

Capítulo 28

ESTRUTURAS DE PAVIMENTO NO CONTEXTO DOS SOLOS NÃO SATURADOS

Wai Ying Yuk Gheling

Lilian Ribeiro de Rezende

Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena

Liedi Legi Bariani Bernucci

Washington Peres Nunez

Jorge Augusto Pereira Ceratti

José Camapum de Carvalho

1. INTRODUÇÃO

As vias de comunicação objetivando o transporte de cargas e passageiros se dividem em aéreas, aquáticas e terrestres. As aquáticas se subdividem em marítimas, fluviais e lacustres e as terrestres em ferrovias e rodovias, esta última englobando as rodovias propriamente ditas e as ruas e avenidas. Além dessas vias de comunicação destinadas de modo predominante a veículos motorizados, tem-se, ainda, as ciclovias destinadas, em especial, a veículos não motorizados, e as calçadas ou passeios, que são destinados ao tráfego de pedestres. Este capítulo tratará apenas das vias de comunicação terrestres.

As estruturas viárias terrestres são, via de regra, projetadas e construídas para permanecerem em condição não saturada. Essa regra comporta exceções, por exemplo, algumas estradas de rodagem próximas ao Rio Araguaia, Estado de Goiás, Brasil, construídas em condições normais, sem a presença de água, permanecem, durante parte do ano, com toda a parte da terraplenagem e, por vezes, parte da estrutura de pavimento abaixo do nível d'água. Nesse caso, parte do maciço se submete aos efeitos da saturação e dessaturação. Outro exemplo diz respeito a situações em que, devido à construção de reservatórios de água nas proximidades da via, parte da terraplenagem, inicialmente projetada para existir em sua integralidade em situação de não saturação, passa a atuar na condição de parcial saturação. Esse é o caso de alguns aterros existentes na BR-060, no trecho que liga a cidade de Anápolis à cidade de Goiânia (Figura 1), que passaram de uma condição inteiramente não saturada para a condição em que parte do maciço passou a atuar em condição de completa saturação com a construção do reservatório de água no ribeirão João Leite.



Figura 1 – Aterro na rodovia BR-060 atingido pelo reservatório de água João Leite

Verifica-se, que as vias podem ser projetadas e executadas para existirem em três condições distintas de não saturação do maciço, compreendendo-se como maciço a estrutura de pavimento e a terraplenagem: condição permanente de não saturação, condição intermitente de saturação de parte do maciço e condição de saturação permanente de parte do maciço. Nesse último caso, a saturação de parte do maciço pode ser prevista na fase de projeto, o que permite avaliar e considerar os seus efeitos, ou ser proveniente de novas situações impostas suscetíveis de gerar impactos danosos à via.

Neste capítulo, dar-se-á ênfase à situação mais comum em que a via é projetada para ser construída e ter sua vida útil com a integridade do maciço na condição não saturada. Essa opção se deve ao fato de que os contornos de sua avaliação terminam cobrindo as demais situações, que podem ser consideradas casos extremos. Para que se entenda melhor a dinâmica da condição não saturada nos maciços e estruturas de pavimento, o capítulo abordará, também, suas contextualizações espacial e temporal.

2. CONFIGURAÇÃO ESTRUTURAL DAS VIAS

2.1 Pavimentos permeáveis, flexíveis e rígidos

No caso de vias urbanas e rodoviárias, a configuração da estrutura irá variar em função do tipo de pavimento que será implantado. Consequentemente, a abordagem em ter-

mos de solos não saturados será função do tipo de estrutura executada. Nessa linha, destacam-se três situações, com diferentes tipos de estruturas de pavimentos: permeável, flexível ou asfáltico e rígido ou de concreto de cimento Portland (Figura 2).

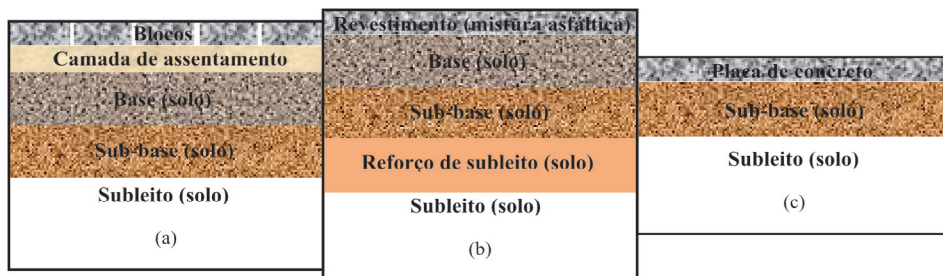


Figura 2 – Exemplos de configuração estrutural de diferentes pavimentos: (a) Permeável - blocos sobre camada de assentamento ou camada porosa asfáltica drenante, ambos sobre base e sub-base de materiais granulares sem uso de imprimação; (b) Flexível – revestimento asfáltico sobre base e sub-base de materiais granulares, solos lateríticos ou solos estabilizados; (c) Rígido – Revestimento em concreto de cimento Portland e base em material granular, estabilizado, de concreto compactado ou asfáltico

