

CAT® PAVING PRODUCTS

GUIA PARA A COMPACTAÇÃO DO SOLO

 CATERPILLAR



CAT CS78B

SAFETY WARNINGS
1. Always use proper tie-off technique.
2. Always use proper hitching technique.
3. Always use proper unloading technique.
4. Always use proper stacking technique.
5. Always use proper unloading technique.
6. Always use proper stacking technique.

STUBBLESS

CAT® PAVING PRODUCTS

GUIA PARA A COMPACTAÇÃO DO SOLO

ÍNDICE

Unidade 1: PRINCÍPIOS BÁSICOS DA COMPACTAÇÃO DO SOLO	8
Unidade 2: TIPOS E CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS	30
Unidade 3: A FÍSICA DA COMPACTAÇÃO	38
Unidade 4: APLICAÇÃO E CONTROLE DE QUALIDADE	58
Unidade 5: COMPACTAÇÃO INTELIGENTE	90
APÊNDICE	112
GLOSSÁRIO DE TERMOS	118

O *Guia para a Compactação do Solo* é publicado pela Cat® Paving Products. Foram feitas todas as tentativas no sentido de assegurar que as especificações e informações contidas neste livro sejam corretas. As informações sobre o desempenho têm apenas o objetivo de estimativas. Devido às muitas variáveis específicas aos trabalhos individuais de compactação do solo (tipos e características e mecânica de solos, aditivos, teor de umidade, especificações do projeto, equipamento disponível, a eficiência do operador, preferências de aplicação do proprietário, condições de capacidade de suporte do solo, altitude, etc.), nem a Caterpillar Inc. nem seus revendedores garantem que as máquinas e as metodologias descritas nesta publicação apresentarão o desempenho esperado. Como as especificações e os materiais do equipamento estão sujeitos a mudanças sem prévio aviso, verifique com seu Revendedor Cat quais são as informações mais recentes sobre o produto e as opções disponíveis. As máquinas mostradas podem incluir equipamentos opcionais e/ou adicionados. CAT, CATERPILLAR, seus respectivos logotipos, o “Amarelo Caterpillar” e a configuração comercial POWER EDGE, bem como a identidade corporativa e de produtos usadas nesta publicação são marcas registradas da Caterpillar e não podem ser usadas sem permissão.

Nota: Consulte sempre o Manual de Operação e Manutenção da Caterpillar apropriado para obter informações específicas sobre o produto. Alguns equipamentos mostrados podem incluir opções adquiridas no mercado paralelo não fabricadas ou testadas pela Caterpillar.

ISBN: 978-1-939945-05-1

QPBO1705

© 2013 Caterpillar Inc. - Todos os direitos reservados.

APRESENTAÇÃO

Os materiais de solo sempre foram os materiais de construção mais abundantes em todo o mundo. Desde os dias em que os romanos usaram materiais de terra para construir estradas até a construção de represas nos dias modernos, as operações adequadas de compactação sempre estiveram ligadas ao desempenho destas camadas, em última análise, é construído sobre essas mesmas camadas. Hoje, projetos tais como rodovias, diques, barragens, aterros estruturais e taludes exigem operações controladas de compactação para assegurar a observação dos critérios de qualidade da engenharia. Quando a qualidade da compactação não é alcançada durante a construção, os custos com reparos durante vida útil do projeto podem superar os custos iniciais da construção.

Os materiais de solos não são apenas os materiais de construção mais abundantes, mas são também os que apresentam maior variedade. O tamanho e o formato das partículas, a mineralogia, o teor de umidade, as misturas e o tempo são fatores que contribuem para a variabilidade dos materiais de terra. Este guia descreve fontes de variabilidade e se concentra na seleção do equipamento correto para manter operações de compactação eficientes e produtivas. As práticas de seleção do equipamento de compactação e os processos de colocação do material de solos foram baseados amplamente em normas práticas ou no que já deu certo no passado. No entanto, com as programações aceleradas de

construção e com turnos voltados às especificações orientadas ao desempenho, as operações de compactação – embora representem uma pequena parte dos custos totais da construção – são cada vez mais críticas para o sucesso do projeto.

Este guia descreve os princípios básicos dos processos de compactação, a seleção de máquinas eficientes para a compactação, e as tecnologias emergentes de testes para a verificação da qualidade, com as metas de tempos potencializados de compactação e o controle dos custos do projeto. A orientação para a seleção de máquinas é baseada no tipo do material, nas exigências de espessura da camada, nas necessidades de produtividade e nos critérios de avaliação da qualidade (por exemplo, compactação relativa, módulos da reação do subsolo).

Este guia é particularmente útil para empreiteiros que querem obter e usar informações sobre o solo antes do início dos projetos, para que possam desenvolver preços de concorrências específicos do canteiro de obra e planos para o processo de compactação que se concentrem em realizar um trabalho bem feito, logo na primeira vez, evitando modificações dispendiosas e atrasos da construção.

Tecnologias de medição da compactação, como o Compaction Control, exclusivo da Cat®, agora possibilitam monitorar o progresso da compactação

em termos de espessura da camada, cobertura em cada passada, Compaction Meter Value (CMV) e Machine Drive Power (MDP). O CMV é um parâmetro muito conhecido que permite que as máquinas de compactação sejam como dispositivos de medição, que oferecem valores de parâmetros mecânicos de medição para os solos (por exemplo: dureza, resistência), com base na análise de vibração da máquina no solo. A MDP é uma tecnologia nova e criativa da Caterpillar, que leva a capacidade desses sistemas ainda mais além.

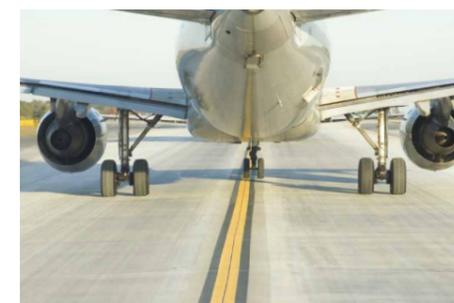
Pela medição dos valores mecânicos de materiais compactados em tempo real usando informações do posicionamento do GNSS (Global Navigation Satellite System), podem ser gerados mapas de avaliação de alta qualidade e codificados por cores. Esses mapas podem ser vinculados a valores do projeto para assegurar que os materiais compactados atendam aos critérios estabelecidos de qualidade. Essa abordagem de avaliação da qualidade da compactação está muitos anos-luz à frente do antigo método de inspeção visual geral. Onde as especificações da compactação, antigamente, eram orientadas no sentido de especificações do método que ditavam o processo, agora são possíveis especificações do desempenho orientado para os resultados, com 100% de cobertura em tempo real, com o uso de tecnologias integradas. Na verdade, tecnologias de compactação inteligente agora são

a base para que agências ligadas ao processo de construção em todo o mundo possam repensar a avaliação da qualidade da compactação.

Este guia combina a experiência e o conhecimento conquistados como resultado do comprometimento da Caterpillar em melhorar os equipamentos e as operações de compactação. Muitos empreiteiros, engenheiros, bem como autoridades e pesquisadores reconhecidos contribuíram para a publicação deste guia. Tecnologias emergentes de compactação, especialmente o monitoramento integrado para uma compactação inteligente e métodos para prever os parâmetros da operação, resultarão nas mudanças mais significativas na avaliação da compactação desde 1933, quando Ralph R. Proctor estabeleceu os padrões para o controle da umidade.

Os usuários deste guia terão, nas pontas dos dedos, uma fonte prática dos princípios fundamentais da compactação de solo, informações especializadas sobre a seleção de máquinas, e como potencializar as operações de compactação. A implantação das informações apresentadas neste guia vai reduzir os riscos e melhorar a qualidade da compactação.

David J. White, Ph.D.
Professor Associado
Universidade Estadual de Iowa



INTRODUÇÃO

Quem quer construir deve compactar.

A Caterpillar tem o prazer de apresentar este *Guia de Compactação do Solo*. Seu objetivo é servir como um guia que abrange os princípios básicos da compactação, as técnicas de testes e os procedimentos no canteiro de obras. O teor deste guia oferece uma abordagem prática a um assunto teórico altamente complexo. É produto de décadas de experiência no setor de terraplenagem, bem como o conhecimento contribuído por inúmeros colaboradores, que têm trabalhado com a Caterpillar durante muitos anos.

Quer você seja um profissional da construção, um funcionário público, um educador ou um estudante, ou mesmo que esteja simplesmente interessado em aprender mais sobre a metodologia da construção, você vai descobrir que este guia é uma fonte valiosa.

Outra fonte de grande valor que você deve consultar sobre aplicações de terraplenagem ou compactação é seu revendedor local da Cat. O pessoal do revendedor é treinado por especialistas da Caterpillar para prestar assistência a você, oferecendo equipamento, serviços e conhecimento para mantê-lo no auge de sua produtividade.



Unidade 1 OS PRINCÍPIOS BÁSICOS DA COMPACTAÇÃO DO SOLO

A capacidade de analisar a composição do solo é um fator crítico no processo de estabelecer as especificações da compactação e então obter a resistência necessária para suportar a carga.



[O QUE É A COMPACTAÇÃO]

Em palavras simples, compactação é o processo de aumentar mecanicamente a densidade de um material. O solo fica mais denso com a redução dos vazios entre as partículas que os formam. Com o tempo, o material solto fica assentado e ocorre uma auto-compactação naturalmente. Com a aplicação de várias forças mecânicas, o tempo necessário para que seja obtida a compactação é reduzido de anos para horas.

A compactação é um processo necessário para praticamente todo tipo de projeto de construção,

inclusive estradas, ferrovias, aeroportos, construção civil, fundações, oleodutos, represas, canais, aquedutos e muito mais. Se o solo precisar suportar uma estrutura, a compactação é normalmente necessária para manter a estabilidade dessa estrutura.

A compactação do solo é realizada com o emprego de uma força ou uma combinação de forças, pressão estática, impacto, manipulação e vibração.



[POR QUE A COMPACTAÇÃO É IMPORTANTE?]

O material apropriadamente compactado é capaz de suportar cargas mais pesadas sem deformação (torção, rachaduras, movimentação). O material do subleito que suporta uma estrutura pesada deve ser muito denso ou ficará ainda mais compactado sob a carga, fazendo com que a estrutura se acomode. O material denso tem menos permeabilidade, o que reduz o impacto da infiltração de água. A compactação também nivela a superfície e revela áreas estruturalmente fracas.

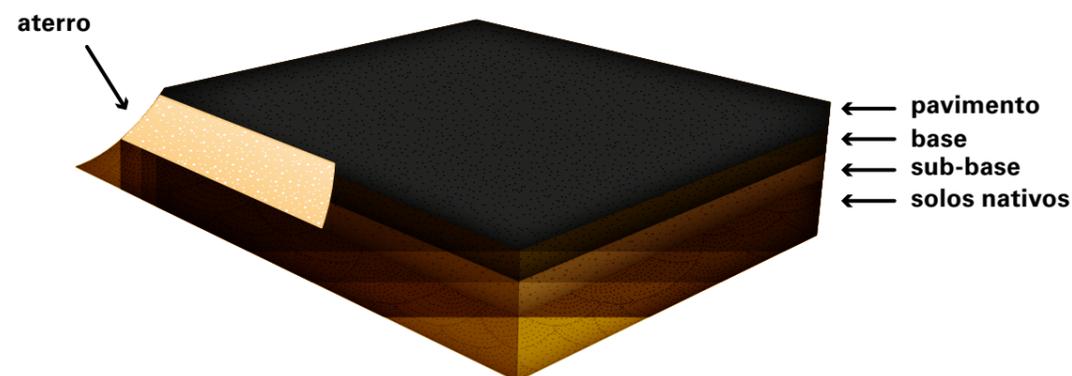
Uma boa maneira de ilustrar a importância da compactação é considerar as várias camadas do leito de uma rua ou de uma rodovia típica. Cada camada do leito é projetada para atender a um propósito específico de engenharia, bem como para suportar o peso colocado sobre ele. Cada camada deve ser construída da maneira certa, com a espessura e a rigidez apropriadas. Se uma camada

não ficar suficientemente resistente, o leito da rua ou da rodovia apresentará problemas.

A compactação ocorre durante todas as fases de construção da estrada. A qualidade da compactação exerce um impacto significativo na longevidade da estrada, bem como um profundo efeito no conforto – e possivelmente na segurança – do público que a usa.

O elemento menos dispendioso na ampliação da vida útil da estrada é o processo da compactação. Aumentar a densidade das camadas da rodovia durante o processo de construção custa muito pouco por metro cúbico de solo. Atender às especificações de densidade pode resultar em uma economia significativa de dinheiro nos futuros custos de manutenção e/ou de uma nova pavimentação da estrada.

SEÇÃO TÍPICA DE UMA ESTRADA



[O QUE É O SOLO?]

Solos são materiais não consolidados compostos de partículas de minerais que podem conter substâncias orgânicas. Solos são, essencialmente, depósitos de rochas desintegradas que foram lentamente desgastadas por processos físicos e químicos.

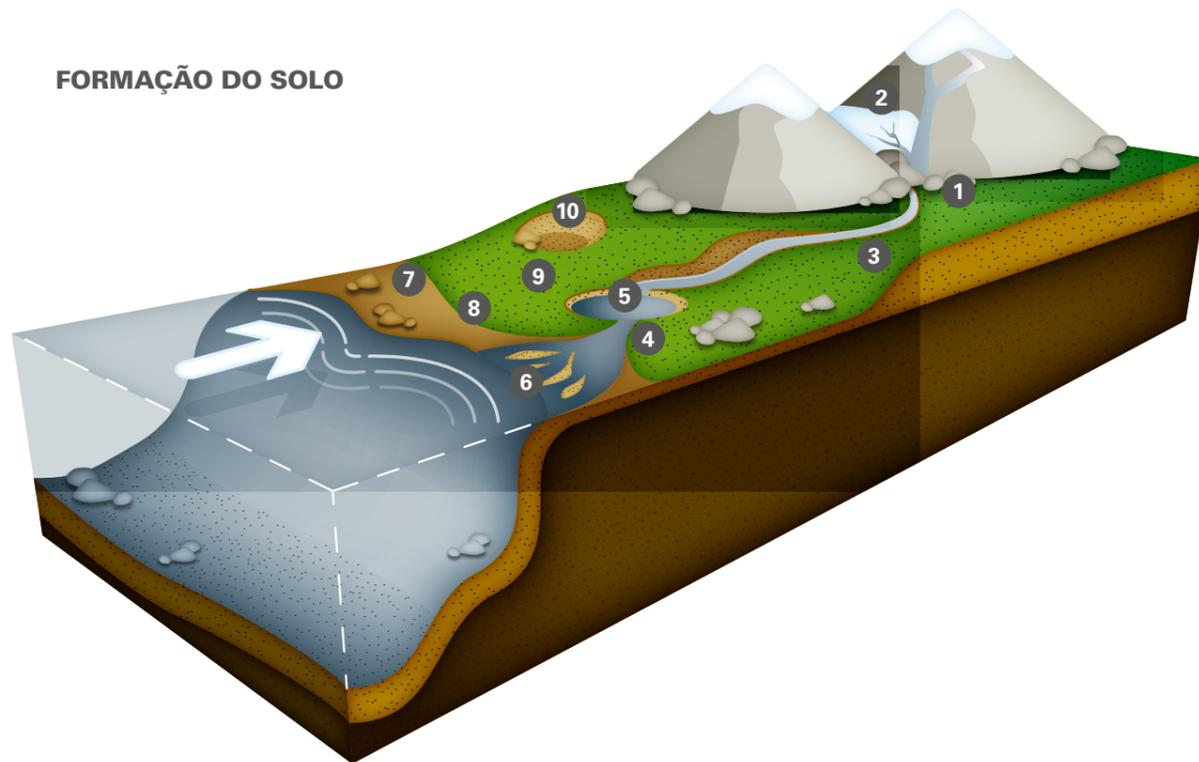
Os processos físicos incluem congelamento e descongelamento, compactação, trituração e a força dos ventos.

Os processos químicos formam solos argilosos. A ação de desagregação em longo prazo, bem como

as precipitações pluviométricas, desempenham uma parte importante na criação de solos argilosos. A argila difere da areia e do cascalho porque consiste de minúsculas partículas planas com estruturas semelhantes a placas resultantes de uma grande variedade de rochas.

A matéria orgânica também contribui para a formação do solo. Quando as plantas morrem, seus resíduos passam a fazer parte do solo. Os solos com alto teor de matéria orgânica são normalmente muito esponjosos e fracos para serem usados com propósitos estruturais.

FORMAÇÃO DO SOLO



- 1 **solos residuais**
rochas previamente existentes desagregadas
- 2 **depósitos glaciais**
materiais transportados ou criados por camadas de gelo
- 3 **depósitos glaciais**
materiais transportados pela água do derretimento de camadas de gelo
- 4 **depósitos de rios**
- 5 **sedimentos lacustres**
- 6 **solos de aluvião**
solos de granulação fina depositados em planícies e em estuários pela água escoada
- 7 **sedimentos trazidos por ondas**
- 8 **depósitos trazidos pelo vento**
- 9 **solos orgânicos**
vegetação decomposta
- 10 **solos artificiais**
processados pela ação de dinamites e trituração

[TIPOS DE SOLOS]

Embora os solos possam apresentar uma grande variação em sua formação física e química, seis tipos fundamentais são reconhecidos para os objetivos de engenharia: pedregulho, seixos, cascalho, areia, sedimento fino e argila.

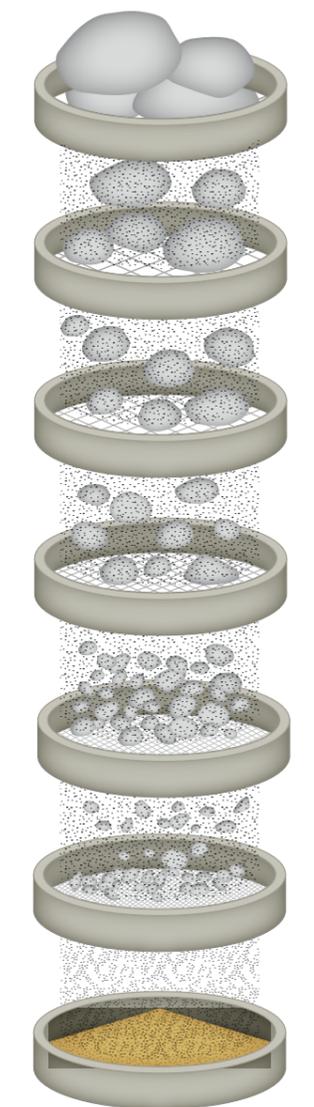
Os seis tipos de solos são geralmente organizados pelo tamanho das partículas, que é determinado com a utilização do teste da peneira. Embora os detalhes precisos de uso da engenharia possam variar segundo o país, os tamanhos

das peneiras são geralmente definidos por sistemas desenvolvidos por uma de duas fontes: a International Organization for Standardization (ISO) [www.iso.org] ou a American Society for Testing and Materials (ASTM) [www.astm.org]. Os dois sistemas não concordam precisamente, mas são bastante similares. As porcentagens de solos que são muito finos para ser classificados com peneiras são determinadas com a utilização de um teste com hidrômetro. (Veja p. 14.)

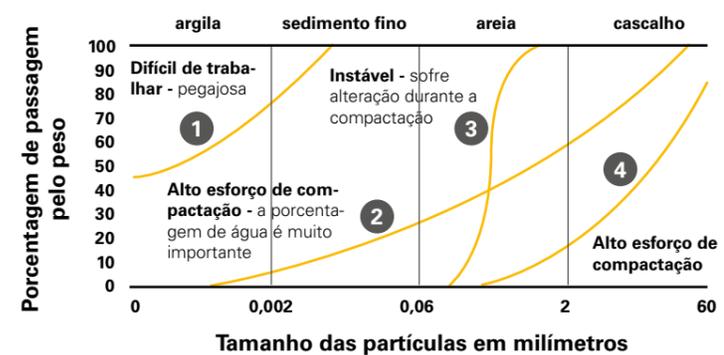
TIPOS DE SOLOS



TESTE DA PENEIRA



DISTRIBUIÇÃO PELO TAMANHO DAS PARTÍCULAS



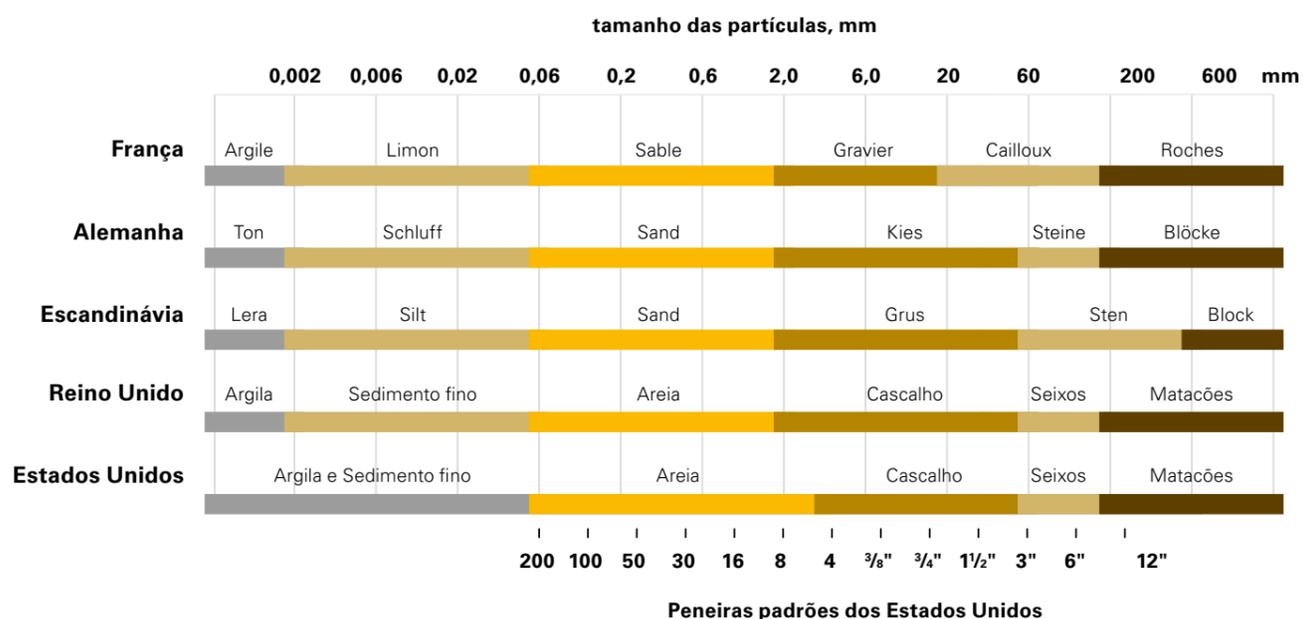
- 1 sedimento fino – argila
- 2 cascalho – sedimento fino
- 3 areia uniforme
- 4 cascalho – areia



Teste do Hidrômetro

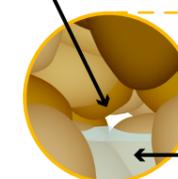
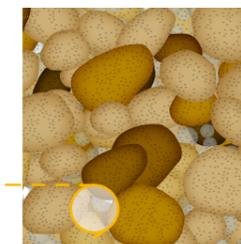
A amostra do solo é dispersada (suspensa) em água em um cilindro com graduação. O tempo que o material leva para assentar no fundo pode identificar diferentes tamanhos de granulação. É feita uma leitura da suspensão no hidrômetro para determinar a gravidade específica, que permite o cálculo das porcentagens de grãos de um tamanho em particular.

GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DE SOLOS



VAZIOS DE AR/ÁGUA

Vazio de ar



Água

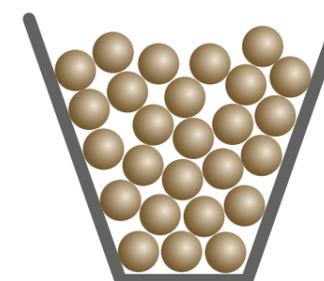
entre as partículas são chamados de "vazios, ou vácuos". Os vazios podem ser ocupados por ar ou água. Quando um material de solo tem muito ar e água devido a vazios abundantes, o solo fica instável. O processo de compactação rearranja as partículas do solo para reduzir ao mínimo o volume e o tamanho dos vazios de ar ou água, deixando o material mais denso e estável.

Os solos naturais ou "nativos" – aqueles que ficam naturalmente depositados no terreno – variam conforme o local. Por exemplo, um material de solo nunca é 100 por cento argila ou areia - sempre existe a presença de pequenas porcentagens de outros tipos de solo. Os melhores materiais de solo para construção frequentemente são compostos de porcentagens específicas de tipos selecionados de solo, dependendo das características de engenharia que são desejadas.

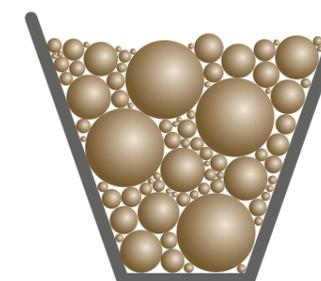
Os engenheiros geotécnicos podem projetar misturas de solos para obter essas características, especificando as porcentagens de cada tipo de solo. Os tipos de solos que faltam em um solo nativo são acrescentados nas proporções certas e misturados com os solos nativos para criar um solo adequado à finalidade desejada pela engenharia. Esses materiais aditivos são frequentemente determinados como resultado de uma análise econômica dos materiais de solos disponíveis nas proximidades.

Quando examinamos atentamente uma amostra de solo, notamos que existem partículas individuais de muitos tamanhos e formatos. Os espaços

GRANULAÇÃO



Solo com granulação uniforme ou precária



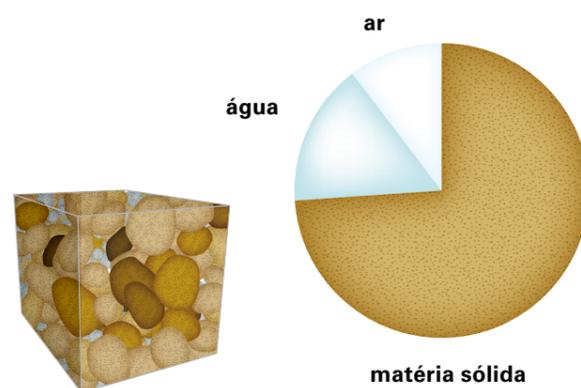
bem granulado

As partículas individuais de um material de solo variam em tamanho, mesmo quando a variação é pequena. A faixa de tamanho das partículas é denominada "granulação," e, algumas vezes, é chamada de "distribuição das partículas por tamanho" ou "distribuição do tamanho dos grãos." Idealmente, existem quantidades relativamente iguais de todos os tamanhos de grãos, sem a presença de um tamanho predominante. Um material que tenha essa gama ideal de tamanhos é considerado como "bem granulado".

Os materiais que tenham partículas de tamanhos quase idênticos, como areias aluviais, são considerados como de "granulação uniforme" ou materiais com "granulação precária". Se não houver a presença de um ou mais tamanhos no material, ele é chamado de "material com granulação tipo gap-graded". Um solo bem granulado é mais facilmente compactado do que um solo com granulação precária porque a presença de uma variabilidade de tamanhos dos grãos significa que os grãos menores se adaptam perfeitamente nos vazios entre os grãos maiores.

O material de um solo é fundamentalmente uma mistura composta de várias porcentagens dos tipos de solos mencionados anteriormente. É importante entender que o material de um solo não é feito apenas de materiais sólidos. O material de um solo é uma mistura de matéria sólida (qualquer combinação de tipos de solos), água e ar.

MISTURAS NO SOLO



[QUATRO TIPOS DE MATERIAIS DE SOLO]

Embora algumas vezes seja útil conhecer a composição exata de um material de solo, é mais pragmático entender como um material de solo reage quando várias forças são aplicadas a ele. Com esse objetivo, os profissionais que trabalham com solos classificam os materiais de solos em quatro tipos básicos:

1. **coesivo**
2. **semi-coesivo**
3. **não-coesivo ou granular**
4. **orgânico**

Cada tipo reage diferentemente quando são aplicadas forças a eles. A forma com que cada um reage determina sua conformidade aos vários propósitos de engenharia na construção, bem como que tipos de meios são usados para trabalhar com cada solo. Como foi mencionado anteriormente, os materiais de solos orgânicos não são adequados para os propósitos da construção.

Quando um material de solo não é adequado para os propósitos da engenharia, ele é substituído ou são empregados vários meios para melhorar as características do solo, um processo conhecido como "estabilização". Essas soluções podem incluir estabilização química – por exemplo, a incorporação de cimento Portland, cal, partículas de cinza incombustível ou cloreto de cálcio – e estabilização mecânica, que inclui a adição de agregados especiais ou a utilização de geossintéticos para reforçar o solo.

TIPOS DE MATERIAIS



Tipo de Solo	Aparência / Percepção	Movimento da Água	Quando Úmido	Quando Seco
Solos granulares, areias finas e sedimentos finos	Os grãos densos podem ser vistos. Sensação arenosa quando esfregado entre os dedos.	Quando a água e o solo são agitados na palma da mão, se misturam. Quando a agitação é interrompida, eles se separam.	Muito pouca ou nenhuma plasticidade.	Pouca ou nenhuma resistência aderente quando seco. A amostra do solo desmorona facilmente.
Solos coesivos, mistos e argilas	Os grãos não podem ser vistos a olho nu. Sensação lisa e oleosa quando esfregado entre os dedos.	Quando a água e o solo são agitados na palma da mão, eles não se misturam.	Plástico e pegajoso. Pode ser compactado.	Tem alta resistência quando seco. Desmorona com dificuldade. Lenta saturação na água.

[A IMPORTÂNCIA DO TEOR DE UMIDADE]

A importância da água no processo de compactação do solo não pode ser exagerada. Cada tipo de solo tem características físicas que definem como o solo reage à umidade. Para cada material de solo, há um teor de umidade que maximiza as propriedades de engenharia do material para uma determinada energia de compactação. Geralmente, quanto menor o tamanho da partícula, maior é a influência da água na compactação.

Se um solo tiver um teor muito pequeno de umidade, o material será difícil de trabalhar porque as partículas não terão a lubrificação necessária para rearranjá-las em um estado mais denso. E, as partículas não serão suficientemente aderentes para permanecer onde foram adensadas e assentadas.

É acrescentada água para realçar a aderência e a lubrificação. Água demais pode causar saturação.

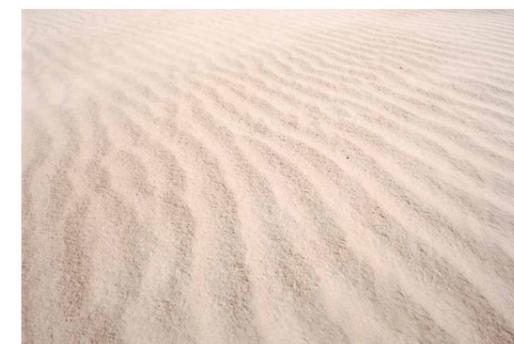


Quando o solo está saturado, os vazios ficam cheios de água, enfraquecendo a capacidade de suporte de carga da estrutura. As partículas também ficarão excessivamente lubrificadas, e poderão ser facilmente deslocadas.

Como um exemplo simples de como a água pode afetar as propriedades de engenharia de um solo, imagine-se tentando construir um castelo de areia em uma praia. A água na areia lhe dá uma aderência suficiente para que ela seja moldada em paredes grossas e torres altas. Agora imagine-se tentando construir o mesmo castelo de areia no deserto. O árido solo do deserto não tem aderência, assim será difícil conseguir mais alguns poucos montes baixos de areia.



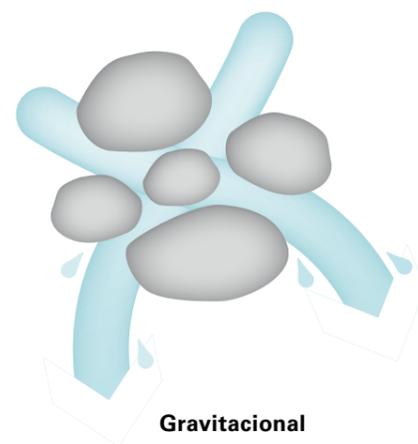
A água também tem outros efeitos. Como resiste à compressão, ela desloca os materiais do solo, causando instabilidade. A água congelada se expande, deslocando o solo ao redor dela. Quando a água gelada descongela, ela ocupa um volume menor, criando espaço que vai permitir o assentamento do material.



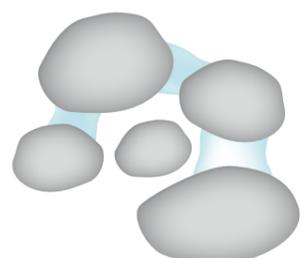
A água está presente em todos os solos em seus estados naturais. Ela aparece em uma das três maneiras a seguir:

1. A água gravitacional é livre para se mover para baixo devido à força da gravidade. Ela pode ser drenada naturalmente de um solo.
2. A água capilar é mantida em um solo por pequenos poros ou vazios. É considerada água livre e só pode ser removida com o rebaixamento do nível do lençol freático ou pela evaporação.
3. A água higroscópica está presente em um solo após a remoção da água gravitacional e da água capilar. Os grãos individuais do solo mantêm essa água na forma de um filme muito fino, que tem afinidades físicas e químicas com os grãos do solo. É também chamada de teor de umidade "secada com ar". Essa água deverá ser removida pelo aquecimento do solo em um forno para determinar o verdadeiro peso seco do solo.

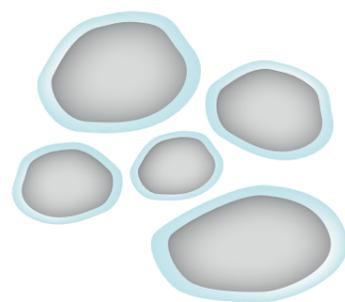
O excesso de umidade lubrifica demais o solo e provoca a instabilidade das partículas, enquanto que pouca umidade reduz a aderência e impede que as partículas sejam reorientadas facilmente para um estado mais denso. Para cada tipo de solo, há um teor de umidade ideal no qual a densidade máxima pode ser atingida com uma determinada quantidade de energia de compactação. O Teste Proctor foi desenvolvido como uma forma de ajudar a definir esse teor ideal de umidade para o esforço selecionado de compactação.



Gravitacional



Capilar



Higroscópica



[O TESTE PROCTOR]

O valor de compactar solos de base e sub-base já foi entendido há muito tempo. Mas foi somente em 1933 que Ralph R. Proctor, do Los Angeles Bureau of Water Works, desenvolveu um método padronizado para determinar o teor ideal de umidade e a correspondente densidade máxima do solo seco. O Teste Proctor usava um soquete operado manualmente para compactar três camadas do solo colocadas em um cilindro confinado.

O procedimento Padrão determina o teor ideal de umidade de um material que permitirá que certa força de compactação seja aplicada para se obter a densidade máxima do material. Esse resultado é usado para criar uma especificação para compactação no canteiro de obras. Como as condições no campo não são iguais às condições ideais em um laboratório, a compactação que se deseja é escalada em uma porcentagem da densidade a seco, determinada no laboratório. Ela pode variar de 90% a mais de 100%.

Testes modificados de compactação também foram introduzidos em relação às estruturas que exigem maior resistência para suportar cargas extremamente pesadas ou para limitar o assentamento. O teste de compactação Modificado aplica cerca de quatro vezes mais energia que o teste de compactação Padrão e normalmente resulta em um teor de umidade "ideal" mais baixo.



Kit do teste Proctor no laboratório

Ultrapassando 100 por cento de Densidade com o Solo Seco

Como a densidade desejada pode ultrapassar 100%? A densidade máxima com o solo seco, estabelecida pelo Teste Proctor não é a densidade máxima obtida no campo em um solo em particular. A Densidade Proctor com o Solo Seco de 100 por cento representa a densidade máxima obtida no laboratório com a amostra em particular usando uma quantidade específica de força de compactação e um teor ideal de umidade. O teste Proctor Padrão e o teste Proctor Modificado usam pesos diferentes e estabelecem densidades diferentes com o solo seco para a mesma amostra. No campo, os "golpes" resultam de um grande compactador de solo que aplica uma quantidade de força diferente daquela aplicada pelos soquetes dos testes Proctor. Não é incomum alcançar densidades no campo desde 100% a 115% da densidade Proctor máxima com o solo seco. Engenheiros geotécnicos podem determinar que, devido às exigências de suporte da carga e às características do solo, é garantida uma densidade de compactação superior a 100 por cento do teste Proctor.

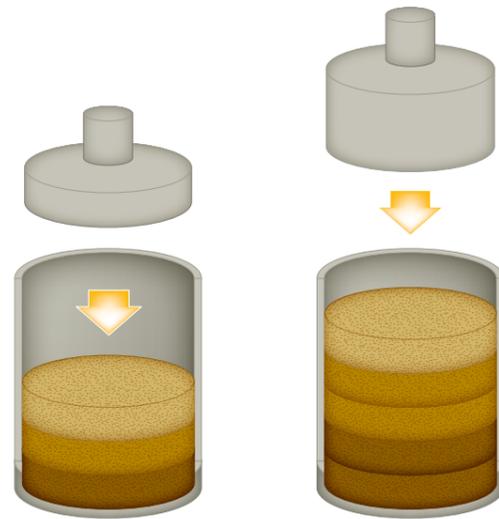
Para uma determinada amostra de solo, o teste Proctor Padrão ou Modificado é realizado cinco vezes. O mesmo procedimento é usado a cada vez em que o teste é feito, mas o teor de umidade varia em cada um deles.

A série começa com o solo em uma condição úmida em algum ponto abaixo do teor de umidade ideal provável. Depois que a primeira amostra é compactada em um recipiente cilíndrico, o peso do solo molhado é medido e uma porção da amostra é colocada em um forno para secar. Quando a amostra ficar completamente seca, ela será pesada novamente. A diferença entre os pesos do solo molhado e seco mostra o índice de umidade que é expresso como uma porcentagem do peso do solo molhado.

Uma segunda amostra com um teor maior de umidade é compactada e é repetido o processo de pesagem e secagem. Amostras adicionais com teor cada vez maior de umidade são processadas até que o peso da unidade molhada seja reduzido ou até o solo ficar molhado demais para ser trabalhado.

Os valores da densidade do solo molhado e do teor de umidade para cada amostra são então plotados e é formada uma curva suave. O ponto mais alto na curva representa a densidade máxima do solo seco e o teor ideal de umidade para aquela amostra de solo.

