Soft Soil Brazilian Review

IBSM EDIÇÃO AMÉRICA LATINA
NOVEMBRO - DEZEMBRO 2026

03
Soluções geotécnicas para solos moles. Pré-carregamento ou CPR Grouting? A comparação nunca feita.

18
Pré carregamento e CPR Grouting. Como cada técnica modifica a trajetória de tensões.

40
O comportamento do CPR Grouting e do Pré Carregamento durante a obra. O que as deformações, as poropressões e a instrumentação revelam sobre o desempenho do solo.

32 Consulta
O pré-carregamento convencional aplica sobrecarga na superfície para comprimir o solo mole. Como o CPR também introduz tensões no terreno e atua diretamente em profundidade, poderia ser considerado uma espécie de pré-carregamento interno?

MELHORAMENTO DO SOLO MOLE:

PRÉ CARREGAMENTO OU CPR GROUTING?

A semelhança termina onde o mecanismo começa.

Duas técnicas, duas trajetórias de tensões e comportamentos profundamente diferentes.



NOVEMBRO/ DEZEMBRO - 2026

Nº 50

IBSM INSTITUTO BRASILEIRO DO SOLO MOLE

SEÇÕES

3 SOLUÇÕES GEOTÉCNICAS PARA SOLOS MOLES. PRÉ-CARREGAMENTO OU CPR GROUTING? A COMPARAÇÃO NUNCA FEITA.

18 PRÉ-CARREGAMENTO E CPR GROUTING. COMO CADA TÉCNICA MODIFICA A TRAJETÓRIA DE TENSÕES.

32 - CONSULTA
O PRÉ-CARREGAMENTO CONVENCIONAL APLICA SOBRECARGA NA SUPERFÍCIE PARA COMPRIMIR O SOLO MOLE. COMO O CPR TAMBÉM INTRODUZ TENSÕES NO TERRENO E ATUA DIRETAMENTE EM PROFUNDIDADE, PODERIA SER CONSIDERADO UMA ESPÉCIE DE PRÉ-CARREGAMENTO INTERNO?

40 O COMPORTAMENTO DO CPR GROUTING E DO PRÉ-CARREGAMENTO DURANTE A OBRA. O QUE AS DEFORMAÇÕES, AS POROPRESSÕES E A INSTRUMENTAÇÃO REVELAM SOBRE O DESEMPENHO DO SOLO.







Editorial

Comparar técnicas é compreender mecanismos. Durante décadas, o pré-carregamento, frequentemente associado ao uso de geodrenos, consolidou-se como uma das principais soluções para o tratamento de depósitos de solos moles. Trata-se de uma técnica consagrada, fundamentada na aplicação antecipada de sobrecarga para acelerar o processo de adensamento, reduzindo o recalque que ocorre após a implantação da obra. Entretanto, a engenharia geotécnica evoluiu. Depósitos mais profundos, obras com cronogramas cada vez mais restritos e exigências crescentes de desempenho passaram a exigir compreensão mais ampla do que simplesmente calcular o recalque final. É necessário saber como cada técnica modifica o maciço, qual trajetória de tensões produz e em que profundidade seus efeitos realmente se manifestam. É neste contexto que esta edição da Soft Soil Brazilian Review propõe uma comparação há muito necessária: pré-carregamento ou CPR Grouting? O objetivo não é estabelecer disputa entre técnicas, nem apresentar uma resposta única para todos os empreendimentos. O propósito é discutir os mecanismos geotécnicos envolvidos. Técnicas diferentes podem apresentar reduções globais de recalque aparentemente semelhantes e, ainda assim, produzir estados de tensão, deformações e comportamentos durante a obra completamente distintos. No pré-carregamento, a compressão é imposta a partir da superfície. Sua eficiência depende da magnitude da sobrecarga, do tempo disponível, das condições de drenagem e da profundidade do depósito mole. Em camadas muito espessas, a experiência de campo e as medições com células de pressão, mostram que os acréscimos de tensão mais significativos podem permanecer concentrados nos primeiros metros. Consequentemente, parcelas mais profundas do solo mole podem não receber o mesmo nível de solicitação e permanecer suscetíveis à deformações futuras. O CPR Grouting atua de maneira diferente. A formação sequencial de bulbos, via expansão de cavidades, no interior do depósito, promove compressão radial, redistribuição das tensões, dissipação das pressões neutras e alteração do estado de tensões do próprio solo. Não se trata simplesmente, de apenas criar elementos rígidos, mas de produzir o geoenrijecimento do maciço entre os bulbos de compressão. Essa diferença conduz à questão que encerra esta edição: o CPR pode ser considerado um pré-carregamento interno? Em certo sentido, sim, porque introduz esforços no interior do depósito antes da aplicação das cargas definitivas. Contudo, esta definição é insuficiente. O carregamento não é aplicado verticalmente a partir da superfície mas, tridimensionalmente, no interior do maciço. O processo interfere na trajetória de tensões, na condição do K_0, na resistência não drenada, na rigidez e na própria estrutura do solo. Mais importante do que escolher, antecipadamente, uma técnica é compreender qual mecanismo responde melhor às condições reais de cada obra. Profundidade e heterogeneidade do depósito, prazo disponível, magnitude das cargas, tolerância aos recalques e comportamento durante a execução devem orientar esta decisão. Ao colocar lado a lado o pré-carregamento e o CPR Grouting, esta edição convida o leitor a ultrapassar comparações baseadas apenas em custo, prazo ou redução estimada do recalque. Comparar verdadeiramente duas técnicas significa compreender como cada uma transforma o solo. E é justamente nesta compreensão que começa a moderna engenharia geotécnica.

Eng.º M.Sc. Joaquim Rodrigues
Especialista em solos moles

SOLUÇÕES GEOTÉCNICAS PARA SOLOS MOLES. PRÉ-CARREGAMENTO OU CPR GROUTING? A COMPARAÇÃO NUNCA FEITA



ANÁLISE
Eng. M.Sc. Joaquim Rodrigues

Fig. 1 - O desafio do melhoramento do solo mole. O desempenho geotécnico não depende apenas da técnica empregada, mas de como ela modifica o estado de tensões, a resistência e a deformabilidade do maciço ao longo do tempo. Melhoramento do solo na BR - 356, com CPR Grouting.

Durante décadas, o pré-carregamento consolidou-se como a solução mais utilizada para preparar depósitos de solos moles, antes da implantação de aterros, rodovias, pátios portuários, áreas aeroportuárias e grandes plataformas industriais. Seu princípio é pela aplicação antecipada, no terreno, de uma carga igual ou superior àquela que atuará durante a vida útil da obra. Sob esse carregamento, o excesso de poropressão gerado no solo dissipa-se gradualmente, a tensão efetiva aumenta e parte dos recalques que ocorreriam depois da construção, é provocado antes da entrada da infraestrutura em operação. O CPR Grouting também provoca compressão, drenagem e mudança do estado de tensões do solo mole, no entanto, não depende da permanência de uma grande sobrecarga superficial para produzir estes efeitos. Esta diferença, aparentemente simples, altera completamente a maneira como o solo é melhorado. No pré-carregamento, a ação age na superfície e é transmitida, com limitação, para o interior do depósito mole, já que a influência das tensões de compressão diminui rapidamente com a profundidade. No CPR, o processo é iniciado dentro da própria camada compressível, pela expansão controlada de cavidades, devido à formação sucessiva de bulbos de compressão. A comparação entre as duas técnicas, portanto, não deve se limitar a perguntar qual delas produz maior

rigidez e resistência. A questão interessante e decisiva é como cada método modifica o solo, em quanto tempo essa modificação ocorre e que tipo de comportamento permanece depois da readequação imposta.

O pré-carregamento continua atual?

Seria incorreto considerar o pré-carregamento uma técnica ultrapassada. Pelo contrário, os trabalhos publicados em 2025 e 2026 mostram intensa atividade científica em torno do método, principalmente em obras de recuperação de áreas costeiras, depósitos de dragagem, portos, rodovias e grandes plataformas. O que mudou, nos últimos 25 anos, não foi o princípio físico da técnica, mas a forma de acelerar, controlar e prever o processo de consolidação. As pesquisas recentes concentram-se principalmente em:

- pré-carregamento convencional com aterro de sobrecarga;
- sobrecarga associada a drenos verticais pré-fabricados;
- pré-carregamento a vácuo;
- combinação entre vácuo e sobrecarga;
- vácuo assistido por injeção de ar;
- consolidação eletro-osmótica;
- carregamentos em etapas ou pulsos;
- modelos que incorporam grandes deformações, fluência e perda de eficiência dos drenos;
- previsão de recalques baseada em instrumentação e assimilação de dados.

Uma revisão publicada em 2025, sobre consolidação drenante de solos moles marinhos, confirma que



Figura 2 – Melhoramento de solos moles com CPR Grouting.
Execução de tratamento geotécnico em depósito de solo mole. Enquanto o pré-carregamento promove o adensamento por meio da aplicação de sobrecargas externas, o CPR Grouting atua diretamente no interior do maciço, mediante expansão controlada de cavidades, induzindo alterações no estado de tensões, dissipação de poropressões e aumento da resistência e rigidez do solo.

o campo de pesquisa está migrando dos sistemas convencionais para métodos combinados, capazes de aumentar a drenagem e reduzir a duração do tratamento. O princípio não mudou, ou seja, aplicar hoje a carga de amanhã. No pré-carregamento convencional, constrói-se sobre o terreno um aterro provisório. A tensão aplicada deve ser suficiente para levar o solo a uma condição de tensão efetiva, superior àquela que será produzida pela obra definitiva. Enquanto a sobrecarga permanece sobre o terreno, o solo mole consolida e recalca. A água é expulsa progressivamente dos vazios, o índice de vazios diminui e a resistência não drenada tende a aumentar. Depois de atingido o grau de consolidação especificado, parte ou a totalidade da sobrecarga é removida. O objetivo é transformar o solo, normalmente adensado, em solo com determinado nível de sobreadensamento. Assim, quando a carga definitiva for implantada, o terreno deverá trabalhar inicialmente dentro de uma faixa de recompressão, apresentando menores deformações. O mecanismo é geotecnicamente consistente. O problema está no tempo necessário para que ocorra. Nas argilas, com baixa permeabilidade, a água pode precisar percorrer vários metros até atingir uma fronteira drenante. Sem medidas adicionais, o período necessário para alcançar o grau de consolidação desejado pode ser incompatível com o cronograma da obra.

Drenos verticais encurtam o caminho, mas não criam carga.

A introdução de drenos verticais pré-fabricados reduz, consideravelmente, o tempo de espera do pré-carregamento. Em vez de a água deslocam-se apenas verticalmente até uma camada drenante, os drenos estabelecem caminhos radiais mais curtos. Mas é importante compreender que o dreno não comprime o solo e não produz adensamento por si mesmo, apenas oferece uma rota preferencial para a água mobilizada pelo carregamento.

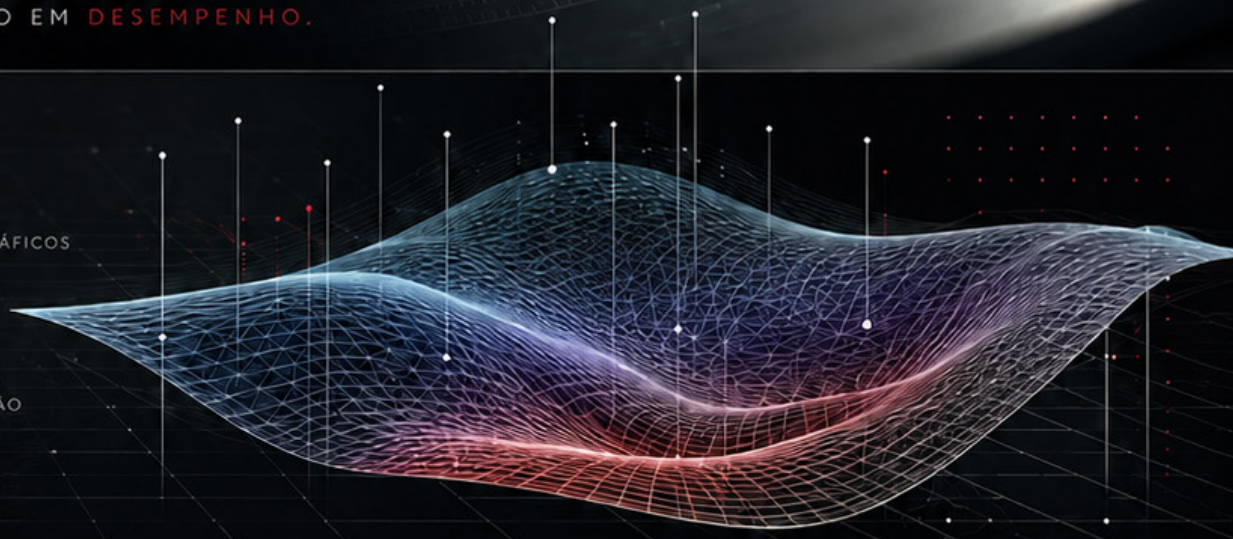
CPR®

GROUTING

Melhorar solos moles exige precisão.

A PRECISÃO TRANSFORMA CONHECIMENTO EM DESEMPENHO.

- INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA
- PRESSIOMETRIA E ENSAIOS TOMOGRÁFICOS
- MODELAGEM NUMÉRICA
- MONITORAMENTO E INSTRUMENTAÇÃO
- EXECUÇÃO CONTROLADA



O **CPR Grouting** integra investigação geotécnica, modelagem numérica, monitoramento e execução controlada para transformar solos moles em plataformas seguras para infraestrutura.



geotecnia@engegraut.com.br | @engegraut_geotecnia | Engegraut Engenharia Geotécnica

O pré-carregamento a vácuo

No pré-carregamento a vácuo, procura-se aumentar a tensão efetiva reduzindo a pressão da água nos poros, em vez de depender exclusivamente do peso de um aterro. Uma membrana impermeável, associada a drenos e bombas, permite estabelecer pressão negativa no sistema. Teoricamente, uma redução de poropressão, de determinada magnitude, pode produzir aumento equivalente da tensão efetiva, desde que o vácuo seja transmitido de maneira uniforme ao maciço. O que não costuma ser fácil. A vantagem é particularmente importante em terrenos de resistência muito baixa, nos quais a construção de um aterro elevado poderia provocar ruptura ou grandes deslocamentos laterais. Entretanto, a eficiência real depende da estanqueidade do sistema e da capacidade de transmitir o vácuo para camadas mais profundas. O que também não é fácil. Trabalhos de 2025 destacam três limitações recorrentes:

1. colmatação dos drenos verticais;
2. atenuação do vácuo com a distância e a profundidade;
3. permanência de deformações pós-construtivas, mesmo após o tratamento.

Estes problemas explicam por que a pesquisa atual não se concentra apenas no vácuo convencional, mas em sistemas capazes de manter a drenagem ativa durante todo o processo, uma das principais tendências de 2025/ 2026. Entre a evolução mais discutida encontra-se o air-boosted vacuum preloading, ou pré-carregamento a vácuo assistido por ar. Neste sistema, o vácuo é combinado com injeções controladas de ar comprimido no interior do solo. A introdução do ar procura produzir três efeitos:

- aumentar o gradiente hidráulico;
- criar ou reabrir caminhos de drenagem;
- reduzir a colmatação ao redor dos drenos.

Um modelo publicado em 2025 incorporou, simultaneamente, a perda de pressão do vácuo e a atenuação da pressão de ar ao longo dos depósitos moles. O estudo evidencia que o desempenho não pode ser analisado admitindo pressões uniformes em toda a profundidade, porque tanto o vácuo quanto o efeito da injeção reduzem-se à medida que se afastam dos pontos de aplicação. É relevante, porque reconhece uma das dificuldades práticas do pré-carregamento, ou seja, o sistema pode apresentar boas leituras junto às bombas e aos coletores sem, necessariamente, transmitir a mesma condição ao interior de toda a camada mole.

Eletro-osmose ou mover a água onde a permeabilidade é mínima

Outra linha de desenvolvimento associa o pré-carregamento à vácuo à eletro-osmose. Ao aplicar um campo elétrico contínuo ao solo a água, presente nos poros, pode ser induzida a migrar em direção aos eletrodos de drenagem. A técnica torna-se particularmente interessante em solos argilosos com turfa, nos quais o fluxo hidráulico convencional é muito lento. Um estudo experimental, publicado pela ASCE, em outubro de 2025, concluiu que a eletro-osmose aumentou significativamente a eficiência da drenagem de argilas dragadas submetidas a vácuo. Pesquisas recentes estudam a combinação entre vácuo, sobrecarga e eletro-osmose para solos bastante saturados. A solução acrescenta novos componentes ao processo, como o consumo de energia, comportamento dos eletrodos, variação do pH, reações eletroquímicas, corrosão e necessidade de controle da distribuição do campo elétrico. Portanto, trata-se de uma tentativa de compensar a baixa permeabilida-



Fig. 3 - Melhoramento do solo mole em um grande empreendimento no Rio de Janeiro, por meio do CPR Grouting com equipamento de perfuração e de formação de verticais com bulbos de compressão do solo.



Fig. 4 - Vista geral da execução de geodrenos verticais em depósito de solo mole, destinados a acelerar o processo de adensamento por meio da redução dos caminhos de drenagem da água intersticial, favorecendo a dissipação das poropressões e o desenvolvimento dos recalques durante o pré-carregamento.

de natural do solo por meio de força adicional de transporte da água.

O problema da colmatação

A colmatação tornou-se um dos temas centrais da pesquisa internacional. Durante a drenagem, partículas finas migram e acumulam-se junto aos drenos verticais, formando-se, então, a zona de baixa permeabilidade, conhecida como coluna de solo adensado ao redor do dreno. A consequência é paradoxal, já que o material mais próximo do dreno consolida-se, no entanto essa própria consolidação dificulta a continuidade do fluxo, vindo de regiões mais afastadas. Um estudo de 2026, sobre solos dragados, avaliou a utilização de agentes compostos por cimento, cal, escória siderúrgica e escória de alto-forno para criar uma estrutura parcialmente floculada, mantendo canais de drenagem abertos. A formulação estudada preservou permeabilidades de duas a cinco vezes superiores às do solo amolgado, com substituição de grande parte do cimento por resíduos industriais. A pesquisa revela um aspecto importante, ou seja, para que o pré-carregamento continue avançando, tornou-se necessário modificar não apenas o sistema de drenagem mas, em alguns casos, a própria estrutura do material tratado.