Os pavimentos permeáveis têm a finalidade de propiciar a infiltração de parte das águas pluviais, permitindo a percolação da água no solo subjacente e a recarga parcial do lençol freático. Geralmente, eles são executados com blocos de concreto intertravados ou blocos de rocha talhados (Figura 2a) e são muito utilizados em calçadas, ciclovias ou estacionamentos (Camapum de Carvalho *et al.*, 2012). Para essa estrutura, o projeto deve considerar o comportamento do solo saturado devido à infiltração priorizada no sistema, sendo recomendável o uso de material com menor potencial de sucção, que são menos sensíveis às variações de umidade, como é, geralmente, o caso dos materiais granulares. Há também pavimentos permeáveis asfálticos, constituídos por revestimento asfáltico poroso, assente sobre camadas granulares, que são destinados ao armazenamento de água por certo período de tempo para auxiliar no amortecimento do pico de cheia (Virgiliis, 2009; Pinto, 2011). Atualmente, esses tipos de soluções são destinados para vias, pátios e estacionamentos de veículos leves em meio urbano. Quando se empregam mantas impermeáveis sob as camadas granulares, que impeçam a percolação de água ao subleito, não há saturação dos solos do subleito; esses pavimentos reservam água por período controlado e alimentam o sistema de drenagem lentamente, esvaziando esses reservatórios temporários com o tempo e também amortecendo os picos de enchentes (PMSP, 2013).

Os pavimentos permeáveis propriamente ditos se distinguem dos pavimentos asfálticos porosos e mesmo dos pavimentos construídos com blocos de concreto intertravados assentes sobre camadas relativamente impermeáveis. Os revestimentos asfálticos porosos são construídos com dupla finalidade: melhorar a segurança na circulação de veículos ao eliminar fenômenos como o da aquaplanagem e o chamado efeito *spray*, que prejudica a visibilidade. Essa camada porosa de revestimento asfáltico é comumente assente sobre

uma camada de concreto asfáltico convencional. Já os pavimentos construídos com blocos de concreto intertravados assentes sobre camadas relativamente impermeáveis, tais como as bases imprimadas, geralmente, vislumbram mais o efeito decorativo e só raramente drenam a água acumulada no espaço entre blocos e na camada granular de assentamento para sistemas de drenagem.

Os pavimentos flexíveis ou asfálticos consistem no tipo de pavimento mais utilizado no Brasil em vias urbanas e rodovias. São dotados de revestimento impermeável (Figura 2b), que impede que a água de escoamento se infiltre e percole através das camadas de solo subjacentes. Ao mesmo tempo, seu projeto e sua execução devem, sempre que necessário, prever sistemas de drenagem que impeçam que a água do lençol freático atinja a camada estrutural do subleito e as demais camadas, mesmo que por ascensão capilar, pois ela é prejudicial à capacidade de suporte do solo. Sendo assim, o dimensionamento dessa estrutura de pavimento deve priorizar o comportamento do solo não saturado, observando-se a faixa de umidade de equilíbrio regional. Segundo Medina e Motta (2015), em rodovias brasileiras bem projetadas e com sistemas de drenagem eficientes, a umidade de equilíbrio na camada estrutural de subleito é, no máximo, igual à umidade ótima de compactação na energia Proctor normal. Assim, para garantir a qualidade dos projetos usando-se métodos mecanísticos de dimensionamento de pavimentos, deve-se observar o valor dessa umidade para que o módulo de resiliência utilizado seja determinado na condição correta de não saturação. Ressalta-se que a umidade de equilíbrio pode variar bastante em más condições de drenagem ou se já houver trincamentos no revestimento que permitam a entrada de água nas estruturas de pavimento durante a vida útil. Destaca-se que a umidade ótima corresponde à condição de porosidade geradora da oclusão da fase ar, possibilitando gerar, a partir dessa umidade, pressões neutras positivas quando da solicitação, o que contribui para a redução da capacidade de suporte. A AASHTO (2008; 1993) prevê, para uso no projeto de dimensionamento dos pavimentos, que se faça uma ponderação do módulo de resiliência do solo do subleito em função da mudança desses valores, ocasionada pelas variações sazonais. Estudos mais recentes já estão relacionando a deformação permanente com a sucção atuante no solo. Ao longo da vida útil desse pavimento, serviços de manutenção, incluindo os sistemas de drenagem e projetos de restauração, devem ser realizados para que a infiltração de águas pluviais não comprometa a estabilidade da estrutura de pavimento. Salienta-se que os oxi-hidróxidos de ferro quando eventualmente solubilizados no interior do maciço e drenados podem se precipitar obstruindo os sistemas de drenagem. Quando essa particularidade ocorre, deve-se atentar para a possível fragilização do maciço devido à sua esqueletização proporcionada pela solubilização e carreamento dos compostos de ferro.

