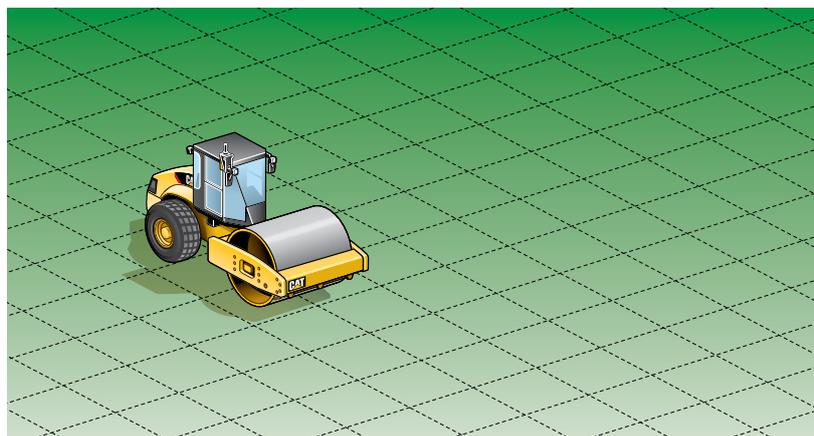
– La compattazione è per tradizione e in larga misura un'attività che procede per tentativi. In mancanza di dati affidabili sullo stato del suolo, per valutare se la compattazione è completata gli operatori si affidano alla propria esperienza e ai propri sensi. In alternativa, una specifica di metodo descrive una procedura che fornisce risultati soddisfacenti a giudizio degli ingegneri, a condizione che venga seguita scrupolosamente. Il suolo compattato viene poi sottoposto a prove per punti su un'area prestabilita. Tutti i risultati delle prove ritenuti insufficienti danno luogo a una rilavorazione dell'area interessata. In alternativa alle prove per punti, in alcune aree si utilizzano compattatori di prova costituiti tipicamente da rimorchi o autocarri con un carico elevato. Come spiegato in precedenza, il compattatore di prova viene trainato sul terreno e la profondità dei solchi tracciati dalle sue ruote indica le aree in cui la compattazione è insufficiente.

A prescindere dal metodo di verifica della qualità di compattazione, gli operatori tendono sostanzialmente a stimare in base all'esperienza la qualità del loro lavoro a mano a mano che il progetto procede. Il metodo di verifica della qualità mediante verifiche puntuali e compattatori di prova consente inoltre di controllare solo una piccola parte dell'area complessiva compattata, che è di solito molto più grande. Ciò non esclude la possibilità che numerose aree siano compattate in modo inadeguato; si tratta di un problema che può rivelarsi molto costoso qualora causi in seguito cedimenti di strade o edifici.

I sistemi di misurazione della compattazione integrati nelle macchine cambiano radicalmente il quadro, fornendo agli operatori un'ampia serie di dati sullo stato della compattazione. Gli operatori in possesso di una formazione opportuna possono utilizzare tali sistemi per stabilire se la compattazione soddisfa i requisiti o se in un'area sono presenti problemi di umidità. I sistemi di misurazione della compattazione integrati nelle macchine sono in grado di avvertire l'operatore della presenza di oggetti sepolti che possono influire negativamente sulla qualità della compattazione, come blocchi di argilla, tronchi d'albero o grandi pietre.



I sistemi di misurazione tradizionali analizzano soltanto una piccola frazione dell'area compattata.



I sistemi di misurazione della compattazione integrati nelle macchine esaminano invece tutta l'area compattata.



I sistemi di misurazione della compattazione integrati nelle macchine forniscono una previsione o un'indicazione circa la rigidità del suolo.

Che cosa misura la tecnologia di compattazione integrata nelle macchine? È importante comprendere che i sistemi in questione non misurano la densità del suolo, anche se quando si esaminano i risultati tale espressione ricorre spesso. A causa della variabilità delle attività di compattazione, essi non misurano in modo diretto alcuna caratteristica, ma una serie di fattori che forniscono una previsione o un'indicazione circa la rigidità del suolo. Come ricordato in precedenza, la rigidità è la capacità di un suolo dotato di una certa forma e composizione di resistere alla deformazione

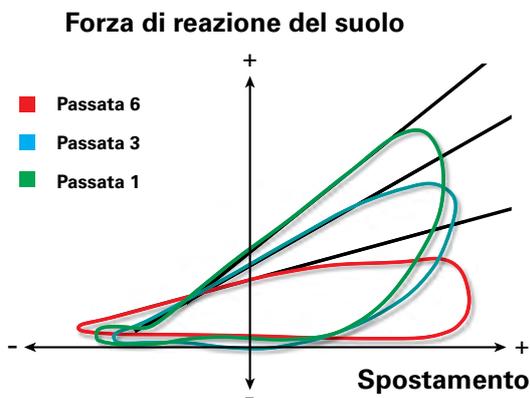
o alla flessione quando viene sottoposto a un carico. Rispetto alla densità, tale proprietà è un indicatore migliore della portanza, poiché alcuni materiali densi risultano fragili sotto carico. Il materiale deve essere flessibile, ma non spezzarsi.

Sono disponibili due tipi di tecnologie di misurazione, vale a dire i sistemi basati su accelerometri e quelli basati sull'energia. Tali sistemi eseguono le misurazioni in modi totalmente diversi, e misurano pertanto quantità anch'esse completamente diverse.

Misurazione basata su accelerometri – I sistemi basati su accelerometri sono disponibili presso la maggior parte dei fornitori. Essi misurano la reazione del suolo ai colpi del tamburo vibrante mediante un accelerometro montato sul medesimo. Per eseguire tali misurazioni vengono impiegati due metodi diversi.

Uno di essi è noto come metodo a spostamento forzato. Tale metodo si avvale di un accelerometro montato sull'assale del tamburo per misurare lo spostamento di quest'ultimo. Misurando l'accelerazione del tamburo e conoscendo le caratteristiche del tamburo stesso e dell'apparato vibrante, nonché il peso totale della macchina e la sua distribuzione, è possibile calcolare la forza richiesta per ottenere un determinato spostamento. Quanto più il suolo è rigido, tanto maggiore è la forza richiesta per fare penetrare il tamburo nel terreno fino a una certa profondità; una forza costante causa viceversa uno spostamento verso il basso del tamburo, all'interno del suolo, e tale spostamento è sempre più piccolo a mano a mano che il suolo diventa più rigido. Poiché l'area di contatto fra il suolo e il tamburo varia al variare dell'impatto con il terreno, questo metodo fornisce stime, non misurazioni esatte.

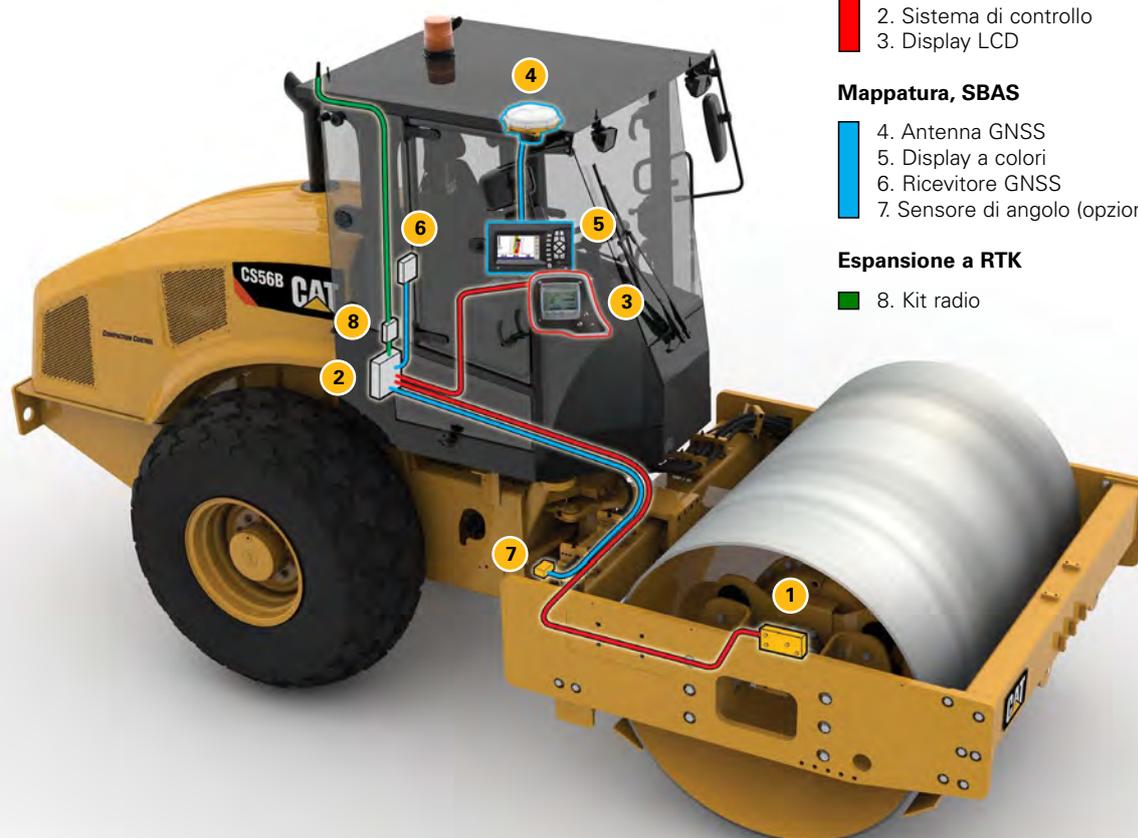
SPOSTAMENTO FORZATO



La rigidità del suolo aumenta al crescere della pendenza della curva.



Gli accelerometri misurano la reazione del suolo quando viene colpito dal tamburo vibrante.



Sistema di misurazione

- 1. Accelerometro
- 2. Sistema di controllo
- 3. Display LCD

Mappatura, SBAS

- 4. Antenna GNSS
- 5. Display a colori
- 6. Ricevitore GNSS
- 7. Sensore di angolo (opzionale)

Espansione a RTK

- 8. Kit radio

COMPACTION METER VALUE (CMV)

Il secondo metodo è detto *Compaction Meter Value (CMV)*. Questo metodo è stato inventato negli anni '70 dall'azienda svedese Geodynamik, ed è attualmente utilizzato da Caterpillar e vari altri produttori. Invece di tentare di calcolare lo spostamento del tamburo, l'accelerometro montato sul medesimo misura il rimbalzo o l'accelerazione G alla frequenza di vibrazione, nonché le forze G a una frequenza doppia di quella di vibrazione del tamburo (detta anche "prima armonica"). Inserendo in una formula i risultati delle due misurazioni, si ottiene un valore di compattazione, detto *Compaction Meter Value (CMV)*, che fornisce un'indicazione della rigidità del suolo.

In altri termini, il principio alla base della misurazione si concentra sulla variazione della risposta dinamica del compattatore all'aumentare della rigidità del terreno sottostante. In analogia con quanto accade nei deflettometri a massa battente, questo sistema basato su accelerometri misura l'entità del "rimbalzo" del tamburo del compattatore sul terreno. I suoli non compattati tendono ad assorbire l'energia di vibrazione, ma a mano a mano che il terreno presente sotto il compattatore diventa più rigido per effetto delle passate, la sua superficie inizia a riflettere l'energia e il tamburo tende a rimbalzare a una frequenza maggiore di quella della forza vibrante. Le misure dell'aumento del rimbalzo possono essere tradotte in un'indicazione del livello di compattazione.

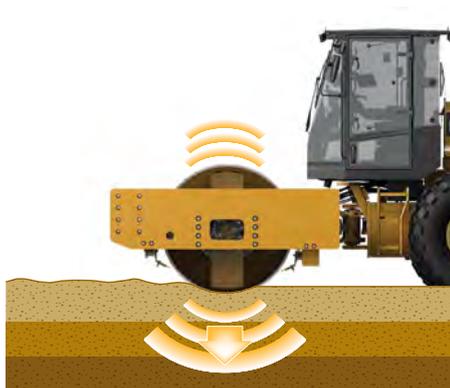
A mano a mano che il suolo diventa più rigido, il rimbalzo diventa più pronunciato. Quando la frequenza di risonanza del terreno diventa uguale a quella di vibrazione della macchina, il suolo ha raggiunto la massima rigidità, e non è più in grado di assorbire l'energia di compattazione del compattatore. A questo punto la macchina inizia a disaccoppiarsi. A prescindere dal metodo di misurazione adottato, i sistemi basati su accelerometri monitorano in quale misura la macchina si avvicina al disaccoppiamento. Tale misurazione è detta Resonance Meter Value (RMV), e viene utilizzata come indicatore della validità delle misurazioni della rigidità; la validità di tali misurazioni è tanto minore quanto più la macchina è vicina al disaccoppiamento.

I sistemi basati su accelerometri misurano un volume di suolo con una profondità di circa 1 - 1,2 m (36 - 48 in), a seconda della composizione del suolo stesso e delle caratteristiche del compattatore. Si ottiene quindi un rilevamento "medio" calcolato la media di tale rilevamento, e non è pertanto possibile isolare indicazioni di rigidità precise a una profondità specifica. Il rilevamento in profondità è tuttavia eccellente per individuare oggetti sepolti, ad esempio nella sottobase, in grado di influire sulla qualità del lavoro e sulle prestazioni a lungo termine della struttura.

Uno degli svantaggi dei sistemi basati su accelerometri risiede nel fatto che per poter eseguire le misurazioni occorre che il tamburo stia vibrando. Tali sistemi sono quindi inadatti per i suoli coesivi e semi-coesivi, a causa dell'effetto smorzante di tali materiali. I sistemi basati su accelerometri non sono pertanto efficaci quando vengono utilizzati su compattatori artigliati o nelle applicazioni che prevedono unicamente la compattazione statica, poiché non è possibile eseguire le misurazioni in assenza di vibrazioni.

Un altro svantaggio dei sistemi basati su accelerometri è costituito dalla profondità di misurazione. Come descritto in precedenza, a seconda del tipo di suolo e della rigidità del materiale su cui si lavora, le misurazioni possono giungere a una profondità di ben 1,2 m (4 ft), chiaramente molto superiore alla profondità / allo spessore di qualunque strato in via di compattazione. Si ottiene pertanto una rigidità media, calcolata su una serie di strati che include il materiale della sottobase.

COME FUNZIONANO I SISTEMI CMV?

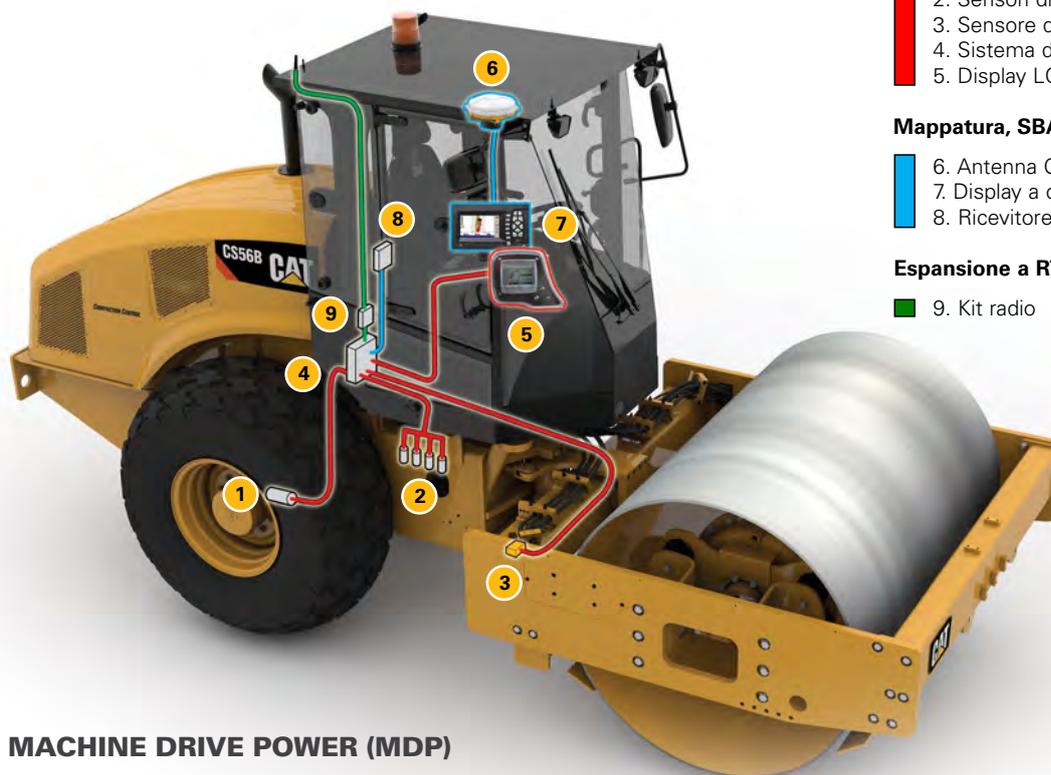


Il tamburo vibrante trasmette al suolo l'energia di vibrazione.



In risposta a tale sollecitazione, il materiale entra in uno stato di vibrazione che viene rilevato dall'accelerometro.

I sistemi CMV calcolano un'indicazione teorica della rigidità del suolo.



Sistema di misurazione

- 1. Sensore di velocità
- 2. Sensori di pressione
- 3. Sensore di angolo
- 4. Sistema di controllo
- 5. Display LCD

Mappatura, SBAS

- 6. Antenna GNSS
- 7. Display a colori
- 8. Ricevitore GNSS

Espansione a RTK

- 9. Kit radio

MACHINE DRIVE POWER (MDP)

Misurazione basata sull'energia – L'altra tecnologia di misurazione attualmente disponibile rileva l'entità della resistenza al rotolamento che il compattatore vibrante incontra mentre avanza sul terreno. Tale tecnologia si basa sul principio secondo cui l'energia necessaria per vincere la resistenza al rotolamento è maggiore sui suoli sciolti che su quelli densi. Al progredire delle passate, il suolo si compatta e mostra un aumento della rigidità e della portanza. A mano a mano che la resistenza opposta dal materiale diminuisce, al compattatore occorre un'energia minore per spostarsi sull'area compattata. Ciò consente di correlare la resistenza al rotolamento, e l'energia necessaria per vincerla, alla rigidità del materiale. Soltanto Caterpillar offre attualmente la tecnologia di misurazione della compattazione basata sull'energia, detta Machine Drive Power (MDP).