Carregamento em estágios ou a segurança antes da velocidade

Quando a resistência não drenada inicial é muito baixa, a sobrecarga não pode e não deve ser aplicada de uma só vez. O aterro precisa ser construído em etapas. Após cada estágio, aguarda-se a dissipação da poropressão e o ganho de resistência antes de acrescentar a camada seguinte. O procedimento reduz o risco de ruptura, mas aumenta a dependência de instrumentação, interpretação, tomada de decisão durante a obra e, claro, tempo. Estudos de 2025 e 2026 continuam analisando o comportamento de solos submetidos a carregamentos em múltiplos estágios, incluindo monitoramento sincronizado ao longo da profundidade e carregamentos pulsados associados à vácuo. O cronograma executivo deixa de ser definido apenas por datas, passando a depender da resposta do terreno com a:

- estabilização do recalque;
- dissipação da poropressão;
- ganho de resistência;
- controle dos deslocamentos laterais;
- manutenção do fator de segurança.

ROCTEST

PIEZÔMETRO AUTOCRAVÁVEL (PWP)



A série PWP de piezômetros de corda vibrante (autocraváveis) foi projetada para medir, com precisão, a poropressão em depósitos de solos moles. Suas características são:

- **ROBUSTEZ**
- **PRECISÃO**
- **CONFIABILIDADE**

Representante exclusivo no Brasil: **3GEO TECNOLOGIA LTDA**
+55 21 2718 3968 / vendas@3geotecnologia.com / www.3geotecnologia.com

Observa-se, então, que o pré-carregamento transforma-se em um processo observacional. Cada novo estágio deve ser autorizado pelo comportamento medido no estágio anterior.

A previsão do recalque tornou-se orientado por dados

Outro avanço recente está na interpretação do monitoramento. Modelos tradicionais, baseados em curvas de recalque versus tempo, continuam úteis, mas apresentam limitações quando o solo é estratificado, altamente compressível ou sujeito a grandes deformações, como é comum. Os trabalhos mais recentes procuram incorporar a:

- variação da permeabilidade durante a consolidação;
- grandes deformações;
- comportamento não linear;
- fluência;
- perda de eficiência dos drenos;
- distribuição não uniforme do vácuo;
- atualização dos parâmetros com dados de campo.

Em 2025, observou-se a apresentação de modelos, de previsão de recalques, que utilizam otimização computacional e técnicas de assimilação de dados para atualizar continuamente as estimativas a partir do monitoramento da obra. Uma revisão sistemática destacou o crescimento das técnicas de retroanálise estatística, aplicadas a aterros sobre solos moles. Em vez de considerar os parâmetros obtidos, na investigação inicial, como valores imutáveis, os dados reais do recalque e poropressão passam a retroalimentar o modelo geotécnico.



Figura 5 – Execução de serviços de melhoramento de solos moles, com utilização de CPR Grouting, visando ao aumento da resistência e à redução da compressibilidade do maciço.

MÉTODO OBSERVACIONAL: O SOLO ORIENTANDO A GEOTECNIA.

O método observacional é uma abordagem geotécnica que permite acompanhar o comportamento real do solo durante a execução de uma obra, comparando os resultados medidos com aqueles previstos em projeto. Por meio de instrumentos como piezômetros, inclinômetros e marcos de recalque, monitoram-se as deformações, os deslocamentos e as poropressões desenvolvidas no maciço. Quando os resultados diferem das previsões, medidas previamente planejadas permitem ajustar o processo construtivo, mantendo as condições de segurança e desempenho, ou seja, o método observacional transforma o monitoramento geotécnico em uma ferramenta de decisão, permitindo que o comportamento real do solo oriente os ajustes necessários durante a obra. Na engenharia do solo mole, observar, medir e interpretar é tão importante quanto projetar.

Consolidar não significa eliminar todo o recalque

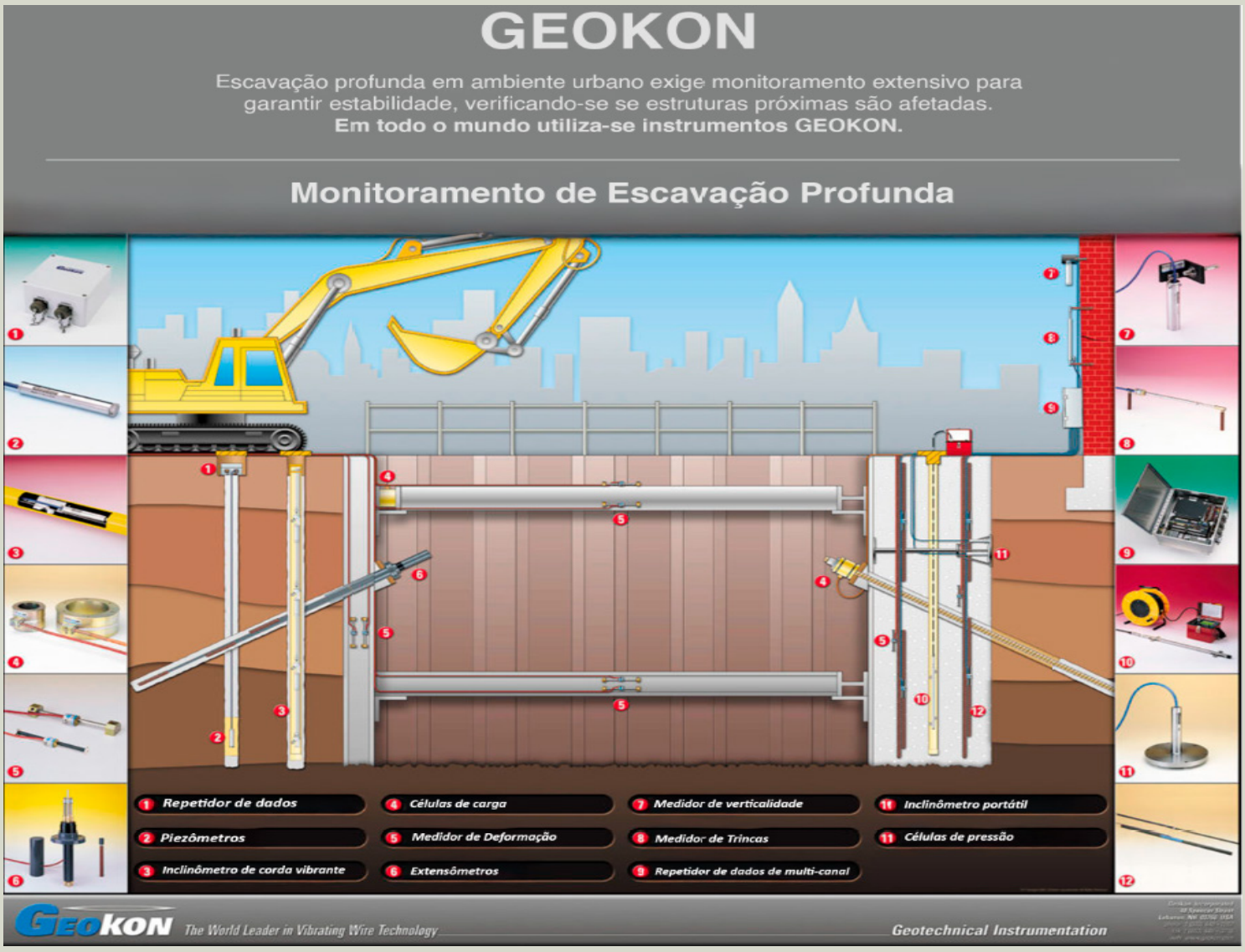
Uma das questões mais importantes levantadas pela literatura recente é o comportamento posterior à retirada da sobrecarga ou à interrupção do vácuo. Mesmo quando grande parte do excesso de poropressão foi dissipado, o solo pode continuar deformando por fluência, rearranjo estrutural e compressão secundária. Um estudo publicado em 2026 analisou, especificamente, a fluência durante e após o pré-carregamento a vácuo. Os autores observaram que o recalque posterior é influenciado pela espessura do solo mole, pelo índice de compressão secundária, pela relação entre as cargas de pré-carregamento e a de serviço e pelo espaçamento dos drenos. Um outro estudo recente incorporou comportamento não linear e fluência, à consolidação de terrenos melhorados com drenos verticais. Todos estes estudos refor-

çam a conclusão fundamental de que o grau de consolidação, ao final do tratamento não é, isoladamente, garantia de desempenho durante toda a vida útil da infraestrutura. Também é necessário avaliar o estado de tensões deixado no solo, a magnitude da tensão de pré-adensamento alcançada, a compressão secundária e a rigidez operacional correspondente ao nível de deformação da obra.

Onde o melhoramento do solo com CPR Grouting muda toda esta lógica

Neste eficiente método de consolidação do solo mole, a compressão começa dentro do solo, e não na superfície. Após a cravação de geodrenos, é feito o bombeamento do graut, relativamente seco, formando-se bulbos sequenciais verticais, a partir da base da camada mole, até a superfície. Cada um destes bulbos comprime, radialmente, o solo ao redor, via expansão de cavidades, forçando-o a drenar para os drenos existentes ao seu redor, promovendo a consolidação em todos os níveis do depósito de solo mole. O solo mole não é substituído, assim como a carga da futura estrutura não é simplesmente transferida através de colunas. O objetivo do CPR Grouting é modificar o próprio maciço, para parâmetros geotécnicos de resistência e rigidez pré-estabelecidos, concordante com a malha de verticais dos bulbos de compressão do solo, de acordo com o volume e a pressão impostos. Em resumo, ocorre:

- redução o índice de vazios;
- expulsão da grande parte da água;
- aumento da tensão efetiva para níveis desejados;
- elevação da tensão de pré-adensamento;
- aumento da resistência não drenada para níveis desejados;
- aumento da rigidez para níveis desejados;



SOLOTEST®

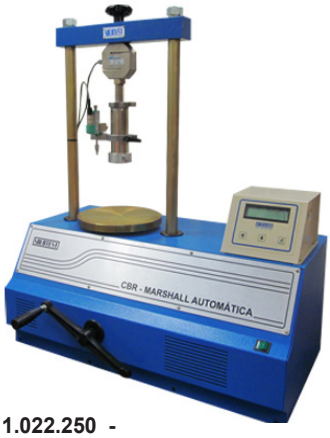
A solotest equipa os melhores laboratórios de solos, concreto e misturas asfálticas da América Latina, com equipamentos próprios e de seus parceiros internacionais.



1.014.250 -
Extrator Shelby de Bancada



1.055.001 -
Prensa de Adensamento



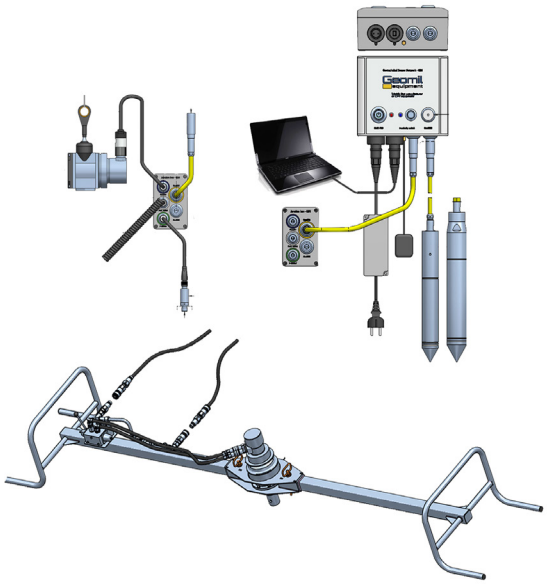
1.022.250 -
Prensa CBR / Marshall Digital Microprocessada



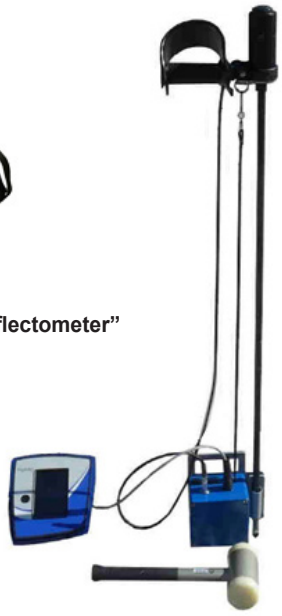
4.100.030 -
Medidor de Densidade de Solo Não Núclear (SDG)



4.100.300 -
LWD “Light Wheight Deflectometer”



4.688.020 - Sistema hidráulico para realização de ensaio CPT em diversos tipos de Solos



4.100.035 - Penetrômetro Dinâmico Eletrônico para Solos Panda

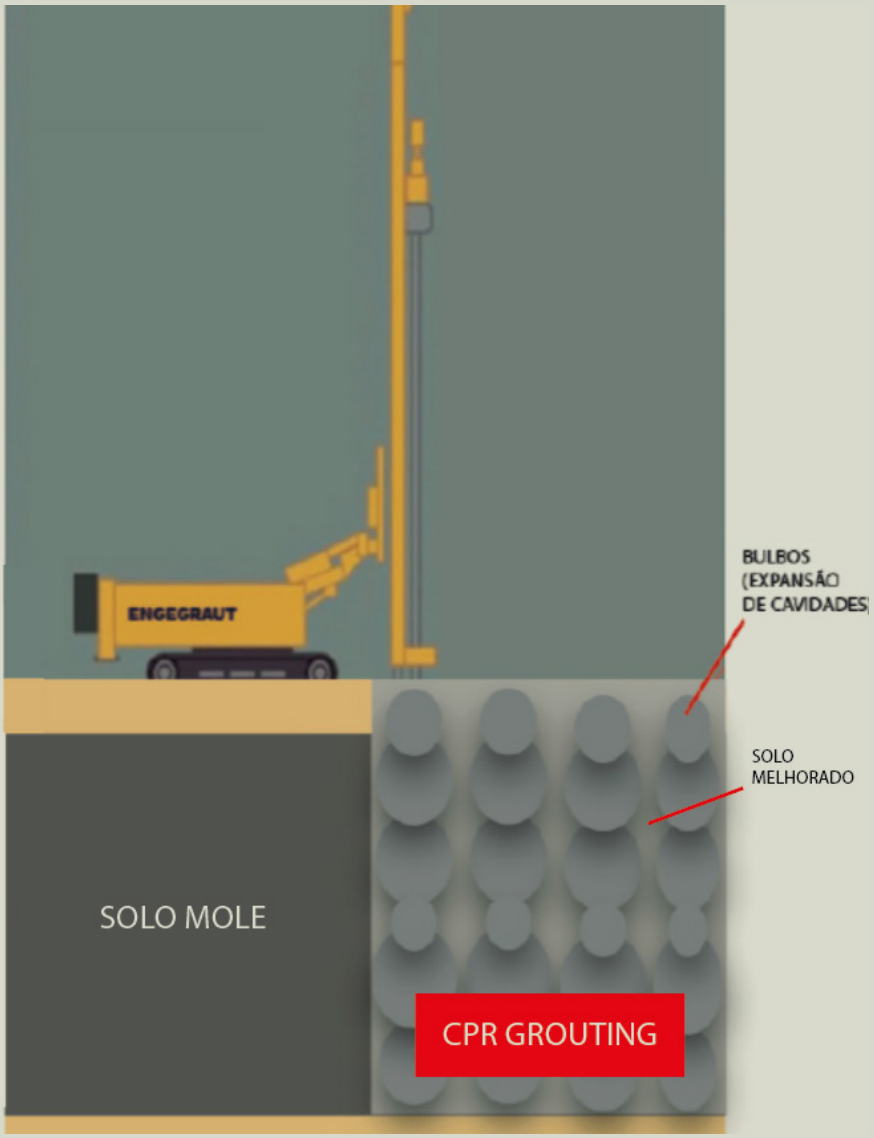
Rua Conselheiro Carrão, nº 275
Bela Vista - SP -Brasil - CEP 01328-000
Tel: (11) 3289-0211
www.solotest.com | solotest@solotest.com

- redução da compressibilidade para níveis desejados;
- criação de uma massa de solo com comportamento completamente homogêneo;
- Eliminação do recalque diferencial.

Portanto, embora com a efetiva ocorrência de drenagem e adensamento, o CPR não é apenas um pré-carregamento subterrâneo. A expansão das cavidades com a formação dos bulbos, impõe ao solo trajetórias tridimensionais de tensões, com forte componente radial e cisalhante.

Duas trajetórias de tensões diferentes

No pré-carregamento, o solo recebe um incremento de tensões verticais. Durante a fase não drenada inicial, o carregamento gera excessos de poropressão e, à medida que a água sai,





este excesso é convertido em tensão efetiva. A trajetória das tensões tende a aproximar-se de uma condição de compressão unidimensional, embora ocorram deformações laterais e redistribuições no campo. No CPR, a expansão dos bulbos atua localmente em várias direções. Cada metro cúbico do solo é submetido a compressão radial, alteração das tensões principais e deformações cisalhantes entre zonas de expansão. Esta diferença afeta:

- a velocidade de mobilização do tratamento;
- a distribuição espacial das deformações;
- o ganho de resistência;
- a evolução da rigidez;
- a anisotropia;
- a homogeneização do depósito;
- a maneira como o solo responderá à carga futura.

Enquanto o pré-carregamento procura reproduzir, antecipadamente, a ação de uma carga superficial, o CPR modifica diretamente o estado de tensões no interior de toda a massa compressível.

Tempo de tratamento

O pré-carregamento depende da velocidade da dissipação da poropressão. Mesmo com drenos, vácuo ou sistemas assistidos, é necessário manter as condições de carregamento até que o grau de consolidação e a tensão de pré-adensamento especificados sejam atingidos. O CPR introduz ações de compressão radial diretamente nos níveis tratados. A resposta inicial ocorre durante a formação dos bulbos, embora a dissipação das poropressões geradas e o ajuste do maciço continuem depois da execução, o que não significa que não haja tempo geotécnico no CPR. Significa que a energia responsável pela mudança, não depende exclusivamente da espera sob uma sobrecarga instalada na superfície.