Os pavimentos rígidos ou de concreto são executados com placas de concreto impermeáveis assentes sobre uma sub-base ou diretamente no subleito quando este oferece a capacidade de suporte necessária (Figura 2c). Assim, na fase de projeto, também se deve, para essas estruturas de pavimento, priorizar a análise do comportamento do solo em estado não saturado. No entanto, é importante atentar para a necessidade de manutenção das juntas de dilatação e para a análise da possibilidade de frentes de umedecimento laterais, pois isso pode gerar gradientes de módulo e deformabilidade das laterais para o centro da estrutura, passíveis de comprometer a estabilidade das placas.

2.2 Ferrovias

Via permanente é a denominação utilizada para o conjunto de camadas e de elementos que possibilitam o tráfego dos trens de maneira estável e segura, e transmite os esforços resultantes da passagem desses veículos à fundação. Alguns pesquisadores têm denominado a via férrea de pavimento ferroviário pela similaridade de funções e princípios de distribuição de tensões com os pavimentos rodoviários, viários e aeroportuários. Os componentes da via permanente são apresentados na Figura 3.

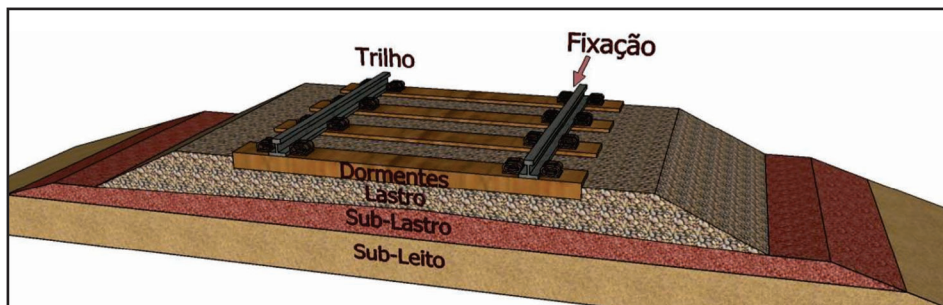


Figura 3 – Componentes da via permanente ferroviária (Klincevicius, 2012)

A concepção dos pavimentos ferroviários é assentar sua grade ou superestrutura (trilhos e dormentes, além das fixações e acessórios) sobre a infraestrutura, trabalhando com rigidez em faixa de valores controlados. De um lado, evita-se a elevada rigidez da infraestrutura de modo a amortecer grandes impactos nas passagens dos trens, reduzindo os desgastes exagerados dos trilhos pelas rodas rígidas, e, de outro, evita-se a elevada resiliência para reduzir a flexão elevada dos trilhos e possíveis descarrilamentos de trens.

Uma vez que não se pode acumular água nas grades, as camadas de lastro e sublastro são de elevada permeabilidade, propiciando a percolação rápida da água de chuva. Portanto, o subleito estrutural está sujeito a variações periódicas de umidade por se tratar de pavimentos permeáveis e expostos às intempéries. A variação de umidade do subleito é cíclica, alternando-se entre umidades elevadas, próximas à saturação, a umidades de equilíbrio muito baixas e de elevada tensão de sucção. A variação dessas tensões de sucção no solo do subleito interfere substancialmente nas respostas elásticas do sistema.

Dada a constante variação de umidade do subleito, deve-se optar, preferencialmente, por solos de baixa sensibilidade à água para evitar sua variação na capacidade de suporte e deformabilidade de forma expressiva. A escolha de solos de subleito ou de camadas finais de terraplenagem estáveis é essencial para o bom desempenho das vias permanentes. Para tanto, essas camadas devem ser compactadas, mesmo em cortes, de maneira a garantir pelo menos 60 cm de espessura com solo selecionado compactado.

Em geral, especificam-se solos lateríticos por apresentarem suas propriedades mecânicas, como o módulo de resiliência, menos sensíveis à variação de umidade, lembrando que compactações excessivas com o fechamento maximizado da macroporosidade podem ampliar as variações de sucção nesses solos por ocasião das reduções e ampliações

da umidade. Embora os solos argilosos lateríticos possam estar sujeitos a elevado aumento de umidade, seu módulo de resiliência, geralmente, não varia demasiadamente com essa elevação (Bernucci, 1995) para as faixas de variação registradas *in situ*. Estruturalmente, os solos lateríticos são compostos por agregados que se solidarizam por contatos cuja resistência varia com a sua natureza, podendo ir de pontes de argila, elos mais sensíveis à variação de umidade, a cimentações oriundas da presença de oxi-hidróxidos de ferro e/ou alumínio, elos com maior estabilidade. Essa estrutura composta por agregados gera uma distribuição de poros quase sempre bimodal, fazendo-se presentes macroporos entre os agregados e microporos em seus interiores. Como a sucção é, em geral, pequena em nível de macroporos, as variações de umidade que nele ocorrem pouco impactam no comportamento mecânico. A sucção atuante nos microporos é, usualmente, elevada, superior a 1.000 kPa, no entanto, variações de umidade no solo atreladas à entrada ou saída de água dos microporos quase que só afetam a estabilidade dos próprios agregados. As variações de umidade e, por consequência, de sucção, que afetam o comportamento mecânico desses solos são aquelas que ocorrem entre a umidade de término da dessaturação dos macroporos e a entrada de ar nos microporos. A amplitude dessa faixa de variação de umidade depende do volume e da distribuição dos poros existentes entre macro e microporos. Outro aspecto definidor da estabilidade estrutural dos solos lateríticos diz respeito ao fato de serem eles, geralmente, compostos por minerais estruturalmente estáveis frente à presença de água, tais como o quartzo, mineral primário residual ou neoformado (Senaha, 2019), o grupo de argilominerais caulinita, compreendido pela caulinita propriamente dita e pela haloisita, e os óxi-hidróxidos de ferro e alumínio, tais como a hematita, goethita e gibbsita.