TESTES PROCTOR



Padrão
Cada camada recebe 25 golpes de um soquete de 2,5 kg (5,5 lb) a partir de uma distância de 305 mm (12 pol.)

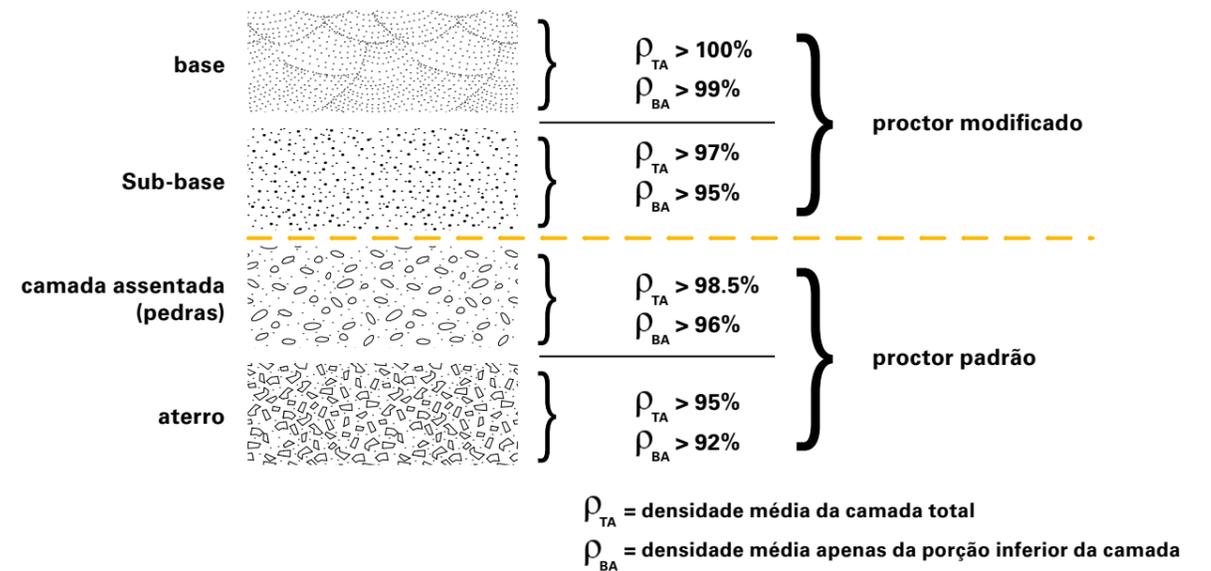
Modificado
Cada camada recebe 25 golpes de um soquete de 4,5 kg (10 lb) a partir de uma distância de 457 mm (18 pol.)

Os testes de laboratório determinam o teor de umidade em que a densidade máxima pode ser alcançada para aquele material de solo em particular. As densidades desejadas no campo são especificadas como uma determinada porcentagem da densidade máxima do solo seco registrada no laboratório. Geralmente, as densidades

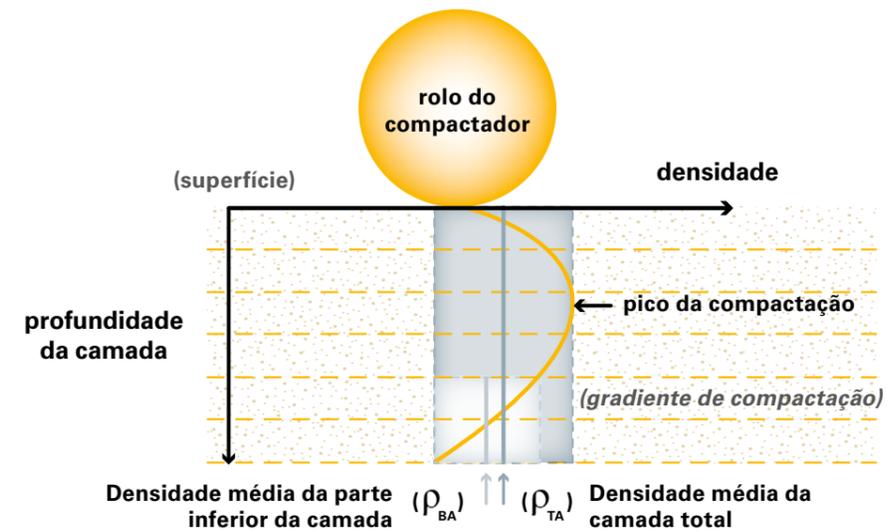
necessárias no campo serão de 95% do teste Proctor Padrão para aterros e até 100% do teste Proctor Modificado para estruturas rodoviárias. Igualmente, o teor de umidade deve estar dentro de uma faixa do teor de umidade ideal determinado pelo laboratório.

DENSIDADES DESEJADAS

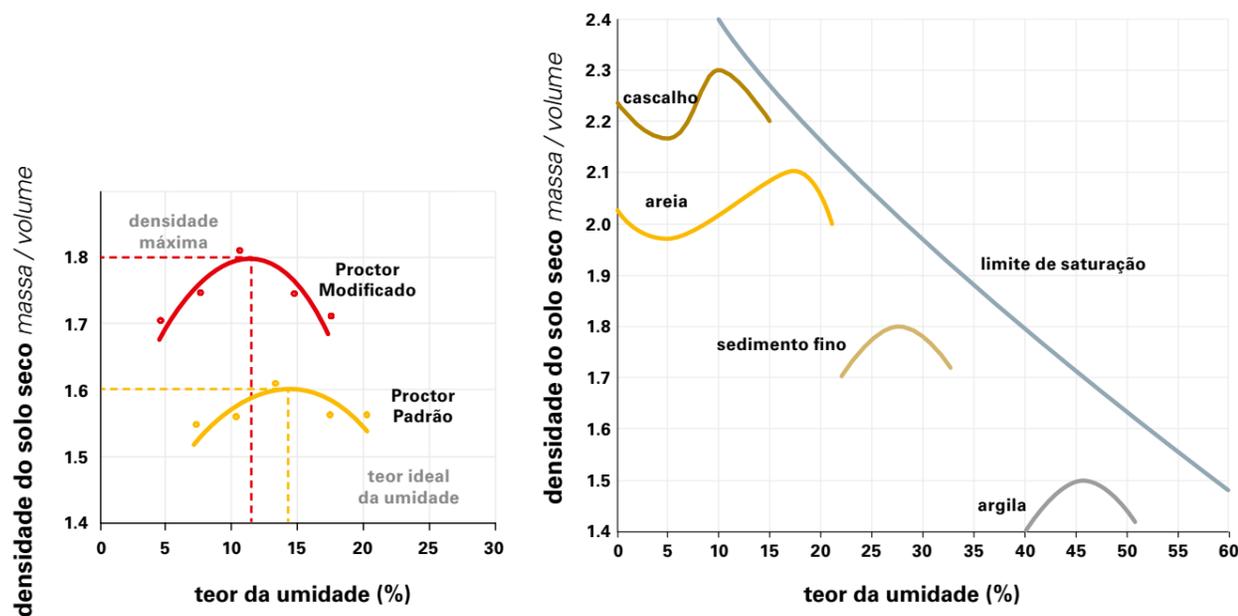
Este exemplo mostra como quanto mais próximo o material estiver da superfície, mais alta será sua densidade.



Esta ilustração do gradiente de compactação compara a densidade média da camada total (ρ_{TA}) com a densidade média apenas da porção inferior da camada (ρ_{BA}).



CURVAS PROCTOR



[PROPRIEDADES DO SOLO]

Os engenheiros tipicamente usam uma grande quantidade de termos quando definem as características e propriedades de vários solos. Conhecer esses termos é essencial para entender os princípios e as técnicas de compactação do solo.

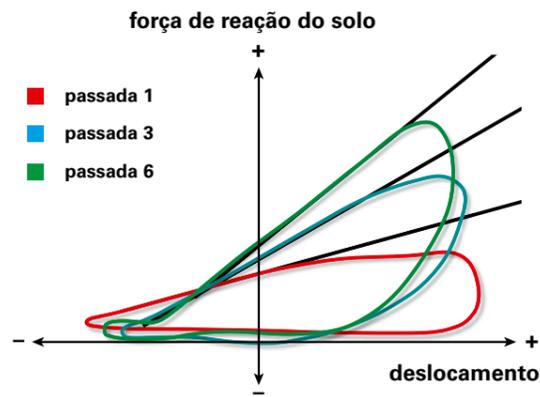
Resistência de Suporte à Carga é a propriedade crítica da estrutura de uma estrada. Em palavras simples, é a capacidade de uma estrutura em suportar a carga que será aplicada sobre ela. A avaliação da resistência de suporte da carga é normalmente obtida com uma prova de compactação com um caminhão basculante carregado e observando-se o efeito no solo, ou com testes por meio de placas de carga.



Na construção de estradas, outras propriedades como módulo, grau de dureza e densidade são tipicamente usadas para determinar uma meta de trabalho para a determinação da resistência de suporte da carga.

Dureza é a capacidade de certo formato de material em resistir à deflexão sob carga e é calculada como a relação da tensão dividida pelo deslocamento. Diferentemente do módulo elástico, ela não é uma qualidade do material do solo em si. A dureza é uma qualidade de certa quantidade, formato e composição de um material de solo – ela determina até que ponto esse formato de material flexiona sob a carga. Por esse motivo, a dureza passou a ser reconhecida como uma maneira válida para se estimar a resistência de suporte da carga de um solo.

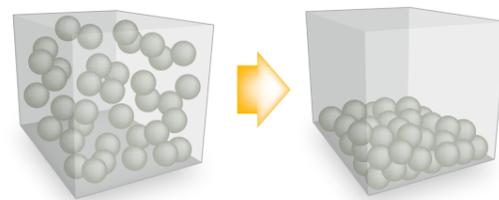
DUREZA



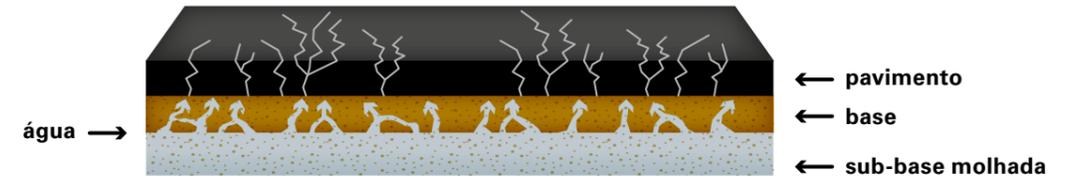
Quanto mais íngreme for a inclinação da curva, mais duro será o solo.

Densidade é um cálculo da massa de um material dividido pelo volume que ele ocupa. A densidade máxima é o volume mínimo que uma massa de um material em particular pode ocupar. Esse seria o estado sem vazios, somente uma massa completamente sólida. Os materiais de solo ficam mais densos quando são compactados a partir de um volume para um volume menor. A densidade tradicionalmente tem sido a propriedade padrão pela qual os engenheiros estimam a resistência de suporte da carga. No entanto, como a alta densidade não tem relação com a deflexão e pode fazer com que certos materiais fiquem quebradiços ou degradados, a proeminência da densidade na avaliação da resistência de suporte da carga foi reduzida. Independentemente disso, ela ainda é uma propriedade necessária e confiável para se usar em certas suposições sobre a capacidade de suporte da estrada.

DENSIDADE



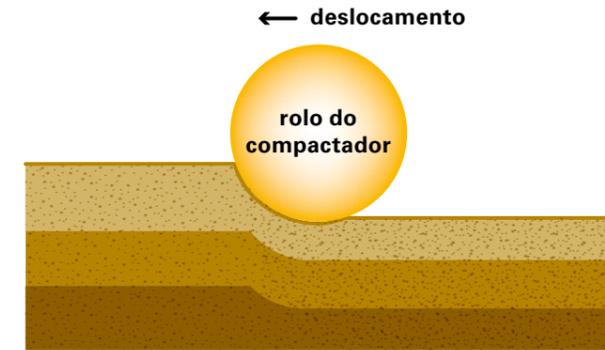
CAPILARIDADE



Capilaridade é a capacidade de um solo em forçar a água para cima ou lateralmente. Uma característica desejável para o material de base usado como uma camada entre a sub-base e o pavimento de uma rodovia é agir como uma barreira capilar evitando o movimento capilar para cima da água da sub-base. A base granular também permite que a água seja drenada para fora da sub-base. A água capilar é mantida em pequenos poros de vazios no solo. Ela é considerada água

livre, mas só pode ser removida baixando-se o nível do lençol freático, por uma carga pesada contínua ou pela evaporação. Sem uma barreira capilar na base, a água contida enfraqueceria e expandiria a sub-base, resultando em uma superfície inadequadamente suportada e na deterioração prematura da estrada.

COMPRESSIBILIDADE

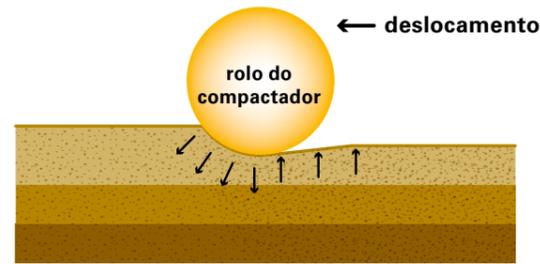


Compressibilidade é a taxa da redução em volume de um solo quando uma força é aplicada a ele. Os solos com alta compressibilidade têm partículas que são facilmente reorientadas para reduzir o espaço disponível para os vazios de ar ou água. Em condições de solo molhado, os solos de argila normalmente têm compressibilidade mais elevada do que os solos

granulares. Mas eles têm menos permeabilidade, o que faz com que a drenagem e a compressão dos solos argilosos sejam muito lentas. Quando cargas são aplicadas rapidamente, por exemplo, sob o efeito de cargas de rodas em movimento, aumenta a pressão da água em solos de granulação fina, resultando em maior compressibilidade.

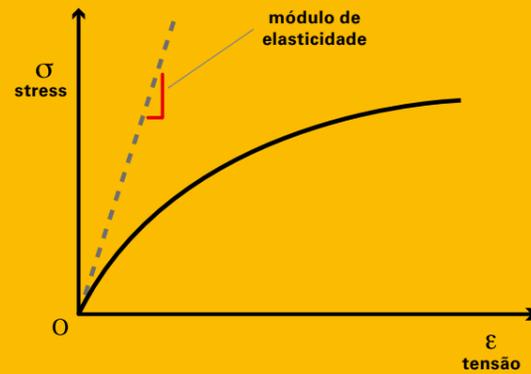
Elasticidade é a tendência de um solo em deformar e retornar à sua forma original, ou quase original, depois da remoção de uma carga compressiva. A elasticidade pode ser uma característica desejável para solos como, por exemplo, para suportar cargas flutuantes sem o acúmulo de deformação permanente. No entanto, estradas com bases ou sub-bases altamente elásticas podem apresentar um desempenho abaixo do desejável se o módulo de elasticidade for muito baixo, resultando em altas tensões dentro das camadas de pavimentação. A estabilização química e mecânica é frequentemente usada para controlar o comportamento elástico de solos e bases. Os solos orgânicos têm uma elasticidade muito alta, mas um baixo módulo de elasticidade.

ELASTICIDADE



Módulo de Elasticidade:

Este é um cálculo da taxa do stress aplicada associada à tensão de um material de solo. É considerada uma qualidade da amostra de solo em particular que está sendo testada, e pode variar de acordo com a composição mutável de um material de solo. O módulo é frequentemente usado para oferecer uma indicação da resistência de suporte da carga de um material de solo. A espessura da camada de pavimentação é tipicamente baseada em uma avaliação do módulo de elasticidade subjacente.



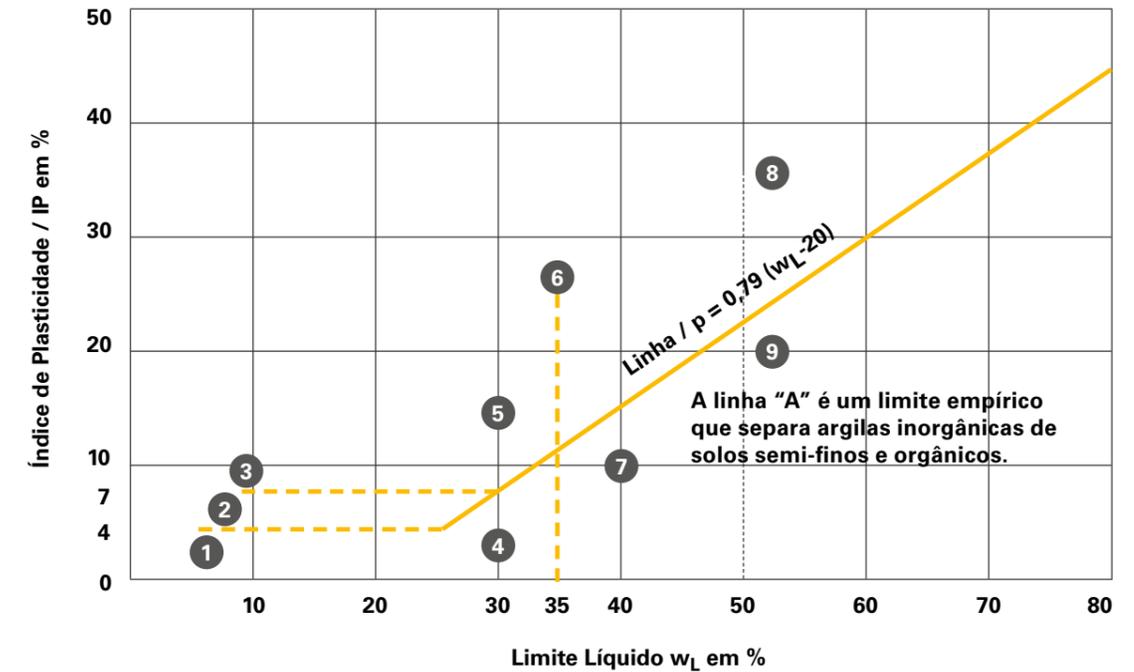
PERMEABILIDADE



Permeabilidade é a facilidade com que a água flui através de um solo. Não é o mesmo que capilaridade, que é a capacidade de um solo em absorver a água. A textura, a gradação e o grau de compactação do solo influenciam a permeabilidade do solo. Permeabilidade é o parâmetro mais variável do solo, com valores que variam mais de

10 ordens de magnitude. Normalmente, os solos com granulação densa são mais permeáveis que os solos de granulação fina porque os solos de gradação densa têm vazios maiores entre suas partículas.

PLASTICIDADE



- 1 misturas de areia – semi-fino
- 2 faixa intermediária
- 3 misturas de areia - argila
- 4 Semi-finos plásticos leves
- 5 argilas plásticas leves
- 6 argilas plásticas médias
- 7 semi-finos com misturas orgânicas e semi-finos organogênicos e semi-finos plásticos médios
- 8 argilas plásticas distintas
- 9 argilas com misturas orgânicas e semi-finos compressíveis distintos

Plasticidade refere-se ao grau de aderência e da natureza deformável de um solo. A medida de plasticidade é expressa como o Índice de Plasticidade (IP). Muitos solos argilosos têm um alto valor IP, são muito compressíveis e têm um

alto grau de aderência. Um solo com um IP zero não tem aderência ou não é plástico. O índice de umidade de um solo também afeta seu IP.

ASSENTAMENTO

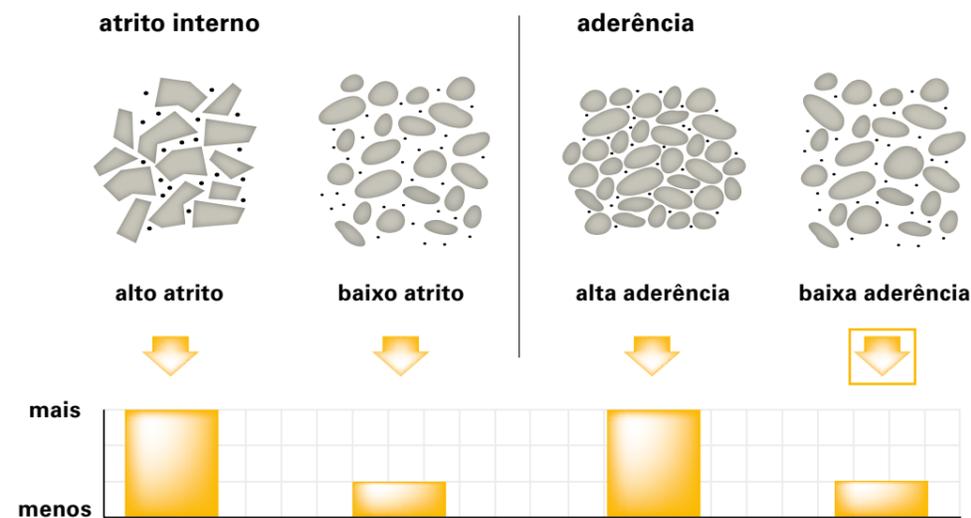


assentamento

Assentamento é o processo de reduzir a elevação da superfície devido à consolidação do material do aterro. O assentamento frequentemente é o resultado de uma compactação inadequada. As partículas do solo compactadas indevidamente,

com o tempo, acabam se reorientando naturalmente e reduzem o espaço disponível para o ar ou a água. O resultado é o assentamento, que está diretamente direcionado com a redução do volume de vazios.

A RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DEPENDE DE ...



A força de compactação necessária para superar a resistência ao cisalhamento

Resistência ao Cisalhamento é a resistência que as partículas do solo precisam para deslizar umas sobre as outras quando é aplicada uma força – por exemplo, força de vibração ou compactação. A resistência ao cisalhamento de um solo é o resultado do atrito interno (resistência ao deslizamento entre as

partículas) e da aderência (a atração entre umas e outras). As partículas de formatos irregulares têm maior resistência ao cisalhamento do que as partículas de formatos lisos. Quanto maior a resistência ao cisalhamento, maior será a força de compactação necessária para que seja obtida a densidade.

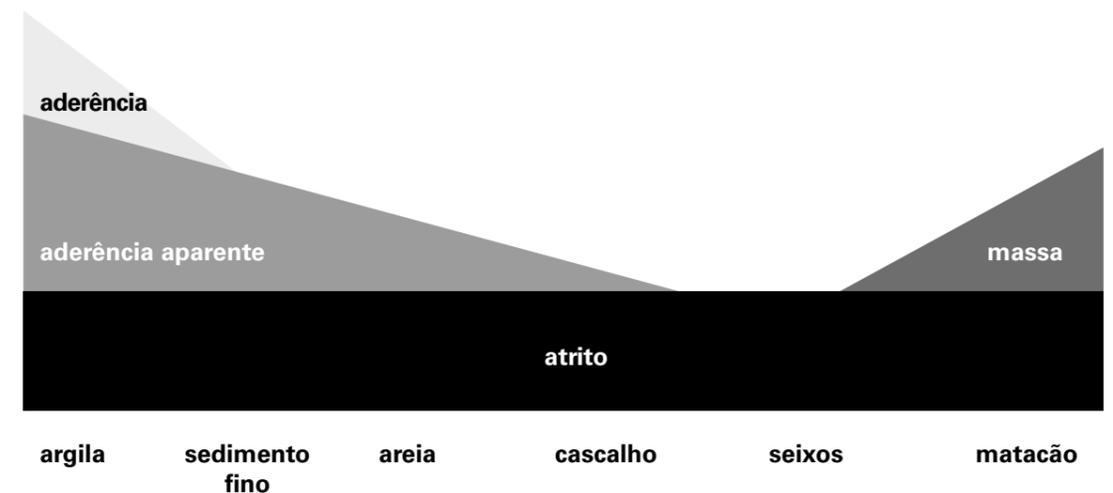
ENCOLHIMENTO



O **Encolhimento ou Inchaço Visível** é um indicio de que o solo tem granulação fina, como a argila, por exemplo. O ciclo de encolhimento e inchaço é resultado da liberação e formação de umidade

no solo. Esse tipo de solo oferece uma fundação inadequada porque as mudanças constantes no volume podem causar falha estrutural em edifícios e pavimentos que dependem de suporte estável.

COMPACTABILIDADE



Compactabilidade: Durante o processo da mudança de um solo desde um estado solto para um estado denso, a facilidade ou a taxa de compactação é frequentemente denominada compactabilidade. A compactabilidade pode ser quantificada como a relação da diferença entre a densidade final menos a densidade inicial dividida pela densidade inicial. Quanto mais alta for a taxa de compactabilidade, mais fácil ou mais rápida será a mudança da densidade para o

esforço aplicado de compactação. Fatores que afetam a compatibilidade incluem a gradação do solo (solos bem gradados tentem a ter compactabilidade mais alta do que os solos tipo gap-graded), teor de umidade, resistência ao cisalhamento (resistência à deformação), energia e método de compactação. Entender os fatores que contribuem para a maior compactabilidade assegura a seleção do equipamento apropriado e operações eficientes de compactação.

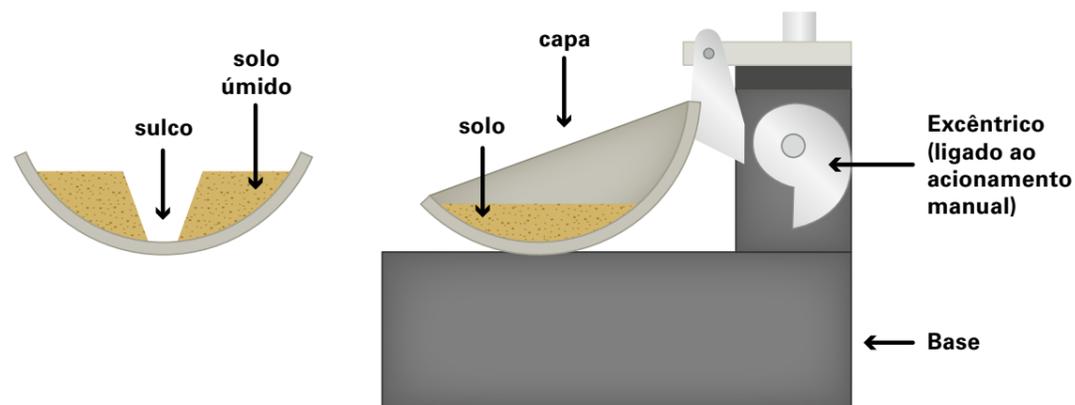
[LIMITES DO SOLO]

A extensão em que o teor de umidade afeta a compactabilidade de um solo aderente (argila) pode ser entendida com mais facilidade com o exame dos limites do solo.

Limite Líquido, Limite Plástico, Índice de Plasticidade e Limite de Encolhimento. Algumas vezes chamados de Limites de Atterberg, eles formam a base da diferenciação entre materiais altamente plásticos, levemente plásticos e não-plásticos.

Albert Atterberg, um químico suíço, foi a primeiro a desenvolver certos limites da consistência do solo.

TESTE DO LIMITE LÍQUIDO (LL)



dispositivo simples para teste do limite líquido

Limite Líquido (LL)

O teor de umidade em que um solo passa de um estado plástico para um estado líquido é o Limite Líquido. Isso significa que há umidade suficiente no solo para superar o atrito interno e a aderência.

Foi desenvolvido um teste simples para determinar o Limite Líquido de um solo. Pegue uma amostra úmida de um solo e coloque-a em uma pequena vasilha aplainando mais ou menos a amostra. Faça um profundo sulco na amostra e incline a vasilha 10-30 vezes, observando o sulco. Se as faces do sulco permanecerem com a mesma distância entre si, pegue a amostra, acrescente mais água e repita o processo. Quando as faces do sulco se aproximarem em um comprimento de 15 mm (1/2 pol.), a amostra ficará meio líquida e terá atingido seu Limite Líquido.

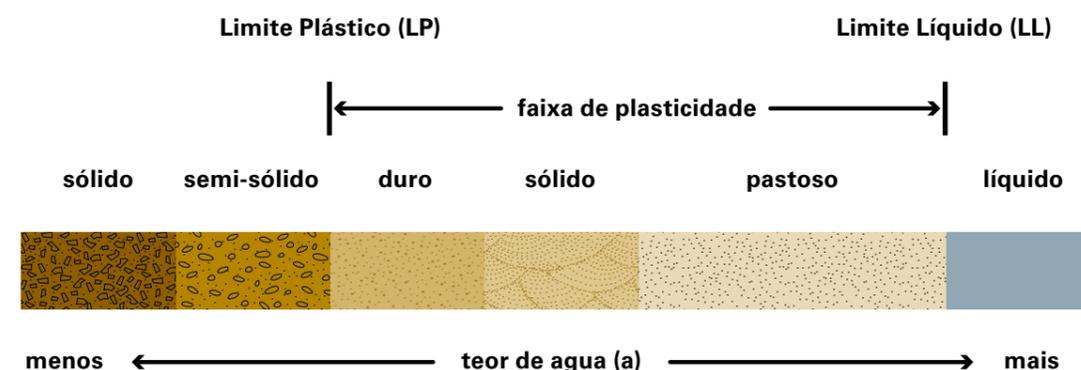
Altos valores de LL são associados com solos de alta compressibilidade. Tipicamente, os solos argilosos têm altos valores de LL; os solos arenosos têm baixos valores de LL.

Limite Plástico (LP)

Esta condição existe quando um solo muda de um estado semi-sólido para um estado plástico. Ela ocorre quando o solo contém umidade suficiente que uma pequena quantidade dele pode ser compactada em um filamento de aproximadamente 3 mm (1/8 pol.) de diâmetro sem romper.

O LP de um solo é importante porque representa o teor de umidade em que as partículas vão deslizar umas sobre as outras e ainda manter uma aderência apreciável. É o ponto onde ocorre a melhor compactação em solos com alto teor de argila. A resistência do solo diminui rapidamente à medida que o teor de umidade aumenta além do Limite Plástico.

ÍNDICE DE PLASTICIDADE (IP)



Índice de Plasticidade (IP)

Esta é a diferença numérica entre o Limite Plástico e o Limite Líquido de um solo. Os solos que apresentam altos valores de IP podem ser muito comprimidos e têm alta aderência. O solo tem pouca ou nenhuma aderência quando o teor de umidade está no Limite Líquido, mas tem aderência considerável quando o teor de umidade está no Limite Plástico. Portanto, o Índice de Plasticidade oferece um meio de calcular a compressibilidade e a aderência de um solo.

O IP também está relacionado com a permeabilidade. Quanto mais alto for o IP, mais baixa será a permeabilidade – e quanto mais baixo for o IP, mais alta será a permeabilidade. Em muitos trabalhos que envolvem construção com solos com alto índice de argila, as especificações exigem um material com certa gradação, um LL máximo e um IP máximo.

Limite de Encolhimento (LE)

Quando o solo é secado abaixo do Limite Plástico, ele encolhe e se torna quebradiço. Quando o volume do teor de umidade da amostra é interrompido, é determinado o Limite de Encolhimento. O LE é a melhor umidade em que se pode compactar muitos solos não-plásticos (arenosos). Os solos que contêm argila suficiente para elevar o IP são mais bem compactados entre o LE e o LP.

Unidade 2

TIPOS E CLASSIFICAÇÕES DE SOLOS

Onde for possível, os testes de solos em laboratório são a melhor opção para a classificação de solos. Quando isso não for possível, você pode realizar um ou mais testes de campo, que irão ajudá-lo a identificar os solos e determinar uma abordagem de compactação.



[SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS]

Existem vários sistemas diferentes para a classificação de solos em uso no mundo todo nos dias de hoje. Todos usam os termos cascalho, areia, sedimento fino e argila, mas com sistemas

ligeiramente diferentes de numeração e códigos de letras. O objetivo das classificações de solos é criar padrões pelos quais possam ser identificados os solos e suas características de engenharia.

Sistema AASHTO de Classificação de Solos –

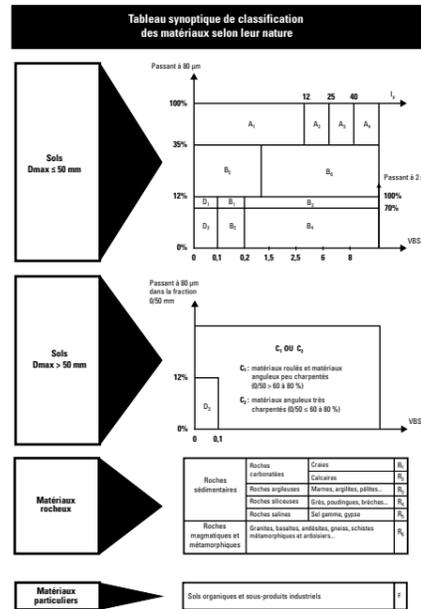
O sistema amplamente usado da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) para a classificação de solos é baseado no desempenho de solos no campo para a construção de rodovias. O sistema divide os materiais em sete grupos principais com alguns subgrupos. Os grupos são arranjados em duas grandes categorias: materiais granulares e materiais argilosos com sedimentos finos.

General Classification	Granular Materials (95% or less passing #200)							Silt-Clay Materials (more than 28% 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-7-6	A-7-5	
Sieve Analysis Percent Passing:													
# 10 #40 #200	0-50 0-30 0-15	0-50 0-25	51-100 0-10	0-35	0-35	0-35	0-35	36-100	36-100	36-100	36-100	36-100	
Characteristics of Fraction #40:													
Liquid Limit Plasticity Index	0-6	N.P.	0-40 0-10	41+ 0-10	41+ 11+	41+ 11+	41+ 11+	0-40 0-10	41+ 0-10	0-40 0-10	41+ 0-10	41+ 11+	
Group Index	0	0	0	0	0-4	0-8	0-12	0-16	0-20				
Used 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					

Consulte o Apêndice para informar-se sobre gráficos em tamanho grande.

Sistema Francês para a Classificação de Solos –

Este sistema classifica os materiais em classes e subclasses, com base na análise mecânica de atributos que incluem a distribuição do tamanho da granulação, a plasticidade e o equivalente de areia.



Sistema Alemão para a Classificação de Solos –

A norma DIN18196 classifica todos os materiais destinados à construção em grupos com base no tamanho das partículas, de acordo com a norma DIN4022, as proporções da massa, a plasticidade e a presença de componentes orgânicos e calcários. Geralmente, as partículas densas e as partículas finas são julgadas diferentemente porque as partículas densas têm um critério de distribuição do tamanho e as partículas finas têm um critério de plasticidade.

Gruppenname	Korngrößenbereich < 63 µm	Korngrößenbereich > 63 µm	Gruppe (allgemein)	Gruppe (detailliert)	Kennzeichnung
Grobkörniger Boden	< 5	> 40	Kies	Ungetrennte Kies	04
				Weggetrennte Kies-Sand-Gemische	04W
				Trennwertfreie getrennte Kies-Sand-Gemische	04T
				Sand	04S
Feinkörniger Boden	5 bis 40	< 40	Kies-Ton	5 bis 15 Gew.-% < 63 µm	05
				15 bis 30 Gew.-% < 63 µm	05T
				30 bis 40 Gew.-% < 63 µm	05T*
				Sand-Schluff	05S
				15 bis 40 Gew.-% < 63 µm	05T*
				Sand-Ton	05T*
Feinkörniger Boden	< 40	-	Schluff	Leichtplastische Schluffe W_L	06
				Mittelpplastische Schluffe W_M	06M
				Leichtplastische Tone W_L	07
				Ton	07M
				Mittelpplastische Tone W_M	07M
				Amorphplastische Tone W_A	07A
Organischer Boden	< 40	-	-	Organische Schluffe W_O	08
				Organische Tone W_O	08T
Organischer Boden	-	-	-	Nicht bei niedrig verweirter Torfe	09
				Carbonate Torfe	09C
Aufkühlung*	-	-	-	Mühsen (Pflanzhorizont)	1
				Auffüllung von Fremdstoffen	A

* Eine Aufkühlung ist eine unter menschlicher Einwirkung entstandene Schichtung aus natürlichen Böden oder Fremdstoffen.

Sistema Unificado para a Classificação de Solos –

O Unified Soil Classification System, ou USCS, é um método amplamente usado para a classificação de solos em projetos de construção. Este sistema foi desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers e pelo U.S. Bureau of Reclamation. Ele usa a textura como o termo descritivo.

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 (4.75 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	Liquid Limit Symbols High LL: H Low LL: L
	Poorly-graded	

Sistema do Reino Unido para a Classificação de Solos –

O sistema British Standard (BS) de classificação é um protocolo para identificar a composição do solo. O solo é primeiramente classificado em denso ou fino com base no tamanho das partículas. Os solos granulares são classificados com base nas distribuições dos tamanhos de suas partículas. Os solos finos são sub-agrupados com base em suas plasticidades.