Ocupação da área

O pré-carregamento exige espaço para o aterro, bermas, taludes, estoques de material, sistemas de drenagem e, frequentemente, remoção posterior da sobrecarga, além do perigo de ruturas. Em áreas confinadas, junto a estruturas existentes ou em vias que precisam permanecer em operação, esta ocupação representa limitação decisiva. O CPR Grouting é executado por pontos de tratamento e pode ser adaptado a faixas de trabalho menores. Esta característica amplia sua aplicação em serviços de melhoramento do solo localizados, interrupção de recalques e obras nas quais não é possível construir e manter grandes aterros provisórios.

Estabilidade durante a execução

No pré-carregamento, a própria carga utilizada para melhorar o solo pode provocar a ruptura do depósito mole. Por isso, estágios construtivos, bermas, geossintéticos e monitoramento de poropressões e deslocamentos laterais tornam-se fundamentais. No pré-carregamento a vácuo, parte deste risco pode ser reduzido, porque o aumento da tensão efetiva é obtido



Fig. 7 - Deformações e ondulações no pavimento rodoviário decorrentes de recalques diferenciais do subleito, associados à presença de solos moles e à passagem de cargas de tráfego.
A imagem ilustra como a baixa rigidez e a elevada compressibilidade do terreno de fundação podem comprometer a regularidade longitudinal da rodovia, afetando o conforto, a segurança e o desempenho da infraestrutura.

Are you looking for a soil improvement in portuguese?

BEST SELLER

MELHORAMENTO DO SOLO MOLE E O GEOENRIJECIMENTO



Adquira seu exemplar através do email: ofitexto@ofitexto.com.br ou atendimento@softsoilgroup.com.br
ou pelo site www.lojaofitexto.com.br

com menor acréscimo de tensão total. Ainda assim, falhas de vedação, perda de vácuo, movimentações periféricas e heterogeneidade do tratamento precisam ser bem controlados. No CPR Grouting, a questão principal está associada ao controle da expansão das cavidades e à interação entre os pontos executados. Volume, pressão, sequência, espaçamento, profundidade e resposta do terreno devem ser acompanhados para se obter valores de rigidez e resistência desejados. As duas técnicas, portanto, precisam de controle. Mas não controlam o mesmo fenômeno.

O indicador mais importante não é apenas o recalque desenvolvido

No pré-carregamento, é comum utilizar o recalque acumulado como principal evidência de que o tratamento avançou. Este indicador é importante, mas incompleto. Um grande recalque, durante o pré-carregamento, demonstra que houve redução de volume. Não demonstra, isoladamente, que toda a área atingiu a mesma rigidez, que a tensão de pré-adensamento é uniforme ou que a fluência futura será desprezível. No CPR Grouting, também não basta registrar os volumes bombeados ou as pressões de execução, razão pela qual verifica-se o efeito produzido no solo entre os bulbos, com piezometria, pressiometria e com tomografia por imagem. Nos dois casos, o desempenho deve ser analisado por um conjunto de indicadores:

- recalque;
- poropressão;
- resistência não drenada;
- tensão de pré-adensamento;
- módulo de deformabilidade;
- velocidade da onda cisalhante correlacionado para rigidez e resistência;
- homogeneidade espacial;
- deformações laterais;
- comportamento sob a carga de serviço.

Em ambos os casos, a instrumentação de campo passa a ter papel decisivo.

Pré-carregamento ou CPR Grouting?

A resposta *não deve ser ideológica*. O pré-carregamento continua sendo uma solução tecnicamente adequada quando existem área disponível, material para sobrecarga, tempo de espera, condições para instalação de drenos, instrumentação e, particularmente, quando a espessura do solo mole for relativamente superficial. Nesta condição, pode ser especialmente competitivo em grandes áreas livres, nas quais a futura carga é relativamente uniforme e o cronograma admite processo prolongado de consolidação. O CPR Grouting torna-se particularmente relevante quando:

- o prazo é incompatível com longos períodos de espera;
- não existe espaço para grandes aterros de sobrecarga;
- a estabilidade impede a aplicação rápida do carregamento superficial;
- o solo precisa ser melhorado sob ou próximo a estruturas existentes;
- é necessário atuar em profundidades ou faixas específicas;
- o objetivo inclui aumento de rigidez e homogeneização, e não apenas antecipação de recalques;
- a obra exige intervenção localizada sem interrupção completa da operação;
- depósitos de solo mole heterogeneos e com grande profundidade.



Fig. 8 - Execução de melhoramento de solos moles com CPR Grouting na BR 356, visando ao aumento da resistência ao cisalhamento, à redução da compressibilidade e ao controle do recalque do terreno.

PRESSIÔMETRO

Um ensaio geotécnico completo realizado no campo

Fácil de operar e 100 % viável



ROCTEST

Representante exclusivo no Brasil

+55 21 2718 3968

3Geo TECNOLOGIA

vendas@3geotecnologia.com

www.3geotecnologia.com

Uma limitação inerente ao pré-carregamento em depósitos espessos de solo mole é a redução progressiva do incremento de tensões com a profundidade. Embora os geodrenos acelerem a dissipação das poropressões, não aumentam as tensões verticais induzidas pelo aterro. Assim, quando depósitos de solos moles apresentam espessuras da ordem de 10, 20 ou até 30 metros, apenas a parcela superior do maciço recebe incrementos de tensão de compressão suficientes para promover um adensamento significativo, enquanto as camadas mais profundas permanecem submetidas a incrementos muito menores ou inexistentes. Na prática, a influência efetiva do carregamento tende a concentrar-se nos primeiros metros do depósito de solo mole, variando conforme a geometria do aterro e as características do solo. Como consequência, em depósitos espessos e heterogêneos, parte do solo mole permanece pouco adensada após a retirada da sobrecarga. Durante a vida útil do empreendimento ou da rodovia, as camadas profundas continuam deformando-se sob o peso do aterro e do tráfego, favorecendo recalques residuais e diferenciais que se manifestam na forma de ondulações longitudinais, desníveis e necessidade de manutenção frequente do pavimento. O que vemos com frequência em nossas estradas. Ao contrário do pré-carregamento, cuja ação depende exclusivamente da propagação das tensões de compressão geradas na superfície, o CPR Grouting atua diretamente no interior do depósito, promovendo a readequação das propriedades geotécnicas em toda a profundidade previamente definida em projeto. Desta forma, o tratamento deixa de depender da capacidade de transmissão das tensões superficiais e passa a modificar diretamente o estado de rigidez do maciço ao longo da profundidade a ser melhorada. Esta comparação é tecnicamente consistente porque contrapõe os mecanismos distintos de pré-carregamento que atua pela aplicação de uma sobrecarga superficial, enquanto o CPR Grouting atua pela modificação direta do maciço na profundidade necessária, o que reforça a diferença conceitual entre as duas abordagens, sem depender apenas da comparação de resultados. A engenharia geotécnica de 2025–2026 mostra que o desafio já não é simplesmente fazer o solo recalcar antes da obra. O desafio é saber quanto do depósito foi efetivamente modificado, qual rigidez foi alcançada, qual parcela de deformação ainda poderá ocorrer e como o terreno responderá às solicitações reais da infraestrutura. Por isso, a pergunta "pré-carregamento ou CPR Grouting?" não deve ser respondida apenas pelo custo por metro quadrado ou pelo recalque observado durante a execução mas, sim, pela trajetória de tensões criada, pelo tempo disponível, pela estabilidade construtiva, pelo nível de homogeneidade obtido e, sobretudo, pelo desempenho que permanecerá depois que o tratamento terminar.

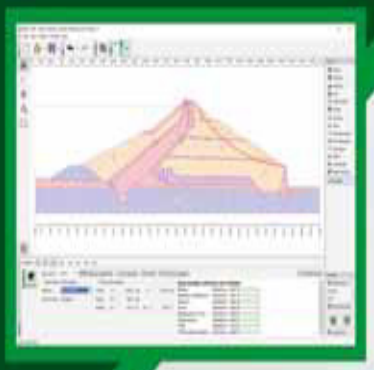


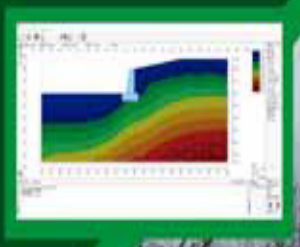
Figura 9 – Execução do melhoramento de solos moles por meio do CPR Grouting. Vista geral da frente de trabalho, destacando os equipamentos de perfuração e formação dos bulbos empregados no tratamento do maciço. A intervenção busca melhorar as propriedades geotécnicas do solo, aumentando sua resistência e rigidez, reduzindo sua compressibilidade e proporcionando melhores condições de estabilidade e controle dos recalques na construção da BR 356.

REFERÊNCIAS

- Joaquim Rodrigues é engenheiro geotécnico M.Sc. Formado no Rio de Janeiro em 1977 e pós-graduado pela COPPE na Universidade Federal do Rio de Janeiro. Diretor do Instituto Brasileiro do Solo Mole e da Engegraut Geotecnia e Engenharia, associada à ABMS e ao American Society of Civil Engineers desde 1994. Desenvolveu duas técnicas de melhoramento de solos moles, sendo motivo de patente o GEOENRIJECIMENTO, utilizada hoje em todo o Brasil.
- Rujikiatkamjorn, C.; Indraratna, B. (2013). Current state of the art in vacuum preloading for stabilising soft soil. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 44(4), 77–86.
- Mesri, G.; Khan, A.Q. (2012). Ground improvement using vacuum loading together with vertical drains. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(6), 680–689.
- Indraratna, B.; Geng, X.; Rujikiatkamjorn, C. (2010). Review of methods of analysis for the use of vacuum preloading and vertical drains for soft clay improvement. Geomechanics and Geoengineering, 5(4), 223–236.
- Tang, M.; Shang, J.Q. (2000). Vacuum preloading consolidation of Yaoqiang Airport runway. Géotechnique, 50(6), 613–623.
- Indraratna, B.; Redana, I.W. (1997). Plane strain modeling of smear effects associated with vertical drains. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123(5), 474–478.
- ASCE/Geo-Institute (2019). Compaction Grouting Consensus Guide. ASCE/G-I 53-19. American Society of Civil Engineers. A norma descreve explicitamente a injeção lenta e controlada de grout de baixa mobilidade e o aumento de resistência e rigidez decorrente da compactação do terreno.

- Análise de Estabilidade
- Escavações e Contenções
- Muros e Gabiões
- Recalque
- Sondagens de Solo
- Túneis e Poços
- Estudos geológicos
- Muros e Gabiões







AVALIE GRATUITAMENTE

Solicite: comercial@solucoescad.com.br

Distribuido por:

SOLUÇÕES CAD BIM

www.solucoescad.com.br

Eng.º Thomas Kim

PRÉ-CARREGAMENTO E CPR GROUTING. COMO CADA TÉCNICA MODIFICA A TRAJETÓRIA DE TENSÕES.



Eng. Thomas Kim

Fig. 1 - Figura 1 – Execução do CPR Grouting em depósito de solo mole, com aplicação controlada de grout para formação sequencial de bulbos em profundidade. O processo promove a expansão de cavidades, modificando o estado de tensões do maciço, aumentando as tensões efetivas e favorecendo o adensamento e o ganho de resistência do solo.

Pré-carregamento e CPR reduzem recalques, conduzindo o solo por caminhos de tensão completamente diferentes. O melhoramento de um depósito de solo mole não deve ser avaliado apenas pelo recalque observado durante a execução da obra. Duas técnicas produzem redução aparente das deformações e, ainda assim, modificam o maciço por mecanismos inteiramente distintos. O pré-carregamento atua a partir da superfície, por meio da aplicação temporária de sobrecarga. O CPR, por sua vez, atua diretamente no interior do depósito, mediante a formação sequencial de bulbos de grout, que comprimem radialmente o solo circundante. Em ambos os casos melhora-se o comportamento do terreno. Entretanto, as trajetórias de tensões, a profundidade de influência e o estado final alcançado pelo solo são bem diferentes. Compreender esta distinção é fundamental, sobretudo quando o depósito de argila mole apresenta grandes espessuras.

O que significa modificar a trajetória de tensões?

Antes da execução de qualquer tratamento, o solo mole encontra-se submetido ao seu estado natural de tensões, resultante do peso das camadas sobrejacentes, da posição do nível d'água e de sua história geológica. A tensão total vertical é parcialmente suportada pelo esqueleto do solo e parcialmente pela água existente nos vazios. A parcela efetivamente transmitida entre as partículas corresponde à tensão efetiva, responsável pelo controle da resis-

O que é trajetória de tensões no solo?

A trajetória de tensões representa o caminho percorrido pelo estado de tensões do solo quando submetido a carregamentos ou intervenções geotécnicas. Em solos moles, esta trajetória depende das variações das tensões totais, das pressões neutras e, consequentemente, das tensões efetivas, que governam a resistência e as deformações do maciço. No pré-carregamento, o aumento das tensões efetivas ocorre progressivamente, à medida que o excesso de poropressão se dissipa. No CPR Grouting, a expansão controlada de cavidades modifica diretamente o campo de tensões, gerando compressão e deformações no solo, com posterior dissipação das poropressões e aumento das tensões efetivas. Compreender a trajetória de tensões é fundamental para prever a resistência, o recalque e a estabilidade do solo tratado.



tência, da rigidez e da compressibilidade do maciço. Quando uma obra acrescenta carregamento ao terreno, este equilíbrio é alterado. Dependendo da técnica empregada, o solo pode ser levado a uma trajetória predominantemente vertical, radial ou tridimensional. Não basta, portanto, afirmar que uma técnica "adensa" ou "melhora" o terreno. É necessário saber:

- quais componentes de tensão foram modificadas;
- em que profundidade essa modificação ocorreu;
- quanto de poropressão foi gerado;
- como ocorreu sua dissipação;
- e qual estado de tensão efetiva permaneceu após o tratamento.

É justamente neste ponto que se estabelece a diferença importante entre o pré-carregamento e o CPR.

A trajetória de tensões produzida pelo pré-carregamento

No pré-carregamento, um aterro temporário é executado sobre o terreno para aplicar uma tensão superior ou equivalente àquela que será produzida pela obra definitiva. Imediatamente após a aplicação da sobrecarga, especialmente em argilas de baixa permeabilidade, grande parte do incremento de tensão total é inicialmente absorvida pela água dos poros. Ocorre, então, aumento da poropressão. À medida que a água é expulsa e a poropressão se dissipa, o incremento de tensão é progressivamente transferido para o esqueleto do solo. A tensão efetiva vertical aumenta, o índice de vazios diminui e o terreno sofre consolidação. A trajetória de tensões é, portanto, governada por três fatores principais:

- magnitude da sobrecarga;
- condições de drenagem;
- tempo disponível para a consolidação.

Quando são empregados drenos verticais, a distância de drenagem é reduzida e a dissipação das poropressões é acelerada. Os drenos, entretanto, não tem nenhuma ingerência na profundidade de propagação das tensões produzidas pelo aterro. acelerando, apenas, a consolidação onde o incremento de tensão já existe. Esta distinção é essencial.

A principal limitação: a redução das tensões com a profundidade

A sobrecarga aplicada na superfície não produz o mesmo incremento de tensão em toda a espessura do depósito. Sua influência diminui progressivamente com a profundidade, variando com a altura, a largura e a geometria do aterro. Em casos instrumentados com células de pressão, observa-se que os incrementos mais significativos de tensão podem permanecer concentrados aproximadamente nos primeiros 5 a 8 metros. Este intervalo

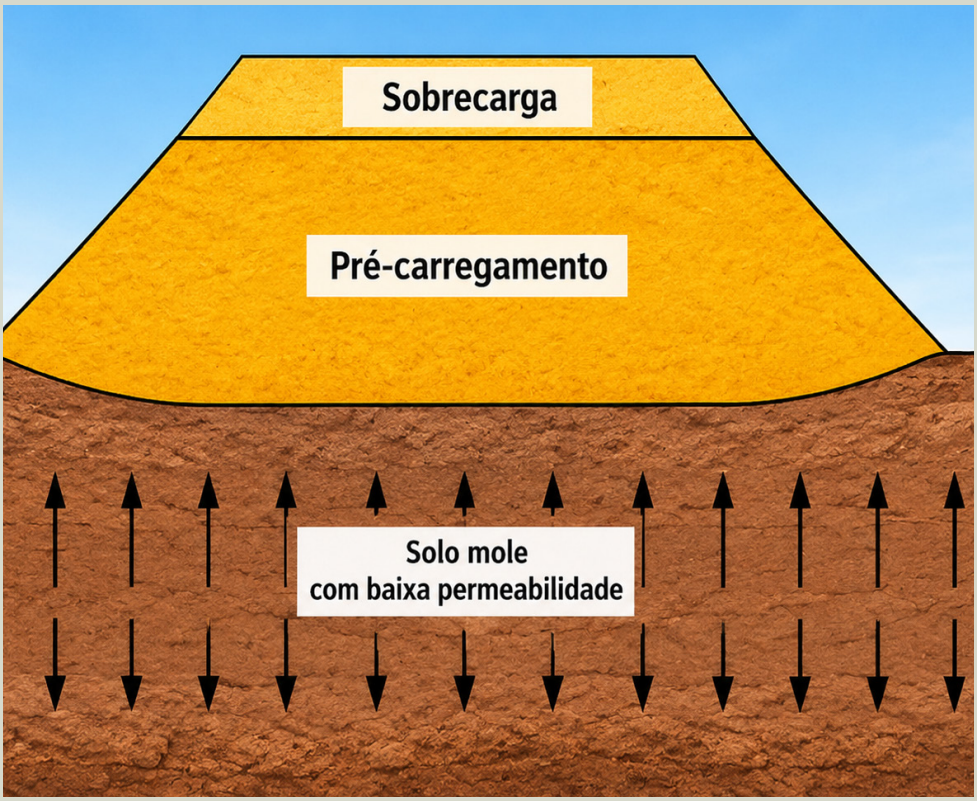


Fig. 2 - Representação esquemática do pré-carregamento em solo mole, com aplicação de sobrecarga para acelerar o adensamento e promover a dissipação das poropressões.

não representa um limite universal, mas uma ordem de grandeza observada em determinadas condições de obra. A consequência torna-se especialmente importante quando existem depósitos de solo mole com espessuras superiores a 10 metros. Nesta situação, a parte superior do depósito pode sofrer consolidação significativa, enquanto as camadas mais profundas recebem incrementos de tensão bem menores ou nulos. O pré-carregamento pode, assim, produzir um solo parcialmente adensado, sem modificar de maneira suficiente toda a massa compressível. Quanto maior a espessura do depósito — 10, 20 ou mesmo 30 metros — maior poderá ser a parcela profunda que permanece pouco ou nada solicitada durante o pré-carregamento. Isto significa que a retirada da sobrecarga e a conclusão aparente do recalque superficial não representam necessariamente o esgotamento das deformações futuras de todo o depósito.