Para subleitos de ferrovias, a drenagem dos aterros e dos cortes é um serviço importante para reduzir as variações substanciais de resistência pela permanência da água na fundação, principalmente, com solos transicionais parcialmente laterizados e não lateríticos, como alguns solos saprolíticos.

3. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS SOLOS

3.1 Solos não estabilizados quimicamente

O estudo do comportamento mecânico dos solos destinado ao projeto de estruturas de pavimento em geral, aí se incluindo as ferrovias, envolve, inicialmente, ensaios de compactação quando se trata da construção de aterros e da estrutura de pavimento propriamente dita. Em situações de corte e de travessia de mantos de solos compressíveis, o estudo envolve, também, a avaliação do comportamento dos solos em estado natural. Nos cortes, esse estudo pode compreender a avaliação do comportamento de solos em estado saturado e em estado não saturado, a depender da situação. No caso dos solos compressíveis, o estudo se volta, de modo predominante, para a avaliação do comportamento do solo em estado saturado. Esse item dará ênfase aos ensaios normalmente utilizados no estudo do comportamento dos solos não saturados.

O comportamento do solo frente à compactação depende diretamente das propriedades de retenção de água do solo e de como essa propriedade intervém na interação entre as

partículas. Os próprios métodos de compactação têm suas eficiências atreladas ao modo como se dá essa interação entre as partículas. Por exemplo, a compactação por vibração é mais eficiente em solos granulares, mas ela, de modo isolado, só apresentará uma resposta satisfatória em solos granulares secos e em solos granulares saturados, pois, em ambos os casos, a capilaridade/sucção é nula. Em solos com certa umidade e, portanto, com a presença de capilaridade/sucção atuante entre as partículas, a eficiência da vibração só será ampliada mediante a atuação conjunta com a energia vibratória de uma energia estática ou semiestática, como é o caso dos rolos vibratórios.

A forma da curva de compactação, em especial, a do ramo seco da curva e o ponto correspondente à umidade ótima, dependem diretamente da capilaridade/sucção presente no solo. Se o solo apresenta grandes variações de sucção com a umidade, o ramo seco da curva de compactação tende a ser íngreme. É evidente que outros fatores, como a estabilidade dos grãos e o efeito lubrificador da água, vão intervir nessa inclinação do ramo seco da curva de compactação, sendo que quanto maior o nível de quebra e/ou do efeito lubrificador com o aumento da umidade, mais inclinada tende a ser a curva nesse ramo. Embora pouco usado em estruturas de pavimento, por, muitas vezes, apresentarem argilo-minerais expansivos, cabe, ainda, salientar que os solos saprolíticos lamelares, apesar de, com frequência, apresentarem elevados valores de capilaridade/sucção terminam apresentando suavidade na inclinação do ramo seco da curva de compactação. Isso, provavelmente, deve-se a, pelo menos, dois fatores: porque a energia dinâmica usada no processo de compactação termina neutralizando o efeito da sucção; porque, apesar de, com frequência, esses solos apresentarem sucção elevada, a uniformidade nas dimensões dos poros faz com que as variações de sucção com a umidade, exceto quando da saturação, não sejam elevadas. Esse é um aspecto que merece estudos complementares.

Sobre a umidade ótima, como ela corresponde ao ponto de oclusão da fase ar, normalmente, ela tende a ser mais elevada em solos argilosos, pois o mecanismo de adsorção da água em volta da partícula termina permitindo a continuidade da fase gasosa.

Embora o ramo úmido da curva de compactação apresente tendência a acompanhar a forma da curva obtida para 100% de saturação, ela terá a sua inclinação associada não diretamente à capilaridade/sucção, mais sim à geração de pressão neutra positiva. Sendo assim, quanto maior a geração da pressão neutra com o aumento da umidade do solo durante o processo de compactação, mais íngreme será o ramo úmido, pois menor será a energia efetiva de compactação, lembrando que a energia externa total usada na compactação se mantém.

A influência e importância da capilaridade/sucção verificada na compactação do solo em laboratório se repete no campo, assim, por exemplo, quando ocorre excesso de umidade não se consegue atingir o grau de compactação desejado no campo, pois a energia aplicada, como no ramo úmido da curva de compactação, transfere-se para a água, gerando pressão neutra positiva e reduzindo a energia efetiva de compactação, embora, por exemplo, o peso do rolo se mantenha constante. Analisando resultados de ensaios laboratoriais em solos lateríticos compactados, Gehling *et al.* (1998a) constataram que o incremento da sucção provoca aumento no valor de módulo de resiliência até se atingir um valor máximo e que, a partir deste máximo, o módulo decresce ou permanece constante para qualquer nível de tensão desvio, como mostrado na Figura 4. Salienta-se que o valor máximo do módulo de resiliência com a sucção difere para cada tipo de solo.