SOIL GROUPS	SUB-GROUPS and in-laboratory identification				
	GROUP SYMBOLS	SUB-GROUP SYMBOLS	FINES % < 63 µm	LIQUID LIMIT	
COARSE GRADES More than 75% of the material is finer than 4.75 mm	GRAVEL More than 85% of the material is finer than 2.0 mm	Slightly silty or clayey GRAVEL	G	SP, CP, GP	0 to 5
		Silty GRAVEL	G	SM, GM, SP, GP	
		Clayey GRAVEL	G	GC, SC, SP, GP	5 to 15
		Very silty GRAVEL	GM	SM, etc.	15 to 25
		Very clayey GRAVEL	GC	GC, etc.	
			GP	GP, etc.	
	SAND More than 85% of the material is finer than 0.075 mm	Slightly silty or clayey SAND	S	SP, SM, GP, GM	0 to 5
		Silty SAND	S	SM, GM, SP, GP, GM, GP	15 to 25
		Clayey SAND	S	SC, GC, SP, GP	
		Very silty SAND	SM	SM, etc.	15 to 25
		Very clayey SAND	SC	SC, etc.	
			SP	SP, etc.	
FINE GRADES More than 75% of the material is finer than 0.075 mm	SILT More than 75% of the material is finer than 0.075 mm	Gravelly SILT	MG	ML, etc.	
		Gravelly CLAY	MG	CL, etc.	< 25
			CG	CL, etc.	25 to 50
			CM	CL, etc.	50 to 75
			CH	CL, etc.	75 to 90
			CC	CL, etc.	> 90
	CLAY More than 75% of the material is finer than 0.075 mm	Lean SILT	ML	ML, etc.	
		Clayey SILT	ML	ML, etc.	
		Lean CLAY	CL	CL, etc.	< 25
		Clayey CLAY	CL	CL, etc.	25 to 50
			CH	CH, etc.	50 to 75
			CC	CC, etc.	> 75
ORGANIC SOILS	Description letter 'O' suffixed to any group or sub-group symbol		Organic matter in significant amount (e.g. MHO) - organic silt or high LL		

PI - consists predominantly of plant remains (fibrous or amorphous)
Classification v1.00 Sept 2010

[CLASSIFICAÇÕES DOS SOLOS NO CAMPO]

Os sistemas de classificação exigem medições em laboratório como, por exemplo, a análise da peneira ou o teste do Índice de Plasticidade. No entanto, alguns testes simples no campo podem ser usados

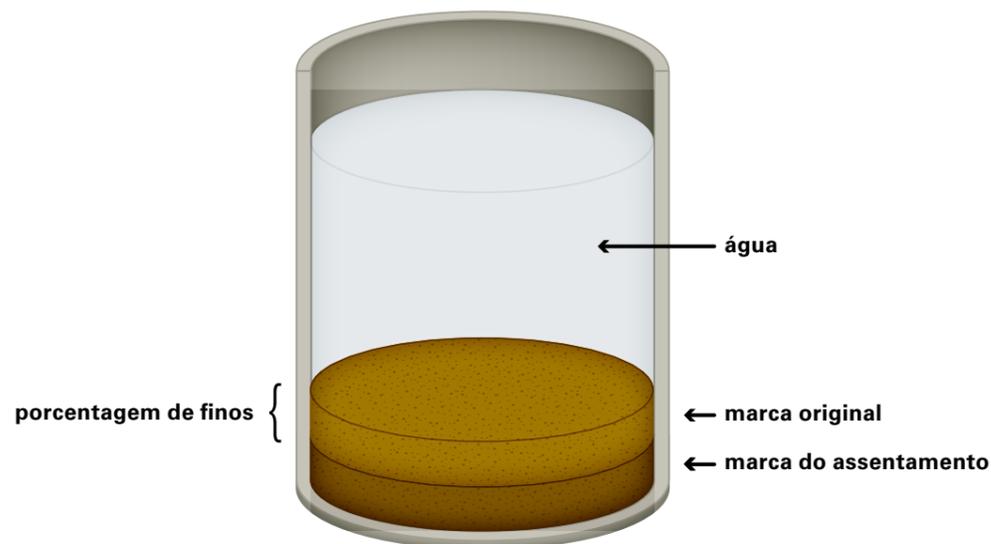
para classificar vários solos, quando não houver a disponibilidade de instalações completas de laboratório. Os testes são usados para determinar gradação, plasticidade e dispersão.

Gradação/Distribuição das Partículas – Para testar a gradação do solo seco, espalhe uma amostra do solo em uma superfície plana. Use um pedaço de papel rígido ou papelão como um ancinho para separar as partículas maiores do solo em um lado. Estime a porcentagem das partículas maiores que 5 mm (3/16 pol.) e a porcentagem dos finos (muito pequenos para que os grãos individuais sejam vistos a olho nu). Além disso, estime se as partículas maiores têm tamanho uniforme (com má gradação) ou se têm tamanhos grandes, médios e pequenos (com boa gradação).

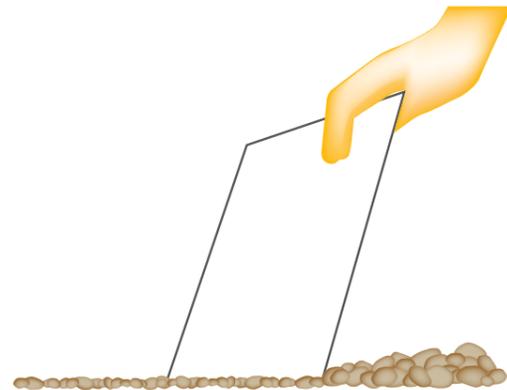
Se o solo estiver molhado, separe um monte com um lápis e faça estimativas de porcentagem no método do solo seco. Para encontrar a porcentagem de finos, encha um recipiente de vidro transparente com 3 mm (1/8 pol.) de água. Então, acrescente solo suficiente para encher o recipiente até 1/4 de sua capacidade. Acrescente água até o solo ficar coberto.

Marque esse nível com um elástico. Encha o recipiente até 3/4 de sua capacidade com água e mexa a mistura vigorosamente. Deixe que a mistura assente por cerca de um minuto e meio e marque a altura do solo que ficou assentado. A diferença entre as duas marcas representa a porcentagem de finos.

PORCENTAGEM DE FINOS

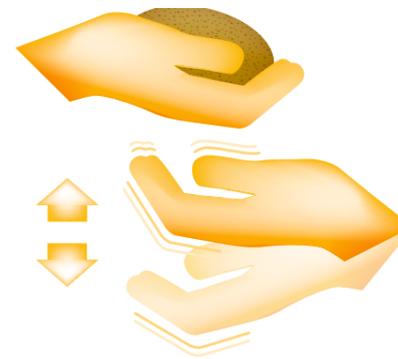


TESTE DE GRADAÇÃO



Plasticidade de Solos com Granulação Fina – Você pode efetuar um ou mais testes no campo para estimar a plasticidade de um solo.

TESTE DA AGITAÇÃO

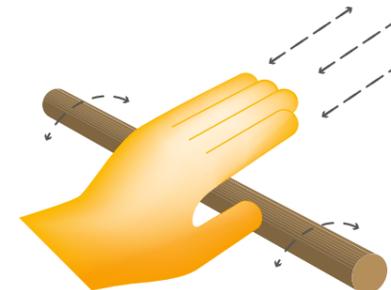


- **Teste da Agitação** – Pegue um monte do solo de granulação fina e amasse-o, fazendo isso com o máximo possível de partículas de granulação grande. Acrescente água gradativamente e amasse o solo até ele começar a ficar pegajoso. Mantenha a bola de solo na palma de uma mão e bata levemente as costas da mão com os dedos da outra mão.

Se a bola ficar brilhante e molhada na superfície, significa que ela tem maioria de areia fina ou segmento fino. Os solos de argila têm pouca ou nenhuma reação a este teste e simplesmente ficam desordenados.

- **Teste da Dureza** – Pegue cerca de metade da bola de solo e amasse-a entre o polegar e o dedo indicador para secá-la. Então, tente enrolar a amostra em um rolo ou uma "minhoca". Se você não conseguir fazer um rolo de maneira nenhuma, o solo é definitivamente de sedimento fino ou de areia fina. Solos altamente plásticos demoram muito tempo para secar. Eles ficam duros e ceráceos, e é necessária uma pressão considerável para formar um rolo que vai se formar quando chegar a um diâmetro de 3 mm (1/8 pol.).

TESTE DA DUREZA



- **Teste de Resistência a Seco** – Pegue a outra metade da bola de solo e amasse-a para formar uma bola. Deixe-a de lado para secar ao ar. Quando o solo estiver seco, esmague-o e selecione um fragmento de formato irregular e com muitas pontas. Tente esmagar esse fragmento entre o polegar e o dedo indicador. O material de sedimento fino vai se transformar em pó com pouco esforço. A argila ficará como uma pedra e será quase impossível esmagá-la com os dedos.

- **Lavagem da Mão** – Depois de manusear sedimentos finos e areias, você vai ter uma sensação de poeira nos dedos. Basta esfregá-los que eles ficarão quase limpos. A água corrente de uma torneira, sem pressão, vai enxaguar o solo. Quando você manuseia argila, forma-se uma crosta nos dedos que não pode ser eliminada simplesmente esfregando-os depois que o solo argiloso seca. A água também não consegue enxaguá-los. As mãos devem ser esfregadas com água para o enxague.

TESTE DA MÃO



- **Teste da Mão** – Pegue um punhado de solo. Aperte-o e, em seguida, abra sua mão. Se o solo for pulverulento e não reter o formato feito por sua mão, ele é muito seco. Se ele quebrar totalmente quando cair, é demasiadamente seco. Se o solo for moldável e quebrar em apenas algumas peças quando cair, tem a quantidade correta de umidade para uma compactação adequada. Se o solo for plástico em sua mão, e deixar traços de umidade em seus dedos e permanecer em uma peça quando derrubado, significa que ele tem excesso de umidade para a compactação.

- **Teste da Dispersão** – Além dos testes de campo que acabaram de ser descritos, o Teste da Dispersão pode ser usado para determinar as porcentagens dos tamanhos da granulação do solo bem como uma indicação da dificuldade de compactar o solo. Tudo que é necessário é um recipiente de vidro transparente e uma amostra representativa de solo.

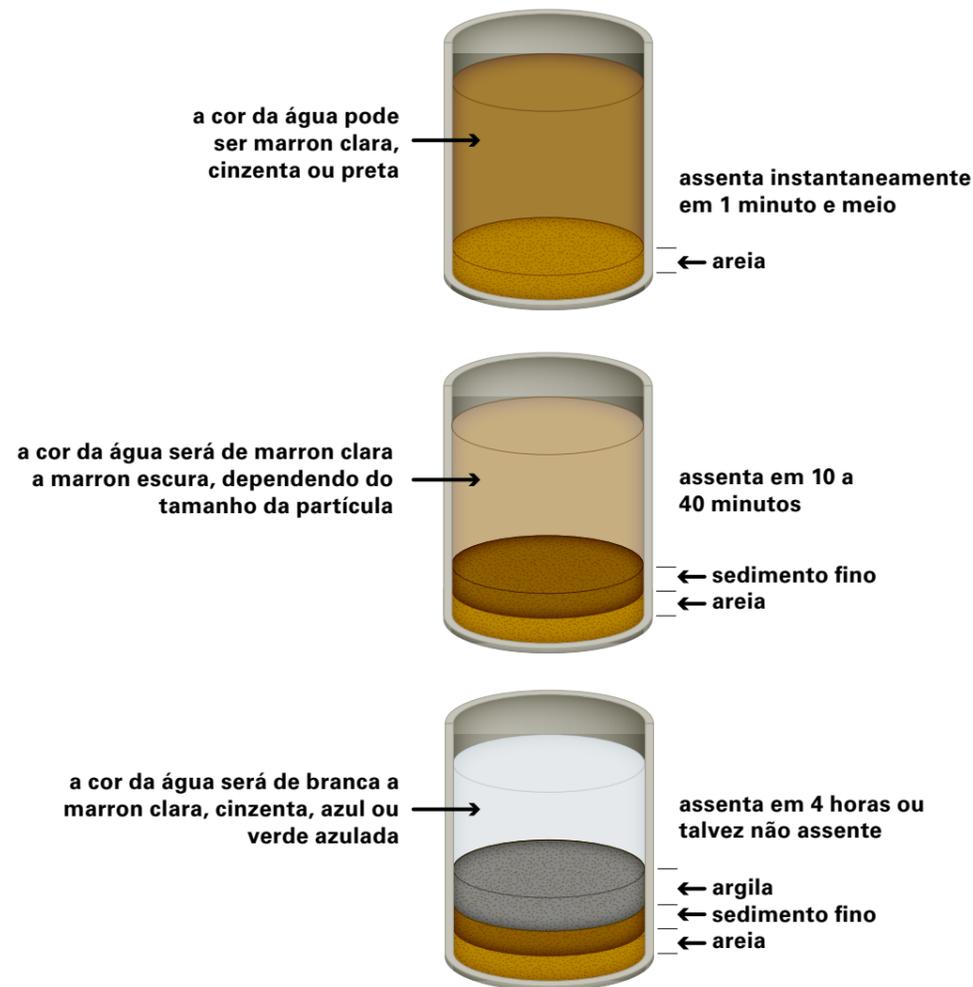
Encha o recipiente até 1/4 - 1/3 do total com o material. Em seguida, encha o recipiente com água até 15 mm (1/2 pol.) do topo. Mexa bem a mistura e observe como o material é assentado.

O material vai assentar em três camadas distintas. A areia no fundo, o sedimento fino em seguida e, finalmente, a argila. Além de mostrar os vários grupos, os resultados vão mostrar se o solo tem boa ou má gradação.

Embora as partículas de sedimento fino e argila sejam muito pequenas e não possam ser vistas a olho nu, as mudanças na gradação podem ser observadas pelas diferenças na coloração. Além disso, quanto mais tempo for necessário para que uma camada seja sedimentada, menores serão as partículas.

Há diversas coisas que podem ser aprendidas a partir do teste de dispersão. Ele vai mostrar os materiais básicos e a gradação de cada um, e o tempo de assentamento vai indicar o tamanho das partículas finas. Na maioria dos casos, um único tamanho de partículas (má gradação) e um tamanho pequeno de partículas vai indicar um material de construção menos estável do que uma mistura onde exista uma boa gradação de todos os tamanhos de partículas. Esses materiais são difíceis de compactar porque os grãos continuam a mudar sob a máquina.

TESTE DE DISPERSÃO



[**SUMÁRIO DOS TESTES DE CAMPO**]

Tipos de Solos	Descrição
Argilas	Não há reação ao teste de agitação; um rolo duro que seca lentamente; um resíduo seco e de forma encrostada que é difícil de remover das mãos.
Sedimentos finos	Rápida reação ao teste de agitação; um rolo fraco ou de forma encrostada; resíduo pulverulento que sai facilmente, bastando esfregar ou lavar as mãos.
Misturas de sedimentos finos e argila	Reações intermediárias ou conflitantes aos testes das mãos.
Areia ou cascalho com argilas finas	Argila suficiente no solo quando uma amostra molhada é apertada com a mão, mas não suficiente para permitir a formação de uma bola de argila.
Areia ou cascalho com sedimentos finos	Qualquer mistura com sedimentos finos pulverulentos ou arenosos.
Areias limpas e cascalhos	A água adicionada a esses solos afunda imediatamente sem fazer qualquer lama.
Rocha explodida ou escarificada	Material denteado que não tem material menor em quantidade suficiente para preencher os vazios.



Unidade 3 A FÍSICA DA COMPACTAÇÃO

Entender a física da compactação de diferentes tipos de solo e o efeito de diferentes máquinas e suas capacidades de compactação é a chave para alcançar a densidade especificada do solo na maneira mais econômica.



[FATORES QUE INFLUENCIAM A COMPACTAÇÃO VIBRATÓRIA]

A compactação vibratória do solo é um processo complexo. Muitos fatores diferentes influenciam o esforço geral da compactação. Todos esses fatores que influem na compactação devem ser considerados no total, e não de forma independente. São as características combinadas do compactador e do solo sobre o qual ele está agindo que determinam o grau do esforço de compactação. E as especificações do projeto determinam se o esforço de compactação é

adequado. Os fatores ou as características que influenciam a compactação vibratória podem ser divididos em três categorias:

1. Características relacionadas com o material e com o canteiro de obras
2. Características relacionadas com as especificações do projeto
3. Características relacionadas com a máquina

Características Relacionadas com o Material e com o Canteiro de Obras

- **Tipo de Solo** – Um determinado tipo de solo tem características exclusivas de compactação; os solos que são mais difíceis de compactar exigem compactadores mais pesados.
- **Granulometria** – A gradação de um material é a extensão dos tamanhos de partículas existentes. Idealmente, existem quantidades relativamente iguais de todos os tamanhos de grãos sem a presença de qualquer tamanho predominante.
- **Uniformidade** – Um material de solo é uma mistura de muitos tipos de solos e tamanhos de partículas. A uniformidade pode ser pensada como o grau em que todos os materiais compostos são bem misturados e dispersados por igual por todo o solo. Uma mistura uniforme de solo é homogênea e pode ser compactada consistentemente; um solo que não tenha uniformidade vai exibir uma compactação inconsistente.

O Coeficiente de Uniformidade (C_u) na mecânica do solo é um parâmetro para descrever a distribuição dos tamanhos das partículas (curva de gradação) de um solo. Ele oferece informações sobre a uniformidade da distribuição dos tamanhos dos grãos de um solo.

CÁLCULO DO COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE

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

O valor de C_u permite as seguintes afirmações a respeito do solo:

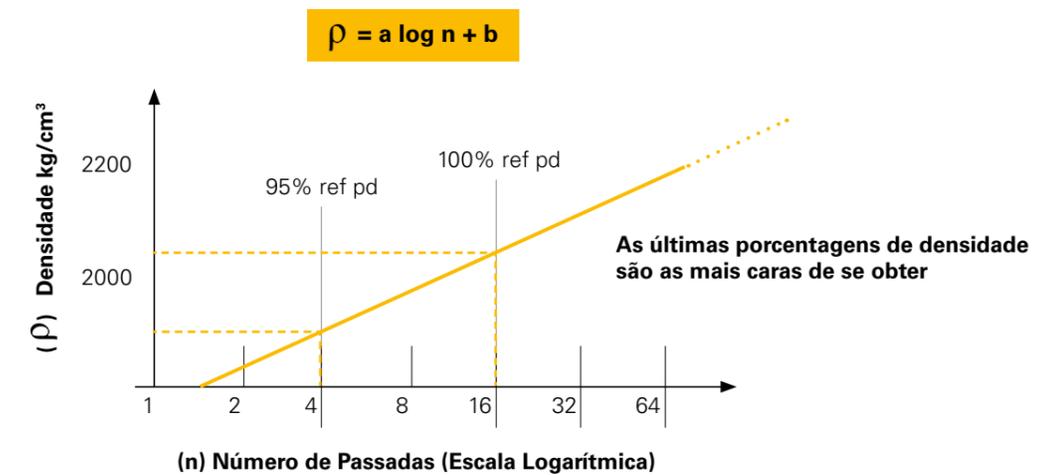
- $C_u < 5$ = solo uniforme
- C_u 5-15 = solo não uniforme
- $C_u > 15$ = solo extremamente não uniforme

Na norma DIN EN ISO 14688-2:2004, (C_u) é definido como a relação do diâmetro (C_u) durante o peneiramento de 60% do diâmetro (C_u) em uma passagem de 10%. A relação representa o declive da faixa da curva do tamanho dos grãos entre 10% e 60% de passadas (através da peneira).

- **Textura** – Os tipos individuais de solos possuem diferentes texturas na superfície, o que exerce um efeito nas características de compactação do material. Os tipos de solos com textura densa criam um alto nível de atrito entre as partículas, exigindo mais energia do compactador para quebrar seus vínculos, permitindo assim que eles se reposicionem em um estado mais denso. As partículas com textura lisa deslizam mais facilmente umas sobre as outras, exigindo menos esforço para compactar.
- **Formato dos Grãos** – Assim como a textura, o formato das partículas também pode afetar a compactação de um solo. Formatos chanfrados tendem a ter maior índice de atrito e exigem maior esforço para compactar. Os formatos lisos e arredondados deslizam mais facilmente, com menos esforço de compactação.
- **Densidade Inicial** – Materiais com densidade inicial mais alta exigem menos força de compactação do que aqueles com densidade mais baixa. Isso vai afetar a produtividade, porque o material menos denso pode exigir mais passadas.
- **Teor de Umidade** – A umidade é o fator isolado mais importante a ser considerado quando se compacta o solo. Muito pouca umidade e partículas muito pequenas não aderem entre si. Umidade demais faz com que as partículas se desloquem facilmente. Cada tipo de solo tem um teor de umidade que é ideal para uma perfeita compactação (definido pelo Teste Proctor).
- **Características de Resistência dos Agregados** – Cada tipo de solo tem uma resistência diferente à compressão, com base na forma com que os agregados foram formados.
- **Base do Subsolo e Sua Capacidade de Suportar Cargas** – Uma estrutura é tão forte e elástica quanto a fundação que a suporta. Se o subsolo não tiver a capacidade de suportar uma estrada, é provável que a compactação das camadas da sub-base e da base seja difícil. Solos inadequados podem ser melhorados pela estabilização química ou mecânica.

O CUSTO DA DENSIDADE

Com um maior número de passadas, a densidade aumenta

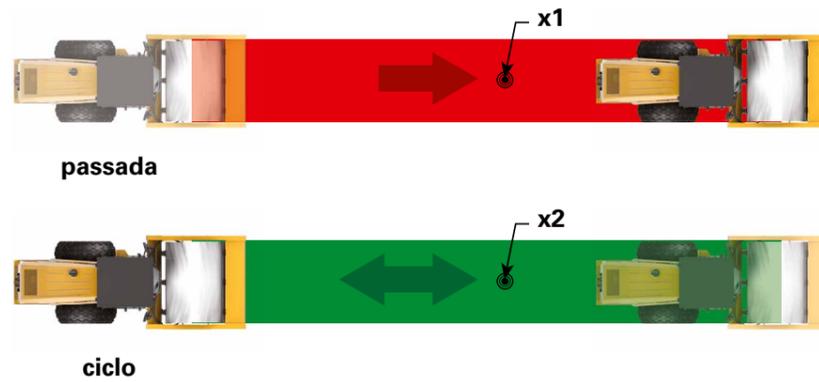


Características Relacionadas com a Especificação do Projeto

- **Meta da Compactação** – Tipicamente, essa meta é estabelecida pela administração do teste Proctor Padrão ou Proctor Modificado, e é especificada como uma determinada porcentagem da densidade do peso a seco máximo resultante desse teste – no exemplo, 95% do Proctor Padrão. Geralmente, quanto mais elevada for a meta da compactação, será necessário um número maior de passadas. É sempre muito difícil alcançar os pontos da porcentagem final da compactação.
- **Espessura da Camada** – Quando se usa um compactador de um determinado tamanho, a espessura da camada influencia a produtividade. Uma camada espessa vai exigir mais passadas do que uma camada fina.



CONTAGEM DAS PASSADAS



- **Número de Passadas** – Refere-se ao número de vezes que um compactador vai passar sobre uma área do solo. A Caterpillar define uma passada como um deslocamento único sobre uma área tanto na direção para frente quanto para trás, e um ciclo como duas passadas consecutivas sobre uma área, tipicamente uma na direção para frente e uma para trás.

Deve-se saber que a contagem das passadas pode ser importante, particularmente quando uma área é identificada por não atender às especificações de compactação. Se um canteiro de obras receber a mesma cobertura

(número de passadas), e se uma área for considerada inadequada, mas se o resto for aprovado, isso irá ajudá-lo a reduzir o número de causas.

Em casos onde é usada uma especificação do método, o número de passadas será determinado (com um compactador de tamanho apropriadamente dimensionado em uma camada de composição e espessura especificadas). Nesses casos, os engenheiros já determinaram, com base em experiência anterior, que esse número de passadas será suficiente para alcançar a meta de compactação.

Características Relacionadas com a Máquina

O projeto da máquina é importante para a dinâmica da compactação. Os fatores influentes incluem: tamanho do chassi, peso total, distância entre eixos, relação da distribuição do peso da máquina entre o rolo dianteiro e os pneus traseiros e o equilíbrio da máquina entre o lado esquerdo e o lado direito. A lista continua com fatores como diâmetro do rolo, comprimento do rolo, massa do rolo, isoladores de choques, massa do peso do excêntrico e a distância entre o centro de gravidade do peso excêntrico e o eixo do rolo. Até mesmo o peso do combustível e o peso do operador influenciam no desempenho do compactador. O fabricante considera cuidadosamente todos esses fatores quando projeta cada máquina.

A compactação vibratória envolve um rolo (peso estático) que se movimenta para cima e para baixo (amplitude) muito rapidamente (frequência) e se movimenta para frente (velocidade de trabalho) sobre material não homogêneo.



Naturalmente, a frequência, a amplitude e a velocidade de trabalho são variáveis controladas pelo operador. Esses fatores serão discutidos mais à frente nesta Unidade 3.

Todas essas variáveis significam que nem sempre é fácil adequar-se um compactador em um determinado trabalho para se alcançar os resultados ideais de compactação. O objetivo na compactação vibratória é encontrar um ponto de força máxima transmitida para o material a ser compactado.

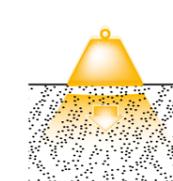
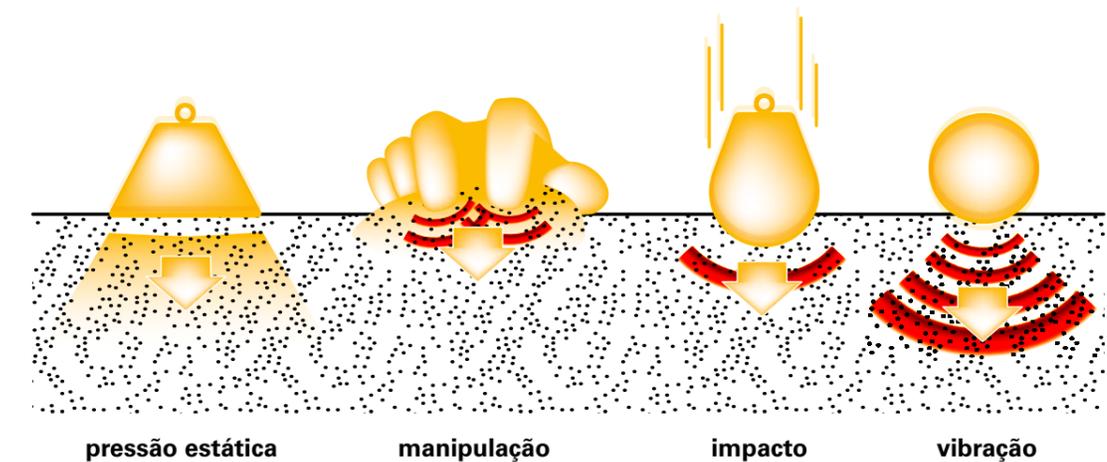
Isso ocorre quando a soma de todos os fatores – características do material, características do compactador, amplitude, frequência e velocidade – contribui idealmente para o esforço de compactação necessário para que sejam alcançadas as especificações do projeto.

[FATORES QUE INFLUENCIAM A COMPACTAÇÃO VIBRATÓRIA]

Compactação é o processo de compressão de um material a partir de um determinado volume em um volume menor. Isso é obtido quando se exerce força e movimento sobre uma área de contato, fazendo com que as partículas dentro do material libertem-se de seus vínculos naturais e fiquem mais perto entre si. Os vazios entre as partículas – ar, água ou uma combinação desses

dois fatores – são eliminados pela combinação de força e movimento. Quatro forças são usadas na compactação:

1. **Pressão estática**
2. **Manipulação**
3. **Impacto**
4. **Vibração.**



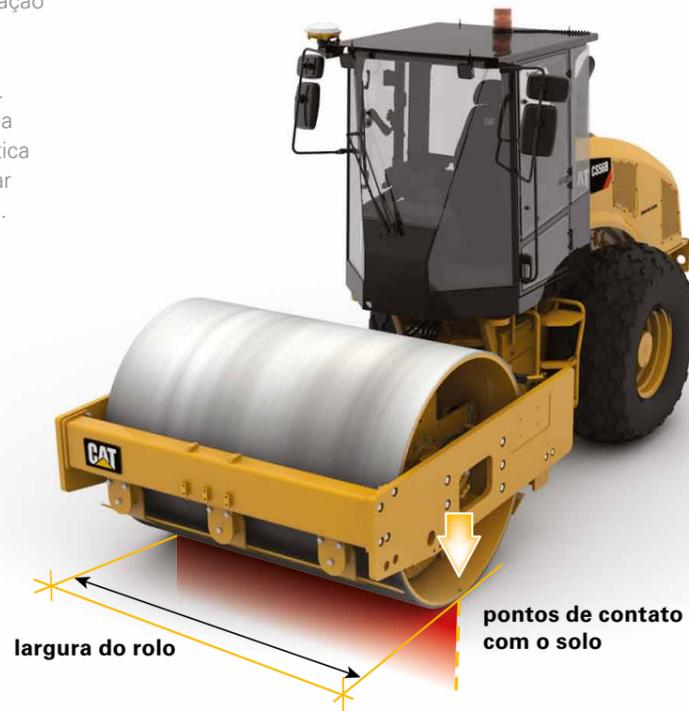
Pressão Estática – Na compactação estática, a pressão do peso do compactador produz pressões de cisalhamento no solo, que fazem com que as partículas individuais deslizem umas sobre as outras.

A compactação ocorre quando a força aplicada faz com que as partículas individuais interrompam

seus vínculos naturais entre si e sejam reorientadas para uma posição mais estável. Essa força de compactação tem um maior efeito em materiais na superfície e em pouca profundidade. Ela tem um efeito mínimo em solos mais profundos.

A carga linear estática é a medida usada pela indústria para comparar o potencial de compactação dos compactadores com rolos estáticos e lisos. É a força vertical diretamente abaixo da largura do rolo que cria as tensões para a compactação. Ela é calculada dividindo-se o peso do rolo (carga do eixo) pela largura do rolo. A carga linear estática é expressa em quilogramas por centímetro linear (kg/cm) ou em libras por polegada linear (lb/pol.). Compactadores com uma carga linear mais alta têm maior potencial de compactação e maior profundidade de influência.

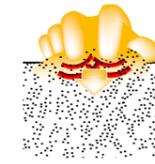
CARGA LINEAR ESTÁTICA



Carga Linear Estática	
Compactadores Vibratórios de Solo	
5 - 8 Ton	16 - 22 kg/cm (90 - 120 lb/pol.)
8 - 12 Ton	20 - 30 kg/cm (100 - 200 lb/pol.)
12 - 15 Ton	30 - 45 kg/cm (180 - 250 lb/pol.)
>15 Ton	45 kg/cm+ (250 lb/pol.+)
Compactadores de Rodas Pneumáticas	1000 - 3200 kg/roda (2200 - 7000 lb/roda)

Para compactadores de rolo estáticos, compactadores tipo Tamping, e compactadores do tipo pé de carneiro, a quantidade de pressão na ponta da face da pata exercida constantemente varia conforme a quantidade do número e a área superficial das pontas que entram em contato com o solo. A profundidade de penetração também pode afetar o cálculo. A pressão das faces da pata é expressa em quilos por centímetro quadrado (libras por polegada quadrada).

A compactação estática é usada em aplicações onde é necessário um toque suave, ou devido a construções nas proximidades, ou materiais que são frágeis ou onde as superfícies têm baixa resistência de suporte de carga. É usada também em situações onde uma força muito grande de compactação poderia forçar a subida de água para a superfície.



Manipulação – Manipulação é uma forma de compactação que rearranja as partículas em uma massa mais densa por meio de um processo de esmagamento ou amassamento. O processo é especialmente efetivo na superfície da camada do material. A ação de amassamento longitudinal e transversal é essencial na compactação de solos demasiadamente estratificados como, por exemplo, solos argilosos. Compactadores com rolo pé de carneiro com rodas tamping e compactadores de rodas pneumáticas são modelos especificamente projetados para produzir esse tipo de força de compactação.

A força de manipulação gerada pelos compactadores de rodas pneumáticas é produto de dois fatores: a pressão de contato e a carga das rodas. O ajuste de qualquer um desses fatores muda o desempenho do compactador.



A compactação por manipulação é usada para se obter uma superfície bem vedada para ajudar o material a resistir aos efeitos da água e das condições climáticas.

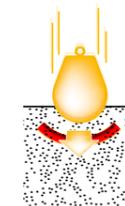
FÓRMULA DA PRESSÃO POR CONTATO

$$\text{PRESSÃO POR CONTATO} = \frac{\text{Carga da roda (kg)}}{\text{Área de contato dos pneus (cm}^2\text{)}}$$

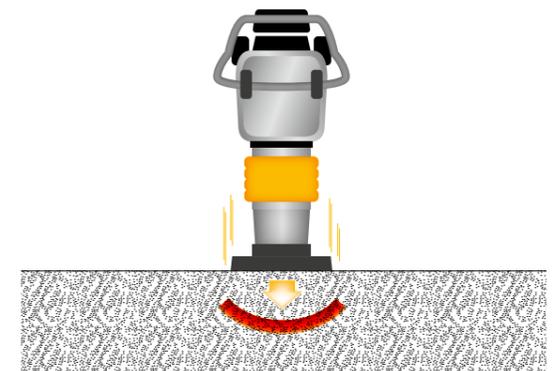
kg/cm² : bar

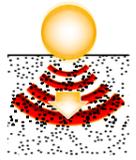
$$\text{CARGA DA RODA} = \frac{\text{Peso de operação do compactador}}{\text{Número de rodas}}$$

kg



Impacto – O impacto cria maior força de compactação do que a força gravitacional de uma carga estática. Isso é porque uma massa em movimento tem velocidade, que é convertida em energia no instante do impacto. O impacto cria uma onda de pressão que vai para o solo desde a superfície. Os impactos são normalmente uma série de golpes. Os impactos de 50-600 golpes por minuto são considerados como uma faixa de baixa frequência e são usados em martelotes de impacto e em socadores manuais. Impactos de 1400-3000 golpes por minuto são de alta frequência e são usados em compactadores vibratórios.





Vibração – A vibração é talvez a força de compactação mais complexa e mais econômica. Mais de 90% dos compactadores vendidos no mercado de hoje são vibratórios isso é porque os compactadores vibratórios podem produzir na mesma medida

de um compactador estático, que tem cerca de três vezes mais massa. A energia vibratória faz com que um compactador vibratório seja mais eficiente que um compactador estático com um dimensionamento similar.

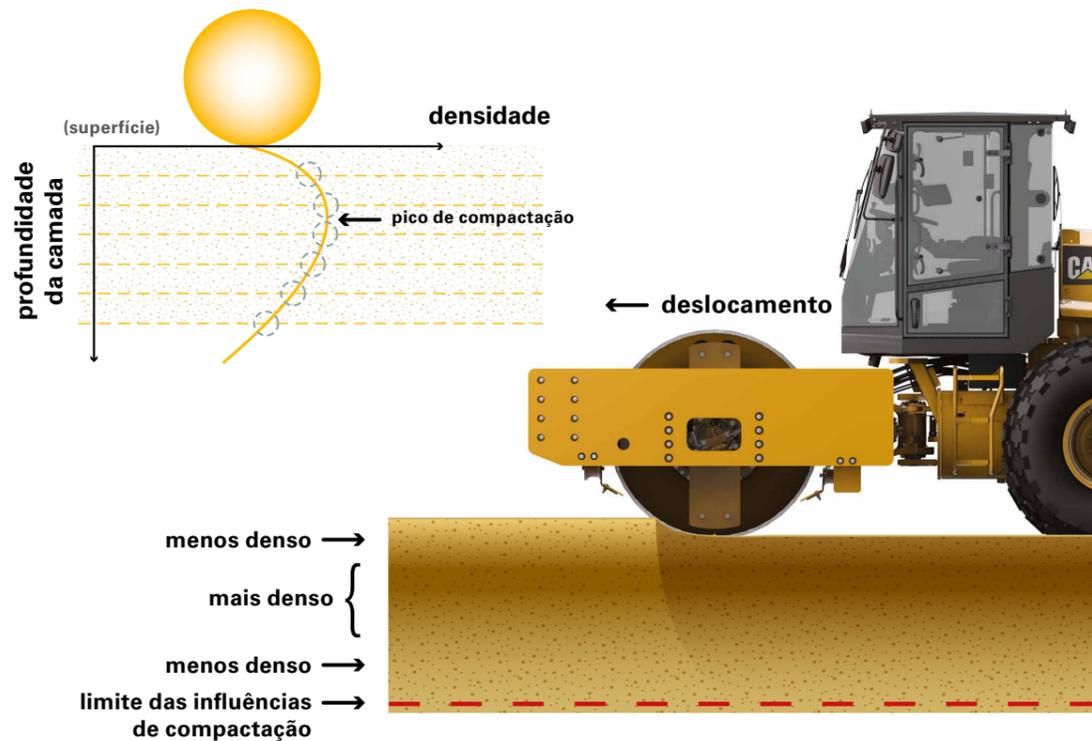
Os compactadores vibratórios produzem uma rápida sucessão de ondas de pressão que se espalham em todas as direções. As ondas de pressão vibratória superam a resistência ao cisalhamento entre as partículas do material que está sendo compactado. Quando é aplicada pressão, as partículas tendem a se reorientar em um estado mais denso (com menos vazios). Para entender como os compactadores vibratórios funcionam, é necessário entender a dinâmica de uma compactação vibratória: amplitude e frequência,

bem como a carga linear estática e a relação entre a massa de vibração e a massa suspensa.

Quando um compactador trabalha, o volume de solo compactado não é compactado uniformemente de cima para baixo. Um compactador de uma determinada massa vai compactar o solo em certa profundidade, mas o grau de compactação do solo vai variar desde a superfície até a profundidade máxima da influência de compactação. Geralmente, o solo da superfície será menos compacto, os solos intermediários vão conter um pico da compactação, e os solos de profundidade máxima novamente ficarão menos compactos.

A mudança dos parâmetros de operação pode influenciar na profundidade das zonas de compactação e alterar a profundidade do pico da zona de compactação, mas não mudará o fato de que o solo vai variar na compactação de cima abaixo. Esse fenômeno é chamado de “gradiente de compactação”, e esses dados ajudam a descrever a conveniência de um determinado dimensionamento de compactador ou de um ajuste de operação para aplicações específicas de compactação.

GRADIENTE DE COMPACTAÇÃO



Parece lógico que quando se usa um compactador de rolos, o solo da superfície deva ser o mais denso – no entanto, o pico da densidade na verdade ocorre abaixo da superfície, e diminui à medida que a profundidade reduz a influência do compactador. Isso é chamado de Gradiente de Compactação.

[DINÂMICA DA COMPACTAÇÃO VIBRATÓRIA]

Amplitude – A amplitude é a medida da distância do movimento vertical a partir da posição de repouso até a posição máxima de um rolo vibratório. Os fabricantes promovem este valor nominal, que é medido em um rolo suspenso. No entanto, a amplitude real, de trabalho, é produto da amplitude nominal e do coeficiente de amplificação, que é uma relação da frequência transmitida com a frequência ressonante da máquina e o solo que está sendo compactado. Pode ser mais útil pensar na amplitude como a distância que o rolo percorre enquanto desloca e compacta o solo.