Quando o recalque reaparece depois da obra

Após a entrada em operação da infraestrutura, as camadas profundas que não foram suficientemente solicitadas pelo pré-carregamento continuam submetidas às cargas permanentes e móveis. O resultado pode ser o desenvolvimento de recalques residuais ao longo do tempo. Quando a espessura, a resistência, a compressibilidade ou a permeabilidade do solo variam lateralmente, estes recalques deixam de ser uniformes e passam a produzir deformações diferenciais. Em rodovias construídas sobre depósitos profundos de solos moles, estas manifestações são percebidas sob a forma de:

- ondulações longitudinais com sucessivos altos e baixos no pavimento;
- perda de nivelamento;
- depressões localizadas;
- recalques junto aos encontros de pontes;
- necessidade recorrente de recomposição asfáltica sem nenhum efeito.



Fig. 3 - Melhoramento do solo na BR 356, em Ervália, MG.

Inúmeras rodovias, implantadas sobre as planícies de solos moles, apresentam manifestações desse tipo. Evidentemente, o desempenho de cada trecho também depende da geometria dos aterros, das condições de drenagem, da variabilidade geotécnica, do controle executivo e das soluções adotadas nas transições. Entretanto, o aspecto conceitual permanece: quando o depósito compressível é muito mais profundo do que a zona efetivamente influenciada pela pré-carga, parte relevante do problema geotécnico permanece no terreno. A superfície é novamente nivelada, mas o maciço profundo continua deformável. Com o tempo, o

perfil longitudinal volta a adquirir o aspecto de um "tobogã", muitas vezes corrigido por novos recapeamentos que acrescentam carga e podem alimentar outro ciclo de recalques. Esta será uma excelente passagem para a segunda metade da matéria, na qual entraremos no CPR e mostraremos como a formação dos bulbos, nas profundidades definidas em projeto, permite modificar diretamente as tensões radiais e horizontais em toda a espessura do depósito tratável.

A trajetória de tensões produzida pelo CPR Grouting

Enquanto o pré-carregamento modifica o depósito a partir de uma sobrecarga aplicada na superfície, o CPR atua diretamente no interior do maciço, nas profundidades estabelecidas pelo projeto. O tratamento é realizado por meio da formação sequencial de bulbos de grout de baixa mobilidade, produzindo expansão controlada, comprimindo o solo mole circundante, deslocando-o radialmente e modificando seu estado de tensões. O mecanismo nada tem a ver com a simplória e pouco eficiente introdução de elementos rígidos para transferir as cargas da estrutura a uma camada resistente. O objetivo fundamental é modificar o comportamento do próprio solo mole, aumentando seu confinamento, sua resistência e sua rigidez, reduzindo sua compressibilidade. Trata-se, portanto, de trajetórias de tensões bem diferentes daquelas produzidas pelo pré-carregamento.

Expansão de cavidade e compressão radial

A formação de um bulbo de CPR pode ser interpretada geotecnicamente por meio do conceito da expansão de cavidade. Durante a injeção do grout seco, o volume introduzido provoca a expansão da cavidade e comprime o solo ao redor. Esta compressão não ocorre apenas na direção vertical, mas desenvolvendo-se tridimensionalmente, com forte mobilização das tensões radiais e tangenciais. Na região próxima ao bulbo, o solo é submetido a grandes deformações e pode atingir estado plástico. À medida que aumenta a distância em relação ao ponto de expansão, as deformações diminuem e o maciço passa a responder em condições elastoplásticas e, posteriormente, predominantemente elásticas. Forma-se, assim, uma zona de solo comprimido ao redor do bulbo, cuja extensão depende de fatores como:

- volume de grout introduzido;
- geometria e espaçamento dos bulbos;
- resistência não drenada do solo;
- rigidez inicial do depósito;
- nível de confinamento;
- condições de drenagem;
- velocidade e sequência de execução.

O tratamento resulta da interação entre os bulbos formados ao longo



Figura 4 – Execução do CPR Grouting em solo mole. Vista aérea da operação de melhoramento do terreno, com equipamentos de perfuração e central de produção de grout. O tratamento promove a expansão controlada de cavidades no interior do maciço, gerando tensões radiais, deslocamento lateral do solo e dissipação progressiva das poropressões, com consequente aumento das tensões efetivas, da resistência ao cisalhamento e da rigidez do solo tratado.

SOLO MOLE NO SEU PROJETO?

NÃO ESCOLHA TÉCNICAS **ALTERNATIVAS** OU **ADAPTADAS** PARA SOLOS MOLES.



FAÇA
MELHORAMENTO DO SOLO

MELHORAMENTO DE SOLOS MOLES É
CPR GROUTING
*100% TEORIA DA CONSOLIDAÇÃO

ENGEGRAUT

TECNOLOGIA PATENTEADA
UTILIZADA EM TODO BRASIL HÁ MAIS DE 30 ANOS.

MAIS SEGURANÇA
PARA O SEU PROJETO

DESEMPENHO GEOTÉCNICO
SUPERIOR E DURADOURO

VISITE NOSSO SITE:
WWW.ENGEGRAUT.COM.BR

facebook.com/engegraut

@engegraut

www.engegraut.com.br

das verticais e entre verticais vizinhas. Por isso, o CPR deve ser compreendido como um processo de modificação geotécnica do maciço, e não como execução de inclusões rígidas.

O aumento das tensões horizontais

No estado geostático, a relação entre tensões efetivas horizontal e vertical é representada pelo coeficiente de empuxo no repouso:

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$$

No pré-carregamento, o incremento de tensão é inicialmente imposto na direção vertical. Durante a consolidação, as tensões horizontais também podem aumentar devido à restrição às deformações laterais, mas a trajetória continua sendo comandada pela sobrecarga aplicada na superfície. No CPR, a expansão dos bulbos atua diretamente na direção radial, produzindo incremento importante das tensões horizontais, alterando completamente o confinamento do solo. Este aumento do confinamento é particularmente relevante porque a resposta da argila mole não fica condicionada apenas à tensão vertical efetiva. Sua resistência, rigidez e deformabilidade também são influenciadas pela tensão média efetiva, pela tensão desviadora e pela trajetória seguida até o estado atual. Assim, o CPR não promove simplesmente a consolidação vertical acelerada, mas conduz o solo por trajetórias tridimensionais de tensões, modificando a relação entre as componentes vertical e horizontal. Após o melhoramento, o coeficiente de tensões horizontais do maciço deixa de corresponder ao K_0 original. O solo passa a apresentar estado de maior adensamento e confinamento, compatível com a compressão radial imposta durante a formação dos bulbos.

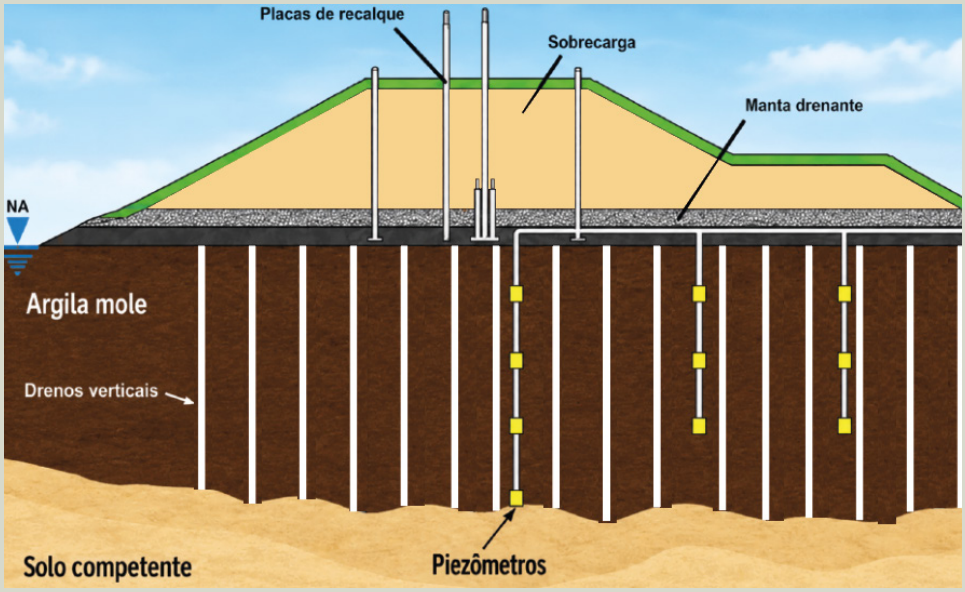


Figura 5 — Seção típica de pré-carregamento com drenos verticais, mostrando a sobrecarga, a manta drenante e a instrumentação por placas de recalque e piezômetros para acompanhamento do processo de adensamento da argila mole.

O que é coeficiente de empuxo em repouso (K_0)?

O coeficiente de empuxo em repouso, K_0, representa a relação entre as tensões efetivas horizontal e vertical existentes no solo, quando não há deformação lateral.
$K_0 = \sigma'h / \sigma'v$
Em que:

- σ'h: tensão efetiva horizontal.
- σ'v: tensão efetiva vertical.

Em argilas moles normalmente adensadas, K_0 apresenta frequentemente valores próximos de 0,5 a 0,6, indicando que a tensão horizontal é inferior à vertical.
Por que o K_0 é importante no melhoramento de solos?
O K_0 caracteriza o estado inicial de tensões do maciço. Técnicas como o CPR Grouting, ao promoverem a expansão controlada de cavidades, modificam as tensões horizontais e a trajetória de tensões do solo.
Após a dissipação das poropressões geradas, o maciço apresenta maiores tensões efetivas horizontais, resistência e rigidez, alterando sua condição inicial de equilíbrio.
O K_0 ajuda a compreender como o solo está confinado lateralmente e como seu estado de tensões pode ser modificado pelo melhoramento geotécnico.

O que acontece com as poropressões?

A formação de bulbos expansivos em uma argila saturada ocorre inicialmente em condição predominantemente não drenada. Como a água presente nos vazios não consegue escapar instantaneamente, parte do incremento de tensão total gera excessos de poropressão. Portanto, não é rigorosamente correto afirmar que toda a tensão aplicada durante a injeção se transforma imediatamente em tensão efetiva. O processo ocorre em duas etapas principais. Na primeira, durante a expansão do bulbo, aumentam as tensões totais e são geradas poropressões positivas no solo circundante. Na segunda, após a injeção,

essas poropressões começam a se dissipar. À medida que a dissipação ocorre, uma parcela crescente da tensão total passa a ser suportada pelo esqueleto do solo. Como resultado, aumentam as tensões efetivas e o solo evolui para um estado bem mais resistente, rígido e absolutamente menos compressível. A sequência pode ser resumida da seguinte forma:

Expansão dos bulbos
↓
Compressão radial
↓
Geração de poropressão
↓
Dissipação
↓
Aumento de tensões efetivas

A presença de caminhos de drenagem naturais e instalados no projeto aceleram essa dissipação. A instrumentação, por piezômetros, permite acompanhar a geração e a redução das poropressões durante e após a execução dos bulbos.

Bulbos e compressão radial do solo: um tratamento construído de baixo para cima.

Os bulbos de CPR são formados sucessivamente nas cotas determinadas pelo projeto. Após a formação do primeiro bulbo, o equipamento sobe até a cota seguinte e executa nova expansão. O procedimento continua até que seja concluída a vertical de tratamento junto à superfície. Essa sequência permite atuar diretamente nas diferentes profundidades do depósito. Ao contrário da sobrecarga superficial, cuja influência diminui à medida que se aprofunda no terreno, o CPR leva o mecanismo de compressão até a camada que precisa ser tratada. Em um depósito de 15 metros de solo mole, por exemplo, não se depende

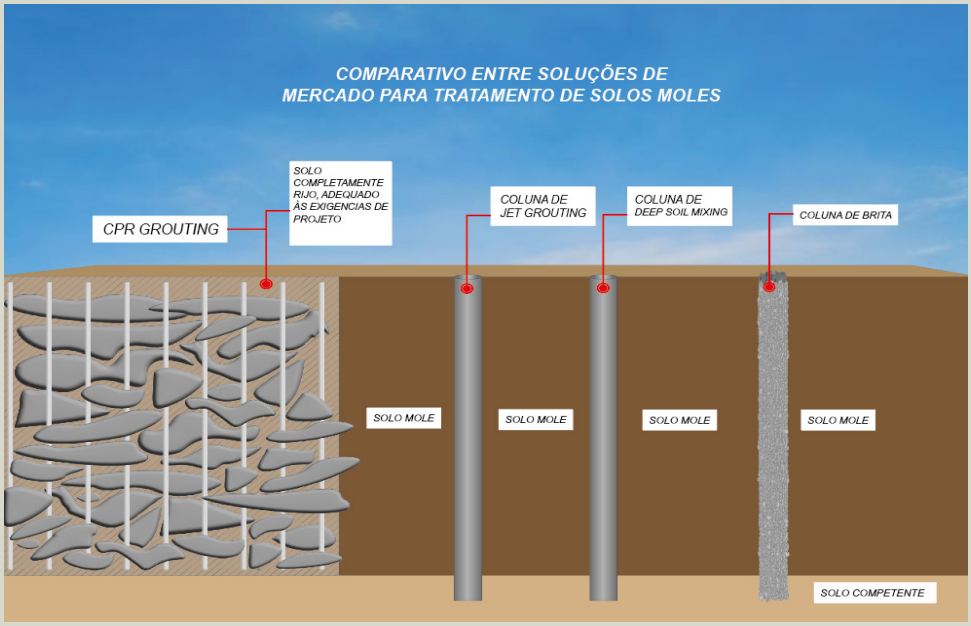


Fig. 6 – Comparação entre métodos de tratamento de solos moles para obras rodoviárias. O CPR Grouting promove o melhoramento efetivo do maciço, aumentando sua rigidez e resistência, por meio da consolidação e do geoenrijecimento da massa de solo, readequando o comportamento geotécnico do terreno eliminando recalques totais e diferenciais. Em contraste, técnicas como colunas de brita, Deep Soil Mixing e Jet Grouting atuam predominantemente como elementos estruturais verticais, promovendo a transferência parcial das cargas para camadas mais profundas ou mais resistentes, sem melhorar o solo mole entre as colunas, resultando em concentrações de tensões, movimentações diferenciais e redução da eficiência em solos muito moles, heterogêneos ou espessos. Nestas condições, a eficiência destas técnicas costuma ser limitada, frequentemente não ultrapassando 50%.

O que é a tensão desviadora (q)?

A tensão desviadora representa a diferença entre as tensões principais máxima e mínima atuantes no solo. É responsável pela tendência de mudança de forma do maciço, produzindo deformações distorcionais e mobilizando sua resistência ao cisalhamento.

No ensaio triaxial convencional, é expressa por:

$q = \sigma_1 - \sigma_3$
Em que:

- σ_1: tensão principal maior.
- σ_3: tensão principal menor.

Qual sua importância nos solos moles?
Em argilas moles, o aumento da tensão desviadora pode provocar deformações cisalhantes significativas e, quando a resistência disponível é atingida, levar à ruptura. No pré-carregamento por aterros, o aumento das tensões verticais pode elevar a tensão desviadora, mobilizando progressivamente a resistência ao cisalhamento do solo. No CPR Grouting, a expansão controlada de cavidades modifica o estado tridimensional de tensões, produzindo incrementos de tensões radiais e circunferenciais e mobilizando deformações no maciço. A posterior dissipação das poropressões favorece o aumento das tensões efetivas e da resistência do solo.
Em síntese: enquanto a tensão média efetiva está associada ao confinamento e à compressão volumétrica do solo, a tensão desviadora está relacionada à distorção e à mobilização da resistência ao cisalhamento. Esta explicação complementa o coeficiente K_0 e ajuda o leitor a compreender por que o pré-carregamento e o CPR Grouting produzem trajetórias de tensões diferentes, embora ambos possam contribuir para o adensamento e o ganho de resistência das argilas moles.