Le misurazioni basate sull'energia presentano numerosi vantaggi. Il principio della tecnologia Machine Drive Power è simile a quello della compattazione di prova: meno le ruote affondano nel terreno, meno energia occorre per farle muovere sul medesimo. Esiste pertanto una forte correlazione fra i valori MDP e quelli di profondità dei solchi ottenuti nelle verifiche mediante compattazione di prova. Vi è inoltre un'elevata

correlazione fra risultati MDP e rigidità del suolo, ma il principale vantaggio delle misurazioni basate sull'energia risiede forse nel fatto che si tratta di un calcolo e di un'indicazione più tangibili e diretti della capacità dei terreni di sostenere un carico. Se la rigidità del terreno è sufficiente per ridurre al minimo l'energia trasferitagli dalla macchina di compattazione, la portanza del suolo è sufficiente per soddisfare i requisiti di compattazione. Tale relazione, misurabile nel caso dei compattatori sia vibranti, sia non, rappresenta il motivo per cui si compattano i suoli.

Poiché non occorre conoscere l'energia di vibrazione per calcolare la rigidità del suolo, il metodo di misurazione della compattazione basato sull'energia è adeguato per tutti i tipi di suolo, compresi quelli coesivi e non, e fornisce buoni risultati sia con i compattatori a tamburo artigliato, sia con quelli a tamburo liscio. Esso funziona inoltre a prescindere dal fatto che l'apparato vibrante sia attivo o inattivo. I sistemi basati sull'energia sono pertanto molto più versatili, e possono essere utilizzati in un maggior numero di applicazioni rispetto a quelli basati su accelerometri.

La profondità di misurazione dei sistemi basati sull'energia, pari a circa 30 - 60 cm (12 - 24 in) a seconda della composizione del suolo e delle caratteristiche del compattatore, è inoltre inferiore rispetto a quella dei sistemi basati su accelerometri. Tale valore è più prossimo alla profondità tipica di uno strato, e fornisce quindi una misurazione del suolo in via di compattazione invece di una media comprendente più strati e/o il materiale della sottobase presenti sotto lo strato che viene compattato. Tale profondità è inoltre più simile a quella raggiunta con i dispositivi di prova portatili, consentendo così agli appaltatori di effettuare correlazioni più affidabili.

I sistemi basati sull'energia presentano tuttavia anche qualche inconveniente. Poiché la loro profondità di misurazione non è particolarmente elevata, essi non sono a volte in grado di individuare gli oggetti sepolti o le aree di compattazione inadeguata della sottobase con la stessa precisione dei sistemi basati su accelerometri. Quando si utilizza un sistema basato sull'energia mentre l'apparato vibrante è innestato, non è possibile fornire all'operatore dati che lo avvertano dell'imminente disaccoppiamento della macchina.

COME FUNZIONANO I SISTEMI MDP?



Per spostarsi su terreni morbidi occorre più energia.



Per spostarsi su terreni rigidi occorre meno energia.

I sistemi MDP misurano l'energia necessaria per vincere la resistenza al rotolamento, fornendo una misurazione più tangibile e diretta della rigidità del suolo.

Fattori che influiscono sui risultati delle misurazioni di compattazione integrate nelle macchine – Come osservato in precedenza, la compattazione mediante un apparato vibrante è un processo complesso, in cui sulla forza totale di compattazione necessaria per raggiungere i target di compattazione/densità influiscono molti fattori. Con la tecnologia di misurazione della compattazione integrata nelle macchine, gli operatori generano dati sul 100 per cento della superficie compattata, invece dell'1 per cento tipico dei metodi/dispositivi portatili tradizionali. L'operatore è pertanto in grado di individuare eventuali aree compattate in modo inadeguato o punti duri e di adottare le misure necessarie per porre rimedio a tali difetti, ottenendo risultati più omogenei e una qualità più elevata.

A prescindere dalla tecnologia utilizzata, occorre tenere conto di una serie di fattori che influiscono sui risultati delle misurazioni della compattazione integrate nelle macchine e sulla loro correlazione con i dati delle prove sul campo più note. Per utilizzare al meglio la tecnologia di misurazione della compattazione integrata nelle macchine è pertanto indispensabile conoscere l'impatto di ciascuno di tali fattori. La conoscenza del modo in cui ogni fattore influisce sulle misurazioni aiuta gli appaltatori a effettuare misurazioni coerenti e con un livello minimo di variazioni. A tale scopo è utile avere una conoscenza di massima di tre fattori primari:

- Preparazione corretta del sito di prova
- Metodo di prova e acquisizione dei dati
- Parametri della macchina

Preparazione del sito di prova

Una preparazione corretta del sito di prova e un controllo rigoroso delle condizioni del materiale di prova sono condizioni della massima importanza. Se non si riesce a garantire l'omogeneità del materiale e l'uniformità della compattazione per quanto concerne sia le condizioni, sia le materie prime della fondazione, è possibile che vi sia un impatto diretto sulla qualità e la precisione dei dati ottenuti durante le prove.

1. Realizzazione della base o della sottobase utilizzando più materiali

– Per la realizzazione della base o della sottobase vengono spesso utilizzati vari materiali. Una base dura di pietrisco frantumato può ad esempio confinare con una formata da argilla relativamente morbida. Una volta che tali basi siano ricoperte da uno spesso strato di ghiaia, ad esempio da 1 m (39 in), le misurazioni CMV effettuate in corrispondenza della base di pietrisco forniscono valori nettamente superiori a quelli ottenuti in corrispondenza della base di argilla. Eseguendo le prove con un dispositivo portatile si otterrebbero viceversa risultati quasi identici, perché tali dispositivi non sono in grado di effettuare misurazioni a profondità superiori a quella dello strato di ghiaia superficiale. La rigidità della base ha una notevole influenza sulle misurazioni basate su accelerometri, ma può influire in una certa misura anche su quelle basate sull'energia.

La presenza di una base o una sottobase più rigide permette una compattazione più agevole e completa del materiale di riempimento soprastante. Caterpillar consiglia pertanto di eseguire una mappatura o una compattazione di prova del livello di scavo più profondo, per determinarne le condizioni prima dell'apporto, della stesa e della compattazione di nuovo materiale di riempimento. È possibile che occorra rettificare le eventuali aree molto più dure o morbide della maggior parte della



Preparazione di un sito di prova

superficie del cantiere. L'uniformità della compattazione è un obiettivo primario, e richiede una base o una sottobase compattata in modo uniforme e dotata di una rigidità portante uniforme.

2. Tipo di suolo

– Il tipo di suolo da compattare influisce in misura considerevole sui risultati ottenuti con la tecnologia CMV o MDP.

Ciò è dovuto al fatto che i tassi interni di elasticità e smorzamento del suolo sono molto diversi per i suoli fini e quelli granulari. Tale differenza influisce sul modo in cui il suolo risponde alle vibrazioni che gli vengono trasmesse, e ciò influenza a sua volta le modalità di esecuzione delle misurazioni.

3. Tenore di umidità

– Tutte le attività di compattazione di prova o di produzione devono essere eseguite su terreni che si trovano in condizioni note e accettabili. Non è ad esempio consigliabile eseguire prove su materiali "spugnosi" bagnati o saturi d'acqua. Il tenore di umidità del suolo è una variabile sempre presente in cantiere e con un'influenza enorme sui risultati della compattazione. Esso costituisce inoltre la principale causa di variazione dei risultati CMV per il medesimo tipo di suolo. Gli appaltatori esercitano un certo controllo su tale fattore, e possono aggiungere acqua mediante autocisterne, mescolandola poi al terreno, oppure arare quest'ultimo e farlo asciugare. Per ogni suolo esiste un tenore di umidità ottimale, che assicura la massima efficienza di compattazione. Per i suoli sabbiosi tale valore ottimale è compreso fra il 4 e il 12 per cento, mentre per quelli argillosi fra il 9 e il 22 per cento.



I valori forniti dai sistemi di misurazione della compattazione integrati nelle macchine forniscono indicazioni sulla rigidità del suolo, ma risentono dell'umidità presente nel medesimo a causa del modo in cui essa riempie i vuoti presenti fra le particelle del suolo. Se in tali vuoti è presente più aria, la compressibilità di quest'ultima causa una riduzione dei valori rilevati. Se è presente più acqua, la sua relativa incompressibilità produce valori più elevati. A un certo punto è presente una tale quantità di acqua che quest'ultima funge da lubrificante fra le particelle, consentendo loro di scorrere le une sulle altre. Tale effetto causa una nuova riduzione dei valori CMV.

Un vantaggio della tecnologia di misurazione della compattazione integrata nelle macchine consiste nella possibilità di conoscere in

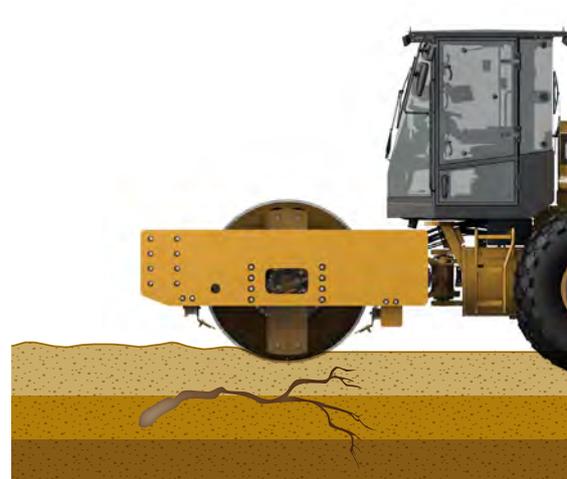
modo indiretto il tenore di umidità di un suolo rilevando in quale misura quest'ultimo si costipa. Per raggiungere un valore target, un compattatore al lavoro su un suolo granulare deve effettuare un numero di passate più elevato a mano a mano che il suolo si asciuga: occorrono tante più passate quanto più il suolo è asciutto. L'operatore può seguire visivamente tale evoluzione sullo schermo, richiedendo eventualmente l'intervento delle autocisterne per il trattamento di specifiche aree secche. Sui suoli bagnati, la forza di compattazione esercitata dal compattatore può causare una migrazione dell'acqua dagli strati inferiori a quelli superiori, dando luogo a una riduzione dei valori rilevati. L'operatore ha la possibilità di richiedere l'intervento di una macchina che apra il terreno, consentendo all'acqua in eccesso di evaporare.

4. Oggetti invisibili sepolti nel suolo –

Quando si compatta uno strato di materiale apparentemente uniforme, i sistemi di misurazione della compattazione integrati nelle macchine forniscono a volte, in aree piccole, valori nettamente maggiori o minori di quelli delle zone circostanti. La prima risposta può consistere in una verifica di tale aree mediante uno strumento del tipo a rilevamento superficiale, come un densimetro nucleare o un deflettometro leggero a massa battente. I risultati di questo tipo di verifiche presentano raramente variazioni paragonabili a quelle delle misurazioni integrate, perché questi tipi di dispositivi non eseguono rilevamenti altrettanto in profondità.

Eventuali indicazioni elevate e localizzate da parte dei sistemi di misurazione della compattazione integrati nelle macchine sono probabilmente dovute alla presenza di una grossa pietra o di un pezzo di cemento sepolti nel suolo a una profondità di qualche decina di centimetri. Eventuali valori bassi possono essere dovuti alla presenza di pneumatici o grandi blocchi di argilla sepolti in un aggregato granulare. Le variazioni dei valori forniti dai sistemi integrati di misurazione della compattazione sono reali, ma comportano l'esecuzione di uno scavo nell'area interessata per determinare la natura dell'oggetto in questione. Ciò può risultare poco pratico.

Introducendo nel terreno una sonda montata su una lunga asta, oppure un penetrometro a cono dinamico, è possibile ottenere qualche indicazione sulla natura dell'anomalia senza dover eseguire uno scavo. Occorre infatti decidere se la variazione rilevata sia in grado di causare problemi del manto stradale finito nella successiva fase di utilizzo. Le variazioni di portanza (rigidità) del suolo di supporto possono causare sollecitazioni della pavimentazione, in grado a loro volta di abbreviarne il ciclo di vita.



ATTENZIONE: quando si lavora in cantieri nei quali possono essere presenti ordigni inesplosi sepolti sotto la superficie, si consiglia di utilizzare un rivelatore di metalli prima di procedere allo scavo e alla compattazione.

Metodo di prova e acquisizione dei dati

1. Correlazione con un metodo noto di prova sul campo – Gli appaltatori privi di una familiarità sufficiente con i sistemi di misurazione della compattazione integrati nelle macchine desiderano ovviamente correlare i dati / le misurazioni con quelli prodotti da una metodologia nota di prova sul campo della compattazione. Le prove di densità mediante sensori Troxler (nucleari) e quelle con cono di sabbia sono state per anni gli standard del settore, e presentano una certa correlazione con i risultati forniti dai sistemi di misurazione integrati nelle macchine, ma non misurano le stesse proprietà del suolo, né raggiungono la stessa profondità.

Il metodo utilizzato per le prove di compattazione sul campo può influire direttamente sul livello di correlazione fra i loro risultati e i valori forniti dai sistemi di misurazione della compattazione integrati nelle macchine. Il volume di suolo effettivamente oggetto di rilevamento con le tecnologie di misurazione della compattazione integrate nelle macchine (CMV o MDP) è nettamente maggiore di quello coinvolto nel caso di un tipico metodo di misurazione sul campo. Nessuno dei dispositivi di misurazione utilizzati per le prove più note di compattazione sul campo raggiunge la medesima profondità, interessa lo stesso volume di suolo o rileva necessariamente le stesse proprietà di quest'ultimo.

Grazie alla loro portabilità e relativa facilità di utilizzo, vengono comunemente utilizzati i seguenti metodi di prova:

- Penetratori a cono dinamico: questi strumenti effettuano misurazioni a una profondità superiore, ma misurano indirettamente l'attrito e la resistenza allo scorrimento del suolo.
- Deflettometri leggeri a massa battente: questi strumenti sottopongono a prova un volume effettivo di materiale pari all'11 per cento circa di quello interessato dai rilevamenti dei sistemi integrati nelle macchine. Qualunque disuniformità dei materiali sottoposti a prova verrebbe pertanto esacerbata e resa ancora più pronunciata dalla differenza fra i volumi di materiale coinvolti nelle prove.

Le correlazioni fra i dati provenienti dai dispositivi di misurazione e quelli forniti dai sistemi di misurazione integrati nelle macchine presentano una variabilità associata al tipo e al numero di prove eseguite. Quando si tenta di correlare i dati delle prove eseguite con sistemi di misurazione integrati nelle macchine e quelli delle prove sul campo più note, le correlazioni più soddisfacenti si ottengono nel caso delle prove di carico su piastre grandi o dei deflettometri a massa battente.

Quando si utilizza una tecnologia di misurazione della compattazione integrata nelle macchine occorre ricordare un ultimo aspetto, vale a dire il fatto che ciò che si sta misurando, un'indicazione della rigidità del suolo, varia mentre lo si misura.



Non è pertanto possibile ritornare nello stesso punto e ottenere esattamente lo stesso valore di una passata precedente. Ciò può costituire un problema per gli enti impegnati nella verifica dei valori delle misurazioni (CMV o MDP) di compattazione con altre prove sul campo della compattazione più conosciute.

Le prove sul campo eseguite con dispositivi portatili dopo la compattazione possono essere ripetute perché non sono invasive e non perturbano il suolo. A causa del loro peso, le macchine equipaggiate con un sistema integrato di misurazione della compattazione modificano il suolo a ogni passata. La prova di carico su piastra è l'unica che ha un effetto paragonabile sul suolo, poiché durante la misurazione viene modificata la struttura stessa di quest'ultimo.

I valori forniti dai sistemi di misurazione della compattazione integrati nelle macchine diventano più ripetibili a mano a mano che il suolo si avvicina al suo stato finale di massima compattazione. In quel momento si registra una variazione minima dei risultati di misurazione della compattazione fra le passate. Se la struttura del suolo presenta una certa fragilità, tuttavia, i valori di compattazione presentano oscillazioni verso l'alto e verso il basso, perché la struttura del suolo si rafforza

fino a un certo livello, disgregandosi poi nella passata successiva. Questo fenomeno, detto "decompattazione", si verifica spesso in alcuni tipi di suoli granulari.

2. Quantità di dati di prova registrati – Sul livello di correlazione con la tecnologia di misurazione della compattazione integrata nelle macchine possono influire anche un intervallo stretto o un numero limitato di misurazioni. Per il confronto con i valori forniti dai sistemi integrati, si consiglia di utilizzare un insieme ben sviluppato di risultati delle prove di compattazione, evitando le correlazioni con punti singoli, che non offrono informazioni sufficienti per un'interpretazione corretta.

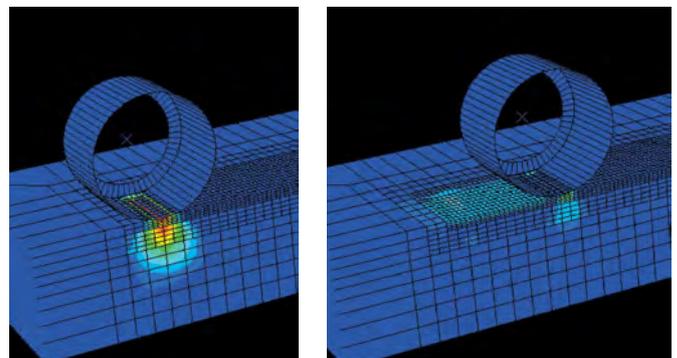
3. Acquisizione dei dati – L'incertezza nell'abbinamento spaziale fra i risultati delle prove sul campo e i valori forniti dai sistemi di misurazione della compattazione integrati nelle macchine può causare variazioni e correlazioni inadeguate. Si consiglia di prestare particolare attenzione all'abbinamento dei rispettivi punti dato, oppure di utilizzare un compattatore dotato di funzioni di mappatura GNSS / acquisizione dei dati per una buona associazione dei dettagli relativi alla posizione nel punto di prova, in modo da poterli correlare correttamente con i dati ottenuti nelle prove sul campo.