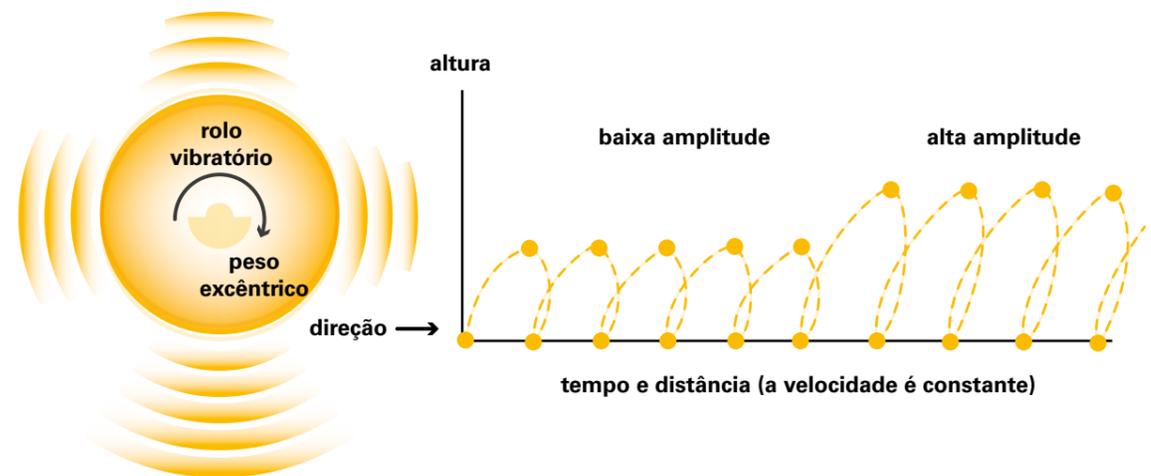
Pela modificação da amplitude, um operador pode variar a força e o movimento (aceleração) do rolo no material.

Quando o solo se aproxima da densidade máxima, chega um ponto onde o solo não pode absorver

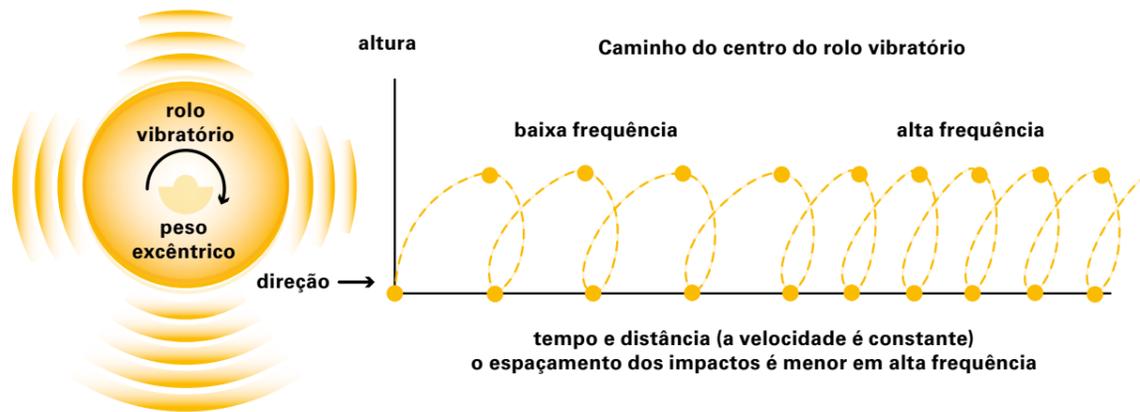
a energia de compactação que o compactador vibratório está transmitindo. Nesse ponto, o rolo pode começar a saltar na superfície e pode ocorrer um ciclo vibratório enquanto o rolo é suspenso no ar. Esse fenômeno é chamado de “de-coupling”, ou “salto duplo” e é acompanhado por uma vibração distinta e vigorosa que afeta toda a máquina. O salto duplo pode danificar a máquina e produzir resultados indesejáveis no solo que está sendo compactado, como, por exemplo, a descompactação.

Para interromper o salto duplo, o operador precisa diminuir a quantidade de energia que a máquina está transmitindo para o solo, bastando para isso simplesmente reduzir a amplitude, que diminuirá a quantidade de força de compactação aplicada ao solo. Alternativamente, o operador pode trabalhar no modo estático.

AMPLITUDE



FREQUÊNCIA



Frequência e Velocidade – Frequência é uma medida do número de ciclos completos ou revoluções dos pesos excêntricos ao redor do eixo de rotação durante um determinado tempo. A frequência é usualmente expressa em unidades de hertz (Hz) ou vibrações por minuto (vpm). Tipicamente, são usadas frequências entre 23-35 Hz (1380-2100 vpm), dependendo do material e do ajuste da amplitude.

A relação entre frequência e velocidade de trabalho é algumas vezes simplificada a uma norma prática que determina que a frequência e a velocidade de trabalho devem ser ajustadas para produzir

aproximadamente um impacto por 25-30 mm (1-1,2 pol.). Uma velocidade de trabalho que seja muito rápida pode causar o efeito “tanque de lavar roupa” (impactos com espaços muito grandes entre um e outro), e uma velocidade de trabalho que seja muito lenta impacta negativamente a produtividade da máquina. Existe uma velocidade ideal e uma frequência ideal para cada aplicação de compactação, mas elas podem não produzir um impacto por 25 mm (1 pol.). A manutenção de uma compactação uniforme é crítica, e utilizar as características de controle automático da velocidade pode ajudar a manter essa consistência.

Relação entre a Massa Vibratória e a Massa Suspensa – Podemos inferir que se um compactador vibratório de uma determinada massa e amplitude pode compactar um determinado solo com um determinado grau de eficiência, então simplesmente aplicando-se mais massa e mais amplitude tornaremos o compactador mais eficiente no mesmo solo. Isso não é necessariamente verdadeiro.

Em um compactador vibratório, a massa de vibração (rolo) é associada com a massa suspensa (a estrutura traseira), e a relação entre as duas é um fator crítico na determinação da massa e da amplitude que o compactador pode ter. A relação é cuidadosamente equilibrada para permitir que a máquina potencialize a energia que pode impactar o solo com segurança.



Ressonância que trabalha contra o esforço de compactação



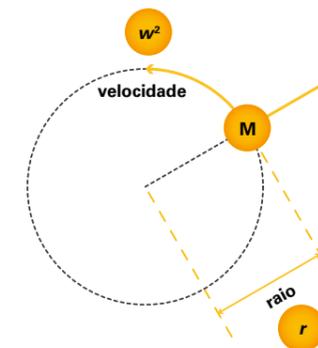
Ressonância que trabalha junto é convergência harmônica

Ressonância – Quando a frequência de vibrações impostas em um objeto é igual à frequência natural do objeto, o objeto vai vibrar em ressonância. Na compactação vibratória, a ressonância é muito importante.

A interação entre o material que está sendo compactado e a máquina vibratória faz com que o material e a máquina vibrem. Os pesos excêntricos que giram dentro do rolo mantêm essa vibração em uma frequência igual às rotações por minuto do eixo do peso excêntrico. Em algumas condições

da frequência determinada a máquina e o material vibram com ressonância. As condições que produzem ressonância dependem não apenas das características da máquina, mas também da natureza do material a ser compactado e do grau de compactação obtido. A frequência ideal para que seja obtida a transmissão mais eficiente da energia de compactação é cerca de 15% mais alta que a frequência ressonante.

FORÇA CENTRÍFUGA



força centrífuga = Mw^2r

Para calcular a força centrífuga, a massa (M) do peso excêntrico é multiplicada pelo raio (r) da rotação do eixo do peso excêntrico e pelo quadrado da velocidade de rotação (frequência) (w^2). O fator mais significativo na equação é a frequência.

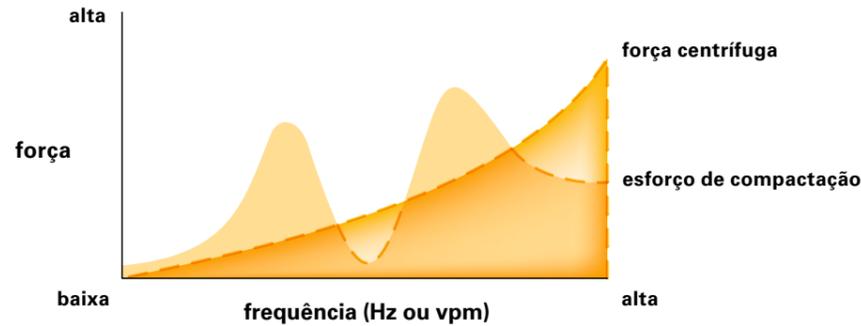
Força Centrífuga – Os compactadores vibratórios criam força centrífuga com um ou mais pesos excêntricos que giram dentro de um rolo. Propondo uma analogia, podemos dizer que a força centrífuga gerada pelo rolo é comparada ao puxão que sentimos quando giramos um balde cheio de água. A massa dos pesos, sua distância desde o centro de rotação até o centro de gravidade, e a velocidade de rotação são fatores que contribuem para a produção dessa força. A força centrífuga é um

cálculo teórico e sua frequência é usada para avaliar a produtividade dos compactadores vibratórios de solo. Mas teoricamente a força centrífuga não é uma maneira precisa para se julgar a capacidade de uma máquina. A verdadeira força vibratória depende de uma interação completa entre o material a ser compactado e a máquina.

FORÇA E FREQUÊNCIA

O gráfico mostra como, teoricamente, a força centrífuga aumenta com a redução da frequência. No entanto, o esforço de compactação que é realmente transmitido ao solo varia com o aumento da frequência. O esforço de compactação vai mostrar múltiplos "picos" e "vales".

Tipicamente, há um primeiro pico representando um valor máximo do esforço de compactação, que rapidamente é reduzido e é seguido por um segundo pico. Geralmente, esse segundo pico vai produzir o valor mais alto, e representa o momento em que a produtividade da máquina está em seu ponto máximo.



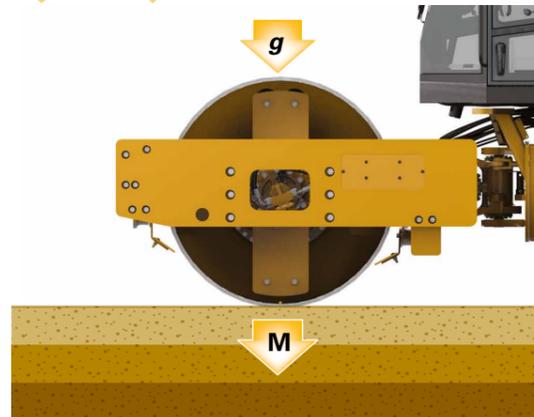
FORÇA TOTAL APLICADA (F_{TA})

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

Onde: F_c é a força centrífuga = $1100 \left(\frac{M}{1000} \right) \left(\frac{r}{1000} \right) \left(\frac{N}{1000} \right)^2$

e: F_s é a carga aplicada em um rolo estático = $M \times g$

- M** massa do peso excêntrico (kg)
- r** momento de excentricidade (m)
- N** rpm
- M** massa aplicada no rolo estático (kg)
- g** aceleração da gravidade $\left(\frac{\text{metros}}{\text{segundo}^2} \right)$



Força Total Aplicada – A força total aplicada é vista como a quantidade máxima de energia vibratória que um compactador pode aplicar ao solo. É calculada pela adição da massa estática do compactador à força centrífuga. Como acontece

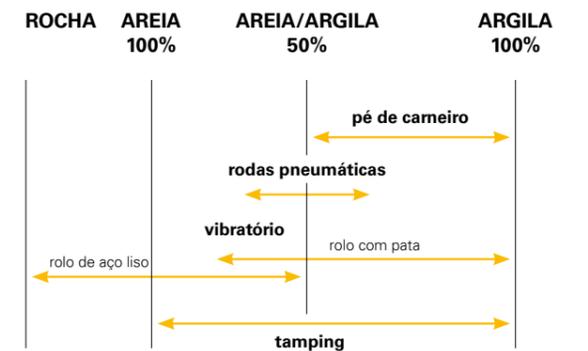
com a força centrífuga, é preciso tomar cuidado quando usar este cálculo para comparar as capacidades de compactação dos compactadores.

[EQUIPAMENTO PARA COMPACTAÇÃO DO SOLO]

Muitos fatores influenciam a escolha do equipamento de compactação. O tipo do equipamento selecionado para um projeto é, algumas vezes, baseado na experiência anterior do empreiteiro, no tipo de solo, na especificação do método ou no equipamento disponível. Outra consideração é a conformidade da máquina à operação de transporte e espalhamento. As condições climáticas e de tração também são importantes. Algumas vezes, o interesse do empreiteiro em padronizar a frota dos equipamentos é de vital importância no processo da tomada de decisão.

O gráfico da aplicação oferece linhas mestras para combinar o equipamento às variáveis da obra e aos tipos de solos. Não existe um único compactador que faça todas as coisas em todas as aplicações. Cada tipo tem uma faixa definida de materiais e de operação na qual ele é mais econômico. Em muitos casos, existem aplicações onde máquinas de tamanhos e tipos diferentes podem alcançar a meta de compactação, mas a escolha da máquina mais adequada vai completar o trabalho de maneira mais econômica e eficiente devido a passadas reduzidas, menor uso de combustível e menos tempo de trabalho.

GRÁFICO DA APLICAÇÃO



Compactadores Vibratórios – Os compactadores vibratórios trabalham segundo o princípio do novo arranjo das partículas para reduzir os vazios e aumentar a densidade e a resistência de suporte de carga. Existem dois tipos: de rolo de aço liso e rolo com patas em formato "pé de carneiro". Para maior versatilidade, os compactadores com rolo de aço liso podem ser equipados com kits opcionais com revestimento tipo pata p-e de carneiro, que permitem o uso dos compactadores de rolo de aço liso em aplicações que exigem rolo com patas, embora com desempenho limitado.

Os compactadores vibratórios com rolo de aço liso geram três forças de compactação: pressão estática, impacto e vibração. As máquinas com rolo com patas geram as mesmas forças, mas também geram força manipulativa. Os compactadores vibratórios oferecem compactação uniforme através de toda a camada.

A densidade é obtida a partir das forças geradas pelo rolo vibratório atingindo o solo. Os resultados da compactação são uma função da frequência e amplitude dos golpes, bem como da força dos golpes e do período de tempo em que os golpes são aplicados.





As patas ovais são uma boa combinação para solos coesivos e camadas mais espessas.

O relacionamento entre frequência e tempo considera velocidades mais lentas de trabalho nos compactadores vibratórios. A velocidade de trabalho é importante porque dita em quanto tempo um trecho em particular do solo será compactado. Para os compactadores vibratórios, uma velocidade de 1-2,5 km/h (0,6-1,6 mph) para rocha e argila, e 2-5 km/h (1,2-3 mph) para cascalho e areia proporciona os melhores resultados.

Os compactadores vibratórios de rolo de aço liso foram as primeiras máquinas vibratórias apresentadas. São mais eficientes em materiais granulares com tamanhos de partículas que variam desde grandes rochas até areia fina. São também usados em solos semi-coesivos com até 50% de teor coesivo no solo. A espessura da camada compactada varia de acordo com o tamanho do compactador. Sempre que são usadas rochas grandes no solo, as camadas compactadas podem ser muito espessas – até 1,2 m (4 pés) não são incomuns. Uma coisa que deve ser lembrada quando há grandes rochas no solo é que a espessura deverá ser de cerca de 300 mm (12 pol.) mais que o tamanho máximo da rocha. Isso permite a consolidação da camada compactada sem que grandes rochas sobressaiam acima da superfície.

As máquinas com rolos com patas expandem a faixa do material para incluir solos com mais de 50 por cento de material coesivo e uma maior porcentagem de sedimentos finos. Quando a pata penetra a parte superior da camada a ser compactada, quebra os vínculos naturais entre as partículas do solo coesivo e obtém melhores resultados de compactação. As patas têm um desenho intrincado para passar pela camada a ser

A Caterpillar também oferece uma opção de kit de capa-pata para os compactadores de rolo de aço liso. A estrutura em duas peças é aparafusada no rolo de aço liso, permitindo que o compactador seja usado em solos coesivos, como um rolo compactador normal. São disponíveis estruturas de capa-pata com faces em formatos quadrados e ovais.

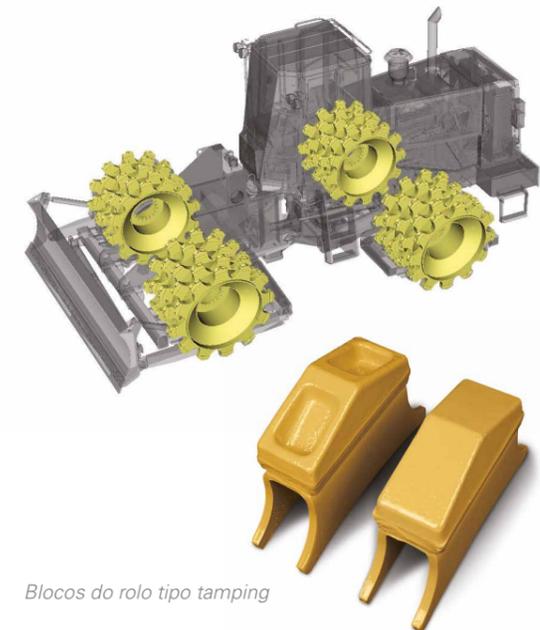


As patas quadradas são mais adequados para solos semi-coesivos e camadas mais finas.

compactada sem afogar o solo, e são cônicos para ajudá-los a ser manter limpos. A espessura típica da camada a ser compactada pelas unidades com rolo com patas em solo coesivo está na faixa de 150-460 mm (6-18 pol.).

A Caterpillar tem dois formatos de patas disponíveis: com faces quadradas ou com faces ovais. As patas quadradas apresentam bons resultados em solos semi-coesivos e camadas mais finas de menos de 150 mm (6 pol.). As patas quadradas fazem um bom trabalho de vedar a superfície.

As patas ovais têm uma área de superfície menor que as patas quadradas, assim aplicam maior pressão no solo do que as patas quadradas. Isso permite que a pata penetre mais profundamente na camada. As patas ovais fazem um trabalho melhor em solos coesivos e camadas mais espessas de 150-460 mm (6-18 pol.). As patas ovais não vedam a superfície tão bem quanto as patas quadradas.



Blocos do rolo tipo tamping

Compactadores tipo Tamping – Os compactadores com rolos tipo Tamping são compactadores de alta velocidade, auto propelidos e não vibratórios. Eles normalmente têm quatro rodas de aço e são equipados com uma lâmina frontal como um trator. Os blocos do rolo são cônicos com uma face retangular.

Os compactadores com patas compactam desde a parte inferior da camada até o topo. Como as patas são cônicas, podem sair da camada a ser compactada sem afogar o solo. Portanto, a parte superior da camada também está sendo compactada e a superfície fica relativamente lisa e vedada. Os compactadores com patas são capazes de atingir velocidades na faixa de 16-32 km/h (10-20 mph), mas normalmente operam na faixa de 10-15 km/h (6-10 mph).

Geralmente, 2-3 ciclos (4-6 passadas da máquina) são suficientes para se alcançar as densidades desejadas em camadas de 200-300 mm (8-12 pol.), embora 4 ciclos possam ser necessários em siltes plásticos com má gradação ou argilas finas.

Compactadores com Rolo Pé de Carneiro – O nome dos compactadores com rolo pé de carneiro deriva do fato de que os antigos construtores de estradas do Império Romano passeavam com carneiros indo e voltando sobre o material da base até a estrada ficar compactada. A expressão “pé de carneiro” passou a ser um termo genérico para descrever todos os tipos de rolos com patas tipo pata. Na verdade, um compactador pé de carneiro é muito diferente

Os compactadores com rolo tipo Tamping são eficientes em todos os solos, exceto areia limpa.

Os compactadores deixam uma superfície relativamente lisa e vedada. Assim as unidades de transporte podem manter uma alta velocidade quando se deslocam sobre a camada compactada. Além disso, como os compactadores com rolo socados equipados com lâmina frontal conseguem espalhar e compactar, o empreiteiro pode ser capaz de reduzir o número de espalhadores de esteiras.

Os compactadores são mais adequados para projetos grandes. Eles precisam de passadas longas e ininterruptas para atingir uma velocidade que gere alta produção. Em camadas superiores a 300 mm (12 pol.) de espessura, os compactadores equipados com rolo tipo Tamping são cerca de 2 a 3 vezes mais produtivos que os compactadores vibratórios com um único rolo. A aplicação, o tamanho do canteiro de obra e a economia por trás da tomada de decisão vão ditar que tipo de máquina é melhor.

de um compactador com rolo com patas ou com Tamping.

Um pé de carneiro é cilíndrico, normalmente com 200 mm (8 pol.) de comprimento. O dente é circular e tem um diâmetro na faixa de 76-127 mm (3-5 pol.). Os dentes nos rolos dos compactadores com patas são cônicos com formato oval ou retangular. E a face do dente é menor do que a base do ressalto – essa é uma diferença importante.



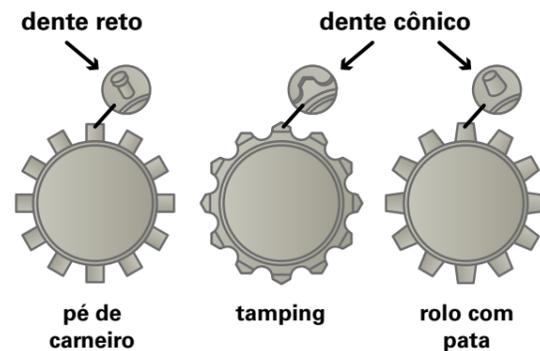
As patas nos rolos pé de carneiro penetram através do topo da camada a ser compactada e, na verdade, compactam a camada inferior. Quando um ressalto sai do solo, ele afoga o material. O resultado é uma camada solta de material na parte de cima. Quando mais camada é espalhada, a camada superior fica ainda mais fofa e a camada anterior é compactada. Um compactador equipado com rolo pé de carneiro compacta realmente de baixo para cima.

O uso de um compactador pé de carneiro tem um benefício definitivo. Como a camada superior do solo está sempre sendo afogada, o processo ajuda a aerar e secar argilas e siltes molhados.

Porém as desvantagens dos compactadores equipados com rolo pé de carneiro são inúmeras. O material solto da camada superior pode agir como uma esponja quando chove e reduzir o processo da compactação. O material solto também reduz a velocidade das unidades de transporte que depositam o material que será compactado, assim os tempos dos ciclos de transporte são aumentados.

Além disso, os compactadores equipados com rolo pé de carneiro podem trabalhar somente com velocidades de 6-10 km/h (4-6 mph), o que cancela qualquer benefício de impacto e vibração. Pressão e manipulação são as únicas forças de compactação exercidas no solo. Normalmente, 6-10 ciclos (12-20 passadas com a máquina) são necessários para se alcançar a densidade desejada em camadas de 200 mm (8 pol.). Os compactadores equipados com rolo pé de carneiro não são mais usados amplamente.

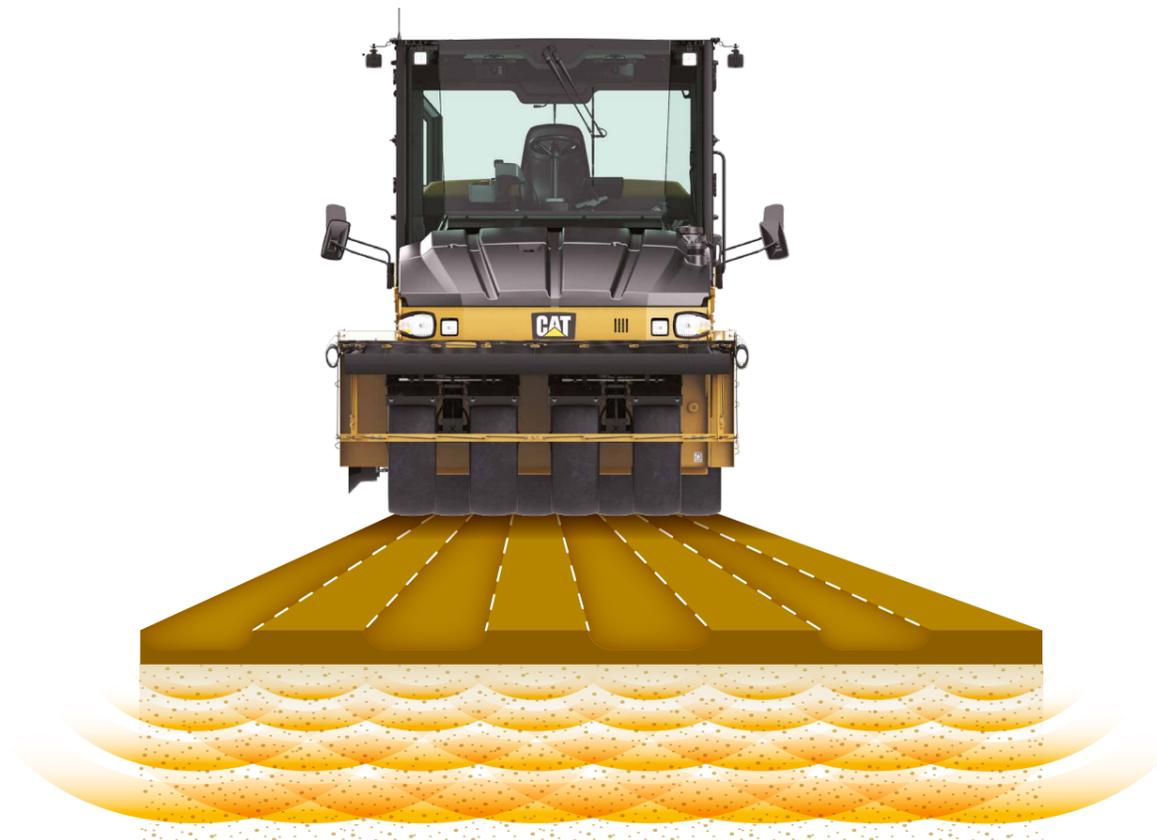
CONFIGURAÇÃO DE PATAS



Compactadores de Rodas Pneumáticas – Os compactadores de rodas pneumáticas são usados em trabalhos de compactação de solo pequenos a médios, primordialmente com materiais com base granular onde já foi usada lâmina. Frequentemente, eles são usados como um compactador de acabamento depois que um computador com rolo vibratório completa a compactação da área. Os compactadores de rodas pneumáticas são mais adequados para a vedação da superfície, para aplicações especiais como a compactação de camadas finas, ou para exigências especiais ditadas pela obra.

As forças de compactação (pressão e manipulação) geradas pelas rodas pneumáticas trabalham desde a parte superior da camada para baixo para produzir densidade. A quantidade de força de compactação pode ser variada, bastando alterar a pressão dos pneus (o método normal) ou mudando o peso do lastro (feito menos frequentemente). A ação de esmagamento causada pelo padrão desigual dos pneus ajuda a vedar e alisar a superfície.

Os compactadores de rodas pneumáticas podem ser usados em solo e asfalto, uma vantagem que permite que um empreiteiro de construção de estradas use um compactador para múltiplos estágios da construção.



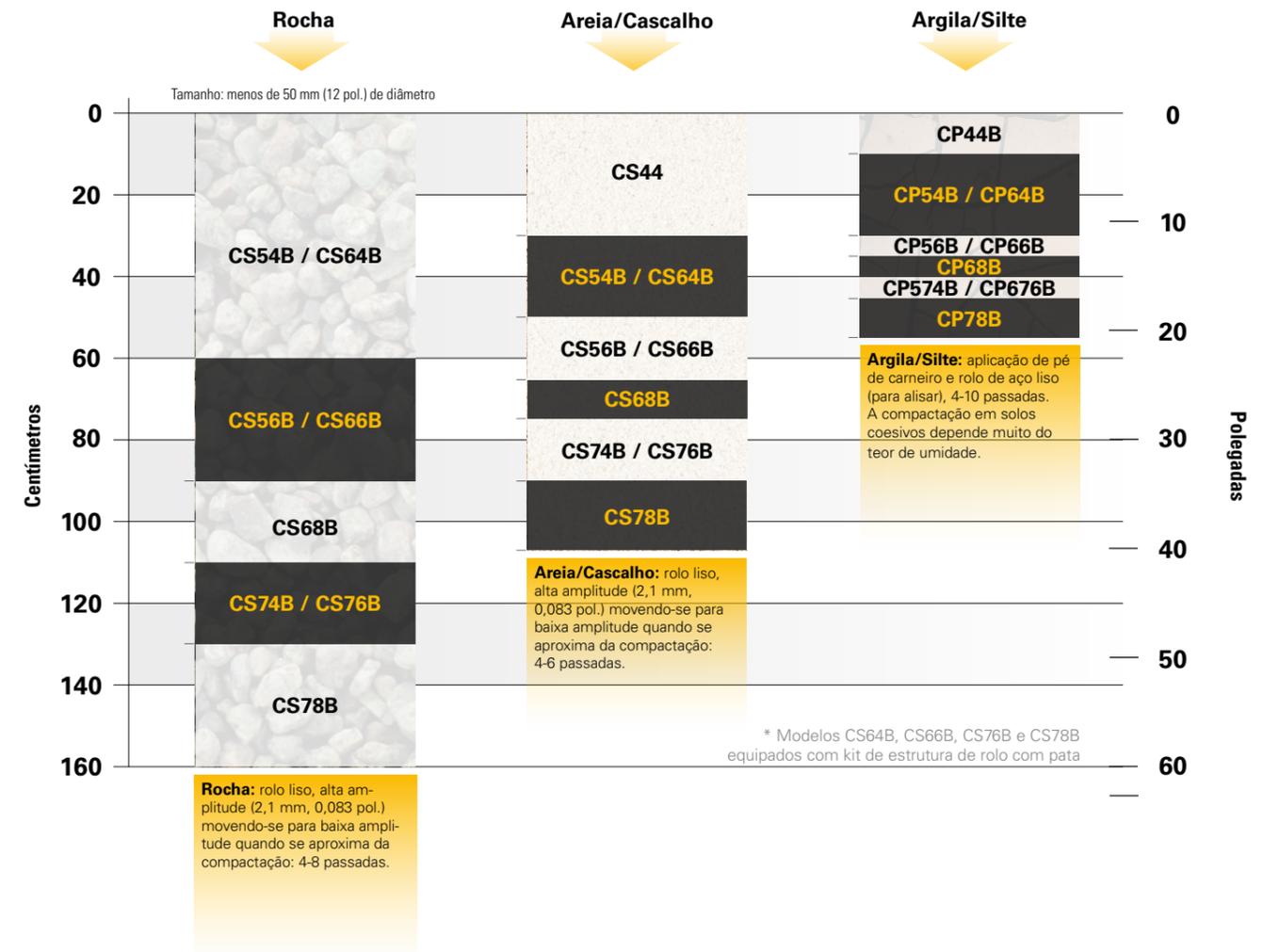


Placas Vibratórias Traseiras – Em material não coesivo, os compactadores vibratórios de solo com um único rolo podem ser equipados com placas vibratórias traseiras, que oferecem uma vedação da superfície que não pode ser obtida com o compactador de rolo simples. Isso permite que o operador considere o gradiente da compactação: o compactador vibratório com rolo simples consegue uma compactação mais profunda, e a placa vibratória compacta e veda a superfície.

Quando as placas vibratórias não são necessárias, elas devem ser removidas da máquina porque seu peso pode reduzir a carga linear do rolo, o que pode significar a necessidade de passadas adicionais para que seja alcançada a meta da compactação.

PROFUNDIDADE DE COMPACTAÇÃO

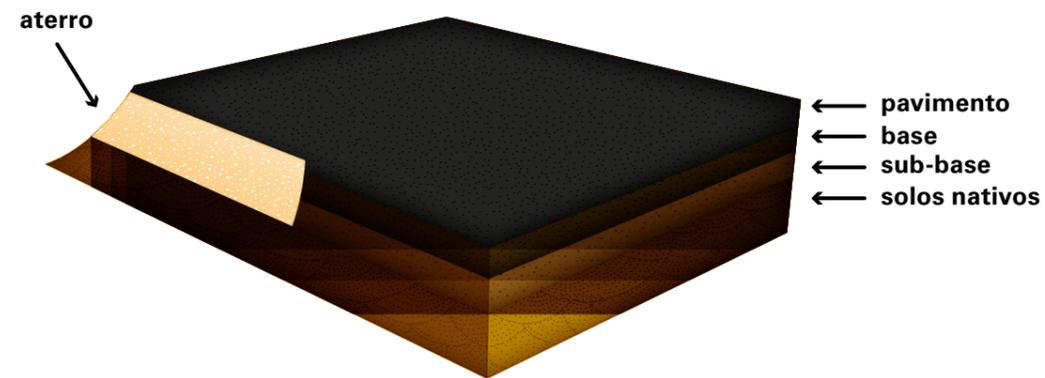
Vamos assumir que a especificação da densidade é 95% do teste Proctor Padrão e pode variar substancialmente devido a diferentes condições do solo.



Unidade 4 APLICAÇÃO E CONTROLE DE QUALIDADE

Os parâmetros do projeto têm um impacto significativo na disposição dos solos e em sua compactação. Aprender como potencializar os resultados sob uma grande variedade de condições vai ajudá-lo a maximizar as eficiências e evitar a repetição do trabalho. Métodos de medições novos e já comprovados pelo uso também são benéficos para ajudá-lo a administrar da melhor maneira seus projetos de compactação.





[OS ELEMENTOS DA ESTRUTURA DO CANTEIRO DE OBRAS]

Como qualquer tipo de estrutura, uma estrada é composta de componentes específicos que realizam funções específicas. A terminologia pode variar regionalmente, mas esses componentes trabalham em conjunto para suportar a carga do tráfego sobre a estrada.

Solos Naturais ou Nativos – Às vezes chamada de “substrato”, “subsolo” ou “sub-leito” é a fundação do leito de uma estrada e consiste dos solos e materiais que ocorrem naturalmente sem qualquer modificação humana ou química. Durante o processo de construção de uma estrada, os solos da superfície são modificados para que se obtenha um piso nivelado por igual. Os materiais expostos na parte inferior do corte são os solos naturais. Se os materiais existentes forem insuficientes para suportar a carga da estrutura da estrada, eles são modificados ou substituídos por materiais adequados. A modificação pode ser mecânica, o que inclui compactação, reforço com materiais geosintéticos ou a incorporação de agregados; ou química o que inclui a incorporação de aglutinantes como, por exemplo, cimento Portland; ou uma combinação das nivelações mecânicas e químicas. O objetivo é melhorar as capacidades de suporte de carga do material. Em última análise, essa fundação deve oferecer suporte adequado para a estrutura que ficará sobre ele.

Aterro – Um aterro é qualquer acúmulo de terra onde o topo é mais alto que a superfície adjacente. O leito da estrada é projetado para ter uma determinada largura e suportar a estrada em uma elevação e nível determinados pela engenharia. Em alguns casos, ondulações que ocorrem naturalmente no terreno podem exigir o uso de material de enchimento para oferecer um solo de embasamento adequado para o leito da estrada.

Os solos de embasamento são construídos para este propósito com a colocação e compactação de materiais agregados apropriados para dar forma ao terreno até ele encontrar a elevação necessária.

Sub-base – As funções primárias desta camada são distribuir a carga da estrutura que ela suporta no substrato e oferecer um nivelamento relativamente por igual sobre o qual colocar a base. No entanto, a sub-base também pode oferecer uma grande variedade de funções adicionais, dependendo da composição dos materiais do substrato, tais como funções de filtragem ou agir como uma barreira contra a água capilar. Normalmente, essa camada é composta principalmente de materiais do substrato que são modificados se necessário e compactados. Pode haver camadas múltiplas de sub-base, porque podem ser acrescentadas camadas secundárias, quando necessárias para suportar cargas maiores. Geralmente, os agregados usados na sub-base são maiores que os agregados usados nas camadas que a sub-base suporta.

Base – As camadas da base servem uma função similar à da sub-base. Elas também distribuem a carga que suportam e oferecem proteção contra os efeitos da água e do degelo. Pode haver uma base única ou camadas múltiplas de base, dependendo das exigências da carga. A base é composta por uma mistura de agregados especificamente projetados com uma partícula de tamanho menor do que a usada na sub-base.

As camadas de asfalto são colocadas sobre essa fundação. A qualidade da fundação vai afetar a durabilidade das camadas de asfalto colocadas sobre ela. Para mais informações sobre as camadas de asfalto, consulte o “Guia para a Compactação do Asfalto” da Caterpillar.

[PROCEDIMENTOS PARA A COMPACTAÇÃO DO SOLO]

CONFIGURAÇÃO DA OBRA

Antes de iniciar um trabalho de compactação, as principais perguntas que um empreiteiro deve considerar são:

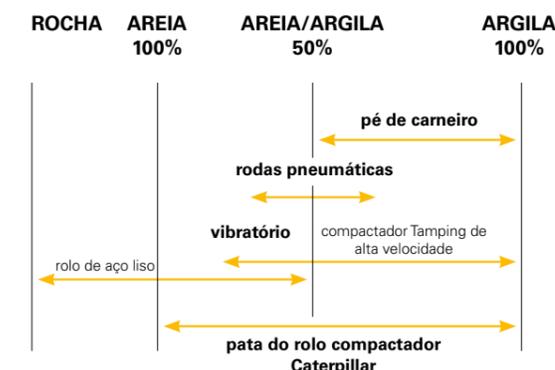
- Quais são a granulometria ou gradação e a classificação do solo?
- Qual é a densidade seca máxima e o teor ideal de umidade?
- Qual é a exigência de compactação (%)?
- Quais são os ajustes e a velocidade do compactador?

- Qual é a espessura da camada a ser compactada?

Um empreiteiro precisa saber à respeito do material e exigências de aplicação para cada tipo de equipamento. Uma vez estas variáveis sejam entendidas corretamente, o empreiteiro pode começar a pensar no melhor a oferecer no canteiro de obras e ainda considerar as tecnologias disponíveis para a aplicação.

Aplicação e Dimensionamento do Compactador – As características de operação para os vários tipos de compactadores são mostradas na ilustração ao lado. Para comparação, a ilustração abaixo mostra as faixas de aplicação onde cada compactador é mais eficiente. As máquinas podem fazer uma sobreposição a essas faixas e não é incomum ver máquinas trabalhando em materiais fora de sua zona normal de aplicação. Portanto, as informações apresentadas nesses gráficos deverão ser consideradas estritamente como um guia ou referência de aplicação.

GRÁFICO DE APLICAÇÃO



Área de trabalho e Aplicação de Aterro – Este tipo de local refere-se a uma ampla gama de tipos de construção de terra ou solos mais variados, tais como: preparação da fundação, terraplenagem, aterro e enchimento de bacia. Este local pode ser caracterizado como uma área de construção, uma estrada ou outro tipo de superfície e estrutura.

CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO PARA O EQUIPAMENTO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO

Somente as máquinas Auto Propelidas

Máquina	Pé de Carneiro	Rodas Pneumáticas (de 15 ton ou acima)	Patás	Vibratório
Espessura da camada compactada – mm (pol.)	150 - 300 (6 - 12)	150 - 300 (6 - 12)	150 - 300 (6 - 12)	150 - 600 (6 - 24)*
Velocidade média de trabalho – km/h (mph)	6 - 10 (4 - 6)	6 - 19 (4 - 12)	16 - 32 (10 - 20)	2 - 8 (2 - 5)
ciclos (1 ciclo = 2 passadas da máquina)	6 - 10	3 - 8	4 - 8	2 - 4

*Depende do tamanho do compactador e da meta de compactação



Aterro com Rochas –

A rocha é cada vez mais usada como material para aterro na construção de estradas. É também

muito usada no aterro de construção de represas, aeroportos, edifícios e portos. A rocha explodida frequentemente contém tantos sedimentos finos que um ajuste considerável vai ocorrer se o aterro não for compactado.

O aterro de rochas normalmente é espalhado em camadas de 450-1200 mm (18-48 pol.). A maneira com que o material é espalhado antes da compactação é vital. O trator que espalha as camadas cria um aterro uniforme porque a lâmina faz alguma reorientação das rochas e as esteiras oferecem uma determinada compactação.



Areia e Cascalho –

A compactação vibratória com máquinas de rolo de aço liso é especialmente adequada e econômica em areia e cascalho.



Altas densidades podem ser obtidas com poucas passadas com a espessura da camada determinada pelo tamanho do compactador.

Areia e cascalho com drenagem livre que contém menos de 10 por cento de sedimentos finos são facilmente compactados, especialmente quando estão quase saturados. Quando é necessária uma alta densidade e as camadas são espessas. Deverá ser acrescentada água. Essa água será drenada da camada durante o processo de compactação.



Quando o teor de umidade estiver abaixo do ideal, pode ser acrescentada água para assegurar que a compactação adequada será alcançada.

Portanto, uma superfície relativamente densa e nivelada é preparada para o compactador.

São necessárias altas forças de compactação depois do espalhamento para relocalar pedras grandes por uma questão de densidade e estabilidade. Os maiores compactadores vibratórios de rolo de aço liso são selecionados para este trabalho. Mesmo assim, os compactadores são submetidos a grandes tensões no aterro de rochas. O rolo deverá ser construído com aço grosso e de alto grau de resistência. Se houver um efeito de esmagamento no material da superfície, o número de passadas poderá ser reduzido. Ou, se a máquina for equipada com mais um ajuste de amplitude, a amplitude mais baixa pode ser usada para reduzir a distorção do material da superfície.

Se a areia e o cascalho contiverem mais de 10% de sedimentos finos, o solo não será mais livre de drenagem e pode se tornar elástico quando o teor de água for alto. Esse tipo de solo tem um teor ideal de umidade onde a densidade máquina pode ser alcançada. Pode ser necessária a secagem do solo molhado para se alcançar o teor ideal de umidade.

Em piso de areia e cascalho com uma compactação insuficiente, é difícil obter uma alta densidade perto da superfície do aterro. Há uma baixa força de cisalhamento em solos com compactação insuficiente e a camada superior tende a se elevar atrás do rolo. Isso não é problema quando camadas múltiplas estão sendo compactadas, quando a camada seguinte é compactada. No entanto, a dificuldade de compactar a superfície deverá ser considerada durante o teste da densidade.



Silte – Os siltes são sedimentos finos não plásticos que, normalmente, são compactados com compactadores vibratórios de rolo de aço liso. Podem

ser espalhados em camadas espessas.

Como todos os solos com granulação fina, sua facilidade de compactação depende da umidade. Para melhores resultados de compactação, o teor da água não deverá variar muito a partir do teor



Argila – As argilas têm propriedades plásticas, o que significa que as características de compactação são altamente dependentes do teor de umidade. Quando o teor de

água é baixo, a argila fica dura e firme. Acima do teor ideal de umidade, a argila torna-se cada vez mais plástica e difícil de compactar.

Frequentemente em uma compactação de argila, o principal problema é a necessidade de ajustar o teor de água. A adição de água com o uso de caminhões-pipas, discos ou estabilizadores de solo é demorada. A infiltração de água no local do poço de empréstimo é uma alternativa melhor. A secagem de argila molhada somente pode ser feita em condições quentes e secas, mesmo com uso de discos e estabilizadores de solo. A rolagem prolongada com compactadores com rolo pé de carneiro algumas vezes é feita para reduzir o teor de umidade.

Mesmo com o teor ideal de umidade, a argila exige um esforço mais alto de compactação e uma camada com espessura mais fina, em comparação com solos não coesivos. Os compactadores com tambor de patas trabalham melhor porque como as patas penetram no solo, eles interrompem os vínculos coesivos entre as partículas. Os compactadores com rodas pneumáticas podem ser usados em argilas com um Índice de Plasticidade de baixo a médio.

Em projetos onde é exigida uma alta produção e a argila é usada como material de aterro, bons resultados podem ser obtidos com uso de compactadores tipo Tamping de alta velocidade juntamente com compactadores vibratórios com rolo com patas. Compactadores equipados com rolo vibratório e lâmina frontal são eficientes no espalhamento do aterro e no cisalhamento de grandes e duros matacões de argila, frequentemente encontrados no material argiloso de empréstimo. Essas máquinas realizam as primeiras passadas. A densidade final é alcançada com o uso de compactadores vibratórios de aço liso.

de umidade ideal. Se houver a presença de um teor muito alto de água, os siltes se aproximam rapidamente do estado fluido e a compactação é impossível. Isso significa que as camadas compactadas podem precisar ser aeradas com discos, misturadas com solo mais seco (um procedimento dispendioso) ou o material de empréstimo pode precisar ser mais bem drenado. Os solos siltosos que também contêm argila podem ter uma coesividade considerável. Nesses solos, compactadores com patas ou com rodas pneumáticas proporcionam melhores resultados.



Quando o índice de umidade é muito alto, a abertura do solo acelera o tempo de secagem.

Aplicações de Base e Sub-Base – As bases e sub-bases são as camadas construídas no topo do aterro ou da superfície do solo natural. Essas camadas servem como fundação para a colocação de uma estrutura na superfície como uma estrada ou um edifício. Elas aumentam a resistência à medida que se aproximam da superfície de acabamento. Os materiais usados

Solos Naturais (Nativos) – Desde um ponto de vista econômico, é preferível usar solos disponíveis localmente. Se esses solos forem adequados, poderão ser usados sem tratamento químico ou aditivos. A compactação apropriada desses solos vai aumentar substancialmente suas capacidades de suporte de cargas e vai controlar outros fatores, tais como permeabilidade, ação capilar ou encolhimento e inchaço.

Solos Tratados (Estabilização do Solo) –

A mistura de produtos químicos com solos naturais pode melhorar substancialmente a estabilidade e as características de suporte de carga do solo. Dá-se a essa operação o nome de estabilização do solo.

Depois que cal e cimento foram misturados no solo, ele deverá ser compactado com um compactador vibratório. O tipo de compactador usado vai depender das características originais do solo não tratado. Mas, geralmente, deverá ser usado um compactador vibratório de 15 toneladas (33.000 lb) ou mais. Quando houver o envolvimento de um grande volume de solo coesivo, um compactador equipado com tambor de patas será mais econômico do que um compactador vibratório. Volumes menores podem ser compactados com um compactador com rodas pneumáticas.

No início do trabalho, é recomendado que você realize um teste apropriado de estabilização para assegurar que os resultados sejam suficientes.

Rocha Britada – As especificações da obra podem determinar que rocha britada bem nivelada seja usada como materiais de base e sub-base. Com o uso de material britado, a gradação pode ser controlada durante o processo de britagem para que as especificações sejam atendidas. A rocha britada é geralmente mais fácil de espalhar e compactar que solos finos, além disso, os resultados da compactação são mais previsíveis. No entanto, essas vantagens da compactação são anuladas pela despesa da brita e dos transportes frequentemente mais longos até o local do projeto.

nessas camadas dependem do tipo de cargas que a estrada ou o edifício pode suportar.

Normalmente, são dadas especificações muito restritas para materiais de base e sub-base, para a espessura da camada a ser compactada, para a densidade exigida e para o módulo de deformação.

A escolha do equipamento de compactação vai depender do tipo de solos. Geralmente, solos granulares e não coesivos são especificados como material de base e sub-base. Os compactadores equipados com rolo de aço liso ou com rodas pneumáticas são mais frequentemente usados nesta aplicação.



A estabilização do solo melhora as qualidades de engenharia de um solo.

A rocha britada é usualmente transportada até o canteiro de obras em caminhões-caçamba de despejo traseiro e colocada no solo com uma motoniveladora ou uma máquina espalhadora (distribuidora). O material de base é então espalhado e formado em camadas que variam entre 150-250 mm (6-10 pol.). Depois do espalhamento, a compactação é realizada por compactadores equipados com rolo de aço liso (estáticos ou vibratórios) ou compactadores de rodas pneumáticas.

[**SUGESTÕES SOBRE A COMPACTAÇÃO DE SOLOS**]

A despeito de sua aparência simples, a compactação de solos pode ser um dos elementos mais difíceis em qualquer projeto de construção. Muitos fabricantes oferecem opções em seu equipamento de compactação que permitem que o operador ajuste a vibração, a frequência e a amplitude da máquina para atender às especificações da obra.

Não há uma maneira fácil de ajustar os parâmetros de trabalho de um compactador de acordo com o material que ele está compactando. O método de tentativas e erros é frequentemente o melhor. Obviamente, o usuário vai precisar selecionar um compactador do tamanho apropriado (largura do rolo, peso, etc.) para atender às exigências da produção. Mas, alcançar o máximo esforço de compactação é usualmente obtido pela experimentação com as variáveis que o operador pode controlar – frequência, amplitude e velocidade de deslocamento – então analisando o desempenho e fazendo ajustes.

Os fabricantes estão oferecendo mais tecnologia em suas máquinas que podem ajudar o operador a potencializar a eficiência. Mas, mesmo com maior tecnologia e sofisticação, para que sejam obtidos os melhores resultados na compactação do solo você precisa revisar alguns princípios básicos da compactação de solo que já foram testados e aprovados em projetos de construção por muitos anos. A seguir vamos ver algumas sugestões sobre a compactação de solo que vão lhe dar uma orientação básica.

QUE COMPACTADOR PARA A APLICAÇÃO?

MATERIAL COESIVO

Camadas finas

Compactador de rolo único (com patas)



MATERIAL FINO

Sensível à água

Compactador de rolo único, com rolo de aço liso ou com patas



MATERIAL DE ATRITO

(areia 0,063-2 mm/0,002-0,07 pol.)

Drenagem livre se o teor de sedimentos finos for < 7%

Compactador de rolo único, com rolos em tandem, compactador de rodas pneumáticas



GRANULAÇÃO DENSA, DRENAGEM LIVRE

Material de atrito

Compactador com rolo único, com rolos em tandem



GRANULAÇÃO DENSA

(cascalho 2-63 mm/0,07-2,5 pol.)

Drenagem livre

Material de atrito

Compactador com rolo único, com rolos em tandem



MATERIAIS DENSOS

Partículas pesadas

Placas grandes, compactador com rolo único (>12,7 tons)



	Permeabilidade	Suporte da Fundação	Sub-base do pavimento	Expansivo	Dificuldade de compactação
Cascalho	Muito alta	Excelente	Excelente	Não	Muito fácil
Areia	Média	Bom	Boa	Não	Fácil
Silte	Média baixa	Insuficiente	Insuficiente	Em parte	Em parte
Argila	Nenhuma+	Moderado	Insuficiente	Difícil	Muito difícil
Orgânico	Baixa	Muito ruim	Não aceitável	Em parte	Muito difícil

Uniformidade da Camada, Padrão de Velocidade e Compactação – A estrutura de edifícios e estradas depende das bases do solo que não só são compactadas segundo as especificações, mas também são compactadas uniformemente. Variações na densidade da base podem levar a buracos ou marcas das rodas nas estradas e problemas com a fundação sob os edifícios. Uma das maiores causas de variações na densidade do solo é o uso de diferentes tipos de solos que são colocados lado a lado.

Como tipos diferentes de solos são compactados diferentemente e produzem diferentes resultados de compactação, todo esforço deve ser feito durante a construção em utilizar material similar para cada camada a ser compactada. Se forem necessários tipos diferentes de materiais, tente usar o mesmo tipo para cada camada – não use materiais diferentes em um espalhamento horizontal. Isso pode ser crítico, impedindo que sejam alcançados resultados uniformes na compactação.

Outra causa de variação na densidade é um teor inconsistente de umidade. Como é mais difícil compactar um solo que esteja muito seco ou muito molhado, o teor ideal de umidade, conforme é determinado pelo Teste Proctor, deverá ser sempre buscado durante a compactação em todo o canteiro de obras. Isso vai ajudá-lo a alcançar os resultados mais uniformes e mais densos possíveis.

A espessura da camada normalmente não é controlada com muita precisão, exceto talvez para verificar a base por baixo da superfície do pavimento. Se todos os outros fatores, tais como teor de umidade e tipo de material, foram mantidos

Espessura da Camada a ser Compactada –

A tecnologia dos compactadores está avançando continuamente, oferecendo mais opções e variações para o processo de compactação. No entanto, depois que um esforço de compactação por igual é aplicado – mesmo com o compactador mais avançado – camadas relativamente espessas de material serão menos densas do que camadas mais finas. Há exceções a esta regra, mas a espessura de uma camada deverá ser buscada, para que as taxas de produção sejam potencializadas, com base na densidade necessária e no número mínimo de passadas do compactador.

A condição da camada anterior ou da base subjacente também tem um efeito na obtenção da compactação. Se uma sub-base não tiver sido totalmente compactada, ela conterá áreas que são relativamente macias. Por outro lado,



constantes, a espessura uniforme da camada gerará uma densidade uniforme em todo o canteiro de obras. Negligenciar a espessura da camada pode resultar em não ser possível atender às especificações da obra.

Outros fatores que podem afetar a compactação e que frequentemente recebem atenção inadequada são a cobertura e as contagens das passadas. Parâmetros como o número de passadas, a velocidade do compactador e os ajustes vibratórios podem ser facilmente controlados. Tecnologias de compactação inteligente, tal como o Compaction Control, com capacidade de mapeamento GNSS, exclusivo da Caterpillar, pode oferecer uma referência visual para assegurar que a cobertura apropriada e as contagens das passadas são mantidas. A cobertura uniforme é mais eficiente e terá mais sucesso que a compactação a esmo do material.



a compactação na próxima camada terá resultados variados e indesejáveis. Cada camada deverá ser uniforme e totalmente compactada para assegurar que as próximas camadas também sejam compactadas com sucesso.

Esforço de Compactação – O esforço de compactação é a quantidade de energia transferida ao solo para rearranjar e adensar as partículas do solo. A variação de parâmetros da máquina, como peso, largura, pressão dos pneus, amplitude de vibração e frequência pode mudar o esforço de compactação. Alguns desses parâmetros podem ser ajustados em uma única máquina. Outros, como a largura podem exigir uma máquina diferente para alterar o esforço de compactação. Certas magnitudes desses parâmetros são necessárias para qualquer projeto.



Velocidade de Trabalho – Em geral, as velocidades de deslocamento desempenham um papel importante na produtividade da construção. Quando mais rápida for a máquina, mais depressa a obra será terminada. No entanto, com os compactadores vibratórios, diferentemente de todos os outros tipos, a produtividade geralmente aumenta com a redução da velocidade de deslocamento. Há uma velocidade economicamente ideal que vai permitir ao compactador alcançar a compactação desejada.



Regras Gerais sobre Colocação e Compactação do Solo

– A seguir estão regras gerais que você, a administração do seu canteiro de obras e seus operadores deverão considerar no início de cada projeto de compactação.

- Quando colocar uma nova camada de material de solo, espalhe o material por toda a área uniformemente. Evite colocar solos que tenham um teor de umidade excessivamente alto. Espalhe o material com um trator em baixa velocidade e molde o perfil apropriado. Não enterre camadas saturadas com materiais novos.
- Cavidades na superfície ou área com segregação visível devem ser remediadas com a adição de material com boa gradação da mesma composição.
- Imediatamente após ter sido completado o espalhamento, compacte o solo, começando por fora e trabalhando em direção ao meio da área.
- Áreas de aterro/acostamento também devem ser compactadas. Compacte o acostamento a partir das bordas externas e trabalhe em direção às áreas do meio. Alise e vede a superfície.
- Quando trabalhar com materiais que sejam suscetíveis às condições climáticas, todo solo colocado deverá ter uma inclinação lateral de cerca de 6 por cento para evitar o acúmulo de água na superfície.

- Quando ocorrerem condições climáticas adversas, compacte cada camada trabalhando uma faixa da largura de um compactador de rolo único até que ela esteja totalmente compactada. Em seguida passe para a faixa seguinte, repetindo o processo e trabalhando através da camada até toda a área ter sido compactada. Certifique-se de alisar e vedar a superfície no final do dia para evitar nova penetração de água.
- Quando compactar uma base flexível, é vantajoso usar baixa amplitude com alta frequência se a base for adequadamente rígida. Use alta amplitude e frequência média a baixa quando a base estiver sendo compactada junto com a primeira camada.
- Usar uma sequência de compactação estática e vibratória – compactação vibratória primeiro, seguida pela estática – pode produzir os melhores resultados.

[MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA COMPACTAÇÃO]

A densidade tem sido o método tradicional para quantificar a compactação do solo no laboratório, e a densidade também tem sido o método histórico mais comum para ajustar e medir as exigências de compactação no campo. Testes de laboratório (como, por exemplo, o Proctor) determinam o teor de umidade no qual a densidade máxima pode ser obtida. As densidades desejadas no campo são especificadas como uma determinada porcentagem da densidade seca máxima do obtida no laboratório.

Geralmente, as densidades exigidas no campo serão de 5% do Teste Proctor Padrão para aterros e de até 100% do Teste Proctor Modificado para estruturas rodoviárias. Igualmente, o teor de umidade deve estar dentro de uma faixa do teor ideal de umidade determinado pelo laboratório.

O teste no campo de ponto a ponto tem sido exigido há muito tempo para assegurar que os

dois elementos importantes – densidade desejada e teor de umidade – sejam mantidos dentro das especificações durante toda a obra de uma construção em particular. Esses testes também podem indicar a efetividade de um equipamento de compactação e dos métodos de construção empregados. Recentemente, métodos de medição da compactação integrados com a máquina passaram a ser mais aceitos como um meio de determinar a qualidade da compactação no canteiro de obras.

Muitas autoridades agora estão exigindo o que é conhecido como uma “compactação inteligente”, que é o aumento dos sistemas de medição da compactação integrados com a máquina, com sistemas de mapeamento que integram as medições com suas localizações no canteiro de obras, bem como para fornecer dados para análises e documentações posteriores.

A EVOLUÇÃO DA HISTÓRIA DA MEDIÇÃO DA COMPACTAÇÃO



- Especificações do Controle do Processo/Método
 - Teste ponto a ponto
 - *Densímetro Troxler/Nuclear*
 - *Penetrômetros*
 - *Deflectômetros*
 - *Testes com Carga com Placa*
- Relativamente precisos
Tipicamente fazem amostras com menos de 1% da área de trabalho total

- Acelerômetro
 - Machine Drive Power (MDP)
- Indicadores em tempo real da rigidez ou da resistência à carga para o operador
Difícil de correlacionar com medições históricas ponto a ponto
Variabilidade de medição em certos tipos de solos ou de aplicações

- Acrescenta capacidades de mapeamento por satélite
- Aumenta a medição da compactação integrada com a máquina por medições correlativas e dados da máquina com a localização exata em que são feitas
- Oferece mapas detalhados para visualizar o trabalho completado
- Oferece dados para análises e documentações

As informações a seguir realçam alguns dos métodos mais comuns. Tenha em mente que cada método de teste mede as propriedades do solo diferentemente (por exemplo, densidade, resistência, etc.) e como tal as tentativas de fazer uma correlação entre os testes deverão ser feitas

Métodos de medição no campo (históricos) – Medições relacionadas com a Densidade do Solo: são utilizados dois métodos básicos para medir a densidade do solo no campo:

1. Meça a reação do solo a partículas radioativas com um dispositivo chamado Troxler ou “Densímetro nuclear”. Esses dispositivos tornaram-se o método mais comum de medição da densidade do solo no campo, mas eles têm a desvantagem de exigir uma licença para usar e monitoramentos e testes periódicos da fonte de radiação nuclear no dispositivo. Frequentemente são necessárias papelada e permissões para o transporte dos dispositivos.

O dispositivo oferece uma indicação do teor de umidade em uma profundidade de cerca de 50 mm (2 pol.) e densidade em uma profundidade de 300 mm (12 pol.) ou menos, pela emissão de radiação de nêutron e raios gama, respectivamente, no solo que está sendo testado. O teste é rápido e pode ser realizado sem perturbar o material. Os melhores resultados são obtidos em solos homogêneos.

Existem três procedimentos básicos de medição da densidade com um densímetro nuclear – transmissão direta, backscatter e uso do “método da lacuna de ar”.

O método da transmissão direta dá a melhor precisão, o menor erro de composição e o menor erro sobre a resistência da superfície. Pode ser usado para testar uma faixa de profundidades de 50-300 mm (2-12 pol.). O aspecto mais importante do método da transmissão direta é que o operador tem controle direto sobre a profundidade da medição.

O método backscatter elimina a necessidade de criar um orifício de acesso no solo compactado por que umidade repousa sobre a superfície. No entanto, a precisão é comprometida e existe a probabilidade de erros na composição. Este método funciona melhor em profundidades mais rasas, de 50-75 mm (2-3 pol.).

com um entendimento físico das diferenças. Além disso, a própria natureza do procedimento de teste ponto a ponto exige que você parta do princípio de que os resultados do teste do ponto são válidos para todas as áreas circunvizinhas não testadas ou para todo o canteiro de obras.



Um Troxler, ou gabarito de densidade nuclear

O método da lacuna de ar oferece um melhoramento no erro de composição e pode ser usado no modo direto ou backscatter. O dispositivo de teste é elevado acima da superfície a ser testada para reduzir o erro de composição, mas a precisão ainda não é igual à do método de transmissão direta.

Algumas limitações para o equipamento de teste nuclear são as precauções que devem ser observadas durante o manuseio de material radioativo, e o fato de que leituras falsas são obtidas algumas vezes a partir de solos ou materiais orgânicos com alto teor radioativo e/ou de sal. As vibrações no solo resultante de equipamentos de construção também podem ser uma fonte de erros nas medições.



O método do cone de areia tem precisão comprovada.

2. Escave e pese um volume de solo e meça o volume do buraco a partir do qual o solo foi escavado. A pesagem de uma amostra de solo é direta desde que haja uma balança de precisão. A medição do volume do buraco onde a amostra do solo foi escavada não é direta, mas foram desenvolvidos alguns procedimentos, que são usados com uma precisão razoável. A seguir a uma descrição de dois exemplos:

Método do Cone de Areia – O método do cone de areia é um procedimento com várias etapas, e é mais demorado que o método Troxler ou do gabarito de densidade nuclear, mas tem precisão comprovada. Algumas vezes ele é usado juntamente com o método nuclear para verificar a calibração do gabarito de densidade nuclear este método se concentra na medição do volume de areia necessário para preencher o vazio a partir do qual a amostra de solo foi removida. A areia flui facilmente para dentro do vazio e tem densidade consistente, o que significa que a areia não terá mudado significativamente de densidade quando for transferida de um recipiente para o vazio do solo.

Método do Balão de Água – O método do balão de água é também chamado de Washington Densometer Test. As três primeiras etapas do teste – escavação, pesagem e secagem de uma amostra – são iguais às realizadas com o método do cone de areia. Dessa maneira, é calculado o teor de umidade.

No entanto, em lugar do cone de areia é usado o Washington Densometer Test é usado para medir o volume do buraco escavado. O densímetro, um dispositivo cheio de fluido, é colocado sobre o buraco. Um balão ligado à placa da base é colocado no buraco. Uma válvula é aberta no lado do densímetro e o fluido calibrado é forçado para dentro do balão. Enquanto o balão enchendo, ele assume o formato do buraco. O densímetro é calibrado para que o dispositivo de teste possa ler o volume de fluido e, conseqüentemente, o volume do buraco.

A densidade (peso da umidade molhada) é encontrada dividindo-se o peso da amostra escavada pelo volume do buraco – igual ao método do cone de areia. O peso da umidade seca também pode ser calculado dividindo-se o peso da umidade molhada por um mais o teor de umidade.

As limitações do método do balão de água são o grande tempo necessário para obter resultados e o fato de que a precisão depende da capacidade do balão em se adaptar às irregularidades nos lados do buraco.



Um Dynamic Cone Penetrometer em uso.

Medições relacionadas com a Resistência do Solo e com a Dureza do Solo – A densidade do solo tem sido a medição histórica para a compactação do solo, tanto para estabelecer as exigências quanto para qualificar os resultados. No entanto, há uma tendência crescente em usar medições da compactação do solo mais diretamente, relacionadas com as exigências da engenharia, que são mais frequentemente voltadas à resistência do solo. Há várias medições da resistência, que são usadas no campo, algumas das quais (mas nem todas) serão descritas neste guia. As medidas da resistência usadas no campo são classificadas em três categorias básicas:

1. Resistência à Penetração no Solo –

A medição de penetração no solo mais comumente usada é um *Dynamic Cone Penetrometer (DCP)*. O teste é uma medição da força/energia ou da resistência ao cisalhamento/atrito necessária para penetrar um pequeno cone no solo com um martelo de peso fixo que golpeia a partir de uma distância conhecida. Esse dispositivo pode ser usado para estimar a chamada *California Bearing Ratio* e valores de posição em newtons por milímetro quadrado (libras por polegada quadrada) até uma profundidade de 1830 mm (72 pol.). O uso inadequado do martelo, ou a contagem incorreta do número de golpes desferidos pelo martelo e a mudança na profundidade por golpe (ou por uma série de golpes), fará com que a leitura das medições seja errônea.

O uso em solo rochoso também produz resultados questionáveis.

O cone comumente usado tem uma área de base de 20 mm (3/4 pol.) com um ângulo de 60 graus incluído na ponta. O cone é penetrado por um peso cadente que golpeia uma placa que então transfere força dinâmica para o cone, fazendo com que ele penetre no solo. Os dados registrados referem-se à distância de penetração por golpe. Em solos mais duros, vários golpes serão necessários para penetrar o cone e o número de golpes é registrado, juntamente com a distância.

O DCP tem a vantagem de medir a resistência do solo em maiores profundidades do que outros métodos. Um cone pode ser penetrado até uma profundidade de 1 m (39 pol.) ou mais, embora o atrito do solo no eixo do dispositivo de penetração do cone possa influenciar nas leituras – particularmente além de um metro de profundidade. O DCP não funciona em materiais muito duros, como o solo estabilizado com cal depois da cura. É fisicamente intenso e pode ser cansativo após seu uso repetido.

2. Reação do Solo a um Peso Cadente –

O princípio deste método é: os solos mais duros provocam mais repercussão quando um peso é derrubado na superfície. Um desses dispositivos é o *Light Falling Weight Deflectometer (LWD)*. Uma versão mais pesada é o *Falling Weight Deflectometer (FWD)*.

O *Light Falling Weight Deflectometer (LWD)* mede a dureza do solo ou o módulo elástico da superfície das camadas da construção por meio da queda de um peso fixo a partir de uma distância conhecida em uma placa da base equipada com acelerômetro(s) e outros sensores. Pela detecção da deflexão ou do movimento da placa da base, o módulo dinâmico de elasticidade do solo é calculado em megapascals (MPa) até uma profundidade de cerca de 150 mm (6 pol.). O uso exige que a superfície do solo seja lisa e plana. Os testes mostram que os deflectômetros de diferentes fabricantes produzem resultados diferentes para a mesma condição do solo.

O *Falling Weight Deflectometer (FWD)* é uma versão maior do dispositivo manual comentado anteriormente.

O FWD é montado em um trailer e não é fácil de ser transportado, mas usa os mesmos princípios para golpear uma placa maior, criando uma zona de influência maior e medindo em maiores profundidades. Enquanto o LWD pode medir até uma profundidade de 150 mm (16 pol.), a versão FWD maior é capaz de uma energia que pode facilmente transmitir 1 m (39 pol.) no solo, parecendo mais com o impacto criado por um compactador vibratório.



Um deflectômetro com a queda de um peso leve

3. Resistência do Solo a um Peso Estático –

Este método é similar aos testes com um peso cadente porque mede a dureza do solo desde a superfície, mas é diferente porque usa uma pressão estática e não uma força dinâmica. Como o propósito a compactação do solo é produzir um solo rígido, você precisa usar muita força para flexionar efetivamente o solo com uma pressão estática. Medir a dureza do solo exige uma placa com um tamanho aproximadamente igual à profundidade desejada da medição – isso significa que uma placa com mais ou menos 30 cm (12 pol.) é necessária e não uma placa na faixa de um centímetro ou de uma polegada.

Teste da Carga na Placa – Vários dispositivos de teste de carga na placa são disponíveis com vários diâmetros da placa. Quanto maior o diâmetro da placa, mas força será necessária para criar o movimento descendente de medição da placa no solo. Quanto a placa recebe a carga, a deflexão resultantes de uma determinada força é medida e plotada. Isso dá o módulo (dureza) do solo e indica a capacidade de suporte de carga do solo. Testes de carga com placas grandes exigem vários milhares de libras de força para movimentar a placa – tipicamente com diâmetro de 300 mm (112 pol.) – para dentro do solo. Frequentemente um equipamento de construção disponível é usado como a fonte da carga. As medições do teste de carga na placa são usadas diretamente no projeto da espessura dos pavimentos.



Preparação de um teste de carga na placa



Um rolo de prova

Outras Medições no Campo – Finalmente, são usados outros métodos de medição no campo que medem a compactação, mas não se enquadram especificamente nas categorias mencionadas anteriormente. Esses métodos têm sido usados há muitas décadas, sozinhos ou juntamente com outros testes para avaliar ainda mais a capacidade de um solo em suportar uma carga. Muito ainda estão em uso hoje.

O rolo de prova não é uma medição direta da resistência do solo como alguns dos métodos descritos anteriormente, mas pode ser uma medição mais direta da qualidade da compactação quando o objetivo da compactação é simplesmente aumentar a dureza do solo para estruturas tais como estradas e estacionamentos. Se a base do solo não apresentar sulcos sob o peso de um rolo de prova carregado, então ele não deverá apresentar deflexão em condições de tráfego, ou seja, desde que a estrada seja bem drenada e permaneça estável durante muito tempo.

De todos os procedimentos tradicionais para o teste da compactação, o rolo de prova é o método que oferece o maior tamanho da amostra a ser testada, porque ele testa economicamente uma superfície muito maior do que os testes feitos em um único local conseguem.

1. Rolo de prova – O uso de rolos de prova tem sido comumente utilizado na América do Norte como um método alternativo ao teste em um único local, para identificar diretamente como a superfície compactada vai reagir a uma carga aplicada. O teste pode identificar pontos mais macios e assegurar uma habilidade uniforme em suportar uma carga. O processo envolve rolar uma massa pesada sobre rodas sobre uma superfície compactada e medir a profundidade dos sulcos ou da deflexão. Um excesso de sulcos revela uma compactação inadequada.

2. Forno Portátil para a Umidade do Solo –

O forno portátil para a umidade do solo é um dispositivo usado para oferecer uma medida do teor de umidade do solo, para correlacionar com as medições de suporte de carga feitas pelos outros dispositivos. As medições dos outros dispositivos mencionados aqui não são válidas sem que se conheça o teor de umidade do solo.



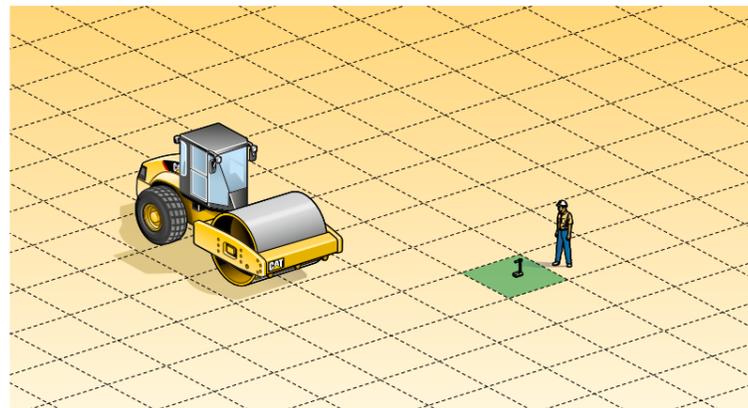
Um forno portátil da umidade do solo

Métodos de Medição da Compactação Integrados à Máquina

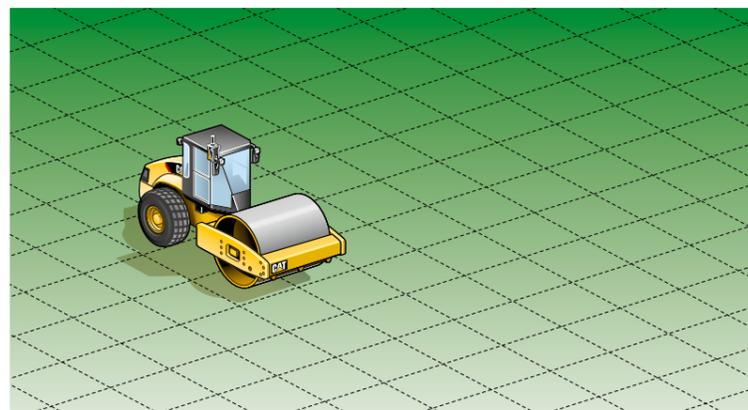
– Tradicionalmente, a compactação tem sido grandemente um exercício de tentativas e erros. Os operadores, na falta de dados confiáveis sobre o estado do solo, confiam em sua experiência e em seu bom senso para julgar quando a compactação está completa. Ou uma especificação de um método oferece um procedimento determinado pelos engenheiros para produzir resultados satisfatórios, se seguidos apropriadamente. O solo compactado é então testado em um local determinado para avaliação de uma área previamente determinada. Quaisquer resultados dos testes que sejam considerados insuficientes resultam em uma nova compactação para aquela área. Alternativamente a esse teste em um ponto específico, algumas áreas utilizam rolos de prova, tipicamente um reboque que carrega um grande peso ou um caminhão basculante. Como foi comentado anteriormente, o rolo de prova é rebocado sobre o local e a profundidade dos sulcos formados pelas rodas indica onde a compactação está inadequada.

Independentemente do método de verificação da qualidade da compactação, os operadores continuam, essencialmente, tentando adivinhar a qualidade de seu trabalho durante a progressão do projeto. E o método de verificar a qualidade usando checagens em um ponto determinado e os rolos de prova testam uma área proporcionalmente pequena de uma área total muito maior que foi compactada. Isso deixa aberta a possibilidade de que muitas áreas podem não ficar adequadamente compactadas, um problema que pode ser tornar muito dispendioso se causar uma falha futura do edifício ou da estrada.

Os sistemas de medição da compactação integrados à máquina muda tudo isso porque fornecem aos operadores dados sobre o estado da compactação. Os operadores treinados podem usar a medição da compactação integrada à máquina para determinar quando a compactação atende às especificações, ou quando uma área pode ter problemas de umidade. A medição da compactação integrada à máquina pode alertar os operadores sobre a presença de objetos enterrados que podem afetar a qualidade da compactação, como, por exemplo, pedaços de argila, troncos de árvore ou grandes rochas.



Os sistemas de medição tradicionais analisam apenas uma proporção pequena da área compactada.



A medição da compactação integrada à máquina analisa toda a área de compactação.



Os sistemas de medição da compactação integrados à máquina oferecem uma provisão ou um indício da dureza do solo.

O que a tecnologia da compactação integrada à máquina mede? É importante entender que esses sistemas não medem a densidade do solo, embora o termo densidade seja frequentemente usado quando se fala em resultados. Devido à variabilidade do trabalho de compactação, eles não medem qualquer coisa diretamente. O que eles fazem é medir uma quantidade de fatores que oferecem uma previsão ou indicação sobre a dureza do solo. Como foi mencionado anteriormente, dureza é a habilidade de certo formato e composição do solo em resistir à deformação ou deflexão sob a influência de uma carga. É uma

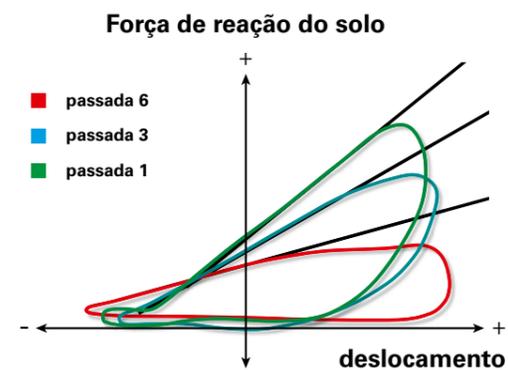
indicação melhor da capacidade de suporte de carga do que a densidade do material, porque alguns materiais densos podem ser quebradiços em condições de carga. O material precisa ser flexível, mas não quebrar.

Dois tipos diferentes de tecnologias de medição são disponíveis: sistemas baseado no acelerômetro e sistemas baseados na energia. Eles efetuam medições de maneiras completamente diferentes e, naturalmente, o que eles medem também é diferente.

Medição baseada no Acelerômetro – Os sistemas baseados no acelerômetro são oferecidos pela maioria dos fabricantes. Eles utilizam um acelerômetro montado no rolo para medir a reação do solo ao ser golpeado pelo rolo vibratório. Dois métodos diferentes são empregados para fazer essas medições.

Um método é chamado de método do Deslocamento da Força. Ele usa um acelerômetro montado no eixo do rolo para medir o deslocamento do rolo. Ao medir a aceleração do rolo e conhecendo as características do rolo, do vibrador e do peso total e da distribuição da máquina, é feito um cálculo da força necessária para obter um determinado deslocamento. Quanto mais duro for o solo, mais alta será a força exigida para fazer com que o rolo se mova no solo em determinada profundidade; ou, uma força constante fará com que o rolo tenha um movimento descendente no solo, à medida que ele ficar mais duro. Como a área de contato do rolo varia com o impacto no solo, este método é uma estimativa e não uma medição exata.