SENSORES DE RECALQUE



CÉLULAS DE PRESSÃO PARA ATERROS

GEOKON

TRUSTED MEASUREMENTS®

EQUIPAMENTOS GEOTÉCNICOS



CÉLULAS DE PRESSÃO CRAVÁVEIS NO TERRENO



PIEZÔMETROS

A Geokon é líder mundial em automação e instrumentação geotécnica para **monitoramento de solos**

REPRESENTANTE EXCLUSIVO NO BRASIL

GS ENGENHARIA

GS ENGENHARIA LTDA

(41) 3402-1707

GSENGENHARIA.COM.BR

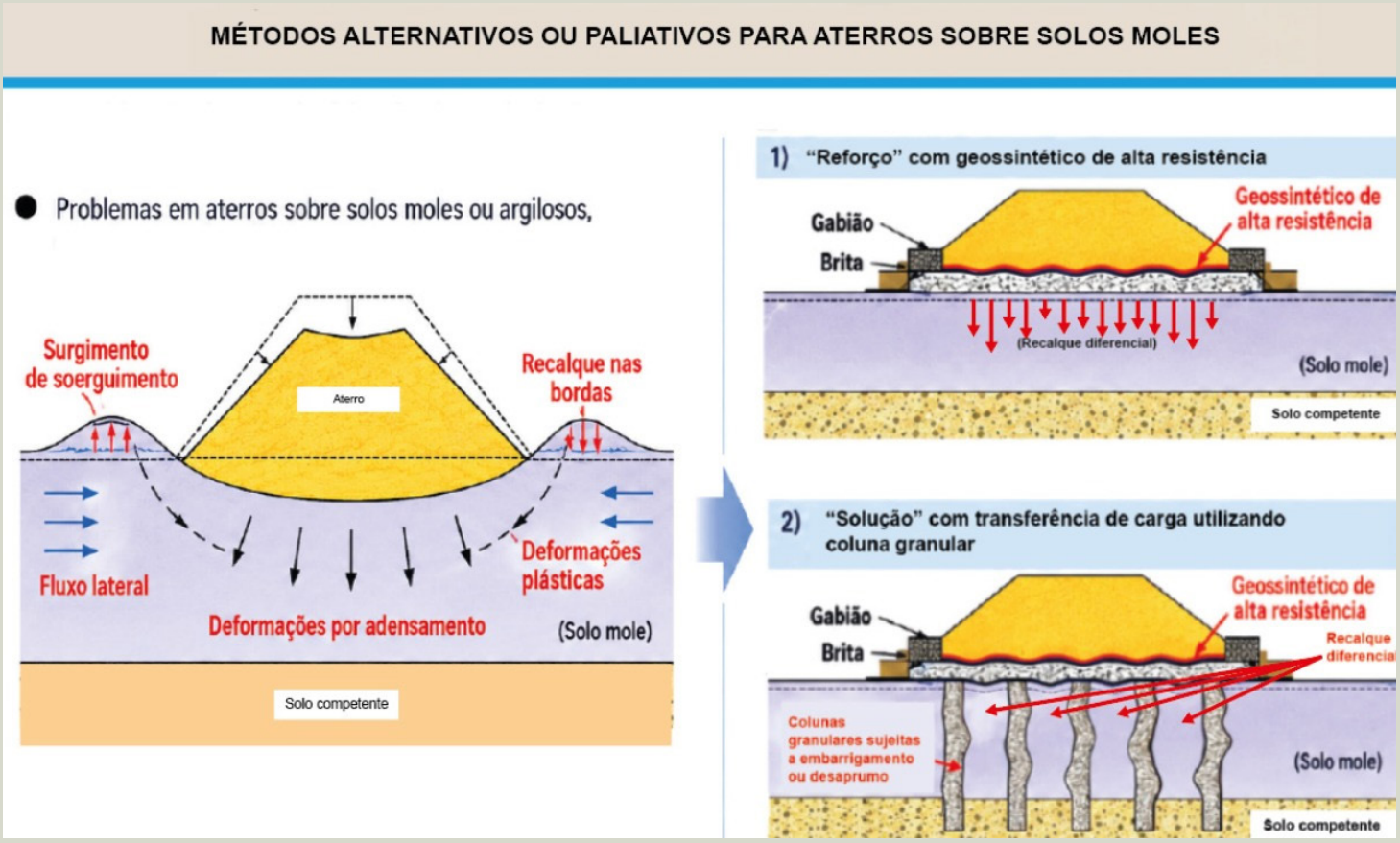


Figura 7 — Problemas de deformação em aterros sobre solos moles e soluções alternativas ou paliativas, combinando colunas de brita e geossintético de alta resistência, visando apenas atenuar recalques e deslocamentos laterais.

exclusivamente da propagação de tensões desde a superfície. Os bulbos podem ser formados diretamente nas cotas profundas, produzindo compressão radial e modificação do estado de tensões ao longo de toda a espessura definida em projeto. Esta é a diferença mais relevante entre as duas técnicas.

O CPR nos depósitos profundos de solo mole

Em depósitos pouco espessos e relativamente homogêneos, o pré-carregamento pode ser uma alternativa eficiente, especialmente quando existe área disponível, material para promover a sobrecarga e tempo suficiente para a consolidação. A situação muda quando o depósito apresenta 10, 20 ou 30 metros de espessura. Nestes casos, as tensões produzidas pelo aterro de pré-carga diminuem progressivamente com a profundidade. Os drenos verticais podem acelerar a dissipação das poropressões, mas não criam, por si próprios, o incremento de tensão necessário nas camadas profundas. O CPR supera esta limitação ao realizar o tratamento nas cotas estabelecidas pelo projeto. O volume dos bulbos, o espaçamento entre as verticais e a sequência executiva podem ser ajustados às características de cada intervalo do perfil geotécnico, permitindo tratar depósitos heterogêneos, nos quais a resistência e a compressibilidade variam tanto vertical quanto lateralmente. O objetivo não é transformar todo o maciço em um bloco rígido. Busca-se produzir uma melhoria compatível com o desempenho exigido pela obra, reduzindo ou eliminando a suscetibilidade à recalques totais e, principalmente, diferenciais.

Redução da compressibilidade e aumento da rigidez

O melhoramento do solo não deve ser avaliado apenas pelo aumento da sua resistência não drenada. Em muitas obras, particularmente em rodovias, ferrovias, aeroportos, galpões e áreas industriais, o estado-limite de serviço pode ser mais determinante do que o estado-limite último. O terreno pode não romper e, ainda assim, desenvolver deformações incompatíveis com o funcionamento da infraestrutura. A compressão radial promovida pelo CPR modifica o arranjo estrutural do solo, consolida-o e aumenta seu confinamento. Após a dissipação das poropressões, o maciço apresenta menor compressibilidade e maior rigidez para os níveis de de-

formação mobilizados pela obra, significando que, para um mesmo incremento posterior de carga, o solo readequado tende a experimentar deformações bem ou significativamente menores. A avaliação do desempenho deve, portanto, considerar conjuntamente:

- resistência;
- rigidez;
- compressibilidade;
- poropressão;
- deformações;
- uniformidade espacial do tratamento.

Um aumento de resistência sem controle da deformabilidade não garante, isoladamente, o desempenho da infraestrutura. A comparação demonstra que não se trata apenas de saber qual técnica produz maior recalque durante a execução. Um recalque elevado, durante o pré-carregamento, pode indicar que houve consolidação, mas não comprova que toda a profundidade compressível foi suficientemente solicitada. Da mesma forma, o desempenho do CPR não deve ser avaliado apenas pelo volume do grout ou por sua resistência. O parâmetro essencial é a modificação produzida no solo entre os bulbos.

Técnicas diferentes, escolhas diferentes

O pré-carregamento não é uma técnica inadequada, apenas possui um campo de aplicação claramente reconhecido e pode apresentar excelente desempenho quando empregado em depósitos pouco profundos, relativamente homogêneos e com condições favoráveis de drenagem e prazo. A limitação surge quando o mecanismo da técnica não é compatível com a profundidade e a variabilidade do depósito. Aplicar uma sobrecarga superficial sobre uma camada de solo mole muito profunda não significa necessariamente melhorar toda

Pré-carregamento e CPR: trajetórias distintas

Aspecto	Pré-carregamento	CPR
Origem do carregamento	Sobrecarga aplicada na superfície	Expansão de bulbos no interior do maciço
Direção predominante	Vertical	Radial e tridimensional
Mecanismo principal	Consolidação por dissipação de poropressões	Compressão radial, consolidação e o confinamento.
Profundidade de influência	Diminui progressivamente com a profundidade	Definida pelas cotas de execução dos bulbos
Tensões horizontais	Aumentam indiretamente pela resposta do solo	São mobilizadas diretamente pela expansão radial
Papel da drenagem	Fundamental para acelerar o adensamento	Importante para dissipar as poropressões geradas pela expansão
Dependência do tempo	Geralmente elevada	Associada à execução e à dissipação das poropressões
Depósitos profundos	Deixa camadas inferiores pouco solicitadas	Permite atuação direta nas camadas profundas
Heterogeneidade	Gera respostas e recalques desiguais	Permite ajustar o tratamento ao perfil geotécnico (homogeneização)
Resultado buscado	Antecipação de parte dos recalques	Modificação do estado de tensões, da rigidez e da compressibilidade

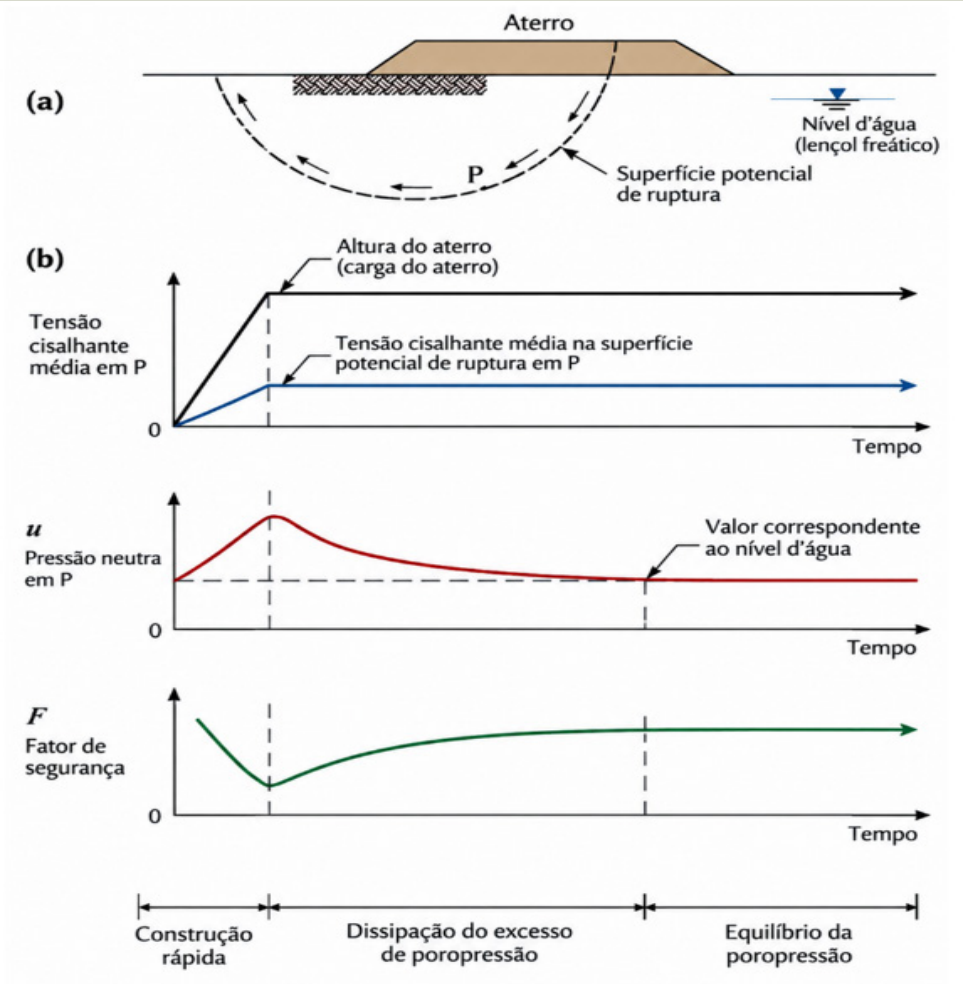


Figura 8 – Estabilidade de aterros sobre solos argilosos moles: (a) configuração geométrica do aterro e mecanismo potencial de ruptura; (b) evolução das tensões cisalhantes, das poropressões e do fator de segurança durante a construção e após sua conclusão.



- **NOTÍCIAS EM TEMPO REAL;**
- **ANÁLISES EM PROFUNDIDADES;**
- **CONSENSO DE OPINIÕES SOBRE SOLUÇÕES;**
- **GRÁFICOS E FERRAMENTAS ANALÍTICAS**

Os principais dados e informações, antes disponíveis apenas por especialistas, agora estão abertos pra você também tomar as melhores decisões na hora de projetar e fazer negócios. Em um só lugar, um serviço completo com a chancela da instituição especialista em melhoramento de solos moles, com **quase 50 anos de experiência.**

CHEGOU SUA
VEZ DE TER

VISÃO

MAIS PROFISSIONAL
DA GEOTECNIA
DO SOLO MOLE.



IBSM INSTITUTO BRASILEIRO DO SOLO MOLE

ACESSE SOFTSOILBRAZILIANGROUP.COM
E ESCOLHA A EDIÇÃO IDEAL PARA SUA PESQUISA.

a sua espessura. A superfície pode recalcar durante a obra, as poropressões medidas nas camadas superiores podem se dissipar e, mesmo assim, permanecer uma massa profunda com elevada compressibilidade. O CPR também exige projeto, controle executivo e instrumentação. A formação dos bulbos deve respeitar a resposta do terreno, as pressões admissíveis, os volumes estabelecidos e a sequência necessária para evitar mecanismos indesejados, como levantamento excessivo, e fuga de material. Cada técnica deve ser escolhida com base no mecanismo que a obra precisa mobilizar e seu gráu de importância.

Conclusão — melhorar o solo é modificar seu comportamento

O pré-carregamento e o CPR não representam apenas maneiras diferentes de executar uma obra, mas conduzem o solo por trajetórias de tensões distintas. O pré-carregamento atua de cima para baixo. Aumenta predominantemente a tensão vertical, gera poropressões e depende da drenagem e do tempo para transformar parte desse carregamento em tensão efetiva. O CPR atua diretamente nas profundidades definidas pelo projeto. A expansão sequencial dos bulbos comprime radialmente o solo, mobiliza as tensões horizontais, aumenta o confinamento e gera poropressões que, após sua dissipação, resultam em maiores tensões efetivas, resistência e rigidez. Nos depósitos profundos de solos moles, esta diferença torna-se decisiva. A questão fundamental deixa de ser simplesmente:

Quanto o terreno recalcou durante o tratamento?

E passa a ser:

Qual parcela do depósito de solo mole teve efetivamente modificadas sua trajetória de tensões, sua resistência e sua compressibilidade?

Esta mudança de enfoque permite compreender por que técnicas capazes de produzir resultados aparentemente semelhantes, durante a obra, podem apresentar desempenhos muito diferentes ao longo da vida útil da infraestrutura. O pré-carregamento procura antecipar o recalque pela aplicação de uma sobrecarga superficial. O CPR modifica diretamente o estado de tensões do maciço na profundidade em que o problema geotécnico está localizado.

REFERÊNCIAS

- Thomas Kim é engenheiro geotécnico. Trabalha com melhoramento de solos moles.
- Terzaghi, K.; Peck, R.B.; Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice.
- Lambe, T.W.; Whitman, R.V. (1969). Soil Mechanics.
- Wood, D.M. (1990). Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics.
- Yu, H.S. (2000). Cavity Expansion Methods in Geomechanics.
- Vesic, A.S. (1972). Expansion of cavities in infinite soil mass.
- ASCE/Geo-Institute (2019). Compaction Grouting Consensus Guide.
- Chu, J. et al. (2014). Overview of preloading methods for soil improvement.
- Indraratna, B.; Rujikiatkamjorn, C.; Sathananthan, I. (2005). Vacuum preloading and vertical drains.
- Schofield, A.; Wroth, P. (1968). Critical State Soil Mechanics. McGraw-Hill.
- Mayne, P.W.; Kulhawy, F.H. (1982). K_o–OCR relationships in soil. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 108(GT6), 851–872.



Figura 9 — Sequência executiva de melhoramento do solo em uma ampliação rodoviária com CPR Grouting.

Bentley Institute

Success Factors
SIG WORKSHOP



Geotechnical Analysis SIG: Simulating Soil Lab Tests for PLAXIS Soil Model Parameters



Micha van der Sloot
Technical Support Manager
Bentley Systems, Inc.

PLAXIS: Simulating Soil Lab Tests

www.bentley.com

Dear User,

When conducting laboratory test results – such as Triaxial and Oedometer tests – you want to make sure that the behavior of your chosen constitutive soil model captures the test result data. With the SoilTest feature, PLAXIS offers a quick and simple method to simulate these lab tests and verify the model behavior. To learn more, this Geotechnical Special Interest Group virtual workshop is a must see!

The agenda for the one-hour session encompasses:

- How to start a soil lab simulation
- Optimizing your model parameters to replicate real-life behavior
- After optimizing, how to quickly update the soil material definition in PLAXIS

The Geotechnical Analysis SIG is open to all Bentley users, so invite your colleagues!

Geotechnical Analysis SIGs – complimentary virtual workshops to keep you working optimally!

CONSULTA

O PRÉ-CARREGAMENTO CONVENCIONAL APLICA UMA SOBRECARGA NA SUPERFÍCIE PARA COMPRIMIR O SOLO MOLE. COMO O CPR TAMBÉM INTRODUZ TENSÕES NO TERRENO E ATUA DIRETAMENTE EM PROFUNDIDADE, PODERIA SER CONSIDERADO UMA ESPÉCIE DE PRÉ-CARREGAMENTO INTERNO?



Figura 1 – Execução de aterro sobre solo mole, com utilização de pré-carregamento. A compactação das camadas do aterro integra o processo construtivo, enquanto o carregamento imposto ao terreno promove o aumento das tensões totais e a geração de excessos de poropressão na fundação. Com a dissipação gradual dessas poropressões, ocorre o adensamento do solo mole, acompanhado de recalques e aumento progressivo da resistência ao cisalhamento. Esta técnica não consegue adensar camadas de solo mole profundas.

Sim, o CPR pode ser interpretado conceitualmente como um pré-carregamento interno do maciço. Essa expressão ajuda a compreender que o tratamento introduz previamente esforços no interior do depósito, comprimindo o solo antes da aplicação das cargas definitivas. Entretanto, esta interpretação exige a ressalva importante de que o CPR não é um pré-carregamento convencional executado dentro do terreno. As duas técnicas apresentam diferenças fundamentais quanto à origem do carregamento, à direção das tensões induzidas e à profundidade de atuação. No pré-carregamento, a sobrecarga é aplicada na superfície e atua predominantemente na direção vertical. No CPR, o carregamento é introduzido diretamente nas cotas de tratamento pela expansão controlada de bulbos de grout de zero mobilidade, que comprimem radialmente o solo circundante. Portanto, a expressão "pré-carregamento interno" é adequada como analogia geotécnica e funcional, mas não deve apagar a identidade própria do mecanismo do CPR.

O que caracteriza um pré-carregamento?

O princípio do pré-carregamento é relativamente simples, ou seja, aplicar ao terreno, antes da operação da obra, uma carga igual ou superior à carga permanente futura. Essa sobrecarga gera poropressões, provoca consolidação e antecipa uma parcela dos recalques que ocorreria posteriormente. A sequência básica é:



sobrecarga superficial

↓

geração de poropressão

↓

drenagem

↓

recalque

↓

aumento da tensao efetiva

Depois que o grau de consolidação previsto é alcançado, a sobrecarga temporária pode ser removida total ou parcialmente. Espera-se que o solo permaneça em um estado de menor compressibilidade diante das cargas de serviço. Em determinadas condições, o solo pode adquirir um comportamento equivalente ao de um material pré-adensado para o nível de carregamento imposto. Entretanto, o resultado depende da magnitude da sobrecarga, do tempo, da drenagem e da profundidade efetivamente alcançada pelo incremento de tensões.

Por que chamar o CPR de pré-carregamento interno?