Parametri della macchina

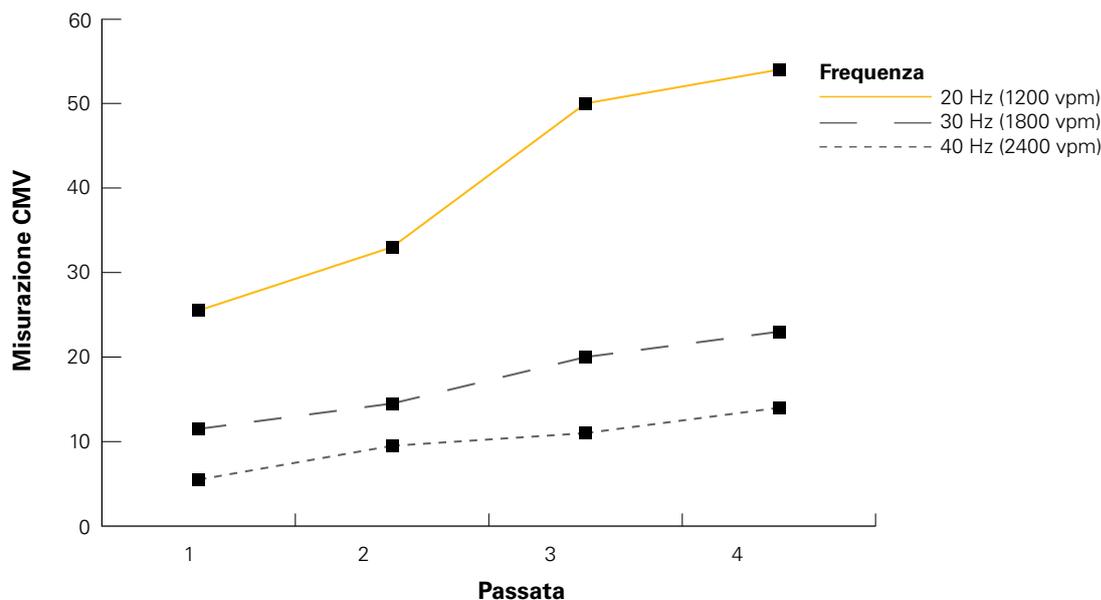
È un fatto risaputo a livello di sviluppo, nonché confermato dall'esperienza sul campo, che la tecnologia di misurazione della compattazione integrata nelle macchine è sensibile ad alcuni parametri operativi di queste ultime. La conoscenza di ciò che il sistema misura rende più agevole comprendere in quale modo l'uso errato di alcuni di tali fattori possa dare origine a dati/risultati fuorvianti.

1. Ampiezza – Se l'ampiezza del movimento del tamburo è elevata, l'effetto delle sue vibrazioni si propaga a una maggiore profondità nel suolo. Tale profondità delle vibrazioni altera i risultati forniti dai sistemi di misurazione della compattazione integrati nelle macchine, poiché il volume di suolo interessato dalle misurazioni è maggiore. Aumenta inoltre la probabilità che a una profondità più elevata la tipologia e la struttura del suolo siano diverse.

Se si desiderano informazioni sulla variabilità dei suoli situati in profondità nel terreno, è pertanto opportuno utilizzare un'ampiezza elevata. Se si è interessati soltanto agli strati superiori, si consiglia un'ampiezza inferiore. Nel caso della tecnologia CMV, la profondità di misurazione del suolo può essere pari o superiore a un metro anche con bassi valori di ampiezza.



Un'ampiezza elevata viene trasmessa a maggiore profondità nel suolo.



2. Frequenza – Il controllo della compattazione CAT con CMV calcola il valore di compattazione (CMV) utilizzando il rapporto fra la frequenza di vibrazione del tamburo e una misurazione della reazione del terreno sul tamburo a una frequenza doppia di quella del tamburo stesso. Se si cambia l'impostazione della frequenza del compattatore vibrante monotamburo, variano di conseguenza i risultati delle misurazioni, anche se la rigidità del suolo rimane invariata. Ciò è dovuto al fatto che su un suolo caratterizzato da una data rigidità le misurazioni CMV tendono a fornire valori più elevati a bassa frequenza e più bassi ad alta frequenza. Le ragioni di tale situazione sono complesse, e hanno a che vedere con il rapporto fra la frequenza propria del suolo e quella del tamburo vibrante.

La tabella mostra l'effetto delle variazioni della frequenza sui risultati delle misurazioni CMV. A parità di tutti gli altri parametri della macchina e del suolo (ad esempio velocità a terra, ampiezza, tipo di suolo e così via), si osserva una notevole differenza fra i risultati delle misurazioni CMV in corrispondenza di ciascuna impostazione della frequenza. La frequenza utilizzata influisce sulle misurazioni CMV, a prescindere dalla rigidità del suolo.

3. Velocità a terra – La velocità a terra influisce in una certa misura sui risultati forniti dai sistemi di misurazione della compattazione integrati nelle macchine. In generale, valori inferiori della velocità assicurano al tamburo vibrante un maggiore contatto con il suolo, aumentandone la rigidità più rapidamente e più in profondità, con una riduzione del numero di passate e del tempo complessivo necessari per soddisfare i requisiti di compattazione. I dati suggeriscono che un aumento della velocità a terra causa in generale una riduzione dei valori misurati con la

tecnologia CMV, ma può anche fare aumentare quelli ottenuti con la tecnologia MDP. È tuttavia difficile quantificare con precisione in quale misura ciò si verifichi, perché durante le prove le variazioni del tipo di suolo, del suo tenore di acqua e di altri fattori complicano la questione.

Quando occorrono più passate per raggiungere i livelli finali di compattazione (indicati dalla rigidità del suolo), il metodo più efficiente consiste nell'utilizzare una bassa velocità a terra e lasciare che l'apparato vibrante agisca sul suolo situato sotto il tamburo. Una velocità inferiore permette di ridurre la distanza fra i punti di impatto del tamburo vibrante e di aumentare di conseguenza il numero di colpi per unità di distanza percorsa, riducendo il numero di passate richieste, e pertanto il tempo necessario per soddisfare i requisiti di compattazione.

Si ottengono inoltre miglioramenti dell'efficienza di utilizzo del carburante: due passate a bassa velocità comportano un consumo di carburante inferiore rispetto a sei passate ad alta velocità. Come regola generale approssimativa è possibile suggerire quanto segue: procedere lentamente per compattare rapidamente e ottimizzare l'efficienza, ma non così lentamente da causare il disaccoppiamento e la decompattazione. Nel caso della tecnologia di misurazione della compattazione integrata nelle macchine, si consiglia di mantenere una velocità appropriata e costante, pari a circa 1 - 2,5 km/h (0,62 - 1,5 mph) su pietrisco e argilla, e a 2 - 5 km/h (1,2 - 3,1 mph) su sabbia e ghiaia. Per un supporto nella gestione di questo fattore, è possibile utilizzare la funzione di controllo automatico della velocità disponibile nei compattatori CAT della serie B.

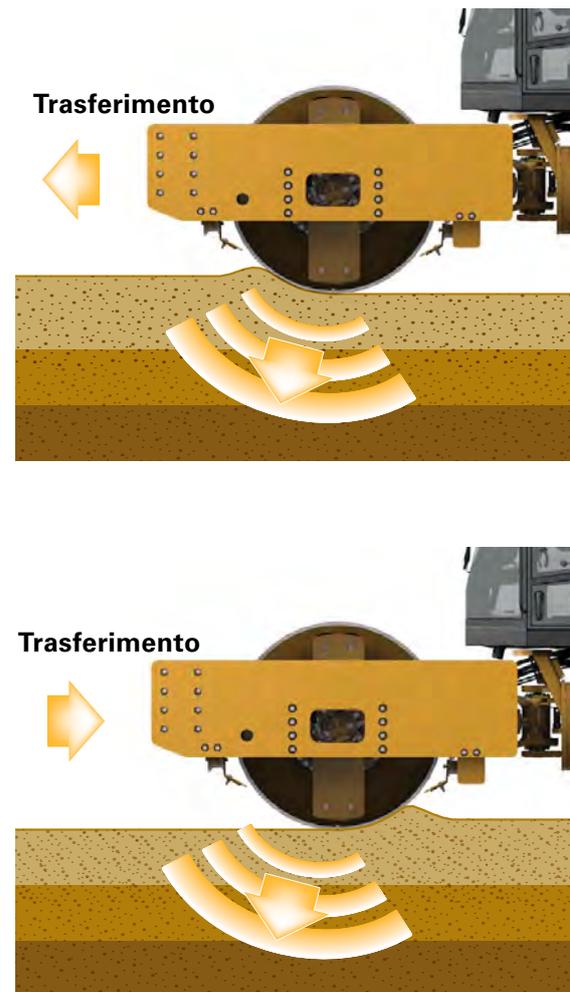
4. Direzione di marcia – Per una data rigidità del suolo, la direzione di marcia, in avanti o in retromarcia, influisce sui valori forniti dai sistemi di misurazione della compattazione integrati nelle macchine. La differenza fra le misurazioni eseguite a marcia avanti e in retromarcia varia fra il 5 e il 20 per cento, ed è maggiore sui suoli molto morbidi.

I risultati forniti dai sistemi di misurazione della compattazione integrati nelle macchine variano a seconda della direzione di marcia perché la rotazione del peso eccentrico presente all'interno del tamburo causa un aumento o una riduzione della coppia netta esercitata dal medesimo mentre avanza sul terreno (nonché a causa del bilanciamento del peso, della presenza delle ruote davanti/dietro al tamburo e di altri fattori). Tale coppia influisce sulla direzione effettiva delle vibrazioni trasmesse al terreno, facendo sì che il tamburo effettui i rilevamenti maggiormente in direzione dell'area già compattata o di quella morbida ancora da compattare.

5. Stato di vibrazione – Sui valori forniti dai sistemi di misurazione della compattazione integrati nelle macchine può influire anche lo stato di attivazione dell'apparato vibrante. A seconda del materiale, l'effetto può essere significativo o meno. Per quanto concerne i dati di prova, le tecnologie che consentono di eseguire le misurazioni con l'apparato vibrante disattivato forniscono risultati più affidabili per via del minor numero di variabili che influiscono sulle misurazioni stessa. Le tecnologie basate sull'energia, come quella MDP, offrono tale possibilità.

6. Disaccoppiamento o doppio salto – All'aumentare della rigidità del suolo, la sua frequenza propria o di risonanza si avvicina sempre di più a quella di vibrazione del tamburo. Quando ciò accade, il tamburo inizia a rimbalzare sulla superficie del suolo, sollevandosi completamente da essa, a una frequenza pari alla metà della frequenza di vibrazione del tamburo stesso, e i valori delle misurazioni RMV (Resonance Meter Value) aumentano. Il valore RMV è semplicemente una misura del grado di disaccoppiamento del tamburo. All'aumentare del disaccoppiamento della macchina l'affidabilità delle misurazioni CMV diminuisce.

DIREZIONE DI MARCIA



Quando la direzione del momento eccentrico corrisponde a quella di marcia della macchina (illustrazione superiore), la coppia netta applicata al tamburo fa sì che l'accelerometro rilevi il suolo sotto una certa angolazione. Quando la direzione del momento eccentrico non corrisponde a quella di marcia della macchina (illustrazione inferiore), le forze di torsione cambiano, facendo variare l'angolo di misurazione. Tale variazione produce una differenza costante fra i valori CMV rilevati durante il funzionamento a marcia avanti e quello in retromarcia.

[PROCEDURE DI MISURAZIONE DELLA COMPATTAZIONE MEDIANTE SISTEMI INTEGRATI NELLE MACCHINE]

I compattatori vibranti monotamburo dotati della tecnologia di misurazione della compattazione integrata nelle macchine sono in grado di misurare fattori che permettono di fornire agli operatori, direttamente in cabina, indicazioni in tempo reale sulla rigidità del suolo. All'efficacia di questo metodo contribuiscono numerosi fattori variabili, che influiscono direttamente sulla costanza delle misurazioni. Queste ultime, pertanto, vengono spesso verificate mediante uno dei metodi elencati in precedenza, oppure con altre attrezzature di prova portatili. A mano a mano che i sistemi diventano più avanzati, il loro uso viene compreso meglio e il grado di accettazione dei loro risultati aumenta.

I sistemi di misurazione della compattazione integrati nelle macchine dispongono di solito di due modalità di funzionamento, vale a dire quella di produzione e quella di prova.

Modalità di produzione – La modalità di produzione viene utilizzata nelle fasi iniziali del processo di compattazione. Essa mira a compattare a un livello accettabile la massima superficie di suolo possibile, nel più breve tempo possibile e con la massima efficienza possibile. Nella modalità di produzione, la tecnologia di misurazione della compattazione integrata nelle macchine fornisce all'operatore indicazioni in tempo reale sulla rigidità del suolo, identificando inoltre le aree nelle quali la compattazione è inadeguata e può rendersi necessaria l'adozione di misure per portare la densità al livello specificato.

Nella modalità di produzione, per l'ampiezza delle vibrazioni del tamburo della macchina viene di solito impostato un valore elevato, e la compattazione del terreno procede soltanto fino a quando viene raggiunto un valore target nominale. L'operatore monitora il display per accertarsi visivamente che le aree siano state adeguatamente compattate. L'obiettivo principale consiste nel portare a termine il lavoro in modo

efficiente e nel compattare la maggior quantità possibile di materiale di riempimento, senza allo stesso tempo compattare eccessivamente le aree sufficientemente rigide. Dato che la macchina opera con un'ampiezza di vibrazione elevata, in alcuni punti possono verificarsi fenomeni di disaccoppiamento. In questa modalità di funzionamento, i valori forniti dai sistemi integrati di misurazione della compattazione presentano di solito una variazione maggiore di quella che è possibile ottenere; tale effetto è una conseguenza di tutte le variabili in gioco, vale a dire velocità a terra, direzione, disaccoppiamento e variazione dell'umidità del suolo. È possibile considerare tale situazione un approccio di sgrossatura alla misurazione della compattazione, e la mancanza o la maggiore variabilità dei dati in tali aree non sono particolarmente rilevanti in questa fase.

Modalità di prova – Una volta ultimata la compattazione nella modalità di produzione, è possibile portare il sistema di misurazione della compattazione nella modalità di prova e utilizzarlo come compattatore di prova per verificare la qualità del lavoro. Tale modalità è di solito più precisa di quella di produzione. Vengono controllate e mantenute costanti molte variabili, fra cui la velocità e la direzione di marcia. Ciò contribuisce a garantire che tali variabili non influiscano sulle misurazioni.

La modalità di prova viene utilizzata quando gli enti appaltanti richiedono dati "sul campo" in grado di fornire un'indicazione precisa della rigidità del terreno per una determinata fase o area del processo di costruzione. È possibile ripetere periodicamente questa procedura durante il periodo di costruzione, facendo passare in modo controllato il compattatore su una parte completata del progetto quando ciò risulta più pratico.

Per ottenere risultati di precisione, l'operatore deve mantenere il più costanti possibile tutte le variabili. Questa può essere considerata la fase di precisione della compattazione del suolo.



PROCESSO DI PROVA CONSIGLIATO

1. Delimitare mediante picchetti la sezione del cantiere da sottoporre a prova e pianificare uno schema di compattazione che permetta all'operatore di procedere a marcia avanti durante tutta la prova di compattazione.
2. Definire un valore target della velocità a terra, compreso fra 2,5 e 4 km/h (1,5 - 2,5 mph), che si è in grado di mantenere. Velocità inferiori forniscono risultati migliori, e l'uso del controllo automatico della velocità ne ottimizza l'uniformità, consentendo una migliore compattazione e una maggiore precisione dei dati.
3. Impostare un valore di ampiezza basso. Tale impostazione riduce le probabilità di disaccoppiamento del tamburo e fa sì che le misurazioni non penetrino troppo a fondo nel suolo. Ciò rende più agevole la correlazione con altri metodi di prova.
4. Attivare la vibrazione (o la compattazione statica nel caso della tecnologia MDP) e mettere in movimento la macchina in modo da iniziare la misurazione della compattazione procedendo a marcia avanti con una velocità a terra, un'ampiezza e una frequenza costanti.
5. Le passate del tamburo devono appena toccarsi o sovrapporsi. La sovrapposizione avviene alle estremità o nelle aree di svolta. *Nota: le aree di sovrapposizione possono essere considerate come passate multiple, e possono causare discordanze nei dati.*
6. L'acquisizione manuale dei dati può risultare poco pratica e deve essere accompagnata da un abbinamento della massima precisione possibile con la posizione in cantiere all'interno delle sezioni delimitate dai picchetti. La maggior parte dei sistemi di misurazione della compattazione integrati nelle macchine non permette il salvataggio automatico dei dati in assenza dell'opzione GNSS (GPS). Utilizzare un software per fogli elettronici, come Excel, per ordinare i dati in base alla direzione di marcia, utilizzando per l'analisi soltanto quelli acquisiti a marcia avanti. Contrassegnare fisicamente tutti i punti ritenuti di importanza tale da richiedere un riesame o una prova seguita da una correlazione con un metodo noto di misurazione sul campo della compattazione.
7. Per una migliore qualità, misurare il tenore di umidità del suolo secondo uno schema a reticolo che copra tutta l'area sottoposta a compattazione e misurazione. Il passo del reticolo deve essere stabilito in base alle dimensioni del cantiere e ai requisiti dell'ente appaltante. Le misurazioni dell'umidità forniscono ulteriori informazioni per l'analisi dei valori di compattazione; lo schema a reticolo permette inoltre di sviluppare una mappa isobarica del tenore di umidità del suolo. I campioni di quest'ultimo utilizzati per le misurazioni dell'umidità devono essere prelevati non appena possibile dopo che il compattatore ha terminato la compattazione di un'area.
8. Riesaminare i dati registrati manualmente e selezionare le aree che si desidera correlare con i dati forniti da un altro tipo di dispositivo di misurazione della compattazione. Selezionare aree con valori alti, bassi e intermedi, nonché più aree per ciascuna fascia di valori.
9. Eseguire le prove di correlazione nei punti precedentemente contrassegnati. Non essere approssimativi, in quanto le condizioni del suolo possono presentare ampie variazioni anche su distanze molto brevi.