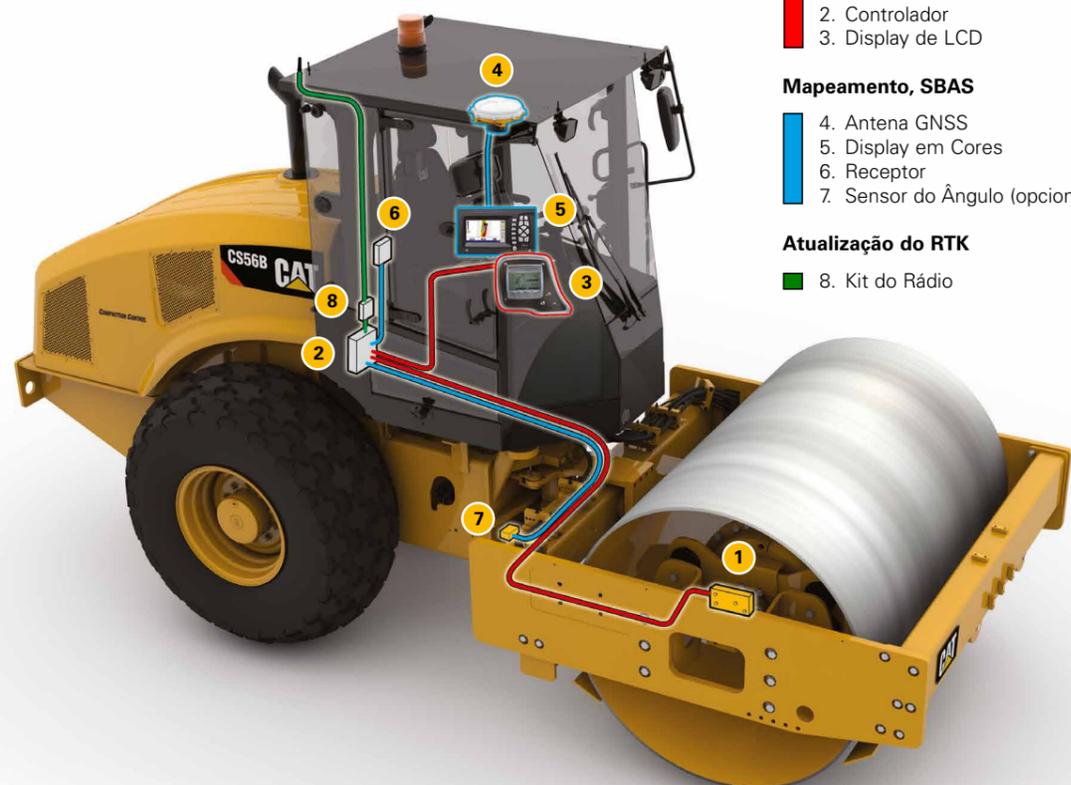
DESLOCAMENTO DA FORÇA



Quando mais íngreme for a inclinação da curva, mais duro será o solo.



Os acelerômetros medem a reação do solo que é golpeado pelo rolo vibratório.



Sistema de Medição

- 1. Acelerômetro
- 2. Controlador
- 3. Display de LCD

Mapeamento, SBAS

- 4. Antena GNSS
- 5. Display em Cores
- 6. Receptor
- 7. Sensor do Ângulo (opcional)

Atualização do RTK

- 8. Kit do Rádio

COMPACTION METER VALUE (CMV)

O segundo método é chamado de *Compaction Meter Value (CMV)*. Inventado pela empresa sueca Geodynamik nos anos setenta, este método é atualmente usado pela Caterpillar e também por vários outros fabricantes. Em vez de tentar calcular o deslocamento do rolo, o acelerômetro montado no rolo mede a reação ou a aceleração da força G na frequência vibratória e também mede as forças G em duas vezes a frequência vibratória do rolo (esse fenômeno também é chamado como “primeira frequência harmônica”). Colocando os dois valores em uma fórmula, é calculado um valor de compactação que é uma indicação da dureza do solo, conhecida como *Compaction Meter Value (CVM)*.

Em outras palavras, o princípio básico da medição é a concentração na mudança da reação dinâmica do compactador à medida que o solo abaixo dele vai ficando mais duro. Mais ou menos como um deflectômetro com um peso cadente, o sistema baseado no acelerômetro mede quanto o rolo do compactador está “saltando” acima do solo. Os solos não compactados tendem a absorver a energia vibratória, mas à medida que o solo fica mais duro sob o compactador com passadas adicionais, a energia começa a ser refletida da superfície e o rolo tende a ressaltar mais rapidamente a partir da força vibratória. A medição desse ressalto aumentado pode ser traduzida em um indicador da compactação.

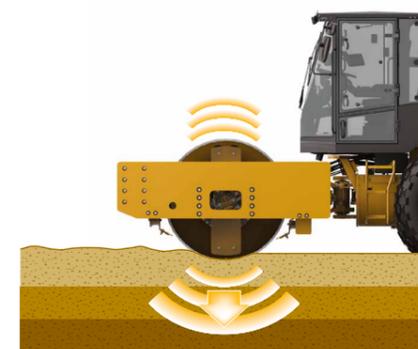
À medida que o solo se torna mais duro, os ressaltos passam a ser mais pronunciados. Quando a frequência ressonante do solo se iguala com a frequência vibratória da máquina, o solo atingiu sua dureza máxima e não pode mais aceitar a energia de compactação do compactador. Nesse ponto, a máquina vai parar de saltar. Independentemente do método de medição empregado, os sistemas baseados no acelerômetro monitoram quanto falta para que a máquina deixe de saltar. Essa medição é chamada de *Resonance Meter Value (RMV)* e é usada para medir a validade da medição da dureza – quanto mais perto a máquina estiver do ponto em que deixará de saltar, menos válida será a medição.

Os sistemas baseados no acelerômetro medem um volume profundo do solo, uma profundidade de cerca de 1-1,2 m (36-48 pol.), dependendo da composição do solo e das características do compactador. É feita uma média dessa leitura, assim não é possível isolar indicações precisas da dureza em qualquer profundidade. Mas a leitura profunda é excelente para encontrar objetos enterrados – na sub-base, por exemplo – que poderiam afetar a qualidade da obra e o desempenho no longo prazo da estrutura.

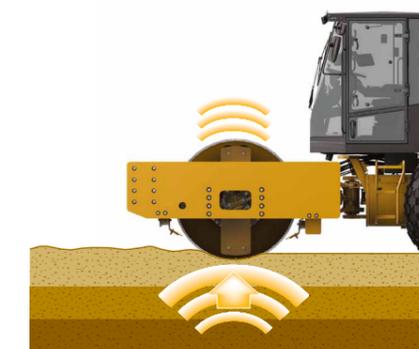
Um dos pontos negativos dos sistemas baseados no acelerômetro é que o rolo deve estar vibrando para fazer as medições. Isso faz com que os sistemas baseados no acelerômetro sejam inadequados para uso em solos coesivos e semicoesivos devido ao efeito amortecedor desses materiais. Por esse motivo, os sistemas baseados no acelerômetro são ineficazes quando usados em compactadores com rolos de pata ou em aplicações quando é utilizada somente a compactação estática, pois as medições não podem ser feitas sem vibração.

Outro ponto negativo dos sistemas baseados no acelerômetro é a profundidade da medida. Conforme foi descrito acima, dependendo do tipo do solo e da dureza dos materiais que estão sendo trabalhados, a profundidade da medição pode ser de até 1,2 m (4 pés) e claramente em uma profundidade muito maior e mais espessa do que qualquer uma das camadas que estão sendo compactadas. Assim, você está obtendo um valor médio da dureza em uma grande quantidade de camadas, ou também está incluindo a dureza do material da sub-base.

CMV - COMO É QUE ELE FUNCIONA?

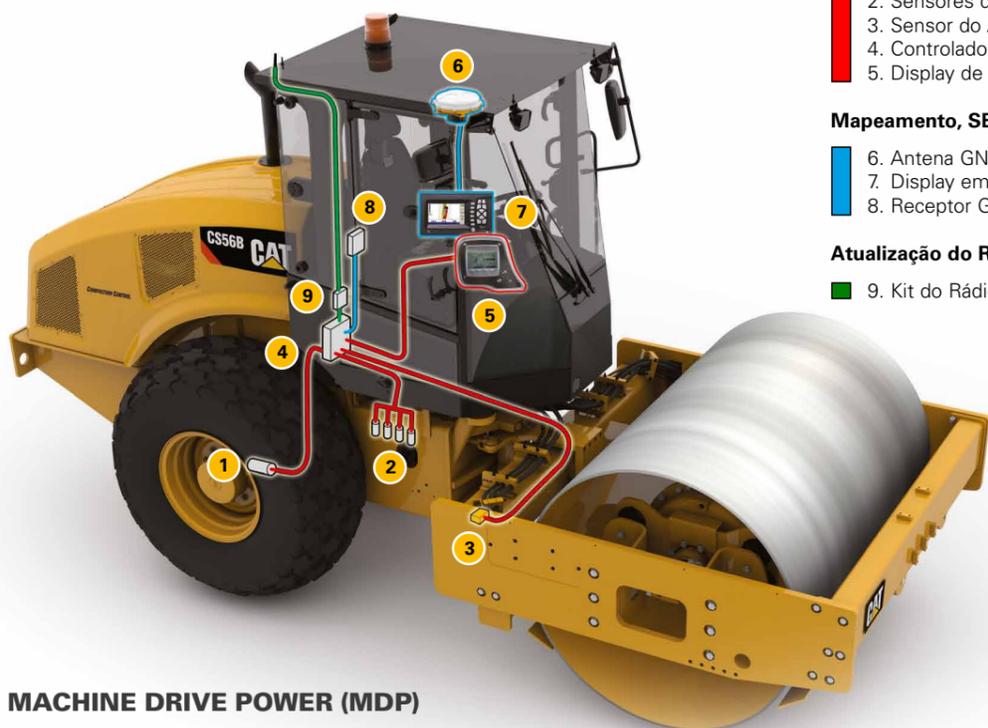


A energia vibratória é transmitida ao solo pelo rolo vibratório.



O material vibra em reação, que é detectada e medida pelo acelerômetro.

O CMV calcula uma indicação teórica da dureza do solo.



Sistema de Medição

- 1. Sensor da Velocidade
- 2. Sensores da Pressão
- 3. Sensor do Ângulo
- 4. Controlador
- 5. Display de LCD

Mapeamento, SBAS

- 6. Antena GNSS
- 7. Display em Cores
- 8. Receptor GNSS

Atualização do RTK

- 9. Kit do Rádio

MACHINE DRIVE POWER (MDP)

Medição Baseada na Energia – A outra tecnologia de medição disponível hoje mede a quantidade da resistência ao rolamento que o compactador do solo encontra quando rola sobre o mesmo. Ela funciona com base no princípio de que é necessária mais energia para superar a resistência ao rolamento de solos soltos do que de solos densos. Com passadas adicionais, o solo fica mais compacto, aumentando a dureza e a resistência de suporte de carga. À medida que o material oferece, gradativamente, menos resistência, o compactador vai precisar de menos energia para se deslocar sobre a área compactada. A resistência ao rolamento, e a quantidade de energia necessária para superá-lo podem, portanto ser correlacionadas com a dureza do material. Somente a Caterpillar oferece atualmente a tecnologia de medição da compactação baseada na energia, chamada de Machine Drive Power (MDP).

A medição baseada na energia tem muitas vantagens. O uso da Machine Drive Power é similar ao rolo da prova: quanto menos uma roda afundar no solo, menos energia será necessária para movimentar a roda sobre o solo. Assim sendo, existe uma forte correção entre oMDP e a profundidade dos sulcos resultantes dos testes com o rolo da prova. Há também uma alta correlação

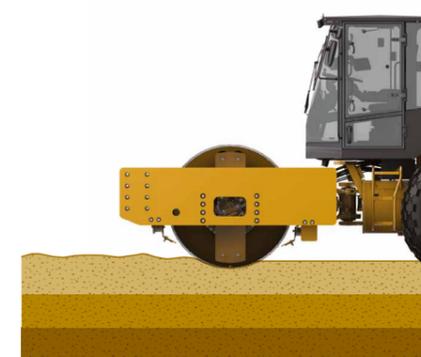
entre oMDP e a dureza do solo, mas talvez a maior vantagem da medição baseada na energia seja o fato de que ela oferece um cálculo mais direto e uma indicação da capacidade do solo em suportar uma carga. Se o solo for suficientemente duro para minimizar a energia transferida desde a máquina de compactação, então ele será suficientemente forte para atingir as exigências da compactação do solo. Esse relacionamento, que pode ser medido com compactadores vibratórios e estáticos, é o motivo subjacente para se compactar os solos.

Como o método de medição da compactação baseado na energia não exige a medição da energia vibratória no cálculo da dureza do solo, ele funciona bem em todos os tipos de solos, inclusive solos coesivos e semicoesivos. Ele também funciona bem tanto em um compactador de rolo com patas quanto em um compactador de rolo liso. Ele funciona quando o sistema vibratório está ativo ou inativo. Por esses motivos, os sistemas baseados na energia são muito mais versáteis e podem ser usados para mais aplicações do que os sistemas baseados no acelerômetro.

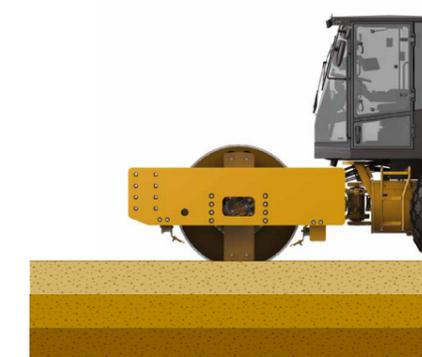
Além disso, os sistemas baseados na energia não medem tão profundamente quando os sistemas baseados no acelerômetro, cerca de 30-60 cm (12-24 pol.) de profundidade, dependendo da composição do solo e das características do compactador. Essa profundidade é mais perto da profundidade de uma camada típica, assim ele está medindo o solo que está compactando e não uma média de algumas camadas e/ou o material da sub-base abaixo da camada que está sendo compactada. Essa profundidade também é mais comparável à profundidade de teste de dispositivos de testes portáteis, o que permite que os empreiteiros as correlacionem com mais confiança.

Existem algumas desvantagens nos sistemas baseados na energia. Eles não medem tão profundamente, assim eles, algumas vezes, não são tão apropriados para a identificação de objetos enterrados ou áreas de compactação inadequada na sub-base quanto os sistemas baseados no acelerômetro. Além disso, quando o operador estiver operando um sistema baseado na energia com o sistema vibratório acionado, não poderá receber dados de advertência informando que a máquina está prestes a parar de saltar.

MDP - COMO É QUE FUNCIONA?



O deslocamento sobre solo com baixa sustentação exige mais energia.



O deslocamento sobre solo duro exige menos energia.

A MDP mede a energia necessária para superar a resistência ao rolamento, uma medição mais tangível e direta da dureza do solo.

Fatores que Influenciam os Resultados da Medição da Compactação Integrada à Máquina

– Conforme mencionado anteriormente, a compactação vibratória é um processo complexo, no qual muitos fatores influenciam a força de compactação geral necessária para que sejam alcançadas as metas de compactação/densidade. Com a tecnologia de medição da compactação integrada à máquina os operadores produzem dados em 100% da superfície compactada, em comparação com menos de 1% usando dispositivos/métodos de testes portáteis tradicionais. Isso dá ao operador a habilidade de localizar áreas com compactação insuficiente ou pontos duros e tomar providências para remediar esses problemas, o que leva a um resultado final mais homogêneo e maior qualidade.

Coerentemente, há um grande número de fatores que influenciam os resultados da medição da compactação de sistemas integrados à máquina e sua correlação com dados de testes de campo conhecidos, independentemente da tecnologia usada. O impacto de cada fator deve ser entendido para que a tecnologia de medição da compactação integrada à máquina seja usada no máximo de suas capacidades. Conhecer como cada fator influencia a medição ajuda o empreiteiro a realizar uma medição consistente com a menor quantidade de variação. Para isso, é benéfico ter um amplo conhecimento de três fatores primários:

- Preparação adequada do local do teste
- Método do teste e coleta de dados
- Parâmetros da máquina

Preparação do Local do Teste

A preparação adequada do local do teste e um perfeito controle das condições do material do teste são da maior importância. A falha em assegurar a homogeneidade do material e a uniformidade da compactação, tanto nas condições da sub-base quando das matérias primas, pode impactar diretamente a qualidade e a precisão dos dados do teste.

1. Construção da Base ou da Sub-base Usando Materiais Múltiplos –

Frequentemente, uma grande variedade de materiais é usada na construção da base ou da sub-base. Por exemplo, uma base dura, de pedra britada, pode estar em contato com uma base construída de argila relativamente macia. Quando cobertos com uma camada espessa de cascalho – talvez 1 m (39 pol.) – as medições com o sistema CMV obtidas em uma base rochosa serão substancialmente mais altas que as medidas em uma base argilosa. O teste da densidade da superfície com um dispositivo de teste portátil resultaria em valores praticamente idênticos, porque os dispositivos não podem medir em profundidades maiores que o cascalho da superfície. A dureza da base tem um profundo efeito nas medições baseadas no acelerômetro, mas também podem ter um efeito limitado nas medições baseadas na energia.

Uma base ou sub-base mais dura faz com que o material do aterro acima dela seja compactado mais facilmente e com um grau mais alto. Por causa disso, a Caterpillar recomenda que o nível mais baixo de escavação seja mapeado ou testado com rolo para determinar qual é sua condição antes que novo material de aterro seja trazido, espalhado e compactado. Pode ser necessário remediar algumas áreas que são substancialmente mais duras ou mais macias que a maioria do canteiro



Preparação de um local de teste

de obra. A uniformidade da compactação é o objetivo e isso exige uma base ou sub-base uniformemente compactada, com uma dureza uniforme de suporte de carga.

2. Tipo de Solo – O tipo de solo que está sendo compactado tem uma grande influência nos resultados obtidos com os sistemas CMV ou MDP.

O motivo disso é que a *spring rate* e a *damping rate* são muito diferentes para solos finos e solos granulares. Isso afeta a forma pela qual o solo reage à compactação vibratória e, conseqüentemente, afeta como a medição é feita.

3. Teor de Umidade – Qualquer compactação para teste ou produção deverá ser realizada sobre condições conhecidas e aceitáveis do solo. Não é aconselhável testar sobre um material “esponjoso” ou saturado com água. O teor de umidade do solo é uma variável com enorme impacto nos resultados da compactação, e é regularmente encontrado no canteiro de obra. É também uma causa importante para a variação de testes com CMV para o mesmo tipo de solo. O empreiteiro exerce algum controle sobre esse fator e pode acrescentar água com um caminhão pipa e misturá-la no material, ou revolver o solo e secá-lo. Para a compactação mais eficiente, todo solo tem um teor ideal de umidade. No caso de solos arenosos, ele varia de 4% a 12% e para solos argilosos ele varia de 9% a 22%.



As medições a partir de um sistema de medição da compactação integrado à máquina – indicações da dureza do solo – são afetadas pela umidade no solo por causa da forma com que ela preenche os vazios entre as partículas do solo. Se houver mais ar nos vazios, a compressibilidade do ar reduz a leitura. Se houver mais água, sua incompressibilidade resultará em uma leitura mais alta. Em algum ponto, um determinado teor de umidade esta presente e age como um lubrificante entre as partículas, permitindo que elas deslizem umas sobre as outras. Isso, novamente, vai reduzir o valor do sistema CMV.

Um benefício de usar a tecnologia de medição da compactação integrada à máquina é que o

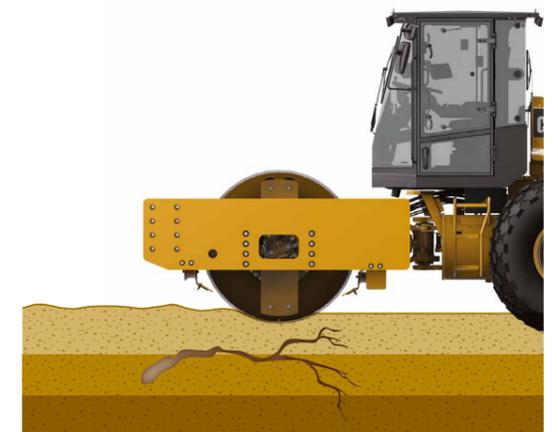
teor de umidade de um solo pode ser verificado indiretamente pela maneira com a qual o solo está sendo compactado. Por exemplo, um compactador passando sobre solos granulares precisará fazer mais passadas para alcançar o valor desejado, à medida que o solo seca: quanto mais seco o solo, mais passadas serão necessárias. O operador pode verificar isso visualmente na tela do display, e pode pedir para que o caminhão de água molhe áreas secas específicas. Em solos molhados, a força de compactação pode fazer com que a água migre desde camadas mais baixas para camadas mais altas, resultando em leituras diminuídas. O operador pode pedir para que uma máquina abra o solo, permitindo a evaporação do excesso de umidade.

4. Objetos Ocultos Enterrados no Solo

– Durante a compactação do que parece ser uma camada uniforme de material, às vezes a medição da compactação integrada na máquina em uma área pequena será substancialmente mais alta ou mais baixa que a da área adjacente. A primeira resposta pode ser verificar a área usando um tipo de instrumento de leitura da superfície, como um medidor da densidade nuclear ou um deflectômetro com um peso leve. Esse tipo de verificação raramente produzirá a mesma variação da medição quanto uma medição integrada, porque esses tipos de dispositivos não medem na mesma profundidade.

Uma causa provável para uma leitura alta da medição da compactação integrada à máquina poderia ser uma rocha grande ou um pedaço de concreto enterrado no solo, talvez a alguns centímetros abaixo da superfície. Uma leitura baixa localizada poderia ser devida a um pedaço grande de argila ou pneus enterrados no agregado granular. As variações nas medições de compactação integrada são reais, mas exigem a escavação da área para determinar o tipo de objeto que está enterrado. Isso pode não ser prático.

Uma sonda usando uma haste comprida enfiada no solo ou um penetrômetro com um cone dinâmico pode dar alguma informação sobre a natureza da anomalia, sem que seja preciso escavar o solo. Uma decisão deve ser tomada se a variação causar problemas com a superfície da estrada acabada durante seu uso posterior. A variação na resistência de suporte da carga (dureza) do solo pode causar stress no pavimento, resultando em um ciclo de vida encurtado.



ADVERTÊNCIA: Quando estiver trabalhando em locais onde exista a possibilidade da existência de munições não explodidas enterradas abaixo da superfície, recomenda-se que seja usado um detector de metal antes da escavação e da compactação.

Método do Teste e Coleta de Dados

1. Método de Correlação Com Um Campo

Conhecido – Os empreiteiros que não conhecem os sistemas de medição da compactação integrados à máquina naturalmente querem relacionar os dados e as medições a uma metodologia de testes da compactação no campo. Os testes Troxler de densidade (nuclear) e da densidade pelo cone de areia têm sido padrões no setor há anos e mostram alguma correlação, mas eles não medem as mesmas propriedades do solo nem nas mesmas profundidades que os sistemas de medição integrados à máquina medem.

O método de teste da compactação no campo utilizado pode impactar diretamente o nível de correlação com o valor de medição da compactação integrada à máquina. O volume efetivo do solo medido pela tecnologia de medição da compactação integrada na máquina (tanto o CMV quando a MDP) é substancialmente maior que o de um método de medição típico realizado no campo. Nenhum dos dispositivos de testes da compactação feitos no campo mede na mesma profundidade, no mesmo volume de solo nem, necessariamente, as mesmas propriedades do solo.

Devido à portabilidade e à relativa facilidade de uso, os métodos a seguir são comumente usados nos testes de campo:

- Penetrômetro de cone dinâmico – mede a uma profundidade maior, mas está indiretamente medindo a resistência ao cisalhamento e o atrito do solo.
- Deflectômetro com peso leve cadente – tem um volume efetivo de material testado de cerca de 1% do que um sistema integrado à máquina mediria. Como tal, qualquer desconformidade dos materiais testados seria exacerbada e ficaria ainda mais pronunciada pela diferença no volume do material testado.

As correlações entre os dados de dispositivos de medição e sistemas de medição integrados com a máquina são variáveis, dependendo de quais são os testes e de quantos testes são realizados. Quanto tentar correlacionar os dados de um teste integrado à máquina com um teste de campo conhecido, as relações mais satisfatórias entre os dados resultam com o uso de uma grande placa de teste de carga ou com um deflectômetro com um peso cadente.

A última coisa que deve ser lembrada quando se utiliza uma tecnologia de medição da compactação integrada à máquina é que o que você está medindo – uma indicação da dureza do solo – está mudando enquanto você a mede.

Como resultado, você não pode voltar e fazer a mesma leitura que você obteve com uma passada anterior. Isso pode resultar em um problema para as agências que tentam verificar os valores de medição da compactação (CMV ou MDP) com algum outro teste de campo conhecido realizado no campo.

Testes no campo após a compactação, feitos com dispositivos portáteis, podem ser repetidos porque não são intrusos e não perturbam o solo. Uma máquina equipada com um sistema de medição de compactação integrado altera o solo em cada passada devido ao seu peso. Um teste com carga placa é um teste que tem um efeito similar no solo enquanto a estrutura do solo é mudada durante a medição.

Os valores de medição da compactação integrada à máquina foram mais repetíveis à medida que o solo se aproxima de seu estado final de compactação máxima. Nesse momento, haverá pouca mudança nos resultados de medição da compactação entre as passadas. No entanto, se a estrutura do solo for um tanto frágil, os valores da compactação oscilarão para cima e para baixo porque a estrutura do solo se acumula até um determinado nível, então desmorona na

passada seguinte. Esse efeito tem o nome de “descompactação” e ocorre frequentemente em alguns tipos de solo granular.

2. Quantidade de Dados Registrados do

Teste – Uma faixa estreita ou um número limitado de medições pode também impactar o nível de correlação vista com a tecnologia de medição da compactação integrada à máquina. Recomenda-se que você utilize uma gama bem desenvolvida de resultados do teste de compactação no campo para comparar com os resultados integrados e evitar correlações baseadas em um único ponto, que não oferecem informações suficientes para que possam ser interpretadas apropriadamente.

3. Coleta de Dados –

A incerteza na comparação espacial dos resultados do teste de campo com os valores da medição da compactação integrada à máquina pode causar variação e uma correlação inadequada. Recomenda-se tomar um cuidado especial em comparar os pontos dos dados relativos ou utilizar um compactador com capacidade de mapeamento GNSS/coleta de dados para associar detalhes da posição no local do teste para correlacionar apropriadamente com os dados do teste no campo.

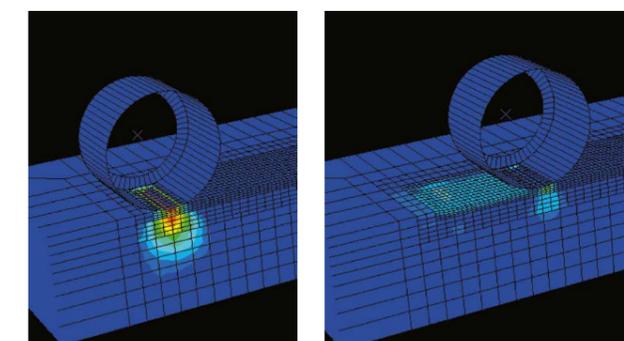
Parâmetros da Máquina

É de conhecimento geral, a partir do ponto de vista do desenvolvimento – bem como da experiência no campo, que a tecnologia da medição da compactação integrada à máquina é sensível a certos parâmetros de operação da máquina. Entender o que o sistema está medindo facilita ver como o uso inadequado de alguns desses fatores pode causar dados/resultados errôneos.

- 1. **Amplitude** – Se o rolo está em amplitude alta, o efeito da vibração do rolo é transmitido no solo. A profundidade da vibração muda a medição da compactação integrada à máquina porque a quantidade de solo que está sendo medido é maior. Além disso, aumenta a probabilidade de que o solo seja de uma estrutura e tipo diferentes em uma profundidade maior.

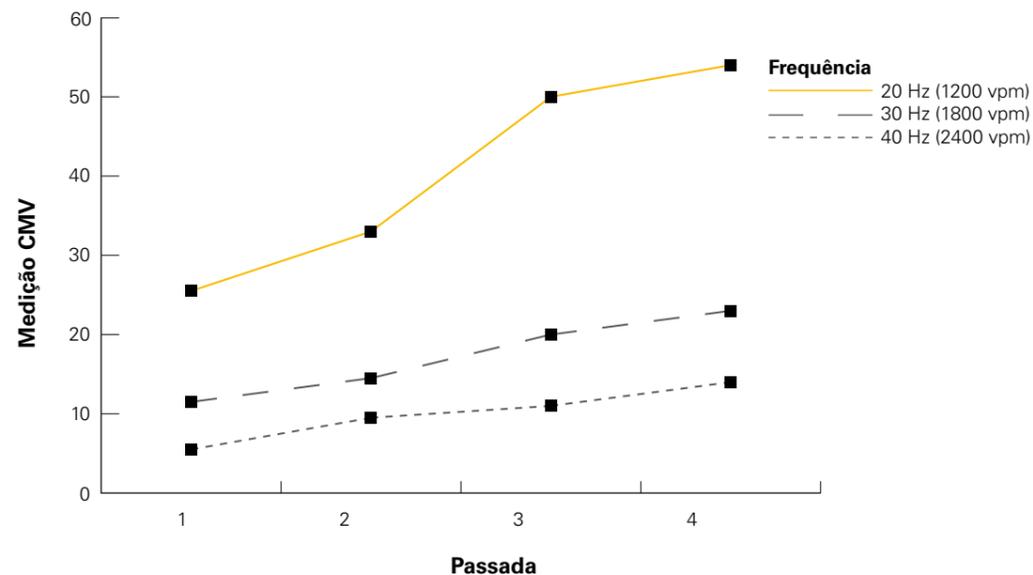
Se você estiver à procura de informações sobre a variabilidade de solos profundos,

deverá ser usada uma amplitude alta. Se estiver interessado apenas nas camadas mais superficiais, é recomendada uma amplitude baixa. Mesmo em amplitude baixa a profundidade de medição do solo pode ser uma medida ou mais para os resultados do CMV.



Alta amplitude é transmitida mais profundamente no solo.





2. Frequência – Cat Compaction Control com CMV usa uma relação da frequência vibratória do rolo e uma medição da reação da frequência do solo de volta ao rolo em duas vezes a frequência do rolo para calcular o valor da compactação (CMV). A mudança do ajuste da frequência vibratória do compactador do solo mudará, subsequentemente, a medição resultante, mesmo se a dureza do solo permanecerá a mesma. Isso ocorre porque em um solo de uma determinada dureza a leitura da medição do CMV tenderá a ser mais alto se medida em baixa frequência, e será mais baixa se medida em alta frequência. Os motivos são complexos, e estão relacionados com a relação da frequência natural do solo com a frequência do rolo vibratório.

O gráfico ilustra como a mudança da frequência pode afetar a medição CMV. Se todos os outros parâmetros da máquina e do solo foram os mesmos (por exemplo, velocidade de deslocamento, amplitude, tipo de solo, etc.), haverá uma diferença significativa entre as CMVs medidas para cada ajuste de frequência. A frequência que você usa vai afetar a medição CMV. Isso acontece independentemente da dureza do solo.

3. Velocidade de Deslocamento –

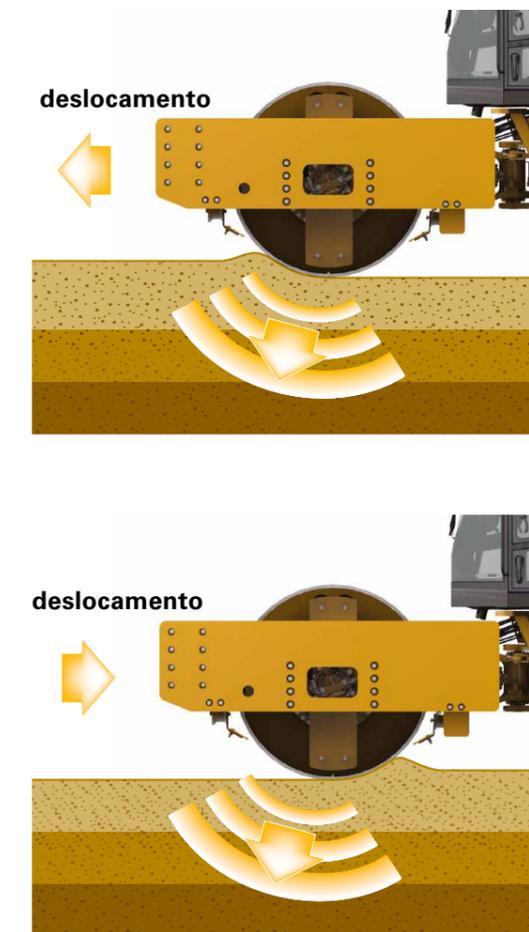
Os resultados da medição da compactação integrada à máquina são afetados, em certa medida, pela velocidade de deslocamento. Geralmente, velocidades mais lentas permitem que o rolo vibratório tenha mais contato com o solo, formando a dureza do solo mais cedo e em um nível mais profundo, resultando em menos passadas e menos tempo para atingir

as exigências da compactação. Os dados sugerem que uma velocidade mais rápida de deslocamento geralmente reduz os resultados de CMV, mas também pode aumentar os resultados de MDP. É difícil quantificar precisamente quanto, porque variações no tipo do solo, teor de água e outros fatores são prejudiciais durante o teste.

Quando são necessárias passadas múltiplas para que sejam alcançados os níveis finais da compactação (indicadas pela dureza do solo), o método mais eficiente é usar uma velocidade lenta de deslocamento e deixar o vibrador trabalhar o solo por baixo do rolo a velocidade mais lenta permite que o rolo vibratório tenha um espaçamento menor entre os impactos e mais golpes por distância percorrida – e exigirá menos passadas – resultando em menos tempo para alcançar as exigências da compactação.

Há também eficiências de combustível: duas passadas em baixa velocidade consomem menos combustível que seis passadas em alta velocidade. Uma regra básica geral: siga lentamente para compactar mais depressa e maximizar a eficiência, mas não tão lentamente que possa ocorrer uma descompactação. Com a tecnologia da medição da compactação integrada à máquina é recomendável manter uma velocidade adequada e constante de cerca de 1-2,5 km/h (0,62-1,5 mph) em solos rochosos e argilosos, e 2-5 km/h (1,2-3,1 mph) em solo arenoso e pedregoso. A característica de Automatic Speed Control nos compactadores da Série B Cat pode ser utilizada para ajudar com esse fator.

DIREÇÃO DE DESLOCAMENTO



4. Direção de Deslocamento – A direção de deslocamento, para frente ou para trás, tem um efeito no valor dos dados registrados da medição da compactação integrada à máquina para uma determinada dureza do solo. A quantidade de variação entre as medições com deslocamento para frente e para trás tipicamente varia de 5% a 20% com variações mais altas em solos extremamente macios.

Os resultados de medição da compactação integrada à máquina diferem dependendo da direção de deslocamento porque a rotação do peso excêntrico dentro do rolo ou acrescenta ou subtrai a partir do torque líquido aplicado ao rolo quando ele está girando sobre o solo (também devido ao equilíbrio do peso, das rodas à frente e atrás do rolo, e outros fatores). Esse torque influencia a direção da vibração efetiva no solo e faz com que o rolo sinta mais na direção da região já compactada ou na direção da área mais macia que ainda será compactada.

5. Estado Vibratório – Um sistema de vibração ativo também pode afetar os valores de medição da compactação integrada à máquina. O impacto pode ou não ser significativo, dependendo do material. Para os dados do teste, tecnologias que permitem que você meça o sistema vibratório produzem resultados mais confiáveis porque já menos variáveis que possam influenciar a medição. Tecnologias baseadas na energia, como MDP, permitem que você faça isso.

6. Descompactação ou Saltos Duplos –

Quando a dureza do solo aumenta, sua frequência natural ou ressonante chega mais perto de se igualar com a frequência do rolo vibratório. Quando isso acontece, o rolo começa a saltar completamente da superfície do solo na metade da frequência vibratória do rolo, e a medição do RMV (Resonance Meter Value) aumenta. RMV é simplesmente uma medida de quando o rolo está saltando. Quanto mais a máquina salta, menos confiável é a medida CMV.

Quando a direção do momento excêntrico se iguala com a direção de deslocamento da máquina (ilustração superior), o torque líquido aplicado ao rolo faz com que o acelerômetro sinta o solo a partir de um determinado ângulo. Quando a direção do momento excêntrico não se iguala com a direção de deslocamento da máquina (ilustração inferior), as forças de torque mudam, modificando o ângulo de medição. Isso vai resultar em leituras CMV consistentemente diferentes nas operações para frente e para trás.

[PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO DA COMPACTAÇÃO INTEGRADA À MÁQUINA]

Compactadores de solo adaptados com tecnologia da medição da compactação integrada à máquina têm a capacidade de medir fatores que podem dar aos operadores uma indicação em tempo real, na própria cabine, sobre a dureza do solo. Muitas variáveis influenciam diretamente a eficácia deste método, bem como a consistência da medição. Por esse motivo, as medições são frequentemente verificadas com a utilização de um dos métodos relacionados anteriormente ou de outro equipamento portátil de teste. À medida que os sistemas ficam mais avançados, seu uso é mais bem entendido, e os resultados são mais aceitos.

A medição da compactação integrada à máquina tipicamente tem dois modos de operação: modo de produção e modo de prova.

Modo de Produção – O modo de produção é utilizado durante o processo inicial de compactação. A finalidade deste modo de operação é compactar a maior quantidade de solo em um nível aceitável da maneira mais rápida e eficiente possível. Durante o modo de produção, a tecnologia da medição da compactação integrada à máquina oferece ao operador uma indicação em tempo real sobre a dureza do solo, bem como identifica áreas de compactação inadequada onde pode ser necessária uma ação para que a densidade chegue à especificação.

No modo de produção, a amplitude da máquina está tipicamente no ajuste alto e o solo é somente compactado até ser alcançado um valor nominal desejado. O operador monitora o display para ver que áreas já foram adequadamente compactadas. A principal preocupação é realizar o trabalho eficientemente, compactando a maior quantidade de solo possível sem compactar exageradamente áreas que são suficientemente duras.

Como a máquina está operando em amplitude alta, podem ocorrer ressaltos do rolo em certos lugares. Devido a todas as variáveis – velocidade de deslocamento, direção, descompactação e variação na umidade do solo – os valores da medição da compactação integrada vistos durante este modo de operação normalmente têm mais variação do que é possível alcançar. Essa pode ser considerada a abordagem inicial da medição da compactação e a falta de precisão ou dados menos variáveis nessas áreas não é tão importante nesse momento.