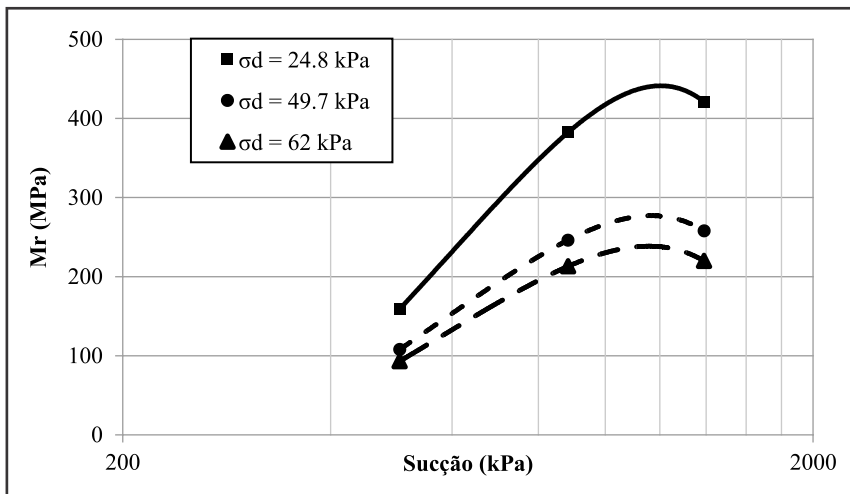


Figura 4 – Efeito da sucção no módulo de resiliência de um solo laterítico compactado para diferentes valores de tensão desvio (Gehling *et al.*, 1998a)

Gehling *et al.* (1998a) destacaram, também, o efeito do teor de umidade de compactação no módulo de resiliência de solos lateríticos compactados. Na Figura 5, apresenta-se a variação do módulo em função do teor de umidade de compactação para um solo argiloso. Observa-se que os módulos medidos em corpos de prova compactados na energia Proctor normal no teor de umidade ótimo ($w_{ot} = 21\%$) e no ramo seco ($w = 19\%$) apresentam tendências e valores semelhantes: uma redução exponencial do módulo (de 650 MPa para 200 MPa) com o aumento da tensão desvio (de 12 kPa para 62 kPa). Já o corpo de prova compactado no ramo úmido ($w = 23\%$) apresentou módulos significativamente menores (entre 270 MPa e 140 MPa) para a mesma faixa de variação da tensão desvio (σ_d). Além disso, observa-se que, para níveis mais elevados de σ_d , o módulo tende a estabilizar-se, sugerindo um comportamento elástico linear do solo. Gehling *et al.* (1998a) salientam, que durante o ensaio, não se observam variações de sucção. Tais comportamentos, embora requerendo mais estudos, certamente são reflexos da geração de pressão neutra positiva e/ou do comprometimento da estabilidade das agregações geralmente presentes nesses solos.

Também em laboratório, ao estudarem o comportamento quanto à deformabilidade elástica de um solo LG', Gehling *et al.* (1998a) observaram que as trajetórias de secagem ou umedecimento e de secagem seguida de umedecimento apresentam influência significativa nos módulos de resiliência, independentemente dos níveis atuantes de tensões desvio. Os materiais apresentaram aumento nos valores de módulos de resiliência quando ensaiados nas trajetórias de secagem e uma diminuição nas trajetórias de umedecimento. Outros resultados demonstraram que os valores de módulo de resiliência diminuem com os ciclos de secagem e umedecimento ocasionados pelo efeito da histerese do solo. Considerando-se a mesma umidade, o processo de secagem resulta em valores de sucção superiores aos valores alcançados por processos de umedecimentos, influenciando os resultados, conforme indicado na Figura 4.

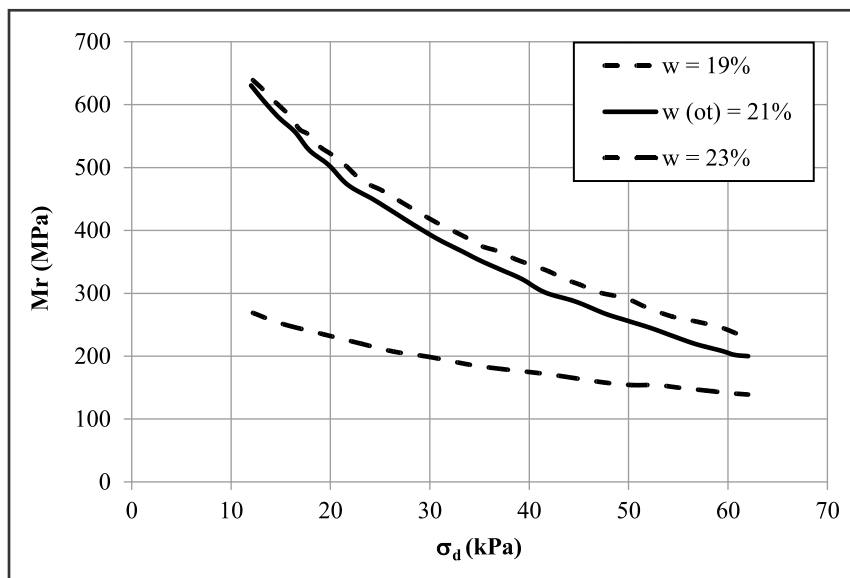


Figura 5 – Efeito do teor de umidade de compactação no módulo de resiliência para diferentes valores de tensão desvio (Gehling *et al.*, 1998a)