NOTA: per sfruttare a fondo le funzioni della tecnologia di misurazione integrata nelle macchine, è necessario utilizzare le funzioni di mappatura GNSS (GPS) per registrare tutti i dati unitamente ai rispettivi dettagli di posizionamento in cantiere. Per ulteriori dettagli sulla "Compattazione intelligente", fare riferimento a un capitolo successivo di questa guida.

Riepilogo della misurazione della compattazione integrata nelle macchine

– La qualità e il costo sono questioni di rilievo in qualunque progetto di compattazione. È pertanto assolutamente essenziale raggiungere gli obiettivi di compattazione pertinenti in modo efficace ed efficiente. Esistono molte specifiche e numerosi metodi tradizionali di misurazione sul campo della compattazione. I metodi basati su sistemi di misurazione della compattazione integrati nelle macchine mettono ora a disposizione degli operatori strumenti migliori, che garantiscono la massima qualità di compattazione possibile al costo minimo.

Se applicata nel modo corretto, la tecnologia di misurazione della compattazione integrata nelle macchine è davvero eccellente, ma vi sono dei limiti a ciò che essa è in grado di fare. La tecnologia di misurazione della compattazione integrata nelle

macchine non è in grado di stabilire su quale tipo di suolo si sta operando, né di descrivere il tenore di umidità o le caratteristiche fisiche del suolo.

Tale tecnologia misura la risposta del suolo per fornire un'istantanea della sua portanza. Una volta configurati correttamente, i compattatori vibranti monotamburo con misurazione integrata della compattazione forniscono informazioni che l'operatore non può ottenere in altro modo. Tali informazioni consentono agli operatori ben addestrati di dedurre lo stato del suolo. I dati forniscono un'indicazione, non una garanzia, riguardo alla rigidità del suolo. Le variabili sono infatti troppo numerose. Gli operatori ben addestrati sono tuttavia in grado di capire le indicazioni fornite dalle misurazioni e le azioni suggerite dalle stesse. I processi utilizzati sono spesso più importanti della tecnologia in sé.



Unità 5

COMPATTAZIONE INTELLIGENTE

La compattazione intelligente rappresenta l'evoluzione più recente ed avanzata dell'applicazione dei compattatori vibranti monotamburo. La capacità di misurare con precisione la compattazione, di correlare le misurazioni con le coordinate GNSS e di visualizzarle sulla mappa di un cantiere nella cabina dell'operatore, nonché di registrare e salvare i dati per scopi di documentazione, non era finora neppure immaginabile. Soltanto il tempo dirà quali innovazioni tecnologiche seguiranno in futuro. Caterpillar sarà all'avanguardia della ricerca e delle scoperte che ne deriveranno.



[CHE COS'È LA COMPATTAZIONE INTELLIGENTE?]

L'espressione "compattazione intelligente" viene attualmente utilizzata, come già nel passato recente, per indicare i sistemi di misurazione della compactazione integrati nei compactatori vibranti monotamburo. Le definizioni dell'espressione "compattazione intelligente" variano a seconda dell'ente pubblico e del produttore di attrezzature che le propongono. In generale, è possibile definire la compactazione intelligente come una tecnologia integrata in un compactatore e applicata al processo di compactazione per migliorare l'efficienza in cantiere eliminando i problemi di stima da parte del personale. Le tecnologie in questione forniscono in tempo reale agli operatori informazioni sulla compactazione che li aiutano a stabilire lo stato di avanzamento della compactazione stessa e/o il suo eventuale completamento.

Tenendo presente tale definizione, è possibile affermare senza tema di sbagliare che la tecnologia di misurazione della compactazione integrata nelle macchine descritte in precedenza è effettivamente una forma di compactazione intelligente. I sistemi integrati presenti sui compactatori vibranti monotamburo forniscono dati dettagliati e in tempo reale sulle attività di compactazione in corso nei cantieri, consentendo a operatori e responsabili di cantiere di accedere a informazioni di cui in precedenza non disponevano.

I sistemi più sofisticati sono inoltre in grado di presentare i dati sotto forma di mappe, per fornire una prospettiva visiva del lavoro svolto, nonché di archiviare i dati per eventuali analisi successive.

Ecco un esempio di specifica utilizzata in passato per il Ministero dei Trasporti di uno Stato USA:

Compactazione intelligente (IC)

Questo processo prevede la misurazione e la **registrazione dell'ora, della posizione e dei parametri di compactazione** del trattamento

granulare durante il processo di compactazione con un compactatore vibrante dotato di un sistema di misurazione basato su accelerometri e di un sistema di posizionamento globale.

Sono attualmente disponibili una definizione o un requisito distinti per quanto concerne i compactatori intelligenti:

Compactatore per compactazione intelligente (IC)

I compactatori dovranno essere del tipo vibrante, dovranno disporre di un sistema di misurazione basato su accelerometri e dovranno **essere in grado di registrare i valori misurati dei parametri di compactazione**.

Allo stesso tempo, l'Agenzia federale per le autostrade (FHWA, Federal Highway Administration) degli Stati Uniti descrive come segue la compactazione intelligente:

L'espressione "**compactazione intelligente (IC, Intelligent Compaction)**" si riferisce alla compactazione dei materiali impiegati per la realizzazione delle strade, come suoli, basi in aggregato o materiali per pavimentazioni in asfalto, utilizzando moderni compactatori vibranti dotati di un sistema di misurazione integrato, di **un sistema di reporting tramite computer di bordo, di funzioni di mappatura basate sul Sistema di posizionamento globale (GPS, Global Positioning System)** e di un controllo opzionale tramite feedback. I compactatori IC agevolano il monitoraggio in tempo reale della compactazione e l'adozione tempestiva delle regolazioni del processo di compactazione mediante l'integrazione di sistemi di misurazione, **documentazione** e controllo. I compactatori IC mantengono registrazioni continue su carte dotate di codici colore, consentendo agli utenti di visualizzare mappe con la posizione esatta del compactatore, il numero di passate da esso eseguite e le misurazioni della rigidità del materiale.

L'Unione Europea ha inoltre creato uno strumento per definire l'uso della compactazione intelligente. Nel suo opuscolo intitolato "Linee guida per la valutazione dei compactatori per suolo e asfalto dotati di controllo continuo della compactazione (CCC)", il Comitato per le attrezzature di costruzione europee (CECE, Committee for European Construction Equipment) ha inserito una matrice per la classificazione delle attrezzature dotate di tecnologie di controllo continuo della compactazione (vedere l'Appendice).



È importante osservare che le definizioni più recenti della compattazione intelligente specificano in modo chiaro non soltanto le funzioni integrate di misurazione della compattazione e di visualizzazione in tempo reale per l'operatore, ma anche quelle di registrazione dei dati di posizionamento e di archiviazione dei medesimi per scopi di documentazione, ulteriore analisi e conservazione delle registrazioni. La definizione dell'espressione "compattazione intelligente" è pertanto in costante evoluzione.

Caterpillar ritiene che un compattatore intelligente dovrebbe misurare la compattazione, correlare le misurazioni con le coordinate GNSS, visualizzare una mappa delle misurazioni, registrare i dati e documentare i risultati. Tali funzioni offrono a operatori, appaltatori e titolari dei progetti numerosi vantaggi in termini di tempi e costi. La definizione utilizzata al momento da Caterpillar per la compattazione intelligente è pertanto:

Compattazione intelligente (IC)

Sistema che misura la compattazione del suolo, mostra all'operatore i risultati delle misurazioni, registra e mappa i risultati della compattazione utilizzando un sistema di mappatura GNSS e controlla o guida l'attività di compattazione della macchina in risposta al sistema di misurazione.

Questa definizione è valida per i compattatori sia vibranti, sia non, e non richiede un sistema di misurazione basato su accelerometri. Come descritto in precedenza, il metodo MDP è una nuova tecnologia che offre numerosi vantaggi rispetto a quella di misurazione della compattazione basata su accelerometri, anche a seconda dell'applicazione.

Questa guida fa pertanto riferimento alla compattazione intelligente unicamente nei casi in cui i compattatori sono dotati di funzioni integrate di misurazione della compattazione (CMV o MDP), funzioni di mappatura e capacità di registrazione e archiviazione dei dati per scopi di documentazione e analisi successiva non a bordo della macchina.

Posizionamento del compattatore all'interno del cantiere

La tecnologia di misurazione della compattazione integrata nelle macchine può essere potenziata con quella dei sistemi satellitari globali di navigazione (GNSS, Global Navigation Satellite Systems), che consente il posizionamento di precisione in cantiere mediante l'uso di varie costellazioni di satelliti in orbita terrestre. La tecnologia GNSS è ampiamente disponibile e offre vari livelli di precisione, alcuni



dei quali richiedono infrastrutture non di bordo che forniscono dati di correzione del posizionamento.

Grazie a tale livello di dati e di dettaglio, la tecnologia di misurazione della compattazione può ora essere abbinata con la posizione fisica in cantiere e configurata in modo da mappare i valori forniti, compreso il numero delle passate, la direzione di marcia della macchina e altre impostazioni della stessa.

A prescindere dalla tecnologia di misurazione della compattazione integrata nelle macchine adottata, il sistema fornisce in qualunque momento misurazioni in tempo reale relative al suolo in via di compattazione. L'aggiunta di funzioni di mappatura e la capacità di registrare e riportare su una mappa le misurazioni nella loro posizione rende molto più utili le stesse.

Come si ottengono i dati di posizionamento? I sistemi di mappatura utilizzano il Sistema satellitare globale di navigazione (GNSS, Global Navigation Satellite System) per fornire gli opportuni dati di mappatura per ciascuna misurazione registrata. Tali sistemi comprendono il sistema GPS (gestito dal Ministero della Difesa degli Stati Uniti), il sistema GLONASS (gestito dal Governo russo) e altri che si prevede entreranno in servizio in futuro, fra cui il sistema Galileo dell'UE e quello cinese denominato Compass.

La posizione viene riportata sulla mappa mediante triangolazione con la posizione nota dei satelliti di tali sistemi. La precisione dei sistemi satellitari non è sufficiente per gli impieghi pratici senza un certo livello di correzione. I sistemi di mappatura presenti sui compattatori vibranti monotamburo utilizzano tale integrazione per correggere i segnali satellitari e assicurare un livello di precisione utile. Sono disponibili due forme di potenziamento principali, dette SBAS e RTK.

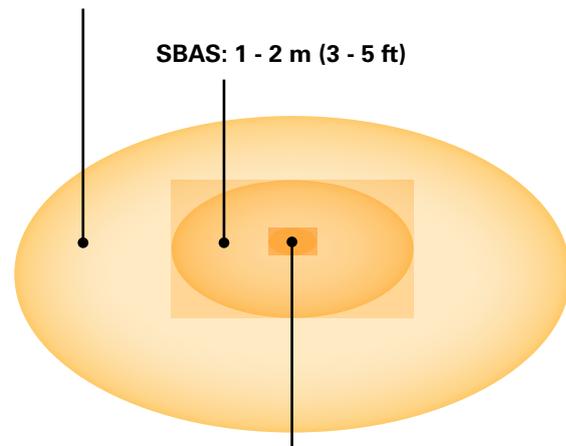
Per la correzione dei segnali di posizionamento satellitare, la maggior parte dei sistemi utilizza il sistema satellitare di potenziamento (SBAS, Satellite Based Augmentation System). Il sistema SBAS effettua le triangolazioni necessarie con vari siti a terra, che rappresentano "punti di ancoraggio" noti in grado di fornire misurazioni correttive. I sistemi SBAS hanno una precisione tipica fino a 1 m (3 ft) e non richiedono infrastrutture diverse da quelle di bordo.

In alternativa, molti produttori sono in grado di potenziare i segnali con una correzione cinematica in tempo reale (RTK, Real Time Kinematic). Questa tecnologia richiede l'uso di stazioni radio base locali per la fornitura dei dati correttivi.

In realtà, la tecnologia più recente consente di raggiungere livelli di precisione RTK anche mediante tecnologie via cellulare o modem, nonché tramite stazioni di riferimento virtuali (VRS, Virtual Reference Station), ma ciò richiede un'organizzazione e un supporto IT più competenti. Le stazioni base sono costose e la tecnologia richiede una visuale diretta fra il ricevitore presente sul compattatore e la stazione base o le unità mobili. Rispetto a quello SBAS, il sistema RTK assicura tuttavia una precisione maggiore, dell'ordine di qualche centimetro (pollice).

PRECISIONE DEI SISTEMI SATELLITARI

Autonomo: 10 m (30 ft)
nessuna correzione



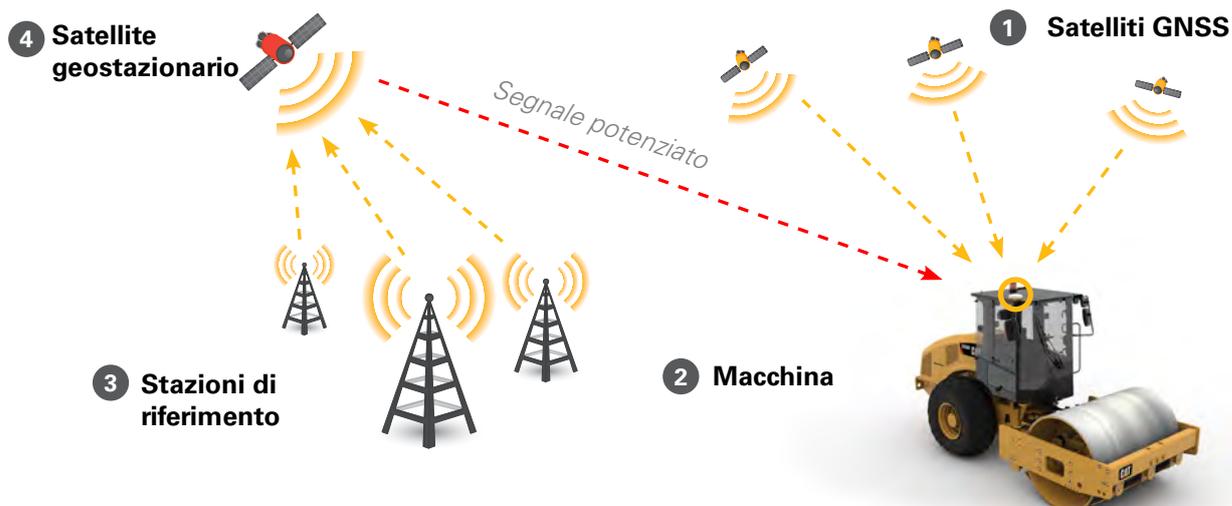
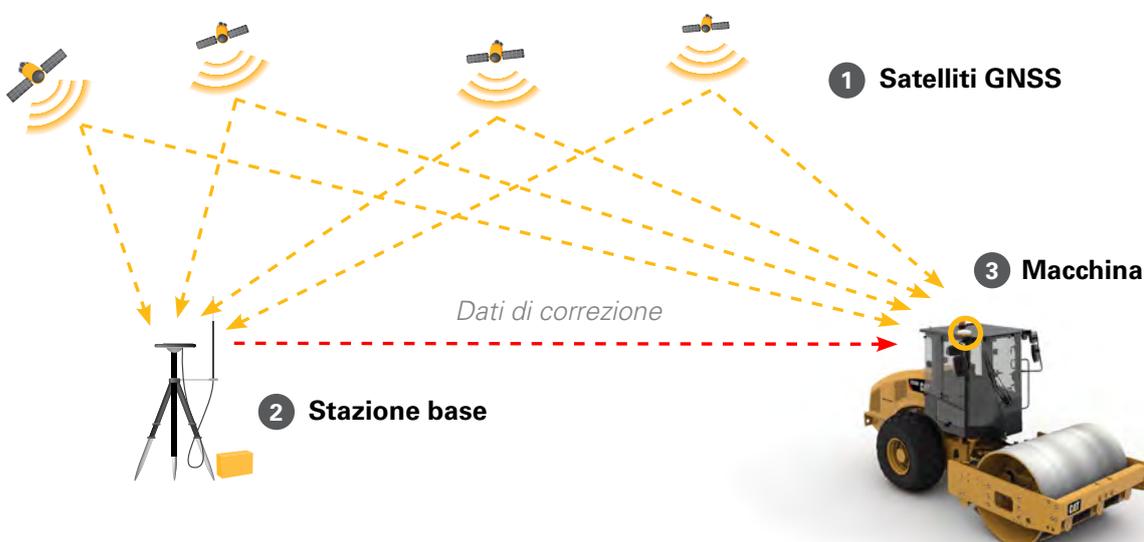
RTK: 1 cm (0,4 in) in direzione orizzontale, 2 cm (0,8 in) in direzione verticale
(con base locale o VRS)

Esso permette inoltre al sistema di registrare i dati di elevazione, consentendo al compattatore di creare anche una mappa con indicazioni di quota e pendenza.

Ciò assicura un vantaggio di rilievo, in quanto il compattatore è spesso l'ultima macchina a operare in un cantiere nel quale vengono svolte attività di movimento terra; la possibilità di realizzare mappe di elevazione può consentire notevoli riduzioni dei tempi/costi associati alle attività finali di rilevamento topografico.