No CPR os esforços propagam-se desde a base da camada mole até a superfície. Durante a introdução do grout, cada bulbo expande-se e comprime o solo ao seu redor, antes da atuação das cargas definitivas da infraestrutura. Sob esse aspecto, existe uma semelhança funcional com o pré-carregamento: o terreno é submetido previamente a um estado de tensões superior

ao seu estado inicial, com o objetivo de reduzir sua deformabilidade futura. A palavra “interno” identifica justamente a principal diferença. O carregamento não é aplicado sobre o depósito, mas em seu interior. A sequência pode ser representada da seguinte maneira:

Expansão interna
↓
Compressão radial
↓
Geração de poropressão
↓
Dissipação
↓
Consolidação
↓
Confinamento
↓
Aumento das tensões efetivas

Após a dissipação das poropressões geradas, parte da modificação imposta pelo tratamento permanece no esqueleto do solo sob a forma de maiores tensões efetivas, maior confinamento, menor compressibilidade e maior rigidez. Geralmente o nível de tensões é de 3 a 6 vezes superior ao necessário.

A diferença não está apenas na localização

Seria incompleto afirmar que o CPR é simplesmente um pré-carregamento convencional transferido da superfície para o interior do solo. A diferença também está na direção e na geometria do carregamento. O aterro de pré-carga provoca predominantemente um incremento de tensão vertical. As tensões horizontais também se modificam, mas sua evolução decorre da resposta do solo ao carregamento vertical e às restrições de deformação lateral. No CPR, a expansão dos bulbos mobiliza diretamente as tensões radiais e tangenciais. O solo é comprimido ao redor de milhares de bulbos expandidos, que aumentam de volume, produzindo campos tridimensionais de tensões e deformações. Assim, os dois métodos conduzem o solo por trajetórias diferentes:

- o pré-carregamento convencional atua predominantemente de cima para baixo;
- o CPR atua de dentro para fora;
- o primeiro é comandado por uma sobrecarga vertical;
- o segundo é comandado pela expansão radial dos bulbos.

Esta diferença modifica a forma como o solo ganha resistência, rigidez e confinamento.

O papel da expansão de cavidade

A formação dos bulbos pode ser interpretada pelo modelo de expansão de cavidade. Quando o grout de zero mobilidade é introduzido, seu volume provoca a expansão da cavidade e o deslocamento do solo circundante. Próximo ao bulbo, o solo experimenta grandes deformações e plastificação. Em regiões mais afastadas, as deformações diminuem progressivamente. O processo cria zonas de influência ao redor dos bulbos. A interação entre as verticais com bulbos sucessivos e outras verticais vizinhas promovem a modificação de um volume de solo muito maior do que o volume ocupado pelo próprio grout. O objeto do tratamento não é apenas a vertical formada. É o maciço comprimido entre as verticais e ao redor dos bulbos. Esta é outra diferença em relação às técnicas alternativas baseadas principalmente na transferência estrutural de cargas para camadas profundas e resistentes.

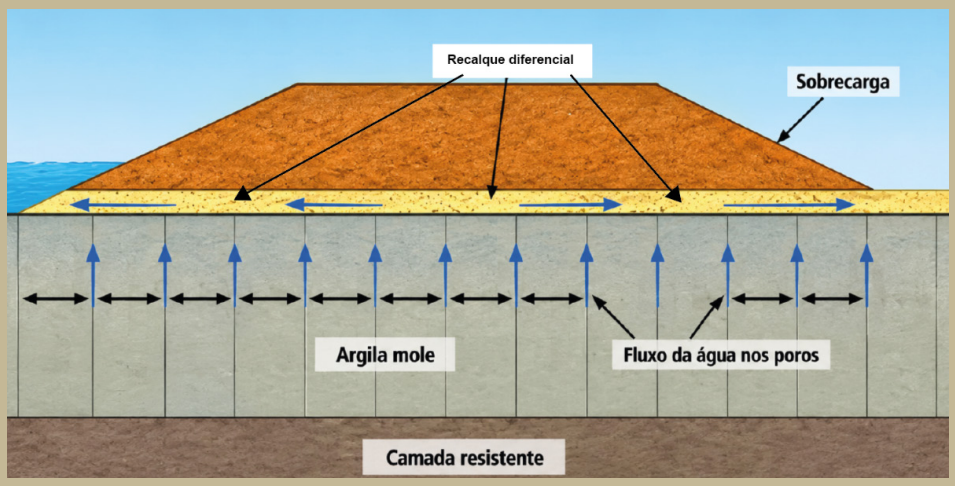


Figura 2 — Esquema do fluxo da água nos poros durante o pré-carregamento de uma camada de argila mole, evidenciando a drenagem vertical em direção à camada de areia e sua posterior dissipação lateral.

O CPR antecipa recalques?

Claro que sim, muitas vezes superior ao provocado pelas cargas de projeto. Durante a expansão dos bulbos, o solo é comprimido e sofre deformações. Toda a variação volumétrica que poderia ocorrer futuramente sob as cargas da obra é provocada durante o tratamento. Entretanto, o objetivo do CPR não é simplesmente produzir um nível de recalque bem superior ao necessário. O tratamento busca alterar diretamente:

- o estado de tensões;
- o confinamento;
- a resistência;
- a rigidez;
- a compressibilidade;
- e a uniformidade do maciço.

A elevação provocada na superfície é apenas uma das manifestações do processo. Dependendo da profundidade, do confinamento e da sequência executiva, a compressão radial poderá ocorrer sem que toda elevação seja percebida exatamente devido a alta compressibilidade existente. A comprovação deve incluir o comportamento das poropressões, os parâmetros executivos, os deslocamentos e os resultados dos ensaios de certificação da nova resistência e rigidez do solo melhorado.

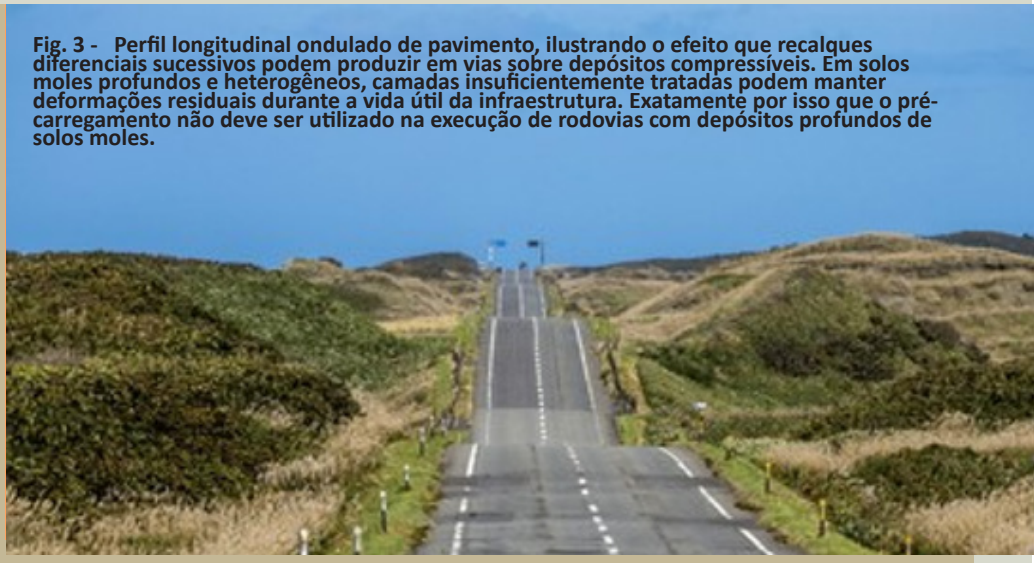


Fig. 3 - Perfil longitudinal ondulado de pavimento, ilustrando o efeito que recalques diferenciais sucessivos podem produzir em vias sobre depósitos compressíveis. Em solos moles profundos e heterogêneos, camadas insuficientemente tratadas podem manter deformações residuais durante a vida útil da infraestrutura. Exatamente por isso que o pré-carregamento não deve ser utilizado na execução de rodovias com depósitos profundos de solos moles.

O CPR torna o solo pré-adensado?

O termo "pré-adensado" possui significado específico na Mecânica dos solos, e está relacionado à maior tensão efetiva vertical já experimentada pelo solo e à correspondente tensão de pré-adensamento. O CPR produz no maciço um comportamento de menor compressibilidade diante das cargas futuras. Contudo, como sua trajetória é tridimensional e apresenta forte componente radial, não se deve reduzir todo o efeito do tratamento a um aumento convencional da tensão de pré-adensamento vertical. O solo tratado apresenta um estado modificado de tensões e estrutura, decorrente da:

- compressão radial;
- aumento das tensões horizontais;
- aumento do confinamento;
- dissipação das poropressões;
- redistribuição das tensões;
- redução do índice de vazios;
- interação entre as zonas tratadas.

Assim, o efeito pode se assemelhar funcionalmente ao pré-adensamento, porque o solo passa a responder com deformações insignificantes às cargas posteriores. O caminho utilizado para atingir esse estado, porém, não é o mesmo do ensaio edométrico nem do pré-carregamento vertical convencional.

O que acontece com o K_0?

No estado natural, a relação entre a tensão horizontal efetiva e a tensão vertical efetiva pode ser representada pelo coeficiente de empuxo no repouso:

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$$

No pré-carregamento convencional, o acréscimo inicial é essencialmente vertical. Em condições de deformação lateral restrita, a tensão horizontal também aumen-

ta, mas a trajetória permanece comandada pelo carregamento vertical. No CPR, a expansão radial atua diretamente sobre a componente horizontal. Consequentemente, a relação entre as tensões horizontais e verticais pode se afastar daquela correspondente ao estado geostático original, o que significa que o tratamento não modifica apenas o valor da tensão efetiva vertical. Ele altera o confinamento e o estado tridimensional de tensões do solo. Esta alteração é importante porque a resistência e a rigidez das argilas não dependem de uma única componente de tensão, mas da combinação entre tensão média efetiva, tensão desviadora, estrutura e trajetória do carregamento.

Poropressão: sinal de que o solo está sendo carregado

Como a expansão ocorre inicialmente em condição predominantemente não drenada, o CPR gera excesso de poropressão. Essa geração não deve ser interpretada automaticamente como um problema, já que demonstra que o solo saturado está respondendo ao incremento de tensão total imposto pela expansão. O aspecto fundamental é controlar:

- a magnitude das poropressões;
- sua distribuição;
- sua velocidade de crescimento;
- o tempo de dissipação;
- a interação entre bulbos próximos;
- os deslocamentos associados.

Se a execução avançar de forma excessivamente rápida, as poropressões podem se acumular. Por isso, a sequência de injeção deve ser compatível com a capacidade de dissipação do depósito e com os limites definidos para a obra. Piezômetros, inclinômetros, prismas e outros instrumentos permitem acompanhar essa resposta e ajustar o tratamento com base no Método Observacional.

A diferença decisiva nos depósitos profundos

A interpretação do CPR, como pré-carregamento interno, torna-se particularmente útil em depósitos profundos de solos moles. No pré-carregamento convencional, o incremento de tensões diminui à medida que aumenta a distância em relação à sobrecarga superficial. Em obras instrumentadas, os incrementos mais significativos podem concentrar-se aproximadamente nos primeiros 5 a 8 metros, dependendo da altura, da largura e da geometria do aterro. Esse intervalo não representa um limite universal. Contudo, demonstra uma limitação física: em depósitos com 10, 20 ou 30 metros de espessura, as camadas profundas recebem incrementos muito menores do que as camadas superiores. Os drenos verticais aceleram a dissipação das poropressões, mas não ampliam a intensidade das tensões aplicadas em profundidade. No CPR, os bulbos são formados diretamente nas cotas profundas. O carregamento interno é levado ao local onde a compressibilidade precisa ser reduzida, sem depender exclusivamente da propagação de uma sobrecarga desde a superfície. Neste sentido, a expressão "pré-carregamento interno" descreve com clareza uma das características mais importantes do CPR: pré-carregar internamente diferentes níveis do depósito.



Fig. 4 - Ondulações sucessivas no perfil longitudinal de pavimento, aspecto compatível com deformações diferenciais do subleito. Em depósitos profundos e heterogêneos de solos moles, o controle insuficiente das deformações resulta em recalques diferenciais e perda progressiva da regularidade da via.

O grout recebe as cargas no lugar do solo?

Esta interpretação não representa corretamente o mecanismo fundamental do CPR. Os bulbos possuem resistência e rigidez superiores às da argila mole, mas o objetivo principal não é constituir colunas destinadas a transferir integralmente as cargas até um estrato resistente. O CPR readéqua o comportamento do maciço formado pelo solo comprimido e pelos bulbos. A eficiência do tratamento deve ser avaliada

SOLOTEST®

71 ANOS

solotest.com.br







GERAL & LABORATÓRIO

principalmente pela modificação produzida no maciço:

- aumento da resistência;
- aumento da rigidez;
- redução da compressibilidade;
- confinamento;
- maior uniformidade;
- homogeneidade;
- controle dos recalques total e diferencial.

A resistência do grout é necessária para preservar os volumes formados e participar da interação com o terreno, mas não deve ser confundida com o único mecanismo responsável pelo desempenho. A expressão "pré-carregamento interno" não pretende substituir a denominação CPR nem enquadrá-lo como uma simples variação do pré-carregamento convencional. Sua utilidade está em explicar que o tratamento cria, antes das cargas de serviço, um novo estado de tensões no interior do solo.

Conclusão

O CPR pode ser considerado um pré-carregamento interno, desde que esta expressão seja entendida como uma interpretação conceitual do seu mecanismo. Assim como o pré-carregamento convencional, ele submete o terreno a esforços superiores antes da entrada em operação da obra, gera poropressões e produz, após sua dissipação, um estado de bem menor compressibilidade diante das solicitações futuras. A semelhança, entretanto, termina nesse princípio geral. No pré-carregamento, a sobrecarga é aplicada na superfície, a trajetória é predominantemente vertical e a influência diminui com a profundidade. No CPR, os esforços são introduzidos diretamente no interior do depósito pela expansão de bulbos, mobilizando tensões radiais e produzindo uma trajetória tridimensional. O CPR não deve ser entendido como uma sobrecarga enterrada nem como um conjunto de colunas convencionais. Seu mecanismo é a compressão radial de cada m³ do solo e a modificação do seu estado de tensões. A expressão mais precisa seria, portanto: O CPR funciona conceitualmente como um pré-carregamento interno, radial e controlado, aplicado diretamente nas profundidades em que o maciço precisa ter sua resistência, sua rigidez e sua compressibilidade modificadas. Em outras palavras, se o pré-carregamento convencional procura comprimir o depósito de cima para baixo, o CPR introduz o carregamento dentro do próprio maciço e o

Uma analogia útil, desde que usada com precisão

Característica	Pré-carregamento convencional	CPR como "pré-carregamento interno"
Local de aplicação	Superfície do terreno	Interior do depósito
Forma de carregamento	Sobrecarga temporária	Expansão de bulbos de graut que passam a fazer parte do maciço
Direção predominante	Vertical	Radial e tridimensional
Profundidade	Depende da propagação das tensões	Definida pelas cotas de tratamento
Poropressão	Gerada pela sobrecarga	Gerada pela expansão
Drenagem	Converte o incremento em tensão efetiva	Consolida a modificação produzida pela compressão
Resultado principal	Antecipação de recalques	Modificação do confinamento, da rigidez e da compressibilidade, bem superior ao de projeto
Massa tratada	Região efetivamente alcançada pela sobrecarga	Regiões influenciadas pelos bulbos
Controle executivo	Altura, etapas, tempo e drenagem	Pressão, volume, sequência, deslocamentos e poropressões

REFERÊNCIAS

- Terzaghi, K.; Peck, R.B.; Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice.
- Lambe, T.W.; Whitman, R.V. (1969). Soil Mechanics.
- Wood, D.M. (1990). Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics.
- Yu, H.S. (2000). Cavity Expansion Methods in Geomechanics.
- Vesic, A.S. (1972). Expansion of cavities in infinite soil mass.
- ASCE/Geo-Institute (2019). Compaction Grouting Consensus Guide.
- Chu, J. et al. (2014). Overview of preloading methods for soil improvement.
- Indraratna, B.; Rujikiatkamjorn, C.; Sathananthan, I. (2005). Vacuum preloading and vertical drains.
- Mayne, P.W.; Kulhawy, F.H. (1982). K_o–OCR relationships in soil.
- M.Sc. Rodrigues, J. Melhoramento do Solo Mole e o Geoenrijecimento.

GEOTECNIA

Uma nova visão sobre *solos moles.*

O livro que está redefinindo
o entendimento do melhoramento
de solos no Brasil.



CONHECIMENTO
QUE TRANSFORMA
O FUTURO DE OBRAS
GEOTÉCNICAS.

SOLICITE AGORA

Eng.º M. Sc. Joaquim Rodrigues
Especialista em solos moles

TÉCNICA, EXPERIÊNCIA
E INOVAÇÃO
A SERVIÇO DA GEOTECNIA.

Eng.ª Patricia Tinoco

O COMPORTAMENTO DO CPR GROUTING E DO PRÉ-CARREGAMENTO DURANTE A OBRA. O QUE AS DEFORMAÇÕES, AS POROPRESSÕES E A INSTRUMENTAÇÃO REVELAM SOBRE O DESEMPENHO DO SOLO.



ANÁLISE

Eng.ª Patricia Tinoco

Fig. 1 - Melhoramento de solos moles com CPR Grouting em Jacarepaguá, Rio de Janeiro.

O projeto geotécnico procura antecipar como o terreno responderá às cargas impostas pela construção. Em depósitos de solos moles, entretanto, essa resposta depende de fatores que nem sempre podem ser representados integralmente pelos ensaios de investigação ou pelos modelos de cálculo. A espessura das camadas, a resistência não drenada, a permeabilidade, a compressibilidade e a história de tensões podem variar significativamente ao longo de uma mesma obra. Por isso, a execução deve ser compreendida como um ensaio em verdadeira grandeza.

Recalques, deslocamentos laterais e poropressões não são apenas consequências da construção. São sinais que revelam como o solo está percorrendo sua trajetória de tensões e se aproximando — ou se afastando — do comportamento previsto no projeto. Esta observação é especialmente importante na comparação entre pré-carregamento e CPR. As duas técnicas produzem respostas distintas durante, a obra, porque modificam o maciço por mecanismos diferentes.