De Werk (2000) e Ceratti *et al.* (2004) analisaram o efeito do tipo de compactação no comportamento quanto à deformabilidade elástica de solos. Na Tabela 1, sintetizam-se os resultados obtidos ao ensaiarem-se corpos de prova de um solo LG' compactados por métodos estático, dinâmico e por amassamento a diferentes teores de umidade.

Tabela 1 – Efeito do Método de Compactação e do Teor de Umidade no Módulo Resiliente de um solo argiloso (Ceratti *et al.*, 2004)

Método de compactação	w (%)	K ₁ (MPa)	K ₂	r ² (%)	Faixa de variação do Módulo para σ_d entre 50 e 80 kPa*
Estático	OMC+2%	116	-0,64	91	133 – 181
Dinâmico	OMC+2%	147	-0,01	2	147 – 147
Amassamento	OMC+2%	134	-0,32	78	143 – 167
Estático	OMC	746	0,01	1	741 – 744
Dinâmico	OMC	293	-0,11	62	300 – 316
Amassamento	OMC	216	-0,16	77	224 – 242
Estático	OMC-2%	788	-0,09	40	804 – 839
Dinâmico	OMC-2%	610	-0,15	50	630 – 676
Amassamento	OMC-2%	430	-0,03	8	433 – 439

Modelo $Mr = K_1 (\sigma_d/100)^{K_2}$

* Tensão desvio teoricamente atuante a 30 cm no interior do subleito de pavimentos delgados.

Ao reavaliarem os resultados obtidos por de Werk (2000), Ceratti *et al.* (2004) concluíram que:

a) Nos corpos de prova compactados no ramo úmido (teor de umidade ótimo + 2% = 23%), o módulo de resiliência (M_r) não foi afetado significativamente pelo método de compactação.

b) O método de compactação afetou o M_r de corpos de prova ensaiados no teor ótimo de umidade (21%). Como mostrado na Figura 6, os módulos de corpos de prova compactados estaticamente foram 140% maiores que aqueles obtidos para corpos de prova compactados com energia dinâmica e 220% superiores aos compactados por amassamento. Tendência semelhante foi observada nos corpos de prova compactados no ramo seco (teor de umidade ótimo - 2% = 19%).

c) Globalmente, os corpos de prova compactados por amassamento apresentaram os menores módulos, fato que deve ser considerado, uma vez que, no campo, os solos argilosos são compactados com rolos pé de carneiro, que reproduzem a compactação por amassamento. Ao medirem-se módulos em corpos de prova compactados estaticamente poderá estar superestimando-se os valores de M_r que se alcançarão no campo.

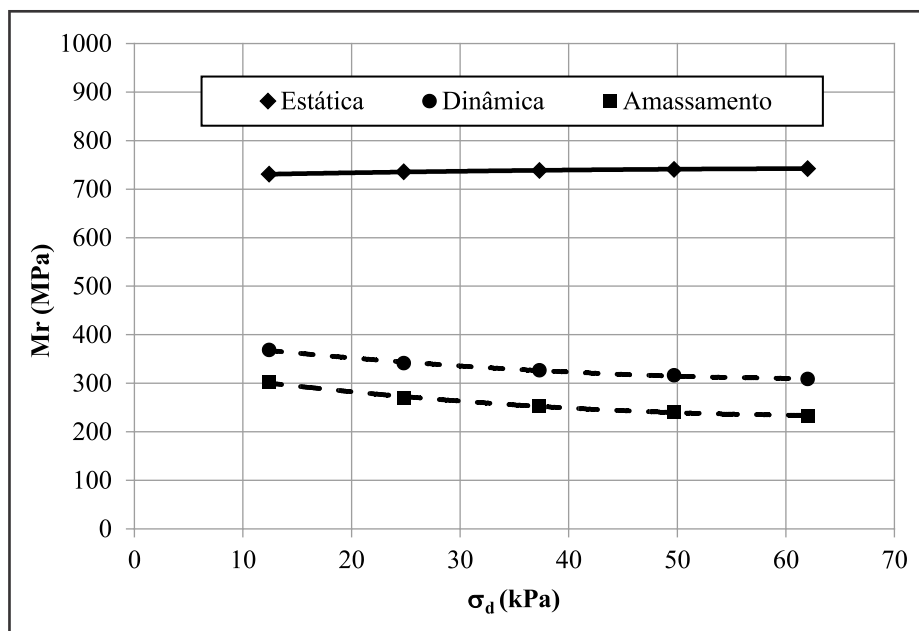


Figura 6 – Efeitos do método de compactação e da tensão desvio no módulo de resiliência de um solo argiloso (de Werk, 2000)