AUTONOMO



SBAS (SATELLITE - BASED AUGMENTATION SYSTEM)**RTK (REAL TIME KINEMATIC)****Vantaggi dei dati di posizionamento**

La misurazione della compattazione integrata nelle macchine è in grado, di per sé, di rivelare in tempo reale molti aspetti dello stato di compattazione; tali informazioni sono tuttavia molto specifiche, e rappresentano un'istantanea in un certo momento. I dati di posizionamento consentono al sistema di fornire non una singola misurazione così come viene acquisita, ma TUTTE le misurazioni nel contesto in cui sono state acquisite. Tale possibilità cambia la prospettiva da istantanea a completa, aprendo la porta ad analisi approfondite. Tutto d'un tratto, l'operatore e la direzione del cantiere hanno la possibilità di accedere a un quadro della qualità di compattazione per l'intero sito, invece che a una semplice istantanea.

Tale possibilità è un fattore di distinzione fondamentale fra i sistemi IC e gli altri metodi di prova. Per tradizione, il personale a terra esegue le prove di qualità utilizzando procedure basate su dispositivi portatili e pochi punti selezionati. Tale procedimento è oneroso in termini di tempo e di denaro. I risultati delle prove vengono utilizzati per descrivere un'area molto più grande di quella effettivamente sottoposta a prova, spesso in un rapporto 1 a 1 milione, non particolarmente rassicurante dal punto di vista statistico. I sistemi IC sono in grado di misurare l'intero sito nel tempo necessario per eseguirne la compattazione.

Alcuni sistemi sono inoltre in grado di importare sul display di bordo configurazioni ingegneristiche o architettoniche in 3D. Ciò può risultare utile nei cantieri in cui viene già attuato un controllo della pendenza senza picchettature o nei quali non sono disponibili picchetti e altri punti notevoli.

Uso dei dati acquisiti

È facile immaginare i vantaggi che i dati aggiuntivi offrono all'operatore, rendendo possibile un modo più efficiente ed economicamente vantaggioso di realizzare una compattazione di qualità presso i cantieri. Molti ispettori e gestori di lavori stradali necessitano di resoconti di base sul campo in tempo reale, vale a dire di dati di prova che documentino l'avanzamento di base della compattazione tramite un'applicazione di stampa in cabina. Molti enti di controllo si stanno ora concentrando sull'acquisizione di rapporti più dettagliati, non forniti a bordo della macchina. Ciò richiede la trasmissione di tutti i dati di compattazione registrati dalla macchina che si trova cantiere a un PC situato in un ufficio. Il trasferimento dei dati può avvenire manualmente, tramite un'unità disco che funge da ponte, oppure via radio, tramite hardware e software per comunicazioni.

Una volta ricevuti tutti i dati sul computer situato in ufficio, gli utenti devono affrontare la sfida di filtrarli e ordinarli per creare i rapporti richiesti dagli enti di ispezione e dalle autorità responsabili delle strade. Sono attualmente disponibili molti programmi software di supporto per tali attività, fra

INTERFACCIA VISIONLINK



cui AccuGrade Office, SiteVision Office, VisionLink, Veda e molti altri ancora. Tali soluzioni software differiscono per tipi di formato dei file, funzioni e prezzi.

[VANTAGGI DELLA COMPATTAZIONE INTELLIGENTE]

Controllo della qualità e documentazione per la garanzia di qualità – La compattazione intelligente permette di documentare il lavoro svolto. Essa consente inoltre un controllo integrato nel processo, con la possibilità di monitorare l'avanzamento su base giornaliera o quasi in tempo reale, di salvare elettronicamente i dati e di analizzare i risultati, correlando questi ultimi con le registrazioni a lungo termine o storiche dei dati del cantiere.

Maggiore produttività degli operatori – I risultati vengono presentati a video agli operatori, aiutandoli a stabilire se il terreno ha raggiunto la rigidità prestabilita. Ciò fornisce in tempo reale agli operatori dati sulla base dei quali è possibile agire. Il sistema è ad esempio in grado avvisare l'operatore della presenza di punti morbidi e di segnalare potenziali problemi relativi al tenore di umidità; se dotato di precisione RTK, il compattatore è inoltre in grado di verificare pendenze ed elevazioni finali del cantiere.

Maggiore efficienza dei cantieri – I risultati prodotti forniscono una mappa dell'intera area compattata, in grado di rivelare le zone che necessitano di un'ulteriore compattazione o quelle già ultimate. Tale possibilità riduce al minimo le passate e i consumi di carburante, ed è in grado di ridurre rapidamente il numero delle prove manuali di compattazione necessarie in cantiere, assicurando un livello di produzione costante e riducendo allo stesso tempo i costi di prova tramite una riduzione dei campioni da etichettare e conservare.

Fiducia nei risultati – Il posizionamento di precisione permette di identificare l'ubicazione esatta dei problemi di compattazione in una fase precoce del processo di costruzione, consentendo di eseguire rettifiche economicamente più vantaggiose e di ridurre il rischio di rilavorazioni successive. I dati forniscono un riferimento affidabile circa la qualità complessiva del lavoro, in un formato visivo facilmente comprensibile. Ciò consente agli operatori ben addestrati di dedurre quando un lavoro è completato, dando loro la fiducia necessaria per passare all'area successiva invece di attendere i risultati delle prove tradizionali.

RISULTATI DELLE MISURAZIONI



[ATTUALI SPECIFICHE PER LA COMPATTAZIONE INTELLIGENTE]

La compattazione intelligente del suolo si è in generale diffusa a mano a mano che gli enti pubblici hanno studiato e accettato i vantaggi di tale tecnologia, creando le specifiche relative al suo utilizzo. Tali specifiche contribuiscono a garantire che la tecnologia in questione venga applicata in modo da fornire risultati accettabili per l'ente che le produce.

L'Agenzia federale per le autostrade (FHWA, Federal Highway Administration) degli Stati Uniti ha sviluppato una serie di specifiche generali per l'uso della compattazione intelligente sul suolo. Tali specifiche sono destinate all'uso da parte del Ministero dei Trasporti degli Stati, che possono utilizzarle così come sono o modificarle per soddisfare i propri requisiti. Si riporta di seguito un esempio delle specifiche pubblicate.

I compattatori IC dovranno soddisfare i seguenti requisiti specifici:

1. I compattatori IC dovranno essere compattatori vibranti monotamburo semoventi e dotati di accelerometri montati all'interno del tamburo, o intorno al medesimo, per misurare le interazioni fra i compattatori stessi e i materiali compattati, al fine di valutare l'energia di compattazione applicata. I compattatori IC potranno avere tamburi lisci o artigliati.
2. Il risultato prodotto dal compattatore è designato come Valore di misurazione della compattazione intelligente (IC-MV, Intelligent Compaction Measurement Value), e descrive la rigidità dei materiali basandosi sulle vibrazioni del tamburo del compattatore e sulla relativa reazione dei materiali sottostanti.

3. Su ciascun compattatore IC dovranno essere montate unità riceventi e radio GPS per il monitoraggio della posizione del tamburo e la tracciabilità del numero di passate dei compattatori.
4. I compattatori IC dovranno essere dotati di un sistema di documentazione integrato a bordo, in grado di visualizzare in tempo reale mappe con codici colore dei valori delle misurazioni IC, ivi compresi i valori di risposta della rigidità, la posizione del compattatore, il numero di passate e i valori di velocità del compattatore, nonché la frequenza e l'ampiezza di vibrazione dei tamburi di compattazione.
5. L'unità di visualizzazione dovrà essere in grado di trasferire i dati mediante una porta USB.
6. Dovrà essere presente una stampante di bordo in grado di stampare i dati identificativi del compattatore, la data delle misurazioni, l'area di costruzione che viene mappata, la percentuale mappata dell'area di costruzione, il valore target di IC-MV e le aree che non rispettano i valori target IC-MV (la stampante opzionale dovrà essere scelta dal Ministero dei Trasporti di ciascuno Stato).

Gli enti pubblici di altri Stati hanno sviluppato proprie specifiche basate sul processo di costruzione delle strade adottato nei rispettivi Paesi. Pur presentando variazioni rispetto alle specifiche FHWA, l'obiettivo è simile, in quanto consiste nel fornire uno standard per l'uso dell'apparecchiatura.

| Spec. | Attrezzatura | Dimensioni del campo | Specifiche sull'ubicazione | Documentazione |
|---|---|--|--|--|
| Ministero dei Trasporti del Minnesota (USA) | Compattatore vibrante a tamburo liscio o artigliato (12500 kg / 25000 lb) | 100 m x 10 m (minimo alla base). Spessore massimo 1,2 m. | Una striscia di taratura/controllo per tipo o fonte del materiale di livellamento | Compattazione, rigidità, umidità, additivi QC e azioni correttive (rapporto settimanale) |
| ISSMGE (International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering; Società internazionale di meccanica dei suoli e ingegneria geotecnica) www.issmge.org/ | Compattatore scelto in base all'esperienza | 100 m per la larghezza del cantiere | Superficie omogenea e uniforme. Sovrapposizione delle tracce $\leq 10\%$ della larghezza del tamburo. | Schema di compattazione, sequenza di compattazione e passate di misurazione; ampiezza, velocità, valori di misurazione dinamica, frequenza, funzionamento di salto e relative ubicazioni |
| Attività di movimento terra (Austria) | Vengono suggeriti compattatori vibranti con ruote in gomma e tamburi lisci | 100 m di lunghezza per la larghezza del cantiere | Assenza di disomogeneità in prossimità della superficie (materiali o tenore di acqua). Sovrapposizione delle tracce $\leq 10\%$ della larghezza del tamburo. | Piano dei cicli di compattazione, sequenza dei cicli di compattazione e misurazione, velocità, ampiezza, frequenza, regime, valori di misurazione dinamica, funzionamento di salto e relative ubicazioni |
| Research Society for Road and Traffic (Associazione per la ricerca su strade e viabilità, Germania) | La preferenza va ai compattatori semoventi con ruote motrici in gomma; sono accettabili compattatori vibranti trainati con veicolo di traino. | Ciascuna area di taratura deve coprire almeno 3 campi parziali lunghi ~ 20 m | Orizzontale e privo di pozzanghere. Tipo di suolo, tenore di acqua, spessore dello strato e portanza degli strati di supporto analoghi. Sovrapposizione delle tracce $\leq 10\%$ della larghezza della macchina. | Valore di misurazione dinamica; frequenza; velocità; funzionamento di salto; ampiezza; distanza; ora della misurazione; tipo di compattatore; tipo di suolo; tenore di acqua; spessore dello strato; data, ora, nome del file o numero di registrazione; condizioni meteo; posizione delle tracce di prova e direzione di compattazione; altezza assoluta o posizione di applicazione; condizioni locali e terrapieni nelle aree marginali; parametri della macchina; e deviazioni percepite |
| Vägverket (Svezia) | Compattatore vibrante od oscillante monotamburo. Carico lineare minimo 15 – 30 kN. | Spessore dello strato più grande 0,2 – 0,6 m. | Lo strato deve essere omogeneo e non congelato. È possibile compattare con la sottobase gli strati di protezione di spessore < 0,5 m. | — |

| Specifiche di compattazione | Velocità | Frequenza |
|---|---|----------------------------|
| Il 90% delle misurazioni di compattazione del compattatore e la media delle misurazioni del modulo LWD (sulla base di 3 prove) devono situarsi al 90% dei valori target stabiliti nella striscia di taratura. | Lo stesso vale durante la taratura e la compattazione di produzione | |
| Coefficiente di correlazione $\geq 0,7$. Valore minimo $\geq 95\%$ di Ev1 e media $\geq 105\%$ ($\geq 100\%$ nella modalità di salto). I valori di misurazione dinamica devono essere inferiori al minimo specificato per $\leq 10\%$ del percorso. Il minimo misurato deve essere $\geq 80\%$ del minimo specificato. La deviazione standard (della media) deve essere $\leq 20\%$ in una passata. | Costante 2 – 6 km/h ($\pm 0,2$ km/h) | Costante (± 2 Hz) |
| Coefficiente di correlazione $\geq 0,7$. Valore minimo $\geq 95\%$ di Ev1 e mediana $\geq 105\%$ ($\geq 100\%$ nella modalità di salto). I valori di misurazione dinamica devono essere inferiori al minimo specificato per $\leq 10\%$ del percorso. Il minimo misurato deve essere $\geq 80\%$ del minimo stabilito. Il massimo misurato in un ciclo non deve essere superiore al massimo stabilito (150% del minimo stabilito). La deviazione standard (della mediana) deve essere $\leq 20\%$ in una passata. | Costante 2 – 6 km/h ($\pm 0,2$ km/h) | Costante (± 2 Hz) |
| Il coefficiente di correlazione derivante da un'analisi di regressione deve essere $\geq 0,7$. Per risultare adatte per la taratura, le singole unità di area (di larghezza pari a quella del tamburo del compattatore) devono avere un valore di misurazione dinamica che differisce di non più del 10% da quello dell'area adiacente. | Costante | |
| Possibilità di soddisfare i requisiti di portanza o grado di compattazione. Media dei valori di compattazione per due punti di ispezione $\geq 89\%$ per la sottobase presente sotto la base stradale e per gli strati di protezione di spessore superiore a 0,5 m; per le basi stradali, la media deve essere $\geq 90\%$. La media richiesta per due rapporti di portanza varia a seconda del tipo di strato. | | Costante 2,5 – 4,0 km/h |

[PROCEDURE OPERATIVE PER LA COMPATTAZIONE INTELLIGENTE]

Come nel caso in cui si utilizza soltanto la tecnologia di misurazione della compattazione integrata nelle macchine esaminata in precedenza, i compattatori vibranti monotamburo predisposti per la compattazione intelligente devono seguire procedure simili, con lievi differenze dovute alle funzioni aggiuntive fornite dai sistemi più avanzati. Vi sono due modalità di funzionamento, vale a dire quella di produzione e quella di prova.

Modalità di produzione – Ancora una volta, tale modalità di funzionamento mira a compattare a un livello accettabile la massima superficie di suolo possibile, nel più breve tempo possibile, con la massima efficienza possibile, e sia nella direzione di marcia avanti, sia in quella di retromarcia, fino a quando non viene raggiunto un valore target nominale. La compattazione viene eseguita con i normali parametri di lavorazione, vale a dire velocità di trasferimento pari a 1 - 2,5 km/h (0,6 - 1,6 mph) su pietrisco di riempimento e argilla, e a 2 - 5 km/h (1,2 - 3,1 mph) su sabbie e suoli limosi non coesivi, e per l'ampiezza di vibrazione della macchina viene tipicamente impostato un valore elevato.

Nel caso dei compattatori dotati di compattazione intelligente, gli operatori possono ora ricevere input diversi da un semplice numero adimensionale che fornisce un'indicazione di rigidità o portanza del suolo. Grazie alle funzioni aggiuntive di visualizzazione a colori e di acquisizione e archiviazione dei dati, l'operatore dispone di un'istantanea dello stato di compattazione nell'ubicazione esatta del compattatore, ed è in grado di monitorare il

cantiere per numero di passate, percentuale di un valore target di misurazione della compattazione o variazione percentuale del valore target di compattazione da passata a passata (per le aree con compattazione sia adeguata, sia insufficiente). Se necessario, l'operatore ha inoltre la possibilità di eseguire una marcatura digitale dei punti e delle aree nei quali è possibile che occorra adottare misure per adeguare la compattazione alla specifica. Tutti i dati memorizzati possono essere inviati all'esterno della macchina per scopi di revisione, filtraggio e analisi secondo necessità.

In questa modalità di funzionamento, il sistema di mappatura fornisce all'operatore un quadro visivo dell'avanzamento della compattazione in cantiere e un livello moderato di garanzia di qualità. A causa di tutta una serie di fattori di variabilità, come velocità a terra, direzione, disaccoppiamento e umidità del suolo, la qualità di dati acquisiti in questa modalità di funzionamento è tuttavia inferiore a quella che è possibile raggiungere. Essa fornisce comunque all'operatore informazioni che permettono di ottimizzare l'efficienza e l'uniformità, eliminando la necessità di affidarsi a stime approssimative durante il processo di compattazione.

Quando i valori raggiungono un intervallo prossimo al target, l'operatore può passare a una nuova area, mentre il personale addetto alla qualità esegue le prove necessarie per garantire che il lavoro soddisfi le specifiche, oppure è possibile preparare l'area ormai prossima al target per una passata nella modalità di prova.



Modalità di prova – Una volta ultimata la compattazione di produzione, è possibile utilizzare il sistema di misurazione della compattazione come compattatore di prova per verificare la qualità del lavoro in questa modalità di funzionamento più precisa. Questo approccio è studiato per l'uso nei casi in cui gli enti appaltanti richiedono una documentazione su mappa in grado di fornire un'indicazione precisa della rigidità del terreno per una determinata fase del processo di costruzione.

Poiché è assolutamente essenziale garantire il controllo e la costanza dei valori, i parametri di lavorazione sono ora una velocità di trasferimento fissa pari a 3 km/h (2 mph) e un'ampiezza di vibrazione della macchina impostata su un valore basso (o disattivata, se necessario, in caso di compattazione eccessiva, disaccoppiamento o altri problemi di una macchina dotata di MDP). Ciò contribuisce a garantire che tali variabili non influiscano sulle misurazioni e sui dati acquisiti e archiviati per la preparazione dei rapporti.

Si osservi inoltre che nel caso della compattazione di prova, l'oggetto della misurazione, vale a dire il grado di compattazione del suolo, cambia mentre lo si misura. Mentre il pesante compattatore si sposta, il suo peso statico esercita forze di pressione e di altro tipo sul suolo sottostante. Gli operatori devono pertanto avere cura di diminuire la forza esercitata durante le misurazioni. La capacità dei sistemi basati sull'energia di eseguire le misurazioni con il tamburo in condizioni statiche (senza vibrazione) li rende ideali per questa applicazione.