A obra como ensaio em verdadeira grandeza

Nenhum modelo geotécnico reproduz perfeitamente toda a complexidade de um depósito natural. As sondagens e os ensaios fornecem informações em pontos específicos. Os modelos numéricos e analíticos



Fig. 2 - Cravação de geodrenos.



transformam estas informações em previsões de recalque, poropressão, resistência e estabilidade. Entretanto, é durante a obra que o comportamento integrado do maciço começa efetivamente a se revelar. A construção oferece respostas a questões fundamentais:

- o recalque está ocorrendo na magnitude prevista?
- a velocidade da deformação está diminuindo?
- as poropressões estão se dissipando?
- existem deslocamentos horizontais significativos?
- o ganho de resistência está ocorrendo?
- o comportamento é uniforme ao longo da área?
- a próxima etapa de carregamento pode ser liberada?

A leitura destes sinais permite avaliar não apenas se o solo está deformando mas, também, como e qual mecanismo está sendo mobilizado.

O comportamento durante o pré-carregamento

No pré-carregamento, uma sobrecarga temporária é aplicada para provocar, antes da entrada em operação, uma parcela dos recalques que ocorreriam sob as cargas definitivas. Em solos moles saturados, o carregamento inicialmente aumenta as tensões totais. Como a água não consegue deixar os vazios imediatamente, grande parte desse incremento aparece como excesso de poropressão. Nesse primeiro momento, o aumento da tensão efetiva pode ser pequeno. À medida que a água é drenada, a poropressão diminui e o carregamento passa progressivamente a ser suportado pelo esqueleto do solo. O comportamento esperado durante a obra envolve:

1. aplicação da sobrecarga;
2. geração de excesso de poropressão;
3. início dos recalques;
4. dissipação gradual das poropressões;
5. aumento das tensões efetivas;
6. ganho de resistência;

7. redução progressiva da velocidade dos recalques.

O recalque durante a obra não representa, portanto, uma anomalia, é parte fundamental do mecanismo de tratamento. A questão decisiva é saber se esse recalque corresponde à consolidação de toda a massa de solo que influenciará o desempenho futuro da infraestrutura.

Construção por etapas e ganho de resistência

Quando a resistência inicial do solo é muito baixa, o aterro de pré-carga não pode ser construído de uma só vez. O carregamento precisa ser dividido em etapas. Cada etapa deve permanecer tempo suficiente para que parte das poropressões seja dissipada. Com isso, aumentam as tensões efetivas e a resistência do solo, permitindo a execução da etapa seguinte. O processo cria uma dependência direta entre:

- altura do aterro;
- velocidade de carregamento;
- geração de poropressões;
- capacidade de drenagem;
- ganho de resistência;
- segurança contra a ruptura.

Se a etapa seguinte for executada antes que o solo desenvolva resistência suficiente, o carregamento poderá ultrapassar sua capacidade naquele momento. A programação da obra, portanto, não deveria ser comandada exclusivamente pelo cronograma físico. Precisa acompanhar a resposta medida do terreno.

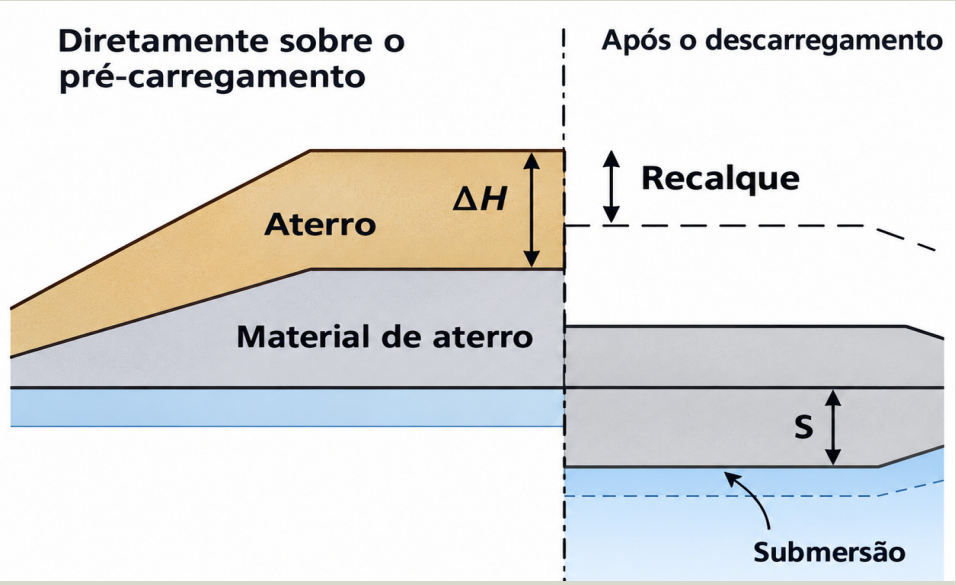


Figura 3 — O desenho mostra (esquerda)como o peso de um aterro provisório comprime o solo mole, expulsando gradualmente parte da água existente em seu interior e provocando seu adensamento. Após a retirada da sobrecarga(direita),o terreno permanece mais baixo, como indicado pelo recalque S. Assim, o pré-carregamento antecipa parte dos recalques, aumentando a resistência do solo e reduzindo futuras deformações.Sua atuação é limitada a pequenas profundidades de solos moles.

Quando o aterro sobe mais rapidamente que a resistência

A elevação do aterro aumenta as tensões cisalhantes mobilizadas no depósito. Simultaneamente, o excesso de poropressão reduz temporariamente a parcela da tensão total suportada pelo esqueleto do solo. Se o carregamento avançar mais rapidamente do que a dissipação das poro-



MELHORAMENTO DO SOLO MOLE E E O GEOENRIJECIMENTO



A PRINCIPAL REFERÊNCIA SOBRE MELHORAMETO DE SOLOS MOLES EM LINGUA PORTUGUESA.

TODO CONHECIMENTO ESSENCIAL QUE O GEOTÉCNICO PRECISA, REUNÍDO EM **UM ÚNICO VOLUME.**

- CONHECENDO O SOLO
- PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS
- ENGENHARIA DOS SOLOS ARGILOSOS MOLES
- MELHORAMENTO DOS SOLOS
- GEOENRIJECIMENTO
- AVALIAÇÃO DO MELHORAMENTO
- A PRÁTICA DO GEOREFORÇO
- FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS

Uma obra que reúne propriedades geotécnicas, métodos de investigação, critérios de projeto e técnicas modernas de melhoramento de solos moles, consolidando **décadas de experiência prática e conhecimento cientifico** em um único volume.

ADQUIRA SEU EXEMPLAR

ofitexto@ofitexto.com.br

atendimento@softsoilgroup.com.br

www.lojaofitexto.com.br

- CONTEÚDO ATUALIZADO E ABRANGENTE
- LINGUAGEM TÉCNICA ACESSÍVEL E DIRETA
- APLICAÇÃO PRÁTICA PARA ENGENHEIROS E PROJETISTAS
- REFERÊNCIA TÉCNICA EM PORTUGUÊS



Fig. 4 - Formação de um aterro estradal.

pressões e o correspondente ganho de resistência, a margem de segurança diminui. Alguns sinais de alerta são:

- crescimento acelerado das poropressões;
- redução da velocidade de dissipação;
- aumento dos deslocamentos horizontais;
- levantamento do terreno junto ao pé do aterro;
- trincas longitudinais na plataforma;
- recalques acelerados;
- mudança súbita no padrão das deformações.

Esses sinais podem anteceder mecanismos de instabilidade ou ruptura progressiva. Por isso, o acompanhamento dos valores absolutos não é suficiente. É necessário observar também a velocidade e a tendência de evolução das leituras. Uma poropressão elevada pode ser admissível se estiver dentro do intervalo previsto e apresentar tendência de dissipação. Uma leitura aparentemente moderada pode ser preocupante se continuar crescendo a cada etapa.

Drenos aceleram a consolidação, mas não criam tensão

Os drenos verticais reduzem o caminho que a água precisa percorrer para deixar o solo. Dessa forma, aceleram a dissipação das poropressões e o processo de consolidação. Entretanto, o dreno não produz, por si próprio, o incremento de tensão necessário para comprimir o solo. Ele apenas facilita a drenagem nas regiões alcançadas pelas tensões geradas pela sobrecarga. Esta distinção é importante nos depósitos profundos. A instrumentação instalada apenas nas camadas superiores pode indicar boa dissipação das poropressões e redução da velocidade dos recalques, enquanto camadas mais profundas receberam incrementos muito menores de tensão. A aparente estabilização da superfície não comprova, isoladamente, que toda a massa compressível foi suficientemente adensada.

Quando o recalque deixa de ser uniforme

Os depósitos de solos moles raramente apresentam espessura, resistência e compressibilidade constan-

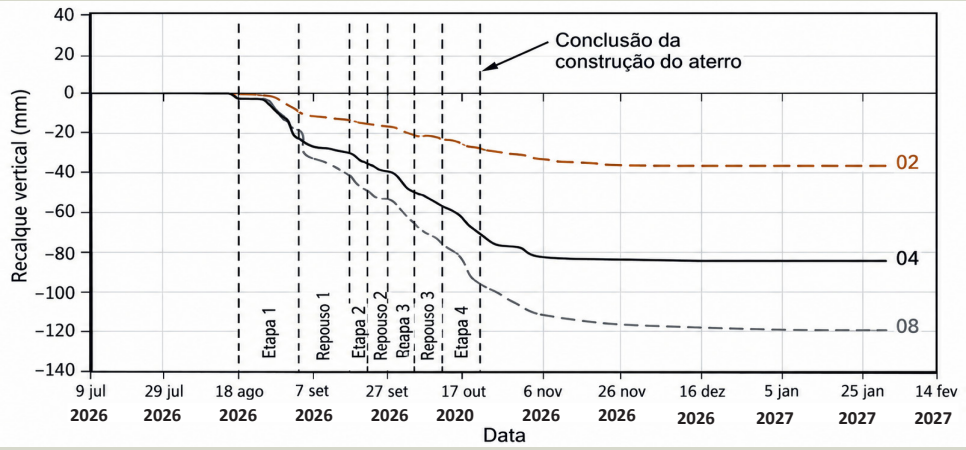


Figura 5 - Construção convencional em etapas. Evolução do recalque medido nos pontos 02, 04 e 08 durante a construção escalonada do aterro, evidenciando a resposta do solo às sucessivas etapas de carregamento e aos períodos intermediários de repouso, bem como a estabilização do recalque após a conclusão da construção.

tes ao longo de toda a obra. Mesmo quando o carregamento superficial é aproximadamente uniforme, diferentes regiões podem apresentar respostas distintas. Onde a camada é mais espessa ou compressível, os recalques tendem a ser maiores. Onde a drenagem é mais lenta, o processo pode continuar por mais tempo. Essa variabilidade produz:

- recalques diferenciais;
- mudanças de inclinação;
- depressões localizadas;
- ondulações longitudinais;
- desnivelamentos;
- trincas no pavimento;
- desconforto e perda de desempenho operacional.

Em obras rodoviárias, essas manifestações podem criar perfis semelhantes a verdadeiros "tobogãs", especialmente quando longos trechos de aterro atravessam depósitos profundos e heterogêneos de solos moles. Os problemas podem se tornar ainda mais evidentes nas transições entre o aterro sobre solo compressível e estruturas praticamente indeslocáveis, como pontes, viadutos, bueiros e segmentos apoiados em fundações profundas. O terreno não responde apenas ao valor da carga. Responde também à sua variabilidade espacial e à diferença de rigidez entre os diversos elementos da obra.

O comportamento durante a execução do CPR

No CPR, o tratamento é executado diretamente no interior do depósito. Bulbos de grout de zero mobilidade são formados sequencialmente nas cotas definidas pelo projeto. A expansão de cada bulbo comprime

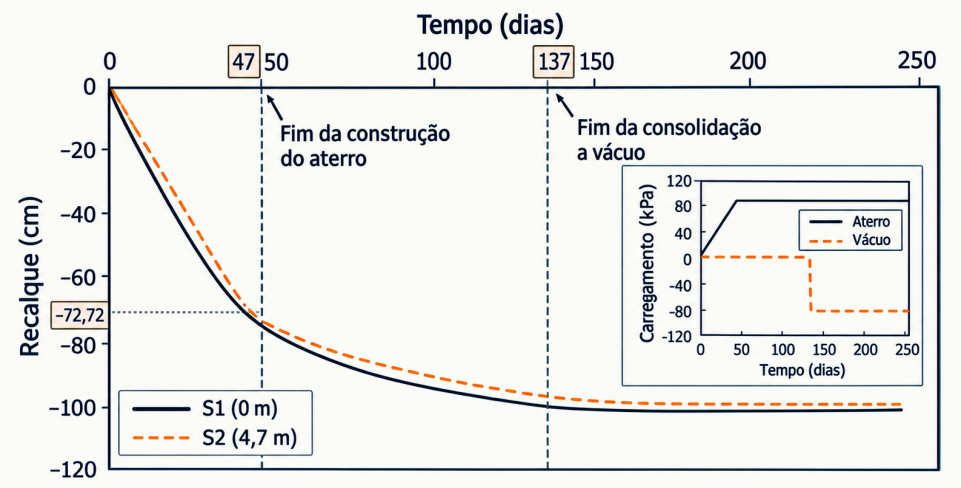


Fig. 6 - Consolidação a vácuo. Evolução dos recalques em função do tempo durante o pré-carregamento associado à consolidação a vácuo. As curvas S1 e S2 mostram o desenvolvimento dos recalques até o término da construção do aterro (47 dias) e durante a aplicação do vácuo, mantida até aproximadamente 137 dias. O gráfico inserido apresenta o histórico de carregamento do aterro e da pressão de vácuo.

radialmente o solo circundante e modifica o campo de tensões. O processo mobiliza as tensões horizontais, aumenta o confinamento e provoca uma reorganização progressiva do maciço. Durante a expansão em solo saturado, parte do incremento de tensão total gera excesso de poropressão. Portanto, o comportamento durante o CPR também precisa ser acompanhado. A sequência básica envolve:

1. Cravação de geodrenos;
2. posicionamento na cota de tratamento;
3. introdução controlada do grout;
4. expansão dos bulbos;
5. compressão radial do solo;
6. geração de poropressões;
7. redistribuição das tensões;
8. dissipação das poropressões;
9. aumento das tensões efetivas e da rigidez.
10. estado de total confinamento;
11. homogeneização.

A resposta do terreno durante a execução fornece informações importantes sobre a formação dos bulbos e a interação entre as milhares de verticais com bulbos..

Pressão e volume não devem ser analisados separadamente

O controle executivo do CPR deve considerar conjuntamente a pressão de bombeamento, o volume introduzido, a velocidade de bombeamento e a resposta do terreno. A pressão isolada não demonstra se o tratamento alcançou o resultado esperado. Ela pode variar em função da resistência do solo, do confinamento, da profundidade, da geometria do bulbo e da proximidade de outros pontos tratados. Da mesma forma, a simples introdução de determinado volume não garante que ocorreu a compressão radial prevista. É necessário verificar o comportamento combinado dos parâmetros. Durante a execução, devem ser observados:

- pressão em função do volume;
- variação das pressões entre as cotas;
- resposta de verticais vizinhas;
- deslocamentos superficiais;
- comportamento das poro-

pressões;
- eventuais perdas ou retornos de material;
- levantamento do terreno;
- interferência com estruturas existentes.

Mudanças inesperadas nas curvas de pressão e volume podem indicar variações do perfil geotécnico, perda de confinamento, comunicação com vazios, fuga de grout ou condições diferentes das previstas no projeto.

A execução sequencial modifica progressivamente o maciço

Os bulbos não são formados simultaneamente. Após a execução do primeiro bulbo, o equipamento sobe para a cota seguinte, onde realiza uma nova expansão. O procedimento continua até a conclusão da vertical na superfície. Posteriormente, novas verticais são executadas segundo a sequência estabelecida no plano de tratamento. Cada bulbo modifica cada m³ do solo ao seu redor. Consequentemente, os bulbos seguintes já podem encontrar um maciço com maior confinamento e diferente estado de tensões. A ordem de execução influencia, portanto, o comportamento do conjunto. Uma sequência corretamente planejada permite controlar a interação entre os pontos tratados e promover a modificação progressiva do maciço. Uma concentração excessivamente rápida de bulbos em uma mesma região pode produzir elevação indesejada das poropressões ou deslocamentos incompatíveis. Por isso, a sequência executiva deve considerar:

- espaçamento entre verticais;
- intervalo entre bulbos;
- direção de avanço;
- condições de drenagem;
- proximidade de estruturas;
- leituras da instrumentação;
- resposta observada durante a formação dos bulbos anteriores.

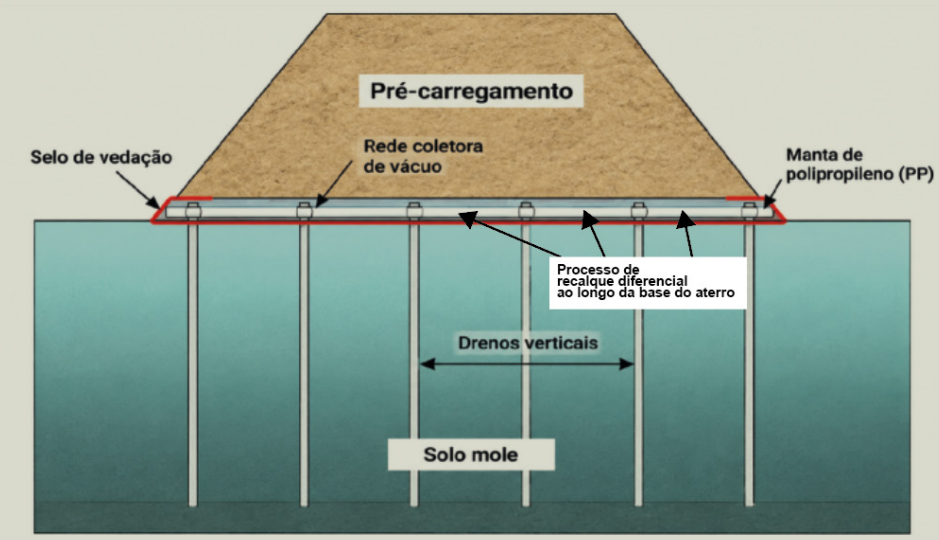


Figura 7 - Esquema típico de pré-carregamento à vácuo, mostrando o aterro, o selo de vedação, a rede coletora de vácuo, a manta de polipropileno (PP) e os drenos verticais instalados no solo mole.