Camapum de Carvalho *et al.* (1987), ao estudarem a influência da compactação semiestática, vibroestática e dinâmica no comportamento mecânico de um solo calcáreo compactado que havia sido utilizado na construção de um aterro rodoviário, chegaram à conclusão similar em relação aos resultados de resistência à compressão simples, ob-

tendo maior resistência para o corpo de prova compactado semiestaticamente. Há que se destacar, no entanto, que, nos estudos realizados por esses autores, o formato das curvas de resistência em função da deformação axial obtidas para a compactação dinâmica foi distinto do obtido para a compactação dinâmica e se alterou com a energia de compactação dinâmica. No estudo, foi a metodologia de compactação semiestática a que apresentou maior similaridade no formato da curva de resistência com o obtido a partir de amostras compactadas *in situ*. Essas constatações e aquelas oriundas das análises realizadas por Ceratti *et al.* (2004) mostram a importância de se estar estudando e analisando cada caso, assumindo grande relevância o tipo de solo e a similaridade entre as técnicas de compactação usadas em campo e laboratório quando se estuda o comportamento mecânico dos solos.

Gehling *et al.* (1998b) relataram os resultados de pesquisa de campo destinada a avaliar a influência da sucção no comportamento resiliente do mesmo solo argiloso de comportamento laterítico (LG'), que foi empregado como camada final de terraplenagem (CFT) de pavimentos experimentais delgados com espessuras variando entre 18 e 34 cm, ensaiados com simulador de tráfego (Núñez, 1997). Instalaram-se tensiômetros tipo *jet-fill*, com pontas porosas localizadas a 30 cm de profundidade no interior da CFT, sobre a qual construíram-se estruturas de pavimentos. A sucção mátrica foi medida de forma contínua ao longo de dois anos. Periodicamente, foram levantadas bacias defletométricas na superfície dos pavimentos, com as quais se estimaram, por retroanálise, os módulos de elasticidade *in situ* (ou de resiliência) do solo da CFT, registrando-se, na ocasião, os níveis das sucções medidas nos tensiômetros. Esse procedimento resultou no modelo a seguir:

$$Mr = 142 + 16,9 (\mu_a - \mu_w)$$

onde: $(\mu_a - \mu_w)$ é a sucção mátrica em kPa e Mr é o módulo de resiliência em MPa.

Salienta-se que esse modelo é válido para valores de sucção mátrica de até 14 kPa, uma vez que, no campo, não se mediram sucções superiores, registrando-se em alguns dias, após chuvas intensas, a condição de saturação da camada, ou seja, sucção nula.

Quanto à avaliação do comportamento mecânico propriamente dito, hoje, no Brasil, o ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC, também referido como CBR) ainda continua a ser o mais utilizado no projeto de vias sob responsabilidade municipal ou estadual. Nas vias privatizadas e nas que estão sob gestão federal, já é comum que os projetos de pavimentação sejam realizados por meio de métodos mecanístico-empíricos. Desde 2020, já está disponível no site do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes o software gratuito denominado Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), que considera parâmetros como módulo de resiliência e deformação permanente para os solos. O CBR é um ensaio, geralmente, realizado com o solo no estado saturado ou quase saturado. Com isso, parece ser irrelevante a ponderação sobre a influência da sucção na avaliação do comportamento mecânico do solo a partir desse ensaio, mas, ao contrário, a discussão, exatamente por isso, merece ser realçada. Quando se avalia o comportamento mecânico do solo a partir do ISC obtido após imersão do corpo de prova, se o solo se en-

contrava, inicialmente, no ramo seco, se estará a subavaliar o comportamento mecânico. No entanto, se a umidade inicial for igual ou superior à correspondente à umidade ótima, a diferença em relação ao comportamento do solo não saturado será pequena, pois, a partir do ponto de oclusão da fase ar, sua contribuição para o comportamento mecânico não será tão significativa como mostra os estudos realizados por Parreira (2004). Outro aspecto, nesse ensaio, merece destaque, não pela influência que a capilaridade/sucção exercera diretamente sobre o comportamento do solo durante o ensaio, mas sim o dano que ela pode gerar no corpo de prova no momento da imersão se certos cuidados não forem tomados. O procedimento mais frequente é o de se tomar o corpo de prova e fazer a sua imersão em um reservatório já contendo o volume de água necessário para recobri-lo. Nesse caso, o corpo de prova a ser recoberto com água submeterá, por ação da capilaridade/sucção, a fase ar a uma pressão positiva. Se essa pressão superar a coesão atuante no solo, ocorrerá o afrouxamento do contato entre as partículas, propiciando a redução do ISC. Esse mecanismo, em muitos casos, explica a forma irregular do trecho inicial da curva de resistência à penetração, pois só após a recompressão dos pontos afrouxados ocorrerá a mobilização da resistência. Nesse ensaio, o recomendável é proceder-se à saturação progressiva do corpo de prova de modo a que a inundação se dê para valores pequenos de capilaridade/sucção, evitando-se danos em sua parte superior.