PROCESSO DI PROVA CONSIGLIATO

1. Pianificare uno schema di compattazione che permetta all'operatore di procedere a marcia avanti durante tutta l'operazione di mappatura.
2. Definire un valore target della velocità a terra, compreso fra 2,5 e 4 km/h (1,5 - 2,5 mph), che si è in grado di mantenere. Velocità inferiori forniscono risultati migliori, e l'uso del controllo automatico della velocità ne ottimizza l'uniformità, assicurando una migliore compattazione e una maggiore precisione di rilevamento dei dati.
3. Impostare un valore di ampiezza basso. Tale impostazione riduce le probabilità di disaccoppiamento del tamburo e fa sì che le misurazioni non penetrino troppo a fondo nel suolo. Ciò rende più probabile la correlazione con altri metodi di prova.
4. Selezionare la voce "proofing on" (attivazione prova) nel menu visualizzato sul display, attivare la vibrazione (o la compattazione statica nel caso della tecnologia MDP) e mettere in movimento la macchina in modo da iniziare la misurazione della compattazione procedendo a marcia avanti con una velocità a terra, un'ampiezza e una frequenza costanti.
5. Utilizzare le funzioni di posizionamento GNSS per guidare la macchina in modo da eseguire una sola passata sull'area di interesse. Le passate del tamburo devono appena toccarsi o sovrapporsi. La sovrapposizione avviene alle estremità o nelle aree di svolta. NOTA: le aree di sovrapposizione possono essere considerate come passate multiple, e possono causare discordanze nei dati registrati.
6. Una volta coperta tutta l'area, selezionare la voce "proofing off" (disattivazione prova) sul display.
7. Per una migliore qualità, misurare il tenore di umidità del suolo secondo uno schema a reticolo che copra tutta l'area sottoposta a compattazione e misurazione. Il passo del reticolo deve essere stabilito in base alle dimensioni del cantiere e ai requisiti dell'ente appaltante. Le misurazioni dell'umidità forniscono ulteriori informazioni per l'analisi dei valori di compattazione; lo schema a reticolo permette inoltre di sviluppare una mappa isobarica del tenore di umidità del suolo. I campioni di quest'ultimo utilizzati per le misurazioni dell'umidità devono essere prelevati non appena possibile dopo che il compattatore ha terminato la compattazione di un'area.
8. Riesaminare la mappa e i dati di compattazione per selezionare le aree che si desidera correlare con i dati forniti da un altro tipo di dispositivo di misurazione della compattazione. Selezionare aree con valori alti, bassi e intermedi, nonché più aree per ciascuna fascia di valori.
9. Eseguire le prove di correlazione utilizzando un rilevatore GNSS portatile per localizzare con la massima precisione possibile le aree di prova selezionate. Non essere approssimativi, in quanto le condizioni del suolo possono presentare ampie variazioni anche su distanze molto brevi (vedere l'esame delle apparecchiature per le prove di correlazione contenuto nel prossimo capitolo).

[SCHEMA SCAGLIONATO CON DUE COMPATTATORI]

Sono disponibili vari metodi di taratura del valore target per la misurazione della compattazione (CMV o MDP) e del numero di passate richiesto. Alcuni di tali metodi sono dettati dall'ente appaltante, e possono differire da quanto riportato in questa guida. Il settore si sta orientando a una prassi che

pone l'accento su una compattazione delle aree uniforme e di livello accettabile, allontanandosi dal tentativo di ottenere un valore specifico di compattazione o di densità per tutte le aree del cantiere.

Taratura del cantiere mediante una striscia di prova e un dispositivo di prova indipendente

Questo metodo è studiato per eliminare il maggior numero possibile di variabili del processo di misurazione, nonché per utilizzare gli stessi suoli e metodi che verranno adottati durante la costruzione effettiva della strada o dell'edificio in questione. Benché molto oneroso sotto il profilo del tempo e delle risorse, questo metodo rappresenta il modo migliore per comprendere il processo e sviluppare una conoscenza di base delle tecnologie coinvolte.

1. Individuare un'area di prova che sia possibile lasciare intatta per tutta la durata del progetto e presenti suoli, pendenze e struttura del sottosuolo simili a quelli della maggior parte del terreno interessato dal progetto stesso.
2. Scavare/colmare l'area di prova portandola a una pendenza longitudinale e trasversale adatta per creare la sottobase della striscia di prova.
3. Introdurre i compattatori vibranti monotamburo e creare una mappa di compattazione di riferimento utilizzando il sistema di compattazione intelligente nella modalità di prova, a bassa ampiezza, a frequenza costante (o con la vibrazione disattivata nel caso della tecnica MDP) e a una velocità di avanzamento costante pari a 3 km/h (2 mph).
4. Se la mappa di compattazione mostra una variabilità elevata (il 90 per cento dei valori deve trovarsi entro una variazione del 20 per cento rispetto al valore medio), provare a compattare la base con un'ampiezza elevata per avvicinare il livello di compattazione delle aree morbide a quello delle aree con valori più elevati. Ripetere il punto 3.
5. Se a questo punto la sottobase risulta compattata in modo uniforme (rispettando il criterio del 90 per cento dei valori entro una variazione del 20 per cento rispetto al valore medio), andare al punto 6. In caso contrario, occorre selezionare una nuova striscia di prova (punto 1) oppure eseguire un intervento di rettifica sulla sottobase per ottenere una mappa più uniforme. L'intervento di rettifica può comportare uno scavo per l'estrazione di oggetti nascosti come pietre e blocchi di argilla, oppure la stabilizzazione del suolo con calce o altri agenti. Se si utilizza un agente stabilizzante nella striscia di prova, affinché quest'ultima sia rappresentativa è indispensabile utilizzare il medesimo agente anche in tutto il cantiere.
6. Misurare la compattazione della sottobase mediante un dispositivo portatile per prove di carico su piastra o un deflettometro leggero a massa battente, adottando uno schema uniforme di punti di prova su tutta la superficie della striscia di prova. Non utilizzare densimetri nucleari o a cono di sabbia, in quanto essi misurano una caratteristica del suolo (densità) diversa dai compattatori vibranti (rigidità). Per una correlazione corretta con la mappa di compattazione GNSS ottenuta partendo dai dati del compattatore intelligente, occorre determinare la posizione dei punti di prova mediante un dispositivo GNSS in grado di raggiungere una precisione dell'ordine del decimetro. Come alternativa alle prove secondo uno schema a reticolo, utilizzare la mappa GNSS prodotta dal compattatore e selezionare una serie di punti sparsi che rappresentino valori di compattazione alti, medi e bassi. Eseguire almeno tre prove per ciascun intervallo di valori (minimo 9 punti di prova). L'uso di un numero più elevato di punti di prova fornisce un risultato più preciso a livello statistico.
7. Misurare il tenore di umidità in ciascun punto di prova. Se il tenore di umidità mostra ampie variazioni, la correlazione non fornisce risultati uniformi.

Come nota precauzionale, ricordare che il dispositivo di prova portatile utilizzato per tarare i valori forniti dal sistema di misurazione della compattazione integrato nel compattatore presenta una sua variabilità delle misurazioni. Ciò significa che è possibile utilizzarlo per misurare più volte lo stesso suolo, con le medesime proprietà, senza ottenere esattamente gli stessi risultati. Le misurazioni nucleari di densità possono ad esempio variare del 15 per cento per lo stesso campione. La prassi corrente consiste nell'acquisire un valore, ruotare il dispositivo di 90 gradi e acquisire un altro valore. Come valore misurato viene registrata la media delle due indicazioni.

8. Eseguire la correlazione dei valori di prova della compattazione con quelli ricavati dalla mappa GNSS prodotta dal compattatore e riportare i risultati su un grafico, con i valori delle misurazioni di compattazione sull'asse y e quelli delle prove sul campo mediante il dispositivo portatile sull'asse x. Il risultato è detto grafico di dispersione.
9. Utilizzare la metodologia di interpolazione curvilinea per determinare la curva di taratura ideale fra i valori forniti dal sistema integrato di misurazione della compattazione e il metodo di prova sul campo. Si ottiene così uno strumento da utilizzare unicamente per tale tipo di suolo del cantiere e per le prove di compattazione della sottobase.
10. Portare sulla striscia il materiale di riempimento per il primo strato e distribuirlo in modo uniforme con la profondità specificata.
11. Compattare il materiale fino a quando risulta compattato in modo uniforme e i valori prodotti dal sistema integrato di misurazione della compattazione non presentano grandi variazioni quando si procede a marcia avanti.
12. Ripetere i punti da 2 a 9 per questo strato di materiale. Si ottiene così la curva di taratura propria dello strato di base, da utilizzare in tutto il cantiere per tale strato di materiale.
13. Ripetere i punti da 10 a 12 per tutti gli strati di materiale di riempimento introdotti, ciascuno dei quali dispone in ultimo di una sua curva di taratura.
14. Se le condizioni del terreno variano a causa di fattori meteorologici, eseguire un nuovo ciclo di verifica sulla striscia di prova allo scopo di ridefinire il livello di accettazione per i valori forniti dal sistema integrato di misurazione della compattazione.



Taratura dei risultati del sistema integrato di misurazione della compattazione e conteggio delle passate mediante un compattatore vibrante monotamburo (senza dispositivo indipendente di prova sul campo)

In alcuni paesi scandinavi si utilizza questo processo, o uno simile. Esso è più pragmatico e richiede meno tempo e minori risorse, pur fornendo uno strumento per un buon controllo della compattazione senza l'uso di altre misurazioni della compattazione come standard. L'obiettivo consiste nell'utilizzare il compattatore per stabilire un livello massimo nominale di compattazione dei materiali del cantiere e per determinare il numero di passate necessarie per raggiungere tale livello. Lo scopo consiste nel garantire un livello di compattazione uniforme in tutto il cantiere. Il procedimento descritto di seguito utilizza una striscia di prova per definire valori di riferimento per la compattazione. La striscia di prova è in realtà un elemento opzionale, poiché è possibile compattare una parte del cantiere, o l'intero cantiere, come se fosse una striscia di prova.

1. Individuare un'area di prova che sia possibile lasciare intatta per tutta la durata del progetto e presenti suoli, pendenze e struttura del sottosuolo simili a quelli della maggior parte del terreno interessato dal progetto stesso.
2. Scavare/colmare l'area di prova portandola a una pendenza longitudinale e trasversale adatta per creare la sottobase della striscia di prova.
3. Introdurre i compattatori vibranti monotamburo e creare una mappa di compattazione (mappa di prova) di riferimento utilizzando il sistema di compattazione intelligente nella modalità di prova, a bassa ampiezza, a frequenza costante (o con la vibrazione disattivata nel caso della tecnica MDP) e a una velocità di avanzamento costante pari a 3 km/h (2 mph).
4. Verificare il tenore di umidità del suolo in un certo numero di punti della striscia di prova. Se tale tenore è troppo alto o troppo basso, correggerlo prima di effettuare ulteriori operazioni di compattazione.
5. Se la mappa di compattazione mostra una variabilità elevata (il 90 per cento dei valori deve trovarsi entro una variazione del 20 per cento rispetto al valore medio), compattare la base con un'ampiezza elevata fino a quando i valori di misurazione all'interno della striscia di prova sono più costanti. Ripetere il punto 3.
6. Una volta ottenuta una compattazione uniforme, verificare il tenore di umidità in un certo numero di punti e registrare i risultati.
7. Portare sulla striscia il materiale di riempimento per il primo strato. Selezionare la funzione Mappa di prova e compattare lo strato di riempimento con un'impostazione di ampiezza elevata e una velocità a terra bassa e uniforme, pari a 3 km/h (2 mph). Portare a termine una passata di andata e ritorno su ciascuna traccia prima spostarsi sul materiale non compattato. Il tenore di umidità deve essere uniforme e ottimale per il suolo o il pietrisco utilizzato.
8. Ripetere il ciclo di compattazione sull'intera area, prendendo nota del valore prevalente fra le misurazioni del livello di costipamento per ogni passata di compattazione.



9. Continuare a ripetere il punto 8 fino a quando il livello di compattazione fra le passate non varia più in misura sostanziale, oppure il compattatore inizia a disaccoppiarsi.
10. Il valore medio al quale le misure di compattazione iniziano a diventare costanti rappresenta il valore target, e il numero di passate che è stato necessario per raggiungerlo è il numero target di passate.
11. Registrare tali risultati e impostare di conseguenza sul display il valore e il numero di passate target per lo strato in questione.
12. Ripetere i punti da 7 a 11 con una nuova mappa di prova per ciascun nuovo strato. Al termine si dispone, per ciascuno strato, di un valore target per le misure di compattazione e il numero di passate.
13. Se più strati presentano valori quasi uguali, utilizzare un singolo valore target delle misure di compattazione per tutti gli strati di riempimento corrispondenti.
14. Eseguire la compattazione del cantiere come di solito, utilizzando la mappa di compattazione come una guida per ottenere un risultato uniforme sull'intera area.
15. Con il tempo e l'esperienza, gli operatori competenti possono riuscire a definire i valori target per le misure di compattazione e il numero di passate senza utilizzare una striscia di prova.
16. Se si desidera una misura più precisa del livello di compattazione finale, utilizzare il compattatore nella modalità di prova (soltanto bassa ampiezza, velocità costante pari a 3 km/h [2 mph], frequenza costante e direzione di marcia avanti).





Uso dei valori di compattazione intelligente senza taratura in cantiere

Questa procedura è la più pragmatica, e richiede un tempo aggiuntivo minimo o nullo. Si noti che questo processo è ideale per quella che in precedenza è stata descritta come modalità di produzione della compattazione; esso richiede una certa esperienza di impiego del sistema e una buona conoscenza delle modalità di funzionamento della tecnologia e del processo di compattazione del suolo in generale.

L'obiettivo di questo processo consiste nell'utilizzare la tecnologia di compattazione intelligente per confrontare la variazione relativa di avanzamento della compattazione passata per passata allo scopo di stabilire quando i fattori fisici alla base dell'attività di compattazione sono adeguati per le condizioni in cui si opera. Come già ricordato, l'uso della compattazione intelligente e della tecnologia integrata di misurazione della compattazione non fornisce una garanzia di compattazione o densità; spesso il processo utilizzato è inoltre più importante degli strumenti e della tecnologia impiegati in un cantiere. Dopo un certo numero di passate su un dato materiale, un compattatore con determinate caratteristiche può perdere la sua efficacia, rendendo irraggiungibile l'obiettivo di compattazione e trasformando in uno spreco tutte le passate successive. Sarebbe pertanto utile essere avvertiti del verificarsi di tale situazione, in modo da poter smettere di sprecare tempo e di consumare inutilmente carburante.

1. Dimensionare il meglio possibile i compattatori vibranti con funzioni di compattazione intelligente, tenendo conto dei target di compattazione, dei tipi di suolo, dei livelli di umidità, dello spessore degli strati e così via. Le informazioni di dettaglio fornite in precedenza descrivono alcuni fattori di cui tenere conto nel dimensionare e configurare il compattatore.
2. Avviare la compattazione in cantiere con il display di compattazione intelligente impostato in modo da mappare i valori di misura della compattazione e da confrontare la loro variazione percentuale fra una passata e la successiva.
3. È possibile impostare e personalizzare la funzione di mappatura in modo da assegnare un certo colore a un determinato intervallo di variazioni percentuali fra una passata e la successiva. Impostare ad esempio il display in modo da visualizzare in rosso le aree che presentano variazioni del 50 - 100 percento fra passate successive, in giallo quelle in cui tali variazioni sono del 10 - 49 percento e infine in verde quelle con variazioni dello 0 - 9 percento fra passate successive. È ovviamente possibile cambiare tali intervalli secondo necessità in base all'esperienza o alle condizioni del cantiere.

4. Proseguire la rullatura e la compattazione puntando a fare diventare verde la mappa.
5. Se vi sono aree che risulta impossibile fare diventare verdi (vale a dire con una variazione minima o nulla fra passate consecutive), è possibile in tali punti sia presente un problema di idoneità del suolo o della sottobase, che occorre risolvere.
6. Quando la mappa è verde in misura sufficiente e non si rilevano ulteriori variazioni dei valori di misura della compattazione fra una passata e la successiva, utilizzare un dispositivo portatile per prove di carico su piastra o un deflettometro leggero a massa battente come descritto negli esempi. Avere cura di utilizzare uno schema di punti di prova uniforme sull'intera area sottoposta a compattazione/prova, oppure come ritenuto opportuno per dimostrare che la compattazione rispetta o meno il target di compattazione specificato per il progetto.
7. Se le prove indicano un livello di compattazione conforme al target, proseguire come descritto con il progetto in cantiere.
8. Se le prove indicano che i target di compattazione non vengono rispettati, sono possibili le due alternative indicate di seguito.
 - 1) Le dimensioni e il peso operativo della macchina non sono corretti per il tipo di suolo e lo spessore dello strato, e/o 2) il tenore di umidità del suolo non è corretto (il suolo è troppo secco o bagnato). In entrambi i casi, il compattatore utilizzato nel cantiere non è in grado di fare avanzare la compattazione, a meno che non venga variata qualche condizione.



[SOLUZIONE DEI PROBLEMI DEI RISULTATI DELLA COMPATTAZIONE INTELLIGENTE]

Come descritto in precedenza, i risultati forniti dai sistemi di compattazione intelligente possono risentire di un certo numero di condizioni presenti in cantiere e di fattori operativi. Con l'esperienza, gli operatori iniziano a riconoscere alcuni schemi e a comprendere le cause probabili delle deviazioni dai valori previsti. Nel seguito sono riportati alcuni problemi comuni, unitamente alle rispettive cause e soluzioni. La conoscenza di queste informazioni contribuisce a una risoluzione più rapida dei problemi che si verificano nei cantieri.

Problema: i valori delle misurazioni di compattazione sono inferiori al previsto

Causa: il suolo è granulare e troppo asciutto per la compattazione. Un'ulteriore compattazione causa il cedimento della struttura del suolo e la decompattazione del medesimo. **Soluzione:** aumentare il livello di umidità del suolo prima di compattarlo ulteriormente. I suoli granulari sono in grado di assorbire molta acqua senza diventare troppo bagnati, in quanto l'acqua tende a defluire. Aggiungere una quantità di acqua leggermente superiore a quella ideale, per tenere conto dell'essiccamento e del drenaggio.