Modo de Prova – Uma vez completada a compactação do modo de produção, o sistema de medição da compactação pode ser usado como um rolo de prova para verificar a qualidade do trabalho no modo de prova. Tipicamente, esse processo é mais preciso que o modo de produção. Muitas variáveis são controladas e mantidas consistentes, inclusive a velocidade e a direção de deslocamento. Isso ajuda a assegurar que essas variáveis não influenciam a medição.

O modo de prova é usado quando a autoridade contratante está exigindo dados “no campo” que mostrem uma indicação precisa da dureza do solo para uma fase em particular em uma determinada área da construção. Esse procedimento pode ser feito em intervalos periódicos de construção, quando é conveniente passar o compactador sobre uma fase completada do projeto em uma maneira controlada.

Para alcançar resultados precisos, o operador precisa manter todas as variáveis da forma mais constante possível. Essa pode ser considerada como uma fase de precisão da compactação do solo.

PROCESSO RECOMENDADO PARA A PROVA

1. Separe uma seção do canteiro de obra a ser testada e planeje um padrão de rolagem que permita que o operador desloque a máquina para frente durante toda a operação de teste da compactação.
2. Determine uma velocidade de deslocamento entre 2,5-4 km/h (1,5-2,5 mph) que você seja capaz de manter. Uma velocidade mais lenta é melhor e o uso do controle automático da velocidade vai potencializar a uniformidade da velocidade, o que permite dados mais confiáveis melhor compactação.
3. Ajuste a amplitude para baixa. Isso vai reduzir a chance de saltos do rolo e vai resultar em uma medição que não penetra tão profundamente no solo. Também facilita a correlação com outros métodos de teste.
4. Inicie a vibração (ou a compactação estática com MDP) e acione a máquina para iniciar a medição da compactação em uma velocidade de deslocamento, amplitude e frequência constantes enquanto estiver se deslocando para frente.
5. As passadas do solo devem estar apenas tocando ou mal se sobrepondo. Sobreponha nos finais ou nas áreas de manobra para retorno. *Nota: as áreas de sobreposição podem ser consideradas como passadas múltiplas e podem provocar discrepâncias nos dados.*
6. A coleta manual de dados pode ser complicada e precisa ser ajustada em uma posição no canteiro de obras da forma mais precisa possível dentro das seções delimitadas com estacas. A maioria dos

sistemas de medição de compactação integrados à máquina não permite a armazenagem automática de dados sem a opção GNSS (GPS). Use software de planilhas como Excel para classificar os dados pela direção deslocada pela máquina, usando apenas os dados de deslocamento para frente para análise. Marque fisicamente quaisquer locais considerados como suficientemente importantes para estudar ou testar com uma correção com um método de medição da compactação no campo.

7. Para uma melhor qualidade, meça o teor de umidade do solo em um padrão de grade em toda a área que foi medida e compactada. O tamanho da grade pode ser ajustado em uma escala de acordo com o canteiro de obra e com as exigências da agência contratante. Isso fornecerá informações adicionais para análise dos valores da compactação, e o padrão de grade vai permitir o desenvolvimento de um mapa iso-bar sobre o teor de umidade do solo. As amostras do solo para medição da unidade devem ser retiradas o mais cedo possível depois que o compactador terminou uma área.
8. Reveja os dados registrados manualmente e selecione aquelas áreas que você deseja correlacionar com outra forma de dispositivo de medição da compactação. Selecione as áreas que apresentam valores altos, valores baixos e valores intermediários. Selecione várias áreas de cada.
9. Conduza testes de correlação nos locais marcados previamente. Não faça aproximações, porque as condições do solo podem variar amplamente em uma distância curta.

NOTA: Para alavancar totalmente as capacidades da tecnologia integrada à máquina, as capacidades de mapeamento GNSS (GPS) seriam necessárias para registrar todo os dados com os correspondentes detalhes de posicionamento no canteiro de obra. Consulte a próxima seção deste guia para obter mais detalhes sobre a “Compactação Inteligente”.



Sumário de Medição da Compactação Integrada

à Máquina – Em qualquer projeto de compactação, qualidade e custo são as principais preocupações. Alcançar metas aplicáveis de compactação de forma eficiente e efetiva é da maior importância. Existem muitas especificações e métodos de medição da compactação historicamente baseadas no campo. Com métodos de medição da compactação integrada à máquina, os operadores agora têm ferramentas melhores que asseguram a melhor qualidade possível da compactação com custo mais baixo.

A medição da compactação integrada à máquina é uma tecnologia maravilhosa quando adequadamente aplicada, mas existem limitações quanto ao que ela pode fazer. A medição da compactação integrada à máquina não pode lhe dizer em que tipo de solo você está operando, nem pode descrever o teor de umidade do solo ou suas características físicas.

A tecnologia da medição da compactação integrada à máquina mede a reação do solo para oferecer uma imagem das capacidades de suporte de carga. Quando adequadamente ajustado e operado um compactador vibratório de solo com medição de compactação integrada oferece informações que o operador, de outra maneira, não poderia obter. Essas informações permitem que o operador treinado deduza o estado do solo. Os dados são uma indicação da dureza do solo, mas não uma garantia. Existem simplesmente muitas variáveis. No entanto, um operador treinado vai entender o que as medições indicam e o curso de ação ditada por essas medições. Os processos utilizados são frequentemente mais importantes que a própria tecnologia.

Unidade 5 COMPACTAÇÃO INTELIGENTE

Compactação inteligente é o mais recente avanço na aplicação de compactadores vibratórios de solo. A capacidade de medir precisamente a compactação, correlatar as medições com as coordenadas de GNSS, exigi-las em um mapa no compartimento do operador, e registrar e armazenar dados para documentação eram habilidades até agora inimagináveis. Somente o tempo dirá que inovações tecnológicas ainda virão. A Caterpillar estará na linha de frente dessa discussão e das descobertas resultantes.



[O QUE É A COMPACTAÇÃO INTELIGENTE?]

Nos dias de hoje e no passado recente, compactação inteligente é um termo aplicado aos sistemas de medição da compactação incorporados com um compactador vibratório de solo. As definições de compactação inteligente variam entre diferentes agências governamentais e fabricantes de equipamentos. De modo geral, a compactação inteligente pode ser definida como a tecnologia integrada ao compactador, aplicada ao processo de compactação, que melhora as eficiências no canteiro de obras pela eliminação das conjecturas do ser humano. As tecnologias oferecem informações em tempo real aos operadores sobre a compactação, que os ajudam a determinar quando a compactação está progredindo e/ou já está completa.

Com essa definição em mente, é seguro dizer que a tecnologia de medição da compactação integrada à máquina, que foi descrita anteriormente, é realmente uma forma de compactação inteligente. Os sistemas integrados aos compactadores de solo oferecem detalhes sobre o esforço de compactação em um canteiro de obras em tempo real, permitindo que os operadores e os encarregados do canteiro de obras tenham acesso a informações que não tinham anteriormente.

Sistemas mais sofisticados também podem mapear os dados para que o operador tenha uma perspectiva visual do trabalho completado, bem como armazenar dados para uma análise posterior.

Um exemplo de uma especificação anterior para um State Department of Transportation (EUA) é:

Compactação Inteligente (CI)

Este processo envolve a medição e o **registro do tempo, local e parâmetros de compactação** do tratamento granular durante o processo de compactação com um compactador

vibratório que é equipado com um sistema de medição baseado em um acelerômetro e um sistema de posicionamento global.

Agora eles têm uma definição ou uma exigência separada sobre o que é um compactador inteligente:

Equipamento de Compactação Inteligente (CI)

Os equipamentos deverão ser compactadores vibratórios com um sistema de medição baseado em um acelerômetro e **capaz de registrar as medições do parâmetro da compactação**.

Ao mesmo tempo, a U.S. Federal Highway Administration (FHWA) descreve compactação inteligente como segue:

Compactação Inteligente (CI) refere-se à compactação de materiais rodoviários, tais como solos, bases de agregados, ou materiais de pavimento asfáltico, usando modernos compactadores vibratórios equipados com um sistema de medição integrada, um **sistema de relatórios por computador embarcado, mapeamento baseado no Sistema de Posicionamento Global (GPS)**, e controle de feedback opcional. Os compactadores CI facilitam o monitoramento da compactação em tempo real e ajustes no momento certo no processo de compactação pela integração dos sistemas de medição, **documentação** e controle. Os compactadores CI também mantêm um registro contínuo de plotagens codificadas por cores, permitindo que o usuário veja plotagens da localização precisa do compactador, o número de passadas e medições da dureza do material.

A União Europeia também criou um meio para definir o uso de compactação inteligente. Em seu panfleto "Orientações para avaliar compactadores de solo e asfalto equipados com controle contínuo da compactação (CCC)," o Committee for European Construction Equipment (CECE) criou uma matriz para classificar equipamentos com tecnologias de controle contínuo de compactação. (Veja Apêndice.)



É importante notar que definições mais recentes da compactação inteligente estão claramente definindo não só as capacidades da medição integrada da compactação e o display em tempo real para o operador, mas também a capacidade de registrar e armazenar dados sobre posicionamento para documentação, análise posterior e retenção dos registros. Como tal, a definição de compactação inteligente está evoluindo continuamente.

A Caterpillar acredita que um compactador inteligente deve medir a compactação, correlacionar as medições com as coordenadas de GNSS, mostrar um mapa das medições, registrar os dados e documentar os resultados. Essas capacidades oferecem muitos benefícios em termos de tempo e custo para os operadores, empreiteiros e proprietários de projetos. Portanto, a definição atual usada pela Caterpillar para compactação inteligente é a seguinte:

Compactação Inteligente (CI)

Um sistema que mede a compactação do solo mostra as medições para o operador, registra e mapeia os resultados da compactação usando um sistema de mapeamento GSNN, e controla ou orienta o esforço de compactação da máquina em resposta ao sistema de medição.

Esta definição pode ser usada tanto para compactadores vibratórios quanto não vibratórios e não exige um sistema de medição baseado em um acelerômetro. Como foi descrito anteriormente, a MDP é uma nova tecnologia e tem muitas vantagens sobre a tecnologia de medição da compactação baseada no acelerômetro, dependendo da aplicação.

Continuando, este guia refere-se somente à compactação inteligente em casos onde o compactador é equipado com capacidades de medição integrada para a compactação (tanto CMV quanto MDP), capacidades de mapeamento e a habilidade de registrar e armazenar dados para documentação e análise posterior fora a máquina.

Posicionamento do Compactador no Canteiro de Obra

A tecnologia de medição da compactação integrada à máquina pode ser aumentada com a tecnologia Global Navigation Satellite Systems (GNSS), que permite um posicionamento preciso no canteiro de obra através do uso de diferentes constelações de satélites no céu. A tecnologia GNSS é amplamente disponível e oferece diferentes níveis de precisão, alguns dos quais exigem infraestrutura fora a máquina, oferecendo dados de correção do posicionamento.



Com esse nível de dados e detalhes, a tecnologia de medição da compactação pode agora igualar-se à localização física em um canteiro de obra e pode ser configurada para mapear esses valores, inclusive a contagem de passadas, a direção do deslocamento da máquina e muitos outros ajustes da máquina.

Independentemente da tecnologia de medição da compactação integrada à máquina empregada, o sistema oferece medição em tempo real do solo que está sendo compactado a qualquer momento. Com o acréscimo da funcionalidade do mapeamento, a habilidade de registrar e plotar as medições em sua localização precisa em um mapa faz com que as informações sejam muito mais úteis.

Dados de Posicionamento, como é que isso funciona?

Os sistemas de mapeamento utilizam o Global Navigation Satellite System (GNSS) para oferecer dados de mapeamento para cada medição registrada. Isso inclui o GPS (operado pelo Departamento de Defesa dos EUA) e GLONASS (operado pelo governo russo), bem como outros sistemas que serão incorporados online no futuro, inclusive Galileu na União Europeia e Compass na China.

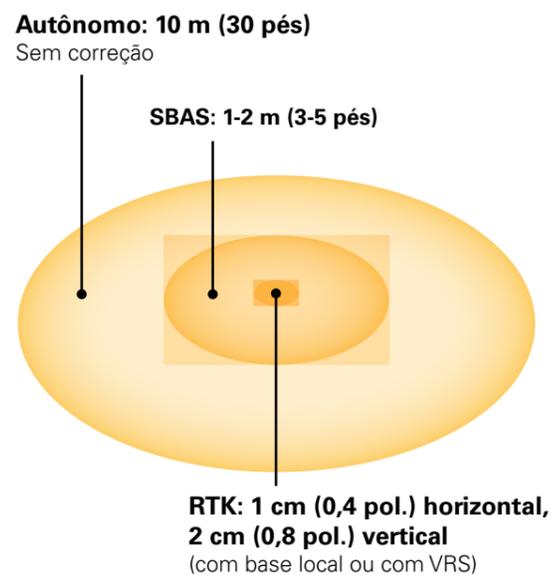
A localização é plotada por triangulação com a posição conhecida dos satélites a partir desses sistemas. Os sistemas por satélite não são suficientemente precisos para ser práticos sem algum grau de correção. Os sistemas de mapeamento em compactadores de solo usam o aumento para corrigir os sinais do satélite e oferecem um grau de precisão que é muito útil. Existem duas formas predominantes de aumento disponíveis: SBAS e RTK.

A maioria dos sistemas utiliza SBAS, ou Satellite Based Augmentation System, para corrigir os sinais de posicionamento por satélite. Os sistemas SBAS fazem a triangulação com sites múltiplos baseados no solo que oferecem "pontos de ancoragem" conhecidos, a partir dos quais o operador recebe a medição da correção. Os sistemas SBAS são tipicamente precisos em até 1 m (3 pés) e não exigem uma estrutura fora da máquina.

Alternativamente, muitos fabricantes podem aumentar o sinal com a correção do sistema RTK, ou Real Time Kinematic. Essa tecnologia exige o uso de estações de rádio na base local para oferecer os dados de correção.

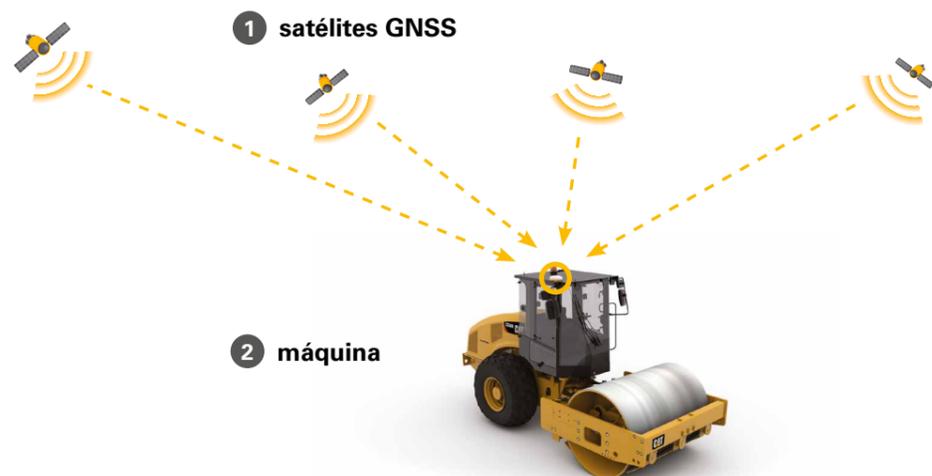
Na verdade, a tecnologia recente também permite precisões do RTK via celular ou tecnologias de modem ou até mesmo Virtual Reference Stations (VRS) – porém exige uma organização de TI mais inteligente e suporte. As estações de base são caras, e a tecnologia exige line-of-site desde o receptor no compactador até a estação de base ou unidades móveis. No entanto, o sistema RTK oferece mais precisão que o SBAS, e até alguns centímetros (ou algumas polegadas). Ele também permite que o sistema registre dados de elevação, que permitem que o compactador mapeie também as elevações dos níveis.

PRECISÃO DO SISTEMA POR SATÉLITE

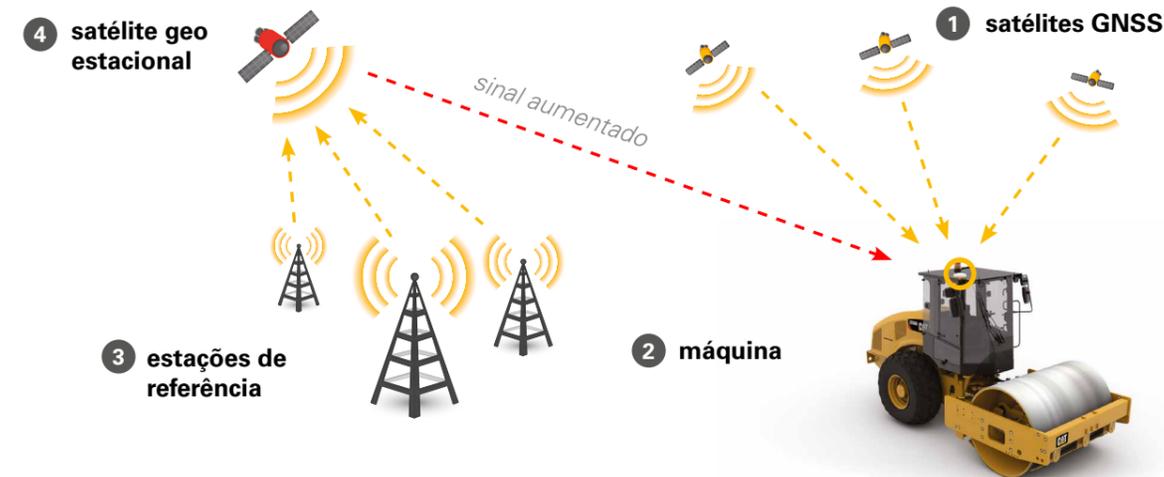


Isso oferece um benefício substancial, porque o compactador é frequentemente a última máquina a operar em uma obra de terraplenagem e pode resultar em uma significativa economia em custo e tempo nas atividades de supervisão da elevação final.

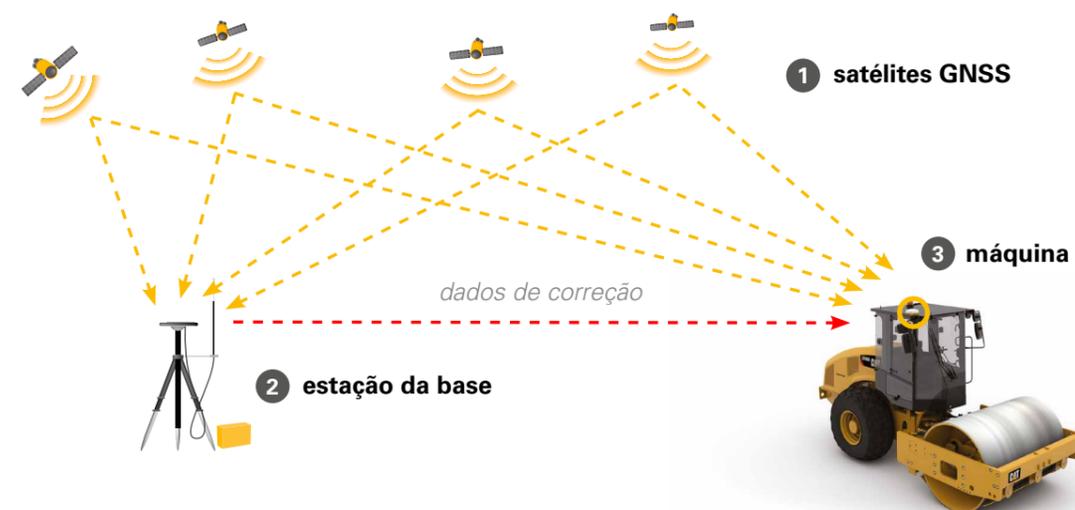
AUTÔNOMO



SBAS (SATELLITE - BASED AUGMENTATION SYSTEM)



RTK (REAL TIME KINEMATIC)



Benefícios dos Dados de Posicionamento

Em si, a medição da compactação integrada à máquina pode revelar muitas coisas sobre o estado da compactação em tempo real, mas essa informação é muito específica, refletindo uma imagem momentânea no tempo. Os dados de posicionamento permitem que o sistema ofereça não apenas uma medição isolada, mas TODAS as medições no contexto de onde são tiradas. Isso muda a visão de momentânea para abrangente, e abre a porta para uma análise mais aprofundada. De repente, o operador – bem como o gerente do canteiro de obra – pode acessar uma imagem da qualidade da compactação para todo o canteiro de obra e não apenas uma imagem momentânea.

Essa capacidade faz uma grande diferença para os sistemas CI quando comparada com os outros métodos de testes. Tradicionalmente, o pessoal

do solo realiza testes de qualidade usando procedimentos de testes portáteis em alguns locais selecionados. O processo é demorado e dispendioso. Os resultados dos testes são usados para representar uma área bem maior do que a que é realmente testada, frequentemente em uma relação de 1:1 milhão – o que não chega a ser estatisticamente tranquilizador. A compactação inteligente pode medir todo o local no tempo que leva para passar o computador sobre ele.

Além disso, alguns sistemas são capazes de incluir projetos de engenharia ou de arquitetura em 3D no display a bordo da máquina. Isso pode ser vantajoso em um canteiro de obra onde o controle do nível do solo sem estacas já está em uso ou onde estacas indicadoras do nível e outras marcações não são disponíveis.

Como Usar os Dados Coletados

É fácil ver as vantagens que os dados adicionais oferecem ao operador, permitindo uma forma mais eficiente e mais barata de obter uma compactação de qualidade em um canteiro de obra. Muitos inspetores e administradores de estradas exigem algum tipo de relatório em tempo real e básico no campo, que é um progresso da compactação através de uma documentação básica com dados de texto via uma aplicação de impressão na cabine. Mas muitas autoridades estão concentradas agora em relatórios mais detalhados fora da máquina. Isso exige a transmissão de todos os dados de compactação registrados desde a máquina no canteiro de obra até um computador pessoal em um escritório. Os dados podem ser movimentados manualmente via um pen-drive ou podem ser transmitidos sem fio via hardware e software de comunicações.

A partir do momento em que todos os dados tiverem sido recebidos no computador do escritório, os usuários têm o desafio de filtrar e selecionar os dados para produzir o relatório da documentação exigido pela inspeção e pelas autoridades rodoviárias.

[BENEFÍCIOS DA COMPACTAÇÃO INTELIGENTE]

Controle de Qualidade e Documentação de Garantia de Qualidade – A compactação inteligente permite a documentação do trabalho completado. Permite também o controle em andamento com a habilidade de monitorar o progresso diariamente ou praticamente em tempo real, bem como a armazenagem e a análise eletrônica dos resultados que podem ser correlacionados com os registros em longo prazo ou históricos dos dados do canteiro de obra.

Maior Produtividade do Operador – A produção é mostrada visualmente para o operador, ajudando a determinar se o solo já atingiu a dureza objetivada. Isso capacita o operador com dados em tempo real sobre os quais ele pode tomar decisões. Por exemplo, o sistema pode alertar o operador sobre pontos de baixa sustentação, indicar problemas em potencial de teor de umidade e, com a precisão do sistema RTK, o compactador também pode verificar os níveis e elevações finais no canteiro de obra.

VISIONLINK INTERFACE



Existem muitos desses programas de software disponíveis hoje para ajudá-lo nessa tarefa, inclusive AccuGrade Office, SiteVision Office, VisionLink, Veda e muito mais. Essas soluções de software variam em tipos do formato do arquivo, capacidades e preços.

Confiança nos Resultados – O posicionamento preciso identifica as localizações exatas de problemas de compactação na fase inicial do processo da construção, permitindo correções efetivas menos dispendiosas e um risco reduzido de uma repetição do trabalho posteriormente. Os dados oferecem uma referência confiável da qualidade geral do trabalho em um formato visual e fácil de entender. Isso permite que operadores treinados deduzam quando uma obra está completa, dando a eles a confiança de passar para a próxima área em vez de ficar esperando pelos resultados dos testes convencionais.

[ESPECIFICAÇÕES ATUALIZADAS PARA A COMPACTAÇÃO INTELIGENTE]

A compactação inteligente para aplicações no solo tem aumentado, em geral, no uso porque as agências governamentais estudaram e aceitaram os benefícios da tecnologia e produziram especificações para seu uso. As especificações ajudam a assegurar que a tecnologia seja aplicada em uma maneira que produza um resultado aceitável para a agência que especificou seu uso.

A Federal Highway Administration (FHWA) dos Estados Unidos desenvolveu um conjunto de especificações genéricas para a utilização da compactação inteligente nos solos. O objetivo dessas especificações é fazer com que os departamentos estaduais de transporte as usem exatamente como são ou as modifiquem para atender às suas necessidades específicas. Vejamos um exemplo das especificações como foram determinadas:

Os compactadores com CI devem atender às seguintes exigências específicas:

1. Os compactadores com CI deverão ser compactadores vibratórios autopropelidos com um único rolo, equipados com acelerômetros montados dentro ou ao redor do rolo, para medir as interações entre os compactadores e os materiais compactados, para que possa ser avaliado o esforço de compactação aplicado. Os compactadores com CI podem ter rolos lisos ou com patas.
2. A produção do compactador é designada como Intelligent Compaction Measurement Value (IC-MV), que representa a dureza dos materiais com base na vibração dos rolos e a resposta resultante dos materiais subjacentes.

RESULTADOS DA MEDIÇÃO



3. As unidades de rádio com GPS e receptoras deverão ser montadas em cada compactador com CI para monitorar as localizações dos rolos e rastrear o número de passadas dos compactadores.
4. Os compactadores com CI deverão incluir um sistema de documentação integrado à máquina, que seja capaz de mostrar, em tempo real, mapas com código de cores os valores da medição de CI, inclusive os valores de resposta da dureza, a localização do compactador, o número de passadas, as velocidades do compactador, juntamente com a frequência da vibração e a amplitude dos rolos do compactador.
5. A unidade do display deverá ser capaz de transferir os dados através de uma saída de USB.
6. A impressora embarcada deverá ser capaz de imprimir a identidade do compactador, bem como a data das medições e a área de construção que está sendo mapeada, bem como a porcentagem da área de construção mapeada, o valor CI-MV desejado, e as áreas que não atingiram os valores desejados de CI-MV. (A opção da impressora deverá ser selecionada por cada Departamento de Transporte estadual).

As autoridades governamentais de outros países desenvolveram suas próprias especificações com base nos processos de construção de estradas em seus respectivos países. Embora possam variar das especificações da FHWA, a meta é similar, no que se refere a querer estabelecer um padrão para o uso do equipamento.

Especificação	Equipamento	Tamanho do Campo	Especificações da Localização	Documentação
Mn/Depto. de Transporte (EUA)	Compactador vibratório com rolo liso ou com patas (25.000 lbs.)	100 x 10 m (mínimo na base). Espessura máxima de 1,2 m	Uma calibração/faixa de controle por tipo ou fonte do material que está sendo nivelado	Compactação, dureza, umidade, atividades de controle de qualidade e ações corretivas (relatório semanal)
ISSMGE (International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering) www.issmge.org/	Computador escolhido pela experiência	100 m pela largura do canteiro de obras	Superfície homogênea e por igual. Sobreposição de $\geq 10\%$ da largura do rolo	Padrão de rolagem, sequência de compactação e medição das passadas; amplitude, velocidade, valores de medição dinâmica, frequência, operação experimental e localizações correspondentes
Terraplenagem (Áustria)	Sugestão de compactadores vibratórios com rodas de borracha e rolos lisos	100 m de comprimento pela largura do canteiro de obras	Não há homogeneidade perto da superfície (materiais ou teor de água) sobreposição de $\geq 10\%$ da largura do rolo	Compactação, plano de operação, sequência de compactação e medições, velocidade, amplitude, frequência, velocidade, valores de medição dinâmica, operação experimental e localizações correspondentes
Sociedade de Pesquisa para Estradas e Tráfego (Alemanha)	Os compactadores autopropelidos com rodas de borracha são preferidos; os compactadores vibratórios tracionados por um veículo são adequados	Cada área de calibração deve cobrir pelo menos 3 campos parciais – 20 m de comprimento	Nivelada e livre de poças. Tipo de solo similar, teor de água, espessura da camada e capacidade de suporte das camadas. Sobreposição de $\geq 10\%$ da largura da máquina	Valor de medição dinâmica, frequência, velocidade, operação experimental, amplitude, distância, horário da medição, tipo do compactador, tipo do solo, teor de água, espessura da camada, data, horário, nome de arquivo ou número do registro, condições climáticas, posição das esteiras do teste e direção de deslocamento, altura absoluta ou posição da aplicação, condições do local e aterros nas áreas marginais, parâmetros da máquina e desvios notados
Vägverket (Suécia)	Compactador vibratório ou com um único rolo oscilante. Carga linear mínima de 15-30 kN	Largura da camada mais longa 0,2 – 0,6 m	A camada deverá ser homogênea e não congelada. As camadas de proteção > 0,5 m podem ser compactadas com sub-base	—

Especificações da Compactação	Velocidade	Frequência
90% das medições da compactação dos compactadores e a média as medições do módulo LWD (baseado e 3 testes) devem estar na meta de 90% dos valores estabelecidos na faixa de calibração.	A mesma durante a calibração e a compactação da produção	
Coefficiente de correção de $\geq 0,7$. Valor mínimo de $\geq 95\%$ de Ev1, e a média deverá ser de $\geq 105\%$ para $\geq 100\%$ durante o modo experimental. Os valores medição dinâmica deverão ser mais baixo que o mínimo especificado para > 10% a trilha. O mínimo medido deverá ser de $\geq 80\%$ do mínimo especificado. (O desvio padrão para a média) deve ser de $\geq 20\%$ em uma passada.	Constante 206 km/h ($\pm 0,2$ km/h)	Constante (± 2 Hz)
Coefficiente de correlação de $\geq 0,7$. Valor mínimo de $\geq 95\%$ de Ev1, e a média deverá ser de $\geq 105\%$ para $\geq 100\%$ durante o modo experimental. Os valores medição dinâmica deverão ser mais baixo que o mínimo especificado para > 10% a trilha. O mínimo medido deverá ser de $\geq 80\%$ do mínimo especificado. O máximo medido em um modo experimental não pode exceder o ajuste máximo (150% do mínimo determinado). O desvio padrão para a média deve ser de $\geq 20\%$ em uma passada.	Constante 206 km/h ($\pm 0,2$ km/h)	Constante (± 2 Hz)
O coeficiente de correlação resultante de uma análise de regressão deve ser de $\geq 0,7$. Unidades de áreas individuais (a largura do rolo do compactador) devem ter um valor de medição dinâmica dentro de 10% da área adjacente para ser adequada para calibração.	Constante	
As exigências de capacidade de suporte ou grau de compactação devem ser atendidas. A média dos valores de compactação para dois pontos de inspeção de $\geq 89\%$ para a sub-base da base da estrada e para as camadas protetivas com mais de 0,5 m de espessura. A média deverá ser de $\geq 90\%$ para as bases da estrada. A média necessária para duas relações de capacidade de suporte varia, dependendo do tipo da camada.		Constante 2,5 – 4,0 km/h

[PROCEDIMENTOS DE OPERAÇÃO DA COMPACTAÇÃO INTELIGENTE]

Similar ao uso apenas da tecnologia de medição da compactação integrada à máquina, mencionada anteriormente, os compactadores vibratórios de solo que permitem a compactação inteligente têm processos similares a seguir, com pequenas diferenças devido às capacidades adicionais que os sistemas mais avançados oferecem. Existem dois modelos de operação: modo de produção e modo de prova.

Modo de Produção – novamente, o objetivo deste modo de operação é compactar a maior quantidade de solo até um nível aceitável da maneira mais rápida e eficiente possível, nas direções para frente e para trás, até o valor nominal desejado ser alcançado. A compactação é conduzida de acordo com parâmetros normais de trabalho – velocidade de deslocamento de 1 a 2,5 km/h (1,2 – 3,1 mph) em solos arenosos e siltosos não-coesivos – e a máquina é tipicamente ajustada na amplitude alta.

No caso de um compactador equipado com compactação inteligente, o operador agora pode receber outras informações além de um número simples, sem dimensões, dando uma indicação da dureza do solo ou da resistência de suporte de carga. Com o display em cores adicional e as capacidades de coleta e armazenagem de dados, o operador tem uma visão instantânea da compactação no local exato do compactador e pode monitorar o canteiro de obras pela contagem das passadas, pela porcentagem do valor de

medição da meta da compactação, ou mesmo pela porcentagem de mudança do valor da meta da compactação, passada por passada (para as áreas de compactação suficiente bem como para as áreas de compactação insuficiente). Quando necessário, o operador também pode marcar, digitalmente, pontos e áreas onde pode ser necessária uma ação para que a compactação atenda à especificação. Todos os dados armazenados podem ser retirados da máquina para serem estudados, filtrados e analisados, se necessário.

Nesse modo de operação, o sistema de mapeamento oferece ao operador uma visualização do progresso da compactação do canteiro de obras e um nível moderado de garantia de qualidade. No entanto, como todas as variáveis – velocidade de deslocamento, direção, descompactação, variação da umidade do solo – os dados da compactação coletados durante o modo de operação ainda são de qualidade inferior ao que é possível alcançar. Entretanto, esse modo ainda dá ao operador dados para potencializar a eficiência e a uniformidade, bem como para eliminar a dependência nas conjecturas durante o processo da compactação.

Quando os valores atingem uma faixa perto do valor desejado, o operador pode passar para uma nova área enquanto o pessoal da qualidade realiza testes para assegurar que o trabalho está de acordo com a especificação ou que a área pode ser preparada para uma passada no modo de prova.

Modo de Prova – Uma vez completada a compactação da produção, o sistema de medição da compactação pode ser usado como um compactador de prova para verificar a qualidade do trabalho nesse modo de operação mais preciso. Essa abordagem tem o objetivo de ser usada quando a autoridade contratante está exigindo uma documentação ou um mapa que mostre uma indicação precisa da dureza do solo para uma fase em particular da construção.

É muito importante assegurar que as variáveis sejam controladas e mantidas de forma consistente, assim os parâmetros de trabalho agora são uma velocidade constante de deslocamento de 3 km/h (2 mph) com a máquina com uma ajustagem de amplitude baixa (ou desligada se necessário, o caso de uma compactação exagerada ou descompactação ou quais outros problemas

relacionados com uma máquina equipada com MDP). Isso ajuda a assegurar que essas variáveis não estão influenciando na medição nem nos dados que estão sendo coletados e armazenados com o objetivo da preparação de relatórios.

Deve também ser notado que quando se trata da compactação de prova, o que você está medindo – o grau de compactação do solo – está mudando enquanto você o mede. Com o movimento do compactador pesado, seu peso estático está introduzindo pressão e outras forças no solo abaixo dele. Por esse motivo, os operadores precisam tomar o cuidado de diminuir a quantidade de força introduzida durante a medição. A habilidade dos sistemas baseados na energia em medir com um rolo estático (sem vibração) faz com que eles sejam ideais para essa aplicação.



PROCESSO RECOMENDADO PARA A PROVA

1. Planeje um padrão de compactação que permita que o operador se desloque à frente durante toda a operação de mapeamento.
2. Determine uma meta de velocidade de deslocamento entre 2,5 a 4 km/h (1,5 a 2,5 mph) que você seja capaz de manter. Quanto mais devagar melhor, e o uso do controle automático da velocidade vai permitir uma uniformidade da velocidade, o que permite melhores dados de medição e compactação.
3. Ajuste a amplitude para baixa. Isso vai reduzir a chance de descompactação do rolo e vai resultar em uma medição que não penetre tão profundamente no solo. Isso faz com que seja mais provável a correlação com outros métodos de teste.
4. Selecione “proofing on” no menu do display e inicie a vibração (ou a operação estática com MDP) e acione a máquina para iniciar a medição da compactação, mantendo constantes a velocidade de deslocamento, a amplitude e a frequência enquanto se desloca à frente.
5. Use as capacidades de posicionamento do GNSS para orientar a máquina, assim somente uma passada é feita sobre a área de interesse. As passadas do rolo devem ser apenas tocadas ou só um pouco sobrepostas. Faça a sobreposição nos finais ou nas áreas de retorno. NOTA: as áreas sobrepostas podem ser consideradas como passadas múltiplas e podem causar discrepâncias nos dados registrados.
6. Quando toda a área tiver sido coberta, selecione “proofing off” no display.
7. Para uma melhor qualidade, meça o teor de umidade do solo em um padrão de grade em toda a área que foi medida e compactada. O tamanho a grade pode ser ajustado de acordo com a escala do canteiro de obras e as exigências da agência contratante. Isso vai oferecer informações adicionais para análise dos valores da compactação, e o padrão de grade vai permitir o desenvolvimento de um mapa iso-bar do teor de umidade do solo. As amostras do solo para medições da umidade devem ser tiradas o mais rapidamente possível depois que o compactador tiver terminado uma área.
8. Estude o mapa e os dados da compactação para selecionar as áreas que você deseja correlacionar com outra forma de dispositivo de medição da compactação. Selecione as áreas com leituras de valores altos, de valores baixos e de valores intermediários. Selecione diversas áreas de cada um desses valores.
9. Faça testes de correlação usando um GNSS manual para localizar as áreas selecionadas para teste com a maior precisão possível. Não faça aproximações, porque as condições do solo podem variar muito em uma curta distância. (veja os comentários sobre o equipamento para testes de correlação na próxima seção.)

Calibração do Local Usando uma Faixa de Teste e um Dispositivo de Teste Independente

Este método tem o objetivo de eliminar o maior número possível de variáveis no processo de medição e usar os mesmos solos e métodos que serão usados durante a construção real da estrada ou do edifício. Isso consome muito tempo e muitos recursos, mas é a melhor maneira de entender o processo e construir uma linha básica de compreensão das tecnologias envolvidas.