ESTUDO VIRTUAL
EDTECH - EDUCORP

Formação em Gestão de Riscos



Prof. Fernando Affonso
Especialista em Riscos

Gestão de Riscos 1 CLIQUE AQUI!

Curso introdutório, necessário para refletirmos e nos questionarmos de como devemos interagir com o que nos rodeia e para transformar riscos em aliados.

Gestão de Riscos 2 CLIQUE AQUI!

Um curso prático para aquelas pessoas que tem objetivos na vida e desejam viver melhor, sem riscos. É um curso completo para preparar o aluno para ter disciplina e perseverança na sua profissão e na identificação e gestão de riscos continuamente.

Gestão de Riscos 3 CLIQUE AQUI!

Um curso avançado para aquelas pessoas que querem ir além, que gostaram do tema gestão de riscos e querem aprender a estimar probabilidade, impacto e conhece a terceira dimensão. O tempo até o impacto.

+1.5k Alunos Treinados ao longo dos anos.

Sobre o Curso

Em um mundo dinâmico e repleto de incertezas, a capacidade de identificar, avaliar e gerenciar riscos é essencial para o sucesso de qualquer pessoa ou organização. A Formação em Gestão de Riscos foi desenvolvida para oferecer um conhecimento sólido e prático sobre estratégias de mitigação de riscos, independentemente do setor de atuação.

Composta por três cursos complementares, esta formação proporciona uma visão ampla e aplicada sobre os principais conceitos, ferramentas e metodologias utilizadas na gestão de riscos. Seja você um empreendedor, profissional de qualquer área ou alguém que deseja aprimorar sua tomada de decisões, este programa é ideal para fortalecer sua capacidade de antecipação e resposta a desafios, garantindo maior segurança e eficiência em seus projetos e negócios.

QUERO SER UM ESPECIALISTA EM GESTÃO DE RISCOS

estudovirtual.com.br
contato@estudovirtual.com.br

O aumento das poropressões durante o CPR é uma consequência esperada da compressão de um solo saturado em condição inicialmente não drenada. A existência de poropressão positiva não indica automaticamente uma situação de risco. O que precisa ser avaliado é sua magnitude, distribuição, velocidade de crescimento e capacidade de dissipação. As leituras devem ser comparadas com limites previamente estabelecidos. Quando necessário, a execução pode ser ajustada por meio da:

- redução da velocidade de bombeamento do graut;
- diminuição do volume por etapa;
- alteração da sequência;
- ampliação do intervalo entre pontos próximos;
- suspensão temporária da execução dos bulbos;
- utilização de trajetórias de drenagem.

Este controle transforma a instrumentação em parte ativa do processo construtivo.

O risco do excesso de pressão

Embora a expansão controlada seja o mecanismo desejado, uma pressão incompatível com o confinamento e com a resistência do terreno pode produzir comportamentos indesejados. Entre eles estão:

- fraturamento hidráulico;
- abertura de caminhos preferenciais;
- fuga de grout;
- levantamento excessivo da superfície;
- deslocamento de estruturas próximas;
- comunicação não prevista entre pontos de injeção.

Evitar estes fenômenos não depende de um único valor fixo de pressão. O controle precisa considerar a profundidade, o tipo de solo, as tensões existentes, o volume já introduzido e a resposta observada. A pressão admissível, em uma camada mais confinada, não é necessariamente adequada a uma região superficial ou próxima de uma face livre.

O que deve ser medido durante a obra?

A instrumentação deve ser escolhida em função dos mecanismos que precisam ser acompanhados.

Piezômetros

Medem as poropressões e permitem acompanhar sua geração e dissipação. No pré-carregamento, ajudam a avaliar a evolução da consolidação e a segurança de novas etapas de alteamento. No CPR, registram a resposta hidráulica produzida pela forma-



ção dos bulbos e auxiliam na definição de intervalos entre a formação de novos bulbos de pressão.

Placas de recalque

Medem os deslocamentos verticais da superfície ou de níveis específicos. São particularmente importantes no pré-carregamento, no qual a magnitude e a velocidade do recalque ajudam a avaliar a evolução do adensamento.

Inclinômetros

Medem deslocamentos horizontais ao longo da profundidade. Podem identificar deformações laterais do maciço, superfícies potenciais de movimentação e tendências de instabilidade que não seriam percebidas apenas por marcos superficiais. Torna-se obrigatório sua utilização junto à estacas de obras de arte.

Prismas e estação total

Permitem acompanhar deslocamentos tridimensionais em aterros, estruturas vizinhas, pavimentos, muros e outras referências instaladas na área. São importantes em tratamentos realizados próximos a construções existentes ou em locais onde pequenos movimentos precisam ser controlados. Importante em obras de ampliação rodoviária.

Ensaios geotécnicos de verificação

Apenas pressiometria e métodos geofísicos, como o MASW, podem ser utilizados antes e depois do tratamento, ajudando a avaliar alterações de resistência e rigidez. Entretanto, cada método mede ou infere propriedades diferentes. A interpretação deve considerar o mecanismo da técnica e o nível de deformação relevante para a obra. Ensaios penetrométricos, como SPT, CPTu e palheta, não conseguem adentrar no solo melhorado, razão pela qual não servem para avaliar solos melhorados.

Instrumentar não é apenas instalar sensores

Um plano de instrumentação somente é útil quando define antecipadamente:

- o que será medido;
- onde os instrumentos serão instalados;
- qual frequência de leitura será adotada;
- quais valores são esperados;
- quais serão os níveis de atenção e alerta;
- quem receberá os resultados;
- quais medidas serão tomadas quando um limite for atingido.

Acumular leituras sem interpretação não aumenta a segurança da obra. Os dados precisam ser organizados em séries temporais, comparados com o avanço da execução e relacionados aos eventos ocorridos no canteiro. A instalação de um novo trecho de aterro ou a formação de uma sequência de bulbos deve aparecer claramente no histórico das leituras. O valor do instrumento está na decisão que ele permite tomar.

O Método Observacional

O Método Observacional transforma a resposta real do terreno em parte do processo de projeto e execução. Sua aplicação pode ser resumida em cinco etapas:



Figura 8 - Melhoramento do solo com CPR Grouting, em uma rodovia no interior de Pernambuco.

Inicialmente, são previstas faixas de comportamento para recalques, poropressões e deslocamentos horizontais. Em seguida, estabelecem-se limites de atenção, alerta e intervenção, acompanhados das respectivas medidas de contingência. Durante a obra, os valores medidos são comparados com as previsões. Se o comportamento estiver dentro da faixa esperada, a execução poderá prosseguir. Se as tendências se aproximarem dos limites, o ritmo poderá ser reduzido. Se os valores ultrapassarem os critérios definidos, a atividade deverá ser interrompida e o projeto reavaliado. O Método Observacional não significa executar sem projeto e decidir posteriormente. Ao contrário, exige previsão, instrumentação, critérios objetivos e alternativas preparadas antes da ocorrência de um comportamento adverso, razão pela qual é frequentemente utilizado no CPR Grouting.

Quando liberar a próxima etapa?

A decisão de avançar não deveria se basear apenas no número de dias transcorridos. No pré-carregamento, a liberação de uma nova etapa pode considerar:

- porcentagem estimada de consolidação;
- dissipação das poropressões;
- velocidade do recalque;
- magnitude dos deslocamentos laterais;
- ganho de resistência;
- fator de segurança atualizado.

No CPR, devem ser considerados:

- resposta das curvas de pressão e volume;
- evolução das poropressões;
- controle dos deslocamentos;
- estabilidade das estruturas próximas;
- comportamento dos pontos anteriormente tratados;
- resultados dos ensaios de verificação.

Um prazo previsto em cronograma pode orientar o planejamento, mas não substitui a evidência de desempenho. A liberação deve ocorrer porque o terreno demonstrou condições para avançar, e não apenas porque o prazo de espera terminou.

O comportamento vale mais do que o calendário

O solo não reconhece o cronograma contratual. Uma argila mole não acelera sua drenagem porque a obra precisa terminar. Tampouco responde uniformemente apenas porque o projeto adotou parâmetros médios. No pré-carregamento, o tempo necessário depende da drenagem e da evolução da consolidação. No CPR, a velocidade de execução precisa respeitar a capacidade do maciço de receber as expansões e dissipar as poropressões geradas. Em ambos os casos, acelerar sem observar a resposta do terreno pode reduzir a segurança ou comprometer o desempenho. A instrumentação fornece a ligação entre o comportamento previsto e o comportamento real. Quando integrada ao Método Observacional, permite ajustar a execução sem perder de vista os objetivos do projeto.

Conclusão — a obra precisa conversar com o projeto

Durante a construção, cada leitura conta uma parte da história do maciço. O recalque mostra como o solo está se deformando. Os piezômetros revelam como as tensões estão sendo repartidas entre a água e o esqueleto sólido. Os inclinômetros identifi-

Leica Geosystems



Leica Geosystems introduces 3D machine control solution for compact excavators and backhoes with swing boom

The Leica iCON iXE3 3D excavator machine control solutions will be available for smaller excavators with swing boom, providing an easy-to-use solution on one unified software and hardware platform.

(Heerbrugg, Switzerland, 2021) Leica Geosystems, part of Hexagon, today announced to extend the Leica MC1 one-for-all software platform by offering its 3D machine control solution for compact excavators and backhoes with swing boom.

Contractors rely on efficient workflows for applications such as trenching for footings, grading ditches or digging out basements. As such, demand for technology-enabled compact equipment is rapidly growing. Whenever applications require a consistent grade and sustained slope, 3D machine control solutions from Leica Geosystems excel on the job.

Leveraging the Leica MC1 – a unified platform for software and hardware – means compact equipment benefits from flexible dataflows, easy-to-use interfaces and increased productivity so operators can focus on the job. Operators also have the flexibility to use the MC1's portable control panel across multiple machines and benefit from the cloud-based collaboration platform Leica ConX, to share and report as-built documentation with office and field stakeholders.

LEICA GEOSYSTEMS

Contact us

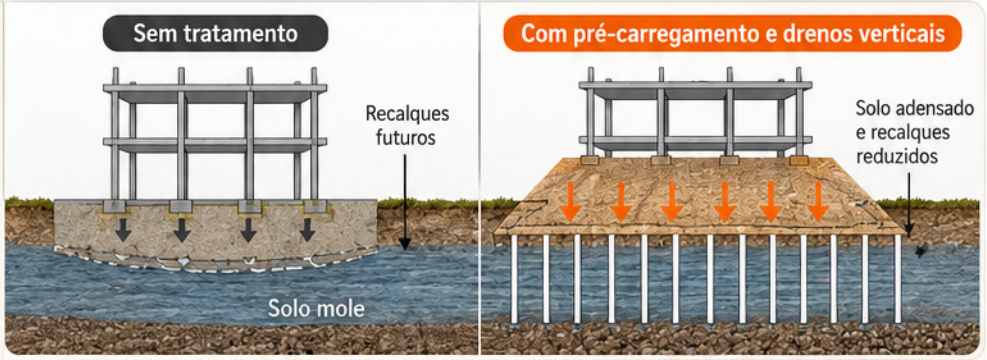
Communications Team
Leica Geosystems AG
CH-9435 Heerbrugg
Switzerland
media@leica-geosystems.com

Pré-carregamento e Drenos Verticais:
Acelerando a Consolidação Antes da Construção

Uma técnica para induzir recalques controlados em solos moloes antes da construção da estrutura permanente. Esta técnica não é eficiente depósitos de solos moles com profundidade superior a 5 ou 10 m.

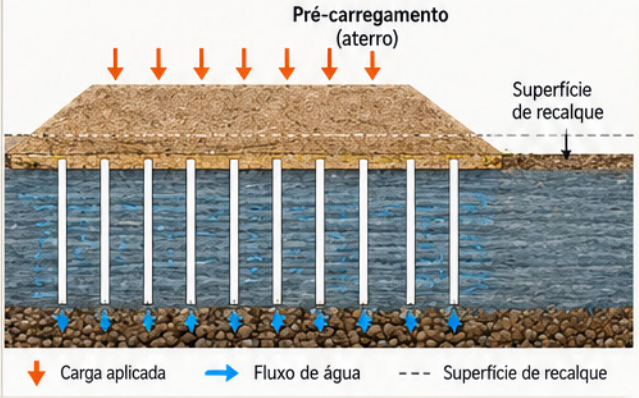
Por que é utilizado?

Porque alguns solos moles podem continuar recalçando por um longo período após a construção, causando danos à obra.
O pré-carregamento antecipa esses recalques.



Objetivo
Fazer o solo assentar mais cedo

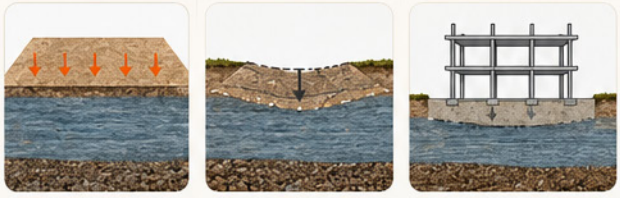
1. Aumentar as tensões no solo mole.
2. Acelerar a saída da água dos poros.
3. Obter um solo mais rígido e estável para receber a estrutura.





Papel do Pré-carregamento

1. Aplica uma carga temporária
2. Induz recalques antes da obra
3. Melhora a capacidade de carga do solo



Papel dos Drenos Verticais

1. Reduz a distância de drenagem
2. Acelera a saída da água dos poros
3. Contribui para um adensamento mais uniforme



Controle de Campo

1. Monitore o recalque
2. Verifique a pressão dos poros
3. Ajuste a altura do aterro conforme a resposta do solo



O que é consolidado?

- ☑ Aumento da resistência ao cisalhamento
- ☑ Redução da compressibilidade
- ☑ Menor recalque pós-obra
- ☑ Maior confiabilidade do desempenho
- ☑ Segurança e economia



O pré-carregamento não tem como objetivo impedir o recalque, mas sim controlar quando e quanto ele ocorre.

cam deslocamentos laterais. Os ensaios de verificação indicam se houve aumento de resistência e rigidez. No pré-carregamento, espera-se que o terreno recalque, dissipe poropressões e ganhe resistência antes da entrada em operação. O desafio é verificar se esse processo alcançou toda a massa compressível relevante e se as deformações futuras serão compatíveis com a infraestrutura. No CPR, acompanha-se a resposta do solo à formação sequencial dos bulbos, controlando-se a pressão, volume, sequência, poropressões e deslocamentos para produzir a compressão radial e o aumento do confinamento previstos. Não existe tratamento bem-sucedido apenas porque foi executado conforme uma quantidade contratada ou porque transcorreu determinado período. O sucesso precisa ser demonstrado pelo comportamento do terreno. O projeto estabelece o comportamento esperado. A instrumentação mostra o comportamento real. O Método Observacional transforma essa comparação em decisões durante a obra.

Duas técnicas, dois comportamentos durante a obra

Aspecto Observado	Pré-carregamento	CPR
Origem do carregamento	Aplicação de sobrecarga superficial	Expansão de bulbos no interior do depósito
Deformação esperada	Recalque limitado durante o tratamento	Compressão radial e deslocamentos controlados
Poropressão	Gerada pela elevação da sobrecarga	Gerada durante a expansão dos bulbos
Evolução do processo	Depende fortemente da drenagem e do tempo	Depende da sequência, pressão, volume e dissipação
Profundidade de atuação	Determinada pela propagação das tensões superficiais limitadas	Definida pelas cotas de execução
Principal risco construtivo	Carregamento mais rápido que o ganho de resistência. Depósitos de solo mole profundos.	Pressão, volume ou sequência incompatíveis com a resposta do maciço
Decisão de avanço	Dissipação, recalque, deslocamento lateral e resistência	Poropressão, pressão, volume, deslocamentos e resposta entre pontos
Instrumentação	Controla consolidação e estabilidade do aterro	Controla a interação entre o ganho de resistência e rigidez
Critério de conclusão	Grau de consolidação e estabilização das deformações	Comprovação da modificação do solo e atendimento ao desempenho



Fig. 9 - Duplicação rodoviária com melhoramento do solo com CPR Grouting.

REFERÊNCIAS

- *Patricia Karina Tinoco é engenheira geotecnica. Trabalha com melhoramento de solos moles.*
- Kirsch, K. & Bell, A. (2025). Terzaghi, K.; Peck, R.B.; Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice. 3rd ed. John Wiley & Sons. Mesri, G.; Godlewski, P.M. (1977). Time- and stress-compressibility interrelationship. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 103(GT5), 417–430.
- Hansbo, S. (1981). Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains. Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm.
- Chu, J.; Indraratna, B.; Yan, S.; Rujikiatkamjorn, C. (2014). Overview of preloading methods for soil improvement. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement, 167(3), 173–185. DOI 10.1680/grim.13.00022.
- Indraratna, B.; Rujikiatkamjorn, C.; Sathananthan, I. (2005). Analytical and numerical solutions for a single vertical drain including the effects of vacuum preloading. Canadian Geotechnical Journal, 42, 994–1014.
- Rujikiatkamjorn, C.; Indraratna, B. (2013). Current state of the art in vacuum preloading for stabilising soft soil. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 44(4), 77–86.
- Mesri, G.; Khan, A.Q. (2012). Ground improvement using vacuum loading together with vertical drains. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(6), 680–689.
- Indraratna, B.; Geng, X.; Rujikiatkamjorn, C. (2010). Review of methods of analysis for the use of vacuum preloading and vertical drains for soft clay improvement. Geomechanics and Geoengineering, 5(4), 223–236.
- Tang, M.; Shang, J.Q. (2000). Vacuum preloading consolidation of Yaoqiang Airport runway. Géotechnique, 50(6), 613–623.



iBSM

INSTITUTO BRASILEIRO DO SOLO MOLE

Instituto Brasileiro do Solo Mole

CONHECIMENTO GEOTÉCNICO

APLICADO AOS DESAFIOS DO SOLO MOLE

O Instituto Brasileiro do Solo Mole reúne conhecimento técnico, experiência prática e inovação para apoiar profissionais e empresas na compreensão e solução dos desafios geotécnicos associados aos solos moles.

PARCEIROS

Bentley Institute | SOLOTEST | GEOKON | SOLUÇÕES CAD

ABMS | Leica Geosystems | TROGERTEC | ENGEGRAUT | ROCTEST

www.ibsm.org.br