Causa: il suolo è formato da argilla invece che da ghiaia o materiali granulari. In alternativa, è possibile che sotto la superficie sia sepolta dell'argilla che influisce sulle misurazioni.

Soluzione: rimuovere l'argilla, se possibile in pratica, o accettare valori inferiori. In alternativa, utilizzare una tecnologia di misurazione della compattazione integrata nel compattatore e basata sull'energia, come quella MDP, che non risente della presenza di suoli coesivi.

Causa: nelle aree più dure del terreno il tamburo si sta disaccoppiando. Quando il tamburo si disaccoppia, i valori delle misure di compattazione (CMV, Compaction Measurement Value) e quelli RMV tendono a essere inferiori a quanto suggerirebbero le condizioni del terreno.

Soluzione: ridurre l'ampiezza, selezionando un'impostazione bassa. Se il disaccoppiamento permane, la compattazione è completa. Un'ulteriore compattazione in presenza di disaccoppiamento può causare una decompattazione.

Causa: il suolo è argilloso e troppo bagnato.

Soluzione: prima di provare a compattare il suolo, utilizzare un disco, un erpice o una stabilizzatrice per rovesciarlo in modo che possa asciugarsi. In alternativa, utilizzare una tecnologia di misurazione della compattazione integrata nel compattatore e basata sull'energia, come quella MDP, che non

risente della presenza di suoli coesivi, ma tenere conto del fatto che i livelli di umidità potrebbero comunque risultare inadatti per ottenere una compattazione corretta.

Causa: il materiale che si sta compattando è stato steso su una base di suolo non compattato o non stabilizzato. Durante la compattazione, esso presenta pertanto una flessione eccessiva e tende a non compattarsi.

Soluzione: occorre rimuovere lo strato superiore del suolo e rettificare quello sottostante. Tale operazione può comportare l'essiccamento e la ricompattazione, l'aggiunta di calce o altri agenti stabilizzanti del suolo oppure, in casi estremi, la rimozione e la sostituzione del suolo scadente.

Causa: la frequenza del tamburo è superiore al dovuto (una circostanza improbabile).

Soluzione: per ottenere il massimo livello di costanza dei risultati, la frequenza del tamburo deve essere pari a circa 30 Hz (1800 vpm). Fare accertare da un meccanico il motivo per cui la velocità di vibrazione non è corretta, quindi rettificarla. In alternativa, è possibile adottare una tecnologia di misurazione della compattazione integrata nel compattatore e basata sull'energia, come quella MDP, utilizzandola nella modalità statica (vibrazione disattivata) per vedere se ciò produce qualche effetto sull'uniformità dei risultati della compattazione.

Causa: sono presenti uno o più oggetti sepolti e meno rigidi del suolo circostante, come una fossa in cui sono seppelliti alberi o altre biomasse, rifiuti interrati o un grande blocco di argilla. Sulla mappa, tali oggetti si presentano come aree relativamente localizzate.

Soluzione: se la gravità della situazione è tale da giustificarlo, eseguire uno scavo, rimuovere i materiali e sostituirli con suolo adeguato.

Causa: la velocità di trasferimento è eccessiva.

Soluzione: rallentare, in modo da ottenere una produttività della massima efficienza e valori di compattazione più elevati. Se il compattatore ne è dotato, utilizzare la funzione opzionale di controllo automatico della velocità.

Causa: la direzione di marcia influisce sui valori delle misurazioni integrate della compattazione.

Soluzione: si tratta di un fatto normale: i valori misurati a marcia avanti sono diversi da quelli rilevati in retromarcia. L'unica soluzione consiste nel procedere sempre in una direzione oppure, durante l'analisi, nell'accettare soltanto i valori di compattazione ottenuti in una direzione.

Problema: i valori delle misurazioni di compattazione sono superiori al previsto

Causa: il suolo della base o della sottobase è più rigido del previsto.

Soluzione: nessuna; eseguire una prova mediante un penetrometro a cono dinamico e verificare la resistenza del sottosuolo allo scorrimento. Se tale resistenza è superiore al previsto, accettare i risultati come normali.

Causa: è presente un oggetto nascosto sepolto sotto la superficie. Può trattarsi di una grande pietra, di una lastra di cemento, di una vecchia pavimentazione o delle fondazioni di un edificio.

Soluzione: estrarre l'oggetto per ottenere una compattazione uniforme.

Causa: la velocità di trasferimento è a volte troppo bassa (una situazione improbabile, a meno che l'operatore non stia tentando di eseguire la compattazione utilizzando un determinato numero di passate).

Soluzione: mantenere costante la velocità. Se il compattatore ne è dotato, utilizzare la funzione opzionale di controllo automatico della velocità.

Causa: il terreno è gelato.

Soluzione: nessuna.

Problema: I valori delle misurazioni di compattazione variano in modo irregolare

Causa: le condizioni effettive del suolo sono variabili, in superficie o al di sotto. Questa situazione è più diffusa di quanto ci si aspetti. Gli oggetti nascosti, le variazioni dei materiali di riempimento e la variabilità del tenore di acqua possono influire sui valori forniti dai sistemi integrati di misurazione della compattazione.

Soluzione: se sono presenti variazioni gravi che occorre rettificare, partire dalla soluzione più semplice. Verificare e regolare il tenore di umidità del suolo. Se necessario, rimuovere gli oggetti nascosti; se di importanza essenziale, sostituire il suolo.

Causa: i valori delle misurazioni di compattazione forniti dal sistema integrato nel compattatore mentre quest'ultimo procede a marcia avanti sono maggiori/minori di quelli ottenuti in retromarcia.

Soluzione: si tratta di una condizione normale, che varia a seconda del tipo di suolo e del livello di compattazione. Le differenze tipicamente diminuiscono all'aumentare del livello di compattazione del suolo.



Causa: il tamburo si sta disaccoppiando durante la compattazione. Il disaccoppiamento può causare ampie variazioni dei valori forniti dal sistema di misurazione della compattazione integrato nel compattatore, in quanto i valori medi tendono a diminuire quando il tamburo inizia a disaccoppiarsi sul terreno più duro.

Soluzione: passare a un'ampiezza bassa. Se il disaccoppiamento permane anche con un'ampiezza bassa, il suolo ha raggiunto la massima rigidità che il compattatore è in grado di fornire. In alternativa, è possibile adottare una tecnologia di misurazione della compattazione integrata nel compattatore e basata sull'energia, come quella MDP, utilizzandola nella modalità statica (vibrazione disattivata) per vedere se ciò produce qualche effetto sull'uniformità dei risultati della compattazione.

[IL FUTURO DELLA COMPATTAZIONE INTELLIGENTE]

Come già spiegato, misurare la rigidità del suolo è un'attività estremamente complessa per via di tutte le variabili coinvolte. La conoscenza dei pregi e degli svantaggi della tecnologia IC si approfondisce tuttavia con l'uso. All'ampliarsi dell'esperienza, emergono nuove tecnologie, come quella detta Machine Drive Power, che offrono ulteriori vantaggi e risolvono i problemi applicativi posti dalla precedente fase di avanzamento. Con l'andar del tempo, le soluzioni hardware per le tecnologie esistenti diventano meno costose, e pertanto più accessibili per la ridefinizione delle finalità delle applicazioni di compattazione del suolo.

I compattatori del futuro disporranno probabilmente di più tecnologie di misurazione, in quanto ciascuna di esse presenta caratteristiche utili differenti. Emergeranno inoltre nuove tecnologie di misurazione basate forse su radar in grado di penetrare nel terreno, ultrasuoni o imaging magnetico. Si potrebbero creare immagini tridimensionali in grado di documentare tutta la struttura delle strade. Opportune tecnologie di rilevamento dell'umidità potrebbero segnalare agli operatori che occorre richiedere l'intervento di un'autocisterna o di uno scarificatore. Ogni operatore di compattatore potrebbe avere accesso alle informazioni provenienti da tutte le macchine presenti in cantiere (comunicazioni da macchina a macchina). Tale possibilità fornirebbe indicazioni in tempo reale sull'avanzamento dei cantieri, con ovvi

vantaggi in presenza di più compattatori o dispositivi di misurazione. I responsabili dei cantieri potrebbero monitorare e utilizzare i dati per prendere ogni giorno le decisioni più vantaggiose sotto il profilo economico.

In futuro, i dati acquisteranno un'importanza sempre maggiore. Un'area oggetto di sviluppi specifici sarà costituita dai dati provenienti da sensori ancora da sviluppare e dalla capacità di trasferire in modo rapido e agevole tali dati all'esterno dei cantieri e in altre applicazioni non di bordo (PC, tablet palmari e altri ancora). Le tecnologie attualmente in uso forniscono già quantità di dati superiori a quelle che è possibile organizzare in modo che risultino utili ai responsabili e agli ispettori dei cantieri del giorno d'oggi. La capacità di filtrare e organizzare i dati all'esterno della macchina, nonché di creare rapporti di cantiere che soddisfino le esigenze degli utenti finali, rivestirà un'enorme importanza, e sarà un'area in cui verranno redatte presto molte specifiche.

Nel campo della scienza della compattazione questa è un'epoca molto stimolante, e soltanto il tempo sarà in grado di dire quali progressi e tecnologie emergeranno in futuro, ma una cosa è certa: la riduzione dei costi, la qualità e l'efficienza rese possibili dalla compattazione intelligente faranno sì che le relative tecnologie vengano richieste e inserite nelle specifiche per cantieri di tutto il mondo.

APPENDICE

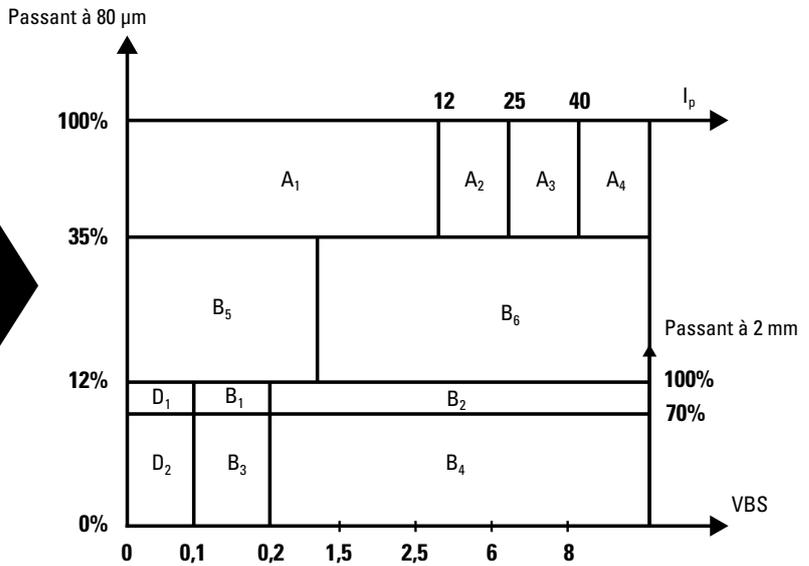
[SISTEMI DI CLASSIFICAZIONE DEI SUOLI]

| AASHTO CLASSIFICATION OF HIGHWAY SUBGRADE MATERIALS (with suggested subgroups) | | | | | | | | | | | |
|--|---|-------|--------------|---------------------------------|-------|-------|--------------|---|--------|--------------|-----------------------|
| General Classification | Granular Materials (35% or less passing #200) | | | | | | | Silt-Clay Materials (more than 35% passing #200) | | | |
| Group Classification | A-1 | | A-3 | A-2 | | | | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 A-7-5 A-7-6 |
| | A-1-a | A-1-b | | A-2-4 | A-2-5 | A-2-6 | A-2-7 | | | | |
| Sieve Analysis Percent Passing: | | | | | | | | | | | |
| # 10 | 0-50 | | 51-100 | | | | | | | | |
| #40 | 0-30 | 0-50 | 0-10 | 0-35 | 0-35 | 0-35 | 0-35 | 36-100 | 36-100 | 36-100 | 36-100 |
| #200 | 0-15 | 0-25 | 0-10 | 0-35 | 0-35 | 0-35 | 0-35 | 36-100 | 36-100 | 36-100 | 36-100 |
| Characteristics of Fraction Passing #40: | | | | | | | | | | | |
| Liquid Limit | | | | 0-40 | 41+ | 0-40 | 41+ | 0-40 | 41+ | 0-40 | 41+ |
| Plasticity Index | 0-6 | | N.P. | 0-10 | 0-10 | 11+ | 11+ | 0-10 | 0-10 | 11+ | 11+ |
| Group Index | 0 | | 0 | 0 | | 0-4 | | 0-8 | 0-12 | 0-16 | 0-20 |
| Usual Types of Significant Constituent Materials | Stone Fragments Gravel and Sand | | Fine Sand | Silty or Clayey Gravel and Sand | | | | Silty Soils | | Clayey Soils | |
| General Rating as Subgrade | Excellent to Good | | | | | | Fair to Poor | | | | |

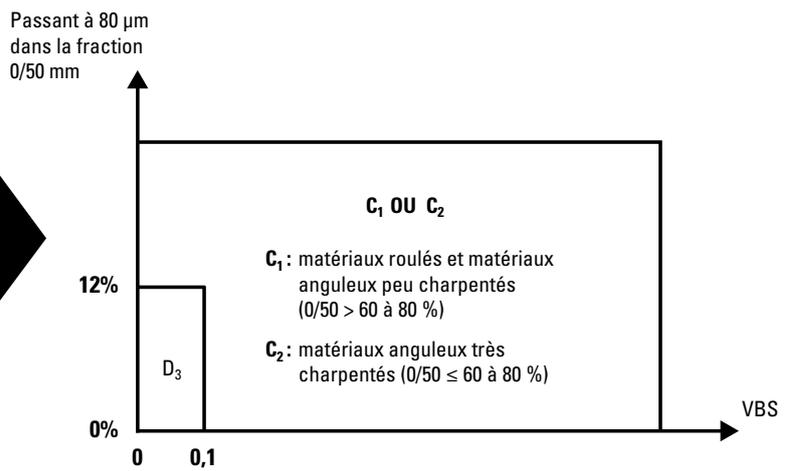
Sistema AASHTO di classificazione dei suoli

Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature

Sols
D_{max} ≤ 50 mm



Sols
D_{max} > 50 mm



Matériaux rocheux

| | | | |
|--------------------------------------|---|-------------------------------|----------------|
| Roches sédimentaires | Roches carbonatées | Craies | R ₁ |
| | | Calcaires | R ₂ |
| | Roches argileuses | Marnes, argilites, pélites... | R ₃ |
| | Roches siliceuses | Grès, poudingues, brèches... | R ₄ |
| | Roches salines | Sel gemme, gypse | R ₅ |
| Roches magmatiques et métamorphiques | Granites, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardoisiers... | | R ₆ |

Matériaux particuliers

| | |
|--|---|
| Sols organiques et sous-produits industriels | F |
|--|---|

Sistema francese di classificazione dei suoli

| Hauptgruppe | Korngrößenanteil ≤ 0,06 mm | Korngrößenanteil > 2,0 mm | Gruppe (allgemein) | Gruppe (detailliert) | Kurzzeichen Gruppensymbol |
|---------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------------|---|------------------------------|
| Grobkörniger Boden | ≤ 5 | < 40 | Kies | Enggestufte Kiese | GE |
| | | | | Weitgestufte Kies-Sand-Gemische | GW |
| | | | | Intermittierend gestufte Kies-Sand-Gemische | GI |
| | | | Sand | Enggestufte Sande | SE |
| | | | | Weitgestufte Sand-Kies-Gemische | SW |
| | | | | Intermittierend gestufte Sand-Kies-Gemische | SI |
| Gemischtkörniger Boden | 5 bis 40 | < 40 | Kies-Schluff | 5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm | GU |
| | | | | 15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm | GU* |
| | | | Kies-Ton | 5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm | GT |
| | | | | 15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm | GT* |
| | | ≤ 40 | Sand-Schluff | 5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm | SU |
| | | | | 15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm | SU* |
| | | | Sand-Ton | 5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm | ST |
| | | | | 15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm | ST* |
| Feinkörniger Boden | < 40 | — | Schluff | Leicht plastische Schluffe $W_L \leq 35$ | UL |
| | | | | Mittelpastische Schluffe $W_L = 35$ bis 50 | UM |
| | | | Ton | Leicht plastische Tone $W_L \leq 35$ | TL |
| | | | | Mittelpastische Tone $W_L = 35$ bis 50 | TM |
| | | | | Ausgeprägt plastische Tone $W_L = 50$ | TA |
| | | | | | |
| Organogener Boden | < 40 | — | Nicht brenn- und schwelbar | Organogene Schluffe $W_L = 35$ bis 50 | OU |
| | | | | Organogene Tone $W_L > 50$ | OT |
| | ≤ 40 | | | Grob bis gemischtkörnige Böden mit humosen Beimengungen | OH |
| | | | | Grob bis gemischtkörnige Böden mit kalkigen, kieseligen Bildungen | OK |
| Organischer Boden | — | — | Brenn- und schwelbar | Nicht bis mäßig zersetzte Torfe | HN |
| | | | | Zersetzte Torfe | HZ |
| | | | | Mudden (Faulschlamm) | F |
| Auffüllung ¹ | — | — | — | Auffüllung aus Fremdstoffen | A |

1 - Eine Auffüllung ist eine unter menschlicher Einwirkung entstandene Schüttung aus natürlichen Böden oder Fremdstoffen.