1. Localize uma área de teste que possa ser deixada intacta pela duração do projeto e que tenha solos, níveis e estrutura do subsolo similares similar à maioria do projeto.
2. Escava/aterre a área do teste para que ela fique nivelada para criar a sub-base para a faixa do teste.
3. Traga o compactador vibratório de solo e crie um mapa com as linhas básicas da compactação usando o sistema de compactação inteligente no modo de prova e em amplitude baixa, frequência constante (com a vibração desligada no caso de MDP) direção constante à frente a 3 km/h (2 mph).
4. Se o mapa da compactação mostrar uma alta variabilidade (90 por cento dos valores deverão estar dentro de uma variação de 20 por cento do valor médio), tente compactar a base em alta amplitude para trazer o nível da compactação das áreas de baixa sustentação para um valor mais igual ao das áreas com valor mais alto. Repita o passo número 3.
5. Se a sub-base agora estiver uniformemente compactada (de acordo com o teste: 90 por cento dos valores dentro da variação de 20 por cento do valor médio), passe para o passo número 6. Caso contrário, ou um novo local para o teste precisa ser escolhido (passo número 1) ou é necessário um remédio para o problema da sub-base para que seja obtido um mapa mais uniforme. O remédio pode envolver a escavação de objetos ocultos, tais como rochas e bolas de argila ou estabilizar o solo com cal ou com algum outro atente. Se um agente estabilizador for usado na faixa de teste, ele também deverá ser usado em todo o canteiro de obras para que a faixa de teste tenha validade.
6. Meça a compactação da sub-base com um dispositivo portátil de teste da carga ou com um deflectômetro com um peso leve cadente usando um padrão uniforme de pontos de teste em toda a área da faixa de teste. Evite usar dispositivos de densidade nuclear ou de cone de areia, porque eles medem características diferentes do solo (densidade) do compactador vibratório (dureza). Esses pontos de teste precisam ser localizados com o uso de um dispositivo GNSS de precisão com uma precisão em decímetros para que possam ser correlacionados corretamente com o mapa de compactação do GNSS obtido pelo compactador inteligente. Como uma alternativa ao teste em um padrão de grade, use o mapa GNSS do compactador e selecione vários locais dispersos que representem os valores alto, médio e baixo de compactação. Obtenha pelo menos três testes para cada faixa de valores (9 pontos de testes, no mínimo). O uso de mais pontos de testes oferece um resultado mais estatisticamente preciso.
7. Meça o teor de umidade em cada um dos pontos de teste. Se o teor de umidade mostrar uma grande variação, as correlações não produzirão resultados uniformes.

Uma nota de advertência: lembre-se que o dispositivo portátil de teste usado para calibrar o valor de medição da compactação integrado ao compactador tem sua própria variabilidade de medição. Isso significa que ele poderá ser usado para medir o solo com as mesmas propriedades várias vezes e não oferecer exatamente os mesmos resultados. Por exemplo, as medições da densidade nuclear podem variar em 15 por cento na mesma amostra. A prática atual é fazer uma leitura, girar o dispositivo 90 graus e fazer outra leitura. A média das duas leituras é registrada como o valor medido.

[PADRÃO ESCALONADO COM DOIS COMPACTADORES]

Diversos métodos podem ser usados para calibrar um valor determinado para a medição da compactação (CMV ou MDP) e o número necessário de passadas. Alguns desses métodos serão ditados pela agência contratante, e podem diferir do que está impresso neste guia. A indústria está seguindo na direção de uma prática de enfatizar que a área

deve ser uniformemente compactada a um nível aceitável, e está se afastando de tentar obter um valor específico ou uma densidade específica de compactação para todas as áreas do canteiro de obras.

8. Correlacione os valores do teste de compactação com aqueles obtidos a partir do mapa do GNSS no compactador e anote os resultados com os valores de medição da compactação no eixo y e os resultados do teste de campo no eixo x. Isso recebe o nome de *scatter plot* (plotagem dispersa).
9. Use a metodologia do ajuste da curva para determinar a melhor curva de calibração entre os valores de medição integrada e o método de teste no campo. Essa é a ferramenta que só será usada para aquele tipo de solo no canteiro de obras e nos testes da compactação na sub-base.
10. Traga a primeira camada de material de aterro e coloque-a uniformemente na profundidade especificada.
11. Compacte o material até ele ficar uniformemente compactado e os valores de medição da compactação integrada não mudem muito quando a máquina estiver se deslocando à frente.
12. Repita os passos 2 a 9 para esta camada de material essa camada básica terá sua própria curva de calibração que será usada em todo o canteiro de obras para esse material.
13. Repita os passos 10 a 12 para todas as camadas de aterro que tiverem sido trazidas. Cada camada terá sua própria curva de calibração.
14. Se as condições do solo mudarem devido às condições climáticas, repita um modo de prova na faixa de teste para restabelecer o que constitui um nível de aceitação para o valor de medição integrado à compactação.



Calibração dos Resultados da Medição da Compactação Integrada e Contagem das Passadas Usando um Compactador de Solo (Não um Dispositivo Independente para o Teste no Campo)

Este processo, ou um similar, é usado em alguns países escandinavos. Ele é mais pragmático e exige menos tempo e recursos, e oferece um meio de ter um bom controle a compactação sem usar outros sistemas de medição da compactação como um padrão. O objetivo é usar o compactador para estabelecer um nível nominal máximo de compactação para os materiais do canteiro de obras, e determinar o número de passadas para alcançar esse nível. O propósito é criar um nível uniforme de compactação em todo o canteiro de obras. O processo a seguir usa uma faixa de teste para estabelecer as linhas básicas da compactação. Uma faixa de teste é opcional, porque uma porção do canteiro de obras ou todo o canteiro de obras pode ser compactado como se fosse uma faixa de teste.

1. Localize uma área de teste que possa ser deixada intacta pela duração do projeto e que tenha solos, níveis e estrutura do subsolo similares similar à maioria do projeto.
2. Escave/aterre a área do teste para que ela fique nivelada para criar a sub-base para a faixa do teste.
3. Traga o compactador vibratório de solo e crie um mapa com as linhas básicas da compactação usando o sistema de compactação inteligente no modo de prova e em amplitude baixa, frequência constante (com a vibração desligada no caso de MDP) direção constante à frente a 3 km/h (2 mph).
4. Verifique o teor de umidade do solo em vários locais na faixa de teste. Se for muito alto ou muito baixo, corrija antes de fazer qualquer compactação adicional.
5. Se o mapa da compactação mostrar uma alta variabilidade (90 por cento dos valores deverão estar dentro de uma variação de 20 por cento do valor médio), tente compactar a base em alta amplitude para trazer o nível da compactação das áreas de baixa sustentação para um valor mais igual ao das áreas com valor mais alto. Repita o passo número 3.
6. Depois de obter uma compactação uniforme, verifique o teor de umidade em vários locais e registre os resultados.
7. Traga a primeira camada de material de aterro. Selecione a característica do mapa de prova e compacte a camada de aterro usando um ajuste de amplitude alta e uma velocidade lenta de deslocamento de 3 km/h (2 mph). Complete uma passada de ida e volta em cada trecho antes de passar para um material não compactado. O teor de umidade deverá ser uniforme e em um nível ideal para o aterro de terra ou pedras que está sendo usado.
8. Repita o ciclo da compactação em toda a área novamente, anotando o valor de medição do nível de compactação que é mais predominante para cada passada de compactação.



9. Continue repetindo o passo 8 até o nível de compactação entre as passadas não mude substancialmente, ou até que o compactadores comece a descompactar.
10. O valor médio em que a medição da compactação começa a ser nivelado é o valor necessário e o número de passadas necessárias para atingir esse valor de compactação é a meta de sua contagem de passadas.
11. Registre esses resultados, e ajuste a meta do valor no display bem como a contagem de passadas de acordo com essa camada.
12. Repita os passos de 7 a 11 com um novo mapa de prova para cada nova camada. Depois de completos, você terá a meta do valor de medição da compactação e da contagem de passadas para cada camada.
13. Se diversas das camadas tiveram valores praticamente idênticos, use a meta do valor de medição a compactação para todas as camadas de aterro correspondentes.
14. Compacte o canteiro de obras como faz normalmente, usando o mapa de compactação como guia para atingir uma compactação uniforme em toda a área.
15. Com o tempo e a experiência em uma região, os operadores e habilidosos podem ser capazes de ajustar a meta dos valores de medição da compactação e da contagem das passagens sem usar uma faixa de teste.
16. Se for desejado um nível de medição mais preciso da compactação final, use o compactador no modo de prova (baixa amplitude, velocidade constante de 3 km/h (2 mph), frequência constante e deslocamento somente à frente).



Uso dos Valores da Compactação Inteligente Sem Calibração no Canteiro de Obras

Este processo é o mais pragmático e exige pouco ou nenhum tempo adicional. É preciso notar que este processo é mais adequado para o que é descrito previamente como um modo de produção da compactação e exige alguma experiência com o sistema, um entendimento de como a tecnologia funciona e o processo de compactação do solo em geral.

O objetivo deste processo é usar a tecnologia da compactação inteligente para comparar a mudança relativa no progresso da compactação passada por passada, para saber quando a física por trás do esforço de compactação é adequada para as condições presentes. Conforme foi mencionado anteriormente, o uso da compactação inteligente e da tecnologia de medição integrada da compactação não é uma garantia de compactação ou densidade, e, frequentemente, o processo empregado é mais importante do que as ferramentas e a tecnologia que são usadas em um canteiro de obras. Um compactador de determinadas características pode se tornar ineficiente depois de um determinado número de passadas em certo material, o que faz com que a meta de compactação seja inatingível e fazendo com que todas as passadas subsequentes sejam inúteis. Será benéfico saber quando essa condição ocorre para parar de perder tempo e consumir combustível desnecessariamente.

1. Dimensioe o compactador vibratório de solo com capacidades de compactação inteligente da melhor maneira possível, considerando as metas de compactação, tipos de solo, níveis de umidade, espessura da camada, etc. Detalhes dados anteriormente descrevem alguns fatores que devem ser levados em consideração quando você dimensionar e escolher a configuração do compactador.
2. Comece a compactação no canteiro de obras com o display da compactação inteligente ajustado para mapear os valores da medição da compactação e compare a mudança percentual entre uma passada e outra.
3. A característica de mapeamento pode ser ajustada e personalizada para designar certa cor para certa faixa de mudança percentual, entre uma passada e outra. Como um exemplo, ajuste o display para mapear a cor vermelha para áreas que mostrem 50-100 por cento de mudança entre uma passada e outra, amarelo para áreas que mostrem 10-49 por cento entre as passadas e, finalmente, verde para 0-9 por cento de mudança entre uma passada e outra. Essas faixas podem ser mudadas conforme a experiência ou de acordo com as condições do canteiro de obras, se necessário.

4. Continue rolando e compactando com o foco no sentido de deixar o mapa verde.
5. Se existirem áreas que não possam ser trazidas para o verde (pouca ou nenhuma mudança entre uma passada e outra) isso é um indício de que pode haver algum problema com a adequabilidade do solo naquela área, ou talvez alguns problemas na sub-base que precisam ser solucionados.
6. Quando o mapa estiver suficientemente verde e não for notada mais nenhuma mudança nos valores de medição da compactação entre uma passada e outra, utilize uma polaca portátil para testar a carta ou um deflectômetro com um peso leve cadente, conforme foi descrito nos exemplos. Certifique-se de usar um padrão uniforme de pontos de teste em toda a área que está sendo compactada/testada ou como for desejado para provar que a meta da compactação especificada para o projeto vai ser aprovada ou reprovada.
7. Se os testes mostrarem um nível passável de compactação, continue com o processo no canteiro de obras conforme foi descrito.
8. Se os testes mostrarem que as metas a compactação não estão sendo alcançadas, uma entre duas coisas está acontecendo:
 - 1) O tamanho e o peso de operação da máquina não estão corretos para o tipo de solo e a espessura da camada e/ou 2) o teor de umidade do solo é incorreto (ou muito sedo ou muito molhado). De qualquer forma, o compactador no canteiro de obras não será capaz de um maior progresso de compactação até que algumas condições sejam mudadas.

[COMO SOLUCIONAR PROBLEMAS COM OS RESULTADOS DA COMPACTAÇÃO INTELIGENTE]

Conforme foi descrito anteriormente, diversas condições no canteiro de obras e fatores operacionais podem afetar os resultados dos sistemas de compactação inteligente. Com a experiência, os operadores vão começar a reconhecer certos padrões e vão entender a causa provável de um desvio dos valores esperados. A seguir vamos ver alguns problemas comuns e as causas e soluções relacionadas a eles. Entender estas informações vai ajudar você a solucionar problemas no canteiro de obras em um curto período de tempo.

Problema: Os Valores de Medição da Compactação São Mais Baixos que os Esperados

Causa: O solo granular está muito seco para compactar. A compactação continuada vai resultar na quebra da estrutura do solo e da descompactação do solo.

Solução: Acrescente umidade ao solo antes de continuar a compactar. Os solos granulares podem receber muita água sem ficar encharcados, porque a água tende a ser drenada. Acrescente um pouco mais do que o exigido idealmente para permitir que a água seque e seja drenada.

Causa: A composição do solo é formada por argila e não por cascalho ou material granular. Ou, a argila pode estar enterrada abaixo do nível da superfície e ainda afetar as medições.

Solução: Remova o solo argiloso se for prático, ou aceite valores mais baixos. Alternativamente, utilize uma tecnologia de medição de compactação integrada ao compactador e baseada na energia como, por exemplo, MDP, que não é tão afetada por solos coesivos.

Causa: O rolo está saltando nas áreas mais duras do solo. Quando o rolo salta, os RMVs são altos e os valores de medição da compactação (CMV) tendem a ficar mais baixos do que as condições do solo poderiam sugerir.

Solução: Reduza a amplitude no ajuste baixo. Se os saltos persistirem, a compactação está completa. Se você continuar a compactar enquanto o rolo está saltando, isso poderá causar a descompactação.

Causa: O solo argiloso está muito molhado.

Solução: Use um disco, um arado, ou um misturador rotativo para escavar o solo para que ele possa secar antes da tentativa de compactá-lo. Alternativamente, utilize uma tecnologia de medição de compactação integrada ao compactador e baseada na energia como, por exemplo, MDP que não é tão afetada por solos coesivos, mas note que os níveis de umidade ainda podem ser inadequados para se alcançar uma compactação apropriada.

Causa: O material que está sendo compactado foi colocado sobre uma base de solo não compactada ou não estabilizada. Como resultado, ele está flexionando muito durante a compactação e não será compactado.

Solução: A camada superior do solo vai precisar ser removida e a camada inferior do solo vai precisar ser remediada. Isso pode envolver a secagem e uma nova compactação, resultando em mais tempo ou algum outro agente estabilizador do solo, ou até mesmo escavar o solo pobre e substituí-lo.

Causa: A frequência do rolo é mais alta do que deveria (isso é pouco provável).

Solução: A frequência do rolo deveria estar perto de 30 Hz (1800 VPM) para os resultados mais consistentes. Peça para um mecânico determinar por que a velocidade da vibração não está agindo apropriadamente e corrija-a. Alternativamente uma tecnologia de medição de compactação integrada ao compactador e baseada na energia como, por exemplo, MDP, pode ser utilizada no modo estático (com a vibração desligada) para ver se isso tem algum efeito na uniformidade dos resultados da compactação.

Causa: Há um ou mais objetos enterrados que não são tão duros quanto o solo adjacente, um local onde árvores ou outras biomassas estão enterradas, resíduos enterrados, ou uma bola de argila. Isso será mostrado no mapa como uma área relativamente localizada.

Solução: Escave e substitua os materiais por um solo bom, se a situação ficar suficientemente séria para justificar essa media.

Causa: A velocidade de deslocamento é muito rápida.

Solução: Diminua a velocidade para obter uma produtividade mais eficiente e valores mais altos de compactação. Utilize o controle automático da velocidade se o compactador estiver equipado com esta opção.

Causa: A direção de deslocamento afeta os valores de medição integrada da compactação.

Solução: Isso é normal. Os valores serão diferentes no deslocamento para frente e para trás. Não há solução, a não ser deslocar o compactador somente em uma direção ou aceitar os valores de compactação apenas de uma direção durante a análise.



Problema: Os Valores de Medição da Compactação São Mais Altos do que Os Esperados

Causa: A base ou a sub-base é de um tipo de solo mais duro do que o esperado.

Solução: Nenhuma. Teste usando um penetrômetro de cone dinâmico ou verifique a resistência ao cisalhamento do subsolo. Se for mais forte, aceite os resultados como normais.

Causa: Objeto oculto enterrado abaixo da superfície. Pode ser uma rocha, uma laje de concreto, antigo pavimento, ou a antiga fundação de um edifício.

Solução: Escave o objeto para obter uma compactação uniforme.

Causa: A velocidade de deslocamento é ocasionalmente muito lenta. (Isso é improvável, a menos que o operador esteja tentando compactar usando um determinado número de passadas).

Solução: Mantenha a velocidade constante. Utilize o controle automático da velocidade se o compactador for equipado com esta opção.

Causa: O solo está congelado.

Solução: Nenhuma.

Problema: Os Valores de Medição da Compactação São Erráticos

Causa: As condições reais do solo são variáveis na superfície ou no nível abaixo da superfície. Isso é mais comum do que as pessoas imaginam. Objetos ocultos, mudanças nos materiais de aterro e teor mutável de água podem afetar os valores de medição da compactação integrada em compactadores.

Solução: Se variações sérias existem e precisam ser retificadas, comece com as soluções mais fáceis primeiro. Verifique o teor de umidade do solo e ajuste-a. escave objetos ocultos se necessário e substitua o solo se a situação for crítica.

Causa: Os valores de medição da compactação integrada em compactadores medidos no deslocamento à frente são mais altos ou mais baixos que os obtidos à ré.

Solução: Isso é normal, e varia com o tipo de solo e o nível de compactação. Tipicamente, as diferenças ficam menores à medida que o solo fica mais totalmente compactado.



Causa: O rolo está saltando durante a compactação. O salto pode causar grande variação nos valores de medição da compactação integrada ao compactador, porque os valores médios tendem a cair quando o rolo começa a descompactar em solo mais duro.

Solução: Mude para baixa amplitude. Se os saltos acontecem em baixa amplitude, o solo já atingiu a dureza máxima que o compactador pode conseguir. Alternativamente uma tecnologia de medição de compactação integrada ao compactador e baseada na energia como, por exemplo, MDP pode ser utilizada no modo estático (vibração desligada) para ver se isso vai causar algum efeito na uniformidade dos resultados da compactação.

[O FUTURO DA COMPACTAÇÃO INTELIGENTE]

Conforme foi explicado, a medição da dureza do solo é extremamente complexa devido a todas as variáveis envolvidas, no entanto, quando mais a CI é usada, mais profundo é seu entendimento sobre as capacidades e as deficiências da tecnologia. À medida que sua experiência com a compactação inteligente aumenta, novas tecnologias, como a Machine Drive Power, vão surgindo, oferecendo novos benefícios e solucionando problemas de aplicação que a última onda de progresso tem permitido. Com o passar do tempo, soluções de hardware para as tecnologias existentes tornaram-se menos dispendiosas, tornando-as mais acessíveis para nossos propósitos de aplicações de compactação do solo.

O compactador do futuro provavelmente terá múltiplas tecnologias de medição disponíveis, pois cada tecnologia tem diferentes capacidades úteis. Novas tecnologias de medição vão surgir – talvez radar de penetração no solo, imagens por ultrassom ou magnéticas. Imagens tridimensionais que documentem toda a estrutura da estrada poderão ser construídas. Tecnologias com sensores da umidade poderão alertar um operador para que ele entre em contato com um caminhão-pipa ou um ríper. Todo operador de compactador teria acesso a informações de todas as máquinas no canteiro de obras (comunicações entre uma máquina e outra). Isso oferece o progresso em tempo no canteiro de obras, com vantagens mais facilmente vistas com um número múltiplo de compactadores ou dispositivos de medição. Os superintendentes do canteiro de obras podem monitorar e usar os dados para tomar as decisões mais eficientes e menos dispendiosas do dia a dia.

Olhando para o futuro, os dados vão se tornar cada vez mais importantes. Dados de sensores que ainda serão desenvolvidos, e a habilidade de coletar dados, de maneira rápida e fácil, no canteiro de obras e transferi-los para outras aplicações fora da máquina (computador pessoal, tablets manuais, e outros) serão uma área de desenvolvimento específico. As tecnologias atuais já oferecem mais dados que podem ser facilmente classificados e que são úteis para os gerentes e inspetores os canteiros de obras de hoje. A capacidade da filtragem e classificação de dados fora da máquina, e a habilidade de criar um relatório no canteiro de obras que atenda às necessidades do usuário final serão de enorme importância e uma área onde muitas especificações serão escritas brevemente.

É uma era emocionante na ciência da compactação e o tempo dirá que avanços e tecnologias virão a seguir, mas uma coisa é certa: Com as economias de custo, a qualidade e as eficiências oferecidas pela compactação inteligente, as tecnologias serão cada vez mais exigidas e incluídas nas especificações dos canteiros de obras do mundo todo.

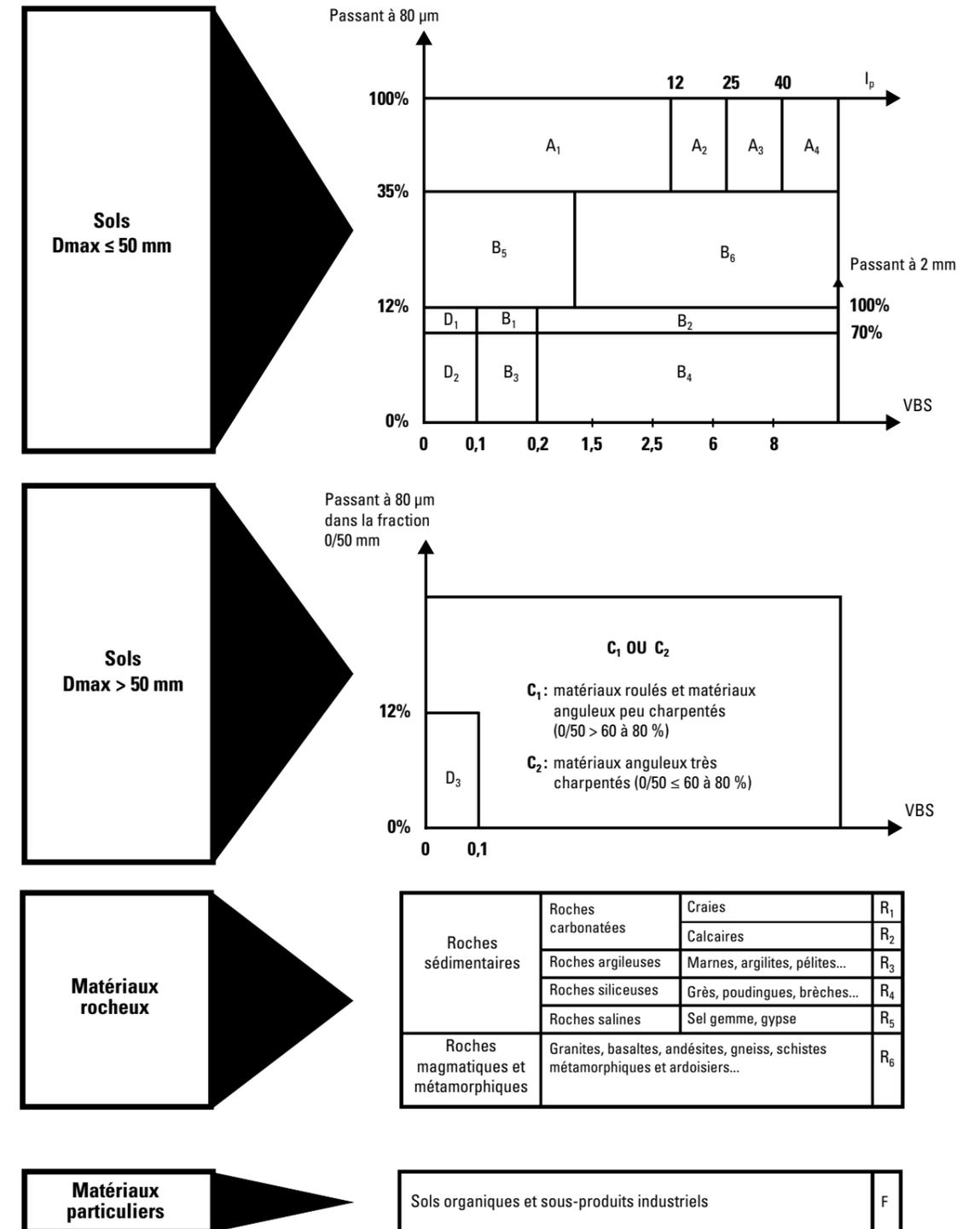
APÊNDICE

[SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS]

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				
Sieve Analysis Percent Passing:										
# 10	0-50		51-100	0-35	0-35	0-35	0-35	36-100	36-100	36-100
# 40	0-30	0-50								
# 200	0-15	0-25	0-10	0-35	0-35	0-35	0-35	36-100	36-100	36-100
Characteristics of Fraction Passing #40:										
Liquid Limit				0-40	41+	0-40	41+	0-40	41+	41+
Plasticity Index	0-6		N.P.	0-10	0-10	11+	11+	0-10	0-10	11+
Group Index	0		0	0	0-4		0-4	0-8	0-12	0-16
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 de Classificação de Solos

Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature



Sistema Francês para a Classificação de Solos

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		
	Organogene Schluffe $W_L = 35$ bis 50				OU		
Organogener Boden	< 40	—	Nicht brenn- und schwelbar	Organogene Tone $W_L > 50$	OT		
	≤ 40			Grob bis gemischtkörnige Böden mit humosen Beimengungen	OH		
				Grob bis gemischtkörnige Böden mit kalkigen, kieseligen Bildungen	OK		
				Nicht bis mäßig zersetzte Torfe	HN		
	Organischer Boden			—	—	Brenn- und schwelbar	Zersetzte Torfe
Mudden (Faulschlamm)		F					
Auffüllung aus Fremdstoffen		A					

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

Sistema Alemão para a Classificação de Solos

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
Poorly-graded	P	Low LL
		H
		L

Sistema Unificado para a Classificação de Solos

SOIL GROUPS		SUB-GROUPS and in-laboratory identification			
		GROUP SYMBOL	SUB-GROUP SYMBOL	FINES % < 0.06 mm	LIQUID LIMIT
GRAVEL and SAND may be qualified sandy GRAVEL and gravelly SAND where appropriate					
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-M	GWM GPM	5 to 15
		Clayey GRAVEL	G-F G-C	GWC GPC	
		Very silty GRAVEL	GM	GML, etc.	15 to 35
		Very clayey GRAVEL	GF 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-M	SWM SPM	15 to 35
		Clayey SAND	S-F S-C	SWC SPC	
		Very silty SAND	SM	SML, etc.	15 to 35
		Very clayey SAND	SF 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	< 35 35 to 70 50 to 70 70 to 90 > 90
		Sandy SILT	MS	MLS, etc.	
	SILTS and CLAYS 65% to 100% fines	Sandy CLAY	FS CS	CLS, etc.	
		SILT (M SOIL)	M	ML, etc.	
		CLAY	F 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

[EXIGÊNCIAS DE COMPACTAÇÃO]

Dispositivos integrados aos Compactadores com realização contínua de aplicação em compactação de solos

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)

Sistema do Reino Unido para a Classificação de Solos

GLOSSÁRIO DE TERMOS

- A -

Agregado	O componente mineral granular, que suporta carga de uma estrutura da estrada, normalmente areia, cascalho, conchas, laje, pedra britada ou finos.
Amplitude	A medida de metade do movimento vertical total de pico a pico de um rolo vibratório por ciclo completo.
Areia	Uma partícula mineral não aderente de tamanho e formato definidos.
Argila	Um mineral de granulação fina (solo) que usa cargas eletro-químicas na superfície para ficar bem aglutinado com água.
Aterro	Qualquer material acrescentado, cujo topo é mais alto que a superfície adjacente.

- B -

Base	Também conhecida como “curso de base”: uma camada de material específico ou selecionado de espessura planejada construída na sub-base com o propósito de cumprir uma ou mais funções, inclusive a distribuição da carga, oferecendo drenagem e minimizando a ação de congelamento.
Bem nivelado	A qualidade de solos de granulação densa em conter partículas de muitos tamanhos, facilitando a compactação.

- C -

Calibração	O processo de ajustar os parâmetros do sistema para maximizar suas capacidades para uso no material do local.
Camada	Uma única camada de material de solo colocado. A espessura pode variar.
Capilaridade	A habilidade de um material em absorver a água para cima ou lateralmente.
Carga Linear	A medida usada pela indústria para comparar o potencial de compactação de compactadores de rolo liso estático.
Cascalho	Um material mineral de granulação densa, definido pela USCS como aquelas partículas com menos de 75 mm (3 pol.) de diâmetro, que não passam através de uma peneira número 4.
Coefficiente de Uniformidade	Um parâmetro para descrever a distribuição do tamanho das partículas (curva de gradação) de um solo.
Coesividade	A habilidade de um material em manter sua resistência quando não confinado, isto é, em manter a aderência e sua forma através de mudanças no teor de umidade ou na submersão.
Compactação	O processo de reduzir vazios em um material através do uso de manipulação mecânica, aumentando a densidade.
Compactação Inteligente	De modo geral, a compactação inteligente pode ser definida como uma tecnologia integrada ao compactador aplicada ao processo de compactação, que melhora as eficiências no canteiro de obras, pela eliminação das conjecturas do ser humano.
Compactibilidade	O grau em que um material de solo é capaz de superar a resistência à deformação específica do material.

Compaction Meter Value (CMV) Uma indicação da dureza do solo calculada pela medição das forças G na frequência vibratória do rolo e na primeira frequência harmônica (2 vezes a frequência vibratória do rolo)

Compaction Meter Value Method Um método que indica a dureza do solo, inventado pela empresa suíça Geodynamik e utilizado pela Caterpillar.

Compressibilidade A taxa pela qual um material é reduzido em volume quando uma força é aplicada a ele.

Controle de Qualidade O procedimento que um empreiteiro implanta para assegurar que o trabalho de compactação será completado de acordo com as especificações.

- D -

De-coupling Também conhecida como “salto duplo”, é um fenômeno onde o rolo salta desde um impacto vibratório e sobe suficientemente alto para permitir que a vibração seguinte ocorra enquanto rolo ainda está no ar.

Densidade A medida de massa por unidade de volume; um indicador tradicional de resistência de suporte de carga.

Descompactação Uma perda de compactação devido à reaplicação de força compactiva desnecessária.

Distribuição de Partículas Veja Distribuição do Tamanho dos Grãos.

Distribuição do Tamanho dos Grãos A medida da faixa e distribuição de partículas de tamanhos diferentes em um solo.

Dureza (Solo) A habilidade de um material (solo) em resistir à deflexão sob carga; um importante indicador da resistência ao suporte de carga.

- E -

Estabilização do Solo O processo de potencializar a adequabilidade de um solo para um determinado propósito de construção.

Estação Uma área não padrão definida pelos engenheiros e marcada por estacas no canteiro de obras com o objetivo de controlar a preparação por seções administráveis.

Elasticidade A tendência de um material em retornar à sua forma original (ou quase original) depois que uma carga de compressão é removida.

- F -

Finos Geralmente, materiais de partículas de tamanho muito pequeno, abaixo de um determinado limite estabelecido pelo teste da peneira. Os finos passam através da peneira menor. Organizações no mundo todo têm definições independentes sobre o tamanho preciso da peneira, mas são aproximadamente os mesmos.

Força Centrífuga A força que faz com que um peso rotativo desbalanceado acelere para longe de seu eixo.

Força Total Aplicada Um cálculo da quantidade máxima de energia vibratória que um compactador pode aplicar no solo.

Frequência Uma medida do número de ciclos completos (por exemplo, vibrações) durante um tempo determinado.

Frequência da Ressonância Para compactadores vibratórios, o ponto em que o material do solo que está vibrando contribui suficientemente para a vibração do compactador, fazendo com que o esforço de compactação exceda a força centrífuga gerada, isto é, o resultado é maior que o esforço.

Frequência Natural	A frequência em que uma massa vibra devido às suas características próprias.
Fundação	O processo de redução da elevação da superfície devido à consolidação do material de aterro.
- G -	
Garantia de Qualidade	Os métodos de testes e dados que o proprietário do projeto usa para documentar a qualidade da compactação alcançada em um projeto.
Global Navigaton Satellite System (GNSS)	Um termo genérico usado para descrever as tecnologias de mapeamento baseado em satélites, que inclui GPS e GLONASS.
Global Positioning System (GPS)	Um sistema de navegação por rádio controlado no mundo todo pelos EUA, composto de uma constelação de 24 satélites e suas estações em terra.
GLONASS	Uma constelação de satélites russa similar ao GPS.
Gradação	A faixa de tamanho de partículas individuais do solo.
Gradação Uniforme	Também conhecida como gradação inadequada; a qualidade de solos com granulação densa em contar partículas de tamanho relativamente uniforme, dificultando a compactação.
Gradiente de Compactação	O grau de compactação através da profundidade de influência. O solo tende a ser menos compacto da superfície e ser mais compacto através de uma grande zona central, e torna-se menos compacto novamente em direção à profundidade extrema de influência.
Grão	Uma partícula mineral.
- I -	
Impacto	Uma força de magnitude aumentada criada por causar pressão estática para tornar-se dinâmica, por exemplo, a queda de um peso. Golpes de baixa frequência ou de frequência irregular (50-600 golpes por minuto) são considerados forças de impacto.
Índice de Plasticidade	A diferença entre o Limite Líquido e o Limite Plástico de um solo. Essa medida é usada para determinar a extensão de estabilização do solo necessária para os solos de granulação fina.
- L -	
Limite Líquido	Um Limite de Atterberg altamente significativo. É o ponto em que um solo contém tanta água que é considerado líquido.
Limite Plástico	Um Limite de Atterberg altamente significativo. É o ponto em que um solo retém umidade suficiente para tornar-se plástico.
- M -	
Manipulação	Um processo de amassamento que rearranja as partículas em uma massa mais densa.
Medição da Compactação Integrada à Máquina	A realização de medição da compactação com tecnologias incorporadas à máquina que está fazendo a compactação.
Método de Energia	O princípio por trás do Machine Drive Power (MDP), um método exclusivo da Caterpillar de determinar a compactação, através da medição a energia necessária para o deslocamento sobre o solo (resistência ao rolamento).

Método da Força/Deslocamento	Um método que indica a dureza do solo usando medições das características do rolo e da aceleração do rolo para calcular o deslocamento do rolo.
Método dos Limites de Atterberg	Um conjunto de padrões que descreve sete estágios de características do solo passando do sólido para o líquido. Os estágios mais importantes são o Limite Plástico e o Limite Líquido.
Modo de Produção	Um sistema de ajuste do compactador que potencializa o uso do sistema para aplicações de alta produção, onde a precisão não é a meta principal.
Modo de Prova	Um sistema de ajuste do compactador que potencializa o uso do sistema para aplicações de alta precisão, onde a produtividade da máquina não é a meta principal.
- N -	
Nível	A inclinação de uma superfície.
Nivelação Inadequada	Também conhecida como nivelação uniforme; a qualidade de solos de granulação densa em conter partículas de tamanho relativamente uniforme, dificultando a compactação.
- P -	
Passada	O número de vezes que um compactador vai passar sobre uma área do solo. Algumas vezes uma “passada” é definida como um deslocamento total de ida e volta, passando duas vezes sobre uma área em particular, e outras vezes uma passada significa um único exemplo que um compactador se desloca sobre uma área. A Caterpillar define uma passada como um único deslocamento sobre uma área, tanto à frente quanto à ré.
Permeabilidade	A habilidade de um material em permitir a passagem de um gás ou de um líquido.
Plasticidade	A propriedade de um solo de granulação fina que permite sua deformação além do ponto de recuperação sem rachar ou demonstrar uma apreciável mudança no volume.
Pressão Estática	Um peso aplicado ao esforço de compactação.
- R -	
Remediação	O processo de alteração do solo por meios químicos ou mecânicos para melhorar suas propriedades de engenharia.
Resistência ao Cisalhamento	A habilidade das partículas do solo em resistir ao deslizamento de umas contra as outras quando é aplicada uma força de compactação.
Resistência ao Rolamento	A quantidade de energia necessária para deslocar uma forma redonda através de um material.
Resistência de Suporte de Carga	A habilidade de um material em suportar uma carga.
Ressonância	A convergência das frequências vibratórias de duas massas que vibram.
- S -	
Salto Duplo	Ver De-coupling.
Silte	Um material mineral não aderente e de granulação fina (solo).
Solo	Material não consolidado composto de partículas minerais que podem ou não conter substâncias orgânicas.

Solo de granulação Densa Uma classificação de solo que envolve partículas (grãos) sem aderência. Areia e cascalho são considerados solos de granulação densa. Os solos de granulação densa são definidos como bem nivelados ou mal nivelados, o que reflete a habilidade do solo em ser compactado.

Solos de Granulação Fina Solos compostos predominantemente de finos.

Sub-base Uma camada entre o sub-nível e a base.

Sub-nível O solo preparado para suportar uma estrutura de tráfego. Essencialmente, ela age como a fundação da estrutura, e, algumas vezes, é conhecida como "solo de embasamento" ou "solo da fundação".

- T -

Teor de Umidade A quantidade de líquido (água) por volume de massa.

Teste Proctor (Padrão ou Modificado) Um teste de laboratório que determina a densidade seca máxima de um material de solo bem como o teor ideal de água para que seja alcançada a densidade máxima.

Textura Uma qualidade que define o atrito na superfície de uma partícula do solo.

- U -

Uniformidade A manutenção de consistência em materiais e aplicações.

- V -

Valor de Medição da Ressonância (RMV) Uma indicação do grau em que o rolo está saltando.

Vazio O espaço em um volume de material não ocupado por material mineral sólido.

Vibração Uma série golpes de alta frequência (1400-4000 golpes por minuto) que produz uma rápida sucessão de ondas de pressão. As vibrações produzidas por um compactador podem quebrar os vínculos entre as partículas de um material que está sendo compactado.



CAT CS78B

SAFETY WARNINGS
1. Always use proper tie-off technique. See the operator's manual for details.
2. Do not use the machine as a crane or hoist.
3. Do not lift or move loads that exceed the rated capacity.
4. Do not use the machine on uneven or slippery surfaces.
5. Do not use the machine on steep slopes.
6. Do not use the machine in restricted visibility.
7. Do not use the machine in hazardous conditions.
8. Do not use the machine in areas with overhead power lines.
9. Do not use the machine in areas with falling objects.
10. Do not use the machine in areas with unstable ground.

STUBBLESS



CATERPILLAR