Sistema tedesco di classificazione dei suoli

USCS SOIL CLASSIFICATION SYSTEM

| SOIL FRACTION | SYMBOL | SIZE RANGE | |
|---|-------------|-----------------------------------|----------|
| Boulders | None | Greater than 12" | |
| Cobbles | None | 75 mm (3") to 12" | |
| 1- Course Grained Soils: | | | |
| Gravel | G | 75 mm (3") to #4 Sieve (4.25 mm) | |
| Course Gravel | | 75 mm to 19 mm | |
| Fine Gravel | | #4 Sieve to 19 mm | |
| Sand | S | #4 Sieve to #200 Sieve (0.075 mm) | |
| Course Sand Medium Sand Fine Sand | | | |
| 2- Fine Grained Soils: | | | |
| Fines | | Less than #200 Sieve | |
| Silt | M | Use Atterberg Limits | |
| Clay | C | Use Atterberg Limits | |
| 3- Organic Soils | | | |
| | O | Use Atterberg Limits | |
| 4- Peat | | | |
| | Pt | Visual Identification | |
| Gradation Symbols | | Liquid Limit Symbols | |
| Well-graded | W | High LL | H |
| Poorly-graded | P | Low LL | L |

Sistema unificato di classificazione dei suoli

| SOIL GROUPS GRAVEL and SAND may be qualified sandy GRAVEL and gravelly SAND where appropriate | | | SUB-GROUPS and in-laboratory identification | | | | |
|--|---|---|--|------------------|--|--------------|--|
| | | | GROUP SYMBOL | SUB-GROUP SYMBOL | FINES % < 0.06 mm | LIQUID LIMIT | |
| COARSE SOILS less than 35% of the material is finer than 0.06 mm | GRAVELS More than 50% of coarse material is of gravel size (coarser than 2 mm) | Slightly silty or clayey GRAVEL | G GW GP | GW GPu CPg | 0 to 5 | | |
| | | Silty GRAVEL | G-F | G-M | GWM GPM | 5 to 15 | |
| | | Clayey GRAVEL | | G-C | GWC GPC | | |
| | | Very silty GRAVEL | GF | GM | GML, etc. | 15 to 35 | |
| | | Very clayey GRAVEL | | GC | GCL GCI GCH GCV GCE | | |
| | SANDS More than 50% of coarse material is of sand size (finer than 2 mm) | Slightly silty or clayey SAND | S SW SP | SW SPu SPg | 0 to 5 | | |
| | | Silty SAND | S-F | S-M | SWM SPM | 15 to 35 | |
| | | Clayey SAND | | S-C | SWC SPC | | |
| | | Very silty SAND | SF | SM | SML, etc. | 15 to 35 | |
| | | Very clayey SAND | | SC | SCL SCI SCH SCV SCE | | |
| FINE SOILS more than 35% of the material is finer than 0.06 mm | Gravelly or sandy SILTS and CLAYS 35% to 65% fines | Gravelly SILT | FG | MG | MLG, etc. | | |
| | | Gravelly CLAY | | CG | CLG CIG CHG CVG CEG | | |
| | | Sandy SILT | FS | MS | MLS, etc. | | |
| | Sandy CLAY | CS | | CLS, etc. | | | |
| | SILTS and CLAYS 65% to 100% fines | SILT (M SOIL) | F | M | ML, etc. | | |
| | | CLAY | | C | CL CI CH CV CE | | < 35 35 to 70 50 to 70 70 to 90 > 90 |
| | ORGANIC SOILS | | Description letter 'O' suffixed to say group or sub-group symbol | | Organic matter in significant amount e.g. MHO – organic silt of high LL | | |
| PEAT | | Pt – consists predominantly of plant remains (fibrous or amorphous) | | | | | |

Primary Letter

G = Gravel
S = Sand
M = Silt
C = Clay
O = Organic Soil
Pt = Peat

Secondary Letter

W = Well graded
P = Poorly graded
M = With non-plastic fines
C = With plastic fines
L = Of low plasticity (LL < 50)
H = Of high plasticity (LL > 50)

Classification v1.00 Sept 2010

Sistema britannico di classificazione dei suoli

[**REQUISITI DI COMPATTAZIONE**]

Dispositivi integrati nei compattatori per l'esecuzione di un controllo continuo della compattazione del suolo

| BASIC/MINIMUM REQUIREMENTS | | | | | |
|---|---|---|---|--|---------------------------------------|
| One of the lower 3 blocks (one value) | At least 2 blocks | 3 top blocks | Top block or 4 lower blocks | 2 lower blocks | At least one block |
| | | Time stamp | Close-loop mode | | |
| Qualitative observation (ex: double-jump...) | | Mapping on board | Actual N passes | Data post-treatment facilities, & additional information | |
| Dimensional bearing capacity (ex: modulus...) | Number of passes (actual vs. target value) | Automatic positioning on board 2D or 3D | Actual frequency | Result by histogram and statistics | Data exchange between machines |
| Dimensional (ex: stiffness...) | Relative evolution (% related to target values D or ND) | Manual positioning 2D + layer (optional) | Actual amplitude A0 | Result by distance or surface | Remote data exchange |
| Non-dimensional value | End of compaction (D or ND) | Distance 1D | Actual speed V | Identification of machine and CCC device | Data exchange from office (USB stick) |
| 1 Behaviour of the material (dynamic response) | 2 Status of compaction (Comparison) | 3 Positioning, traceability during process | 4 Operational information (record and display) | 5 Control report, documentation | 6 Communication, others |

From the pamplet *CECE – Guidelines to evaluate soil and asphalt compactors equipped with continuous compaction control (CCC)*

GLOSSARIO TERMINOLOGICO

- A -

| | |
|--------------------|--|
| Aggregato | Componente minerale granulare portante delle strutture stradali, costituito solitamente da sabbia, ghiaia, arenaria, scorie, pietrisco o materiali fini. |
| Ampiezza | Misura della metà dello spostamento verticale da picco a picco compiuto da un tamburo vibrante in un ciclo completo. |
| Argilla | Materiale minerale (suolo) a grana fine che crea buoni legami con l'acqua grazie alle cariche elettrochimiche superficiali. |
| Assesamento | Processo di riduzione dell'altezza di una superficie a causa del consolidamento del materiale di riempimento. |

- B -

| | |
|----------------------------|---|
| Base | Strato di materiale specificato o selezionato, detto anche "strato intermedio", di spessore prestabilito, steso sulla sottobase per svolgere una o più funzioni, fra cui distribuire il carico, assicurare il drenaggio e ridurre al minimo gli effetti del gelo. |
| Buona granulometria | Caratteristica dei terreni a grana grossa di contenere particelle di molte dimensioni, che ne agevolano la compattazione. |

- C -

| | |
|--|--|
| Capillarità | Capacità di un materiale di assorbire l'acqua dal basso verso l'alto o lateralmente. |
| Carico lineare | Misura utilizzata nel settore per confrontare la forza di compattazione dei compattatori con tamburo liscio statico. |
| Coefficiente di uniformità | Parametro che descrive la distribuzione delle dimensioni delle particelle di un suolo (curva granulometrica). |
| Coesione | Capacità di un materiale di mantenere la propria compattezza in condizioni non confinate, vale a dire di mantenere la propria forma e adesione in caso di variazioni del tenore di umidità o di sommersione. |
| Compaction Meter) Value (CMV | Indicazione della rigidità del suolo calcolata misurando in G le forze esercitate alla frequenza di vibrazione del tamburo e a quella della sua prima armonica (pari al doppio di quella di vibrazione). |
| Compattabilità | Misura della capacità di un suolo di superare la resistenza alla deformazione specifica dei suoi materiali. |
| Compattazione | Processo di riduzione dei vuoti presenti in un materiale mediante manipolazioni meccaniche che ne aumentano la densità. |
| Compattazione intelligente | In generale, è possibile definire la compattazione intelligente come una tecnologia integrata in un compattatore e applicata al processo di compattazione per migliorare l'efficienza dei cantieri eliminando le attività di stima da parte del personale. |
| Compressibilità | Tasso di riduzione del volume di un materiale cui viene applicata una forza. |
| Consistenza | Caratteristica che definisce l'attrito superficiale di una particella del suolo. |
| Controllo della qualità (QC, Quality Control) | Procedura adottata da un appaltatore per garantire il completamento delle attività di compattazione secondo le specifiche. |

- D -

| | |
|---|--|
| Decompattazione | Perdita di compattazione dovuta a un'ulteriore applicazione di una forza di compattazione superflua. |
| Densità | Misura della massa per unità di volume, nonché indicatore tradizionale della portanza. |
| Disaccoppiamento | Fenomeno, detto anche "doppio salto", in cui il tamburo rimbalza dopo un impatto di vibrazione, raggiungendo un'altezza che permette alla vibrazione successiva di avvenire mentre il tamburo stesso è ancora sollevato. |
| Distribuzione delle dimensioni dei granuli | Misura dell'intervallo e della distribuzione delle dimensioni delle varie particelle presenti in un suolo. |
| Distribuzione delle particelle | Vedere Distribuzione delle dimensioni dei granuli. |
| Doppio salto | Vedere Disaccoppiamento. |

- E -

| | |
|-------------------|---|
| Elasticità | Tendenza di un materiale a riprendere la propria forma originale (o quasi) una volta rimosso il carico di compressione che gli era stato applicato. |
|-------------------|---|

- F -

| | |
|-------------------------------|--|
| Forza centrifuga | Forza a seguito della quale un peso sbilanciato in rotazione si allontana a velocità crescente dall'asse di rotazione. |
| Forza totale applicata | Calcolo della massima energia vibrante che un compattatore è in grado di trasferire al terreno. |
| Frequenza | Misura del numero di cicli completi (ad esempio vibrazioni) in un determinato intervallo temporale. |
| Frequenza di risonanza | Nel caso dei compattatori vibranti, si tratta del punto in cui il materiale del suolo che vibra contribuisce alla vibrazione del compattatore in misura sufficiente a fare sì che l'energia di compattazione sia superiore alla forza centrifuga prodotta; ciò significa che il risultato è superiore allo sforzo. |
| Frequenza propria | Frequenza alla quale una massa vibra a causa delle sue caratteristiche intrinseche. |

- G -

| | |
|---|---|
| Garanzia di qualità (QA, Quality Assurance) | Metodi e dati di prova che il titolare di un progetto utilizza per documentare la qualità di compattazione raggiunta nell'ambito del progetto in questione. |
| Global Navigation Satellite System (GNSS) | Termine onnicomprensivo utilizzato per descrivere le tecnologie di mappatura basate su sistemi satellitari, fra cui GPS e GLONASS. |
| GLObal NAVigation Satellite System (GLONASS) | Costellazione satellitare russa simile a quella del sistema GPS. |
| Global Positioning System (GPS) | Sistema di radionavigazione globale controllato dagli Stati Uniti e formato da una costellazione di 24 satelliti e dalle loro stazioni a terra. |
| Gradiente di compattazione | Grado di compattazione all'interno della profondità di azione. Il suolo tende a essere meno compatto in superficie, più compatto in un'ampia zona centrale e nuovamente meno compatto in prossimità della massima profondità di azione. |
| Granulo | Particella minerale. |
| Granulometria | Intervallo di dimensioni delle singole particelle del suolo. |
| Granulometria insufficiente | Caratteristica, detta anche granulometria uniforme, che indica la proprietà dei terreni a grana grossa di contenere particelle di dimensioni relativamente uniformi, che ne rendono difficile la compattazione. |

GLOSSARIO

| | |
|---|---|
| Granulometria uniforme | Caratteristica dei terreni a grana grossa, detta anche granulometria insufficiente, di contenere particelle di dimensioni relativamente uniformi, che ne rendono difficile la compattazione. |
| - I - | |
| Impatto | Forza di valore crescente creata trasformando una pressione da statica a dinamica, ad esempio lasciando cadere un peso. I colpi a frequenze basse o irregolari (da 50 a 600 al minuto) sono considerati forze di impatto. |
| Indice di plasticità | Differenza fra il limite liquido e il limite plastico di un terreno. Questa misura viene utilizzata per stabilire l'entità della stabilizzazione necessaria per i terreni a grana fine. |
| - L - | |
| Limite liquido | Limite di Atterberg altamente significativo, corrispondente al punto in cui un terreno contiene una quantità di acqua tale da essere considerato un liquido. |
| Limite plastico | Limite di Atterberg altamente significativo, corrispondente al punto in cui un terreno conserva una quantità di acqua sufficiente per diventare plastico. |
| Limo | Materiale (suolo) minerale a grana fine non coesivo. |
| - M - | |
| Manipolazione | Processo di lavorazione a impasto che riordina le particelle per formare una massa più densa. |
| Materiali fini | Termine generale che indica materiali formati da particelle di dimensioni molto piccole, inferiori a una determinata soglia stabilita mediante prove di vagliatura. I materiali fini attraversano anche il vaglio più fine. Enti di tutto il mondo adottano proprie definizioni indipendenti della misura specifica del vaglio, che è tuttavia approssimativamente la stessa. |
| Metodo dei limiti di Atterberg | Insieme di standard che descrivono le caratteristiche del terreno in sette fasi che vanno da solido a liquido. Le fasi più importanti sono i limiti plastico e liquido. |
| Metodo del Compaction Meter Value | Metodo di indicazione della rigidità del suolo inventato dall'azienda svizzera Geodynamik e adottato da Caterpillar. |
| Metodo dell'energia | Principio alla base del metodo brevettato Machine Drive Power (MDP) di Caterpillar per la determinazione della compattazione di un suolo misurando l'energia necessaria per guidarvi un veicolo (resistenza al rotolamento). |
| Metodo della forza / dello spostamento | Metodo di indicazione della rigidità del suolo basato sull'uso delle caratteristiche e delle misure di accelerazione del tamburo per calcolarne lo spostamento. |
| Misurazione della compattazione integrata nella macchina | Esecuzione delle misure di compattazione con tecnologie incorporate nella macchina compattatrice. |
| Modalità di produzione | Impostazione dei sistemi di compattazione che ne ottimizza le prestazioni per applicazioni con volumi di produzione elevati, ma nelle quali la precisione non rappresenta l'obiettivo principale. |
| Modalità di prova | Impostazione dei sistemi di compattazione che ne ottimizza le prestazioni per applicazioni di elevata precisione, ma nelle quali la produttività della macchina non rappresenta l'obiettivo principale. |

- P -

| | |
|--|---|
| Passata | Numero di passaggi di un compattatore su una superficie del terreno. Una "passata" viene a volte definita come un percorso di andata e ritorno, vale a dire un doppio passaggio su un'area specifica, mentre in altri casi il termine indica un singolo passaggio di un compattatore su una data area. Caterpillar definisce "passata" un singolo passaggio su un'area, a marcia avanti o in retromarcia. |
| Pendenza | Inclinazione di una superficie. |
| Permeabilità | Capacità di un materiale di consentire il passaggio di un liquido o di un gas. |
| Plasticità | Proprietà di un terreno a grana fine che gli consente di deformarsi al di là del punto di ripristino senza che si formino crepe o senza variazioni apprezzabili di volume. |
| Portanza | Capacità di un materiale di sostenere un carico. |
| Pressione statica | Peso applicato per ottenere l'energia di compattazione. |
| Prova Proctor (standard o modificata) | Prova di laboratorio che determina la massima densità secca di un materiale del suolo, nonché il tenore di acqua ottimale per raggiungere la massima densità. |

- R -

| | |
|------------------------------------|---|
| Resistenza al rotolamento | Quantità di energia necessaria per fare rotolare un oggetto rotondo su un materiale. |
| Resistenza allo scorrimento | Capacità delle particelle di un suolo di resistere allo scorrimento l'una rispetto all'altra quando viene applicata una forza di compattazione. |
| Resonance Meter Value (RMV) | Indicazione del livello di disaccoppiamento del tamburo. |
| Rettifica | Processo di modifica del suolo con mezzi chimici o meccanici per migliorarne le caratteristiche tecniche. |
| Rigidità (del suolo) | Capacità di un materiale di resistere alla flessione sotto carico, nonché indicatore primario della portanza. |
| Risonanza | Convergenza delle frequenze di vibrazione di due masse vibranti. |

- S -

| | |
|----------------------------------|---|
| Sabbia | Particella minerale non coesiva di dimensioni e forma definite. |
| Sottobase | Strato situato fra sottofondo e base. |
| Sottofondo | Suolo preparato per sostenere una struttura destinata al traffico. Il sottofondo svolge essenzialmente il ruolo di fondazione della struttura, e viene a volte detto "suolo di base" o "suolo di fondazione". |
| Stabilizzazione del suolo | Processo di ottimizzazione dell'idoneità di un suolo per un determinato scopo costruttivo. |
| Stazione | Area non standard definita dai tecnici e contrassegnata in cantiere tramite picchetti allo scopo di controllare la preparazione mediante sezioni gestibili. |
| Strato | Singolo strato di materiale del suolo posato, di spessore variabile. |
| Suoli a grana fine | Suoli formati prevalentemente da materiali fini. |

GLOSSARIO

| | |
|-----------------------------|--|
| Suolo | Materiale non consolidato, formato da particelle minerali e contenente o meno sostanze organiche. |
| Suolo a grana grossa | Suolo costituito da particelle (granuli) privi di coesione. Sabbia e ghiaia sono considerati suoli a grana grossa. Questi ultimi sono ulteriormente suddivisi in suoli con granulometria buona o inadeguata, per rispecchiare la loro maggiore o minore capacità di compattazione. |
| - T - | |
| Taratura | Processo di regolazione dei parametri di un sistema allo scopo di potenziarne al massimo le capacità per l'impiego con il materiale in uso. |
| Tenore di umidità | Quantità di liquido (acqua) per unità di volume di una massa. |
| Terrapieno | Accumulo di riempimento la cui sommità si trova più in alto delle superfici adiacenti. |
| - U - | |
| Uniformità | Livello di costanza di materiali e applicazioni. |
| - V - | |
| Vibrazione | Serie di colpi ad alta frequenza (1400 - 4000 al minuto) che produce una rapida successione di onde di pressione. Le vibrazioni prodotte da un compattatore sono in grado di spezzare i legami fra le particelle del materiale che viene compattato. |
| Vuoto | Spazio non occupato da materiali minerali solidi presente all'interno di un certo volume di materiale. |



WARNING
DANGER

STUBBLESS



CAT CS78B



CATERPILLAR