A compactação e o ensaio de ISC por si sós já deixam clara a importância da capilaridade/sucção para a análise do comportamento mecânico dos solos usados nas obras viárias. No entanto, outros aspectos merecem destaque para que se evitem erros de projeto, de avaliação do comportamento mecânico dos materiais e de execução das obras viárias.

Um primeiro aspecto a ser realçado diz respeito à cura feita com exposição do solo ao ar, submetendo-o às condições atmosféricas, tanto em campo como, algumas vezes, em laboratório. Quando se expõe o solo à condição atmosférica, têm-se, geralmente, duas consequências: a) ocorre troca de umidade entre o solo e a atmosfera, quase sempre reduzindo a umidade do solo, e, só para o caso de solos muito ressecados, aumentando-a; b) ocorre a contração ou expansão do solo, sendo mais frequente a contração em consequência da perda de umidade para a atmosfera. Tem-se, então, uma variação da capilaridade/sucção atuante no solo, e é ela que, na segunda das consequências apontadas, é responsável pela contração quando aumenta, e pela expansão quando diminui. No estudo do comportamento mecânico do solo em estado não saturado, a redução da umidade e a diminuição da porosidade, geralmente, refletirá no aumento da sucção e na melhoria do comportamento mecânico, o contrário ocorrendo quando da ampliação da umidade e expansão. Destaca-se que a variação do grau de saturação em função das variações da umidade e da porosidade deve ser analisada. Quando se analisa o comportamento mecânico do solo em estado saturado após submetê-lo a esse tipo de cura geralmente se registra uma melhoria do comportamento mecânico, em especial, no caso dos solos não expansivos, pois o volume inicial que passou por processo de contração não é retomado em sua integralidade.

Outro aspecto a ser, ainda, considerado e que merece ser melhor estudado diz respeito à influência da energia dinâmica no comportamento dos solos, como é caso da usada nos estudos de módulo resiliente e vida de fadiga. Nesses casos, mesmo em situações de campo com elevado volume de tráfego, a condição de laboratório termina sendo mais severa se considerado o efeito dinâmico sobre a capilaridade/sucção.

3.2 Solos estabilizados quimicamente

Os solos utilizados em bases e sub-bases de estruturas de pavimento asfálticos, sub-bases de pavimento de concreto e lastro e sublastro de ferrovias, dependendo da região onde se localiza a obra, podem não apresentar propriedades de resistência mecânica, permeabilidade e deformabilidade satisfatórias. A construção de uma via abrange uma grande extensão e mobiliza quantidades significativas de solo, portanto, a utilização de solos de jazidas distantes do local da obra pode vir a gerar custos significativos, tornando inviável a realização desta. Nesses casos, tornam-se necessários procedimentos de estabilização granulométrica, mecânica ou química dos materiais.

A estabilização química de solos merece um destaque especial, pois envolve não apenas interações físicas, mas também reações químicas dos estabilizantes com as partículas do solo, levando-os a um estado de aglomeração das partículas ou até mesmo de desestabilização destas e de agregados presentes em solos tropicais.

No caso de matrizes descontínuas, o agente químico também modifica as relações solo-água, principalmente em solos argilosos, pois interfere na dupla camada dos argilo-minerais. Nesses casos, deve-se considerar se o aumento de resistência ao longo do tempo é devido apenas ao uso do estabilizante ou se pode ser reflexo da umidade ou da perda desta, com o prolongamento do tempo de cura.

Primeiramente, é importante entender que não necessariamente a adição de estabilizante aos solos é benéfica ao seu comportamento. Rezende (2003) mostrou que solos profundamente intemperizados podem ter seus agregados destruídos pelo agente químico estabilizante, que interfere na distribuição de poros e, conseqüentemente, na sucção e no comportamento mecânico deste.

Lucena (2012) estudou a estabilização de um solo laterítico, com resíduos de lodo de ETA (estação de tratamento de água) e lodo de ETE (estação de tratamento de esgoto), com cal, cimento e emulsão. A Figura 7 apresenta uma comparação da percentagem de umidade de moldagem (umidade de ruptura/umidade de moldagem) para os três estabilizantes utilizados nas duas condições de cura estudadas (seca e úmida). Observa-se que as misturas com lodo de ETA apresentam maior umidade residual do que as que usaram lodo de ETE. Esse fato era previsível devido à presença de sulfato de alumínio no lodo de água, que apresenta comportamento hidrófobo.

Embora para todas as misturas se tenha verificado uma redução da umidade de moldagem durante o processo de cura (Figura 7), não é possível afirmar que tal redução implicará aumento das sucções mátrica e osmótica, pois é necessário analisar como a alteração química do meio as influencia.

Verifica-se, ainda, na Figura 7, que o estabilizante cal é o que retém mais umidade residual e a emulsão, o que apresenta maior perda, enquanto o cimento apresenta comportamento intermediário. De acordo com Angelim (2005), a cal hidratada é ávida por água e possui propriedade de retenção de água elevada. As misturas com adição de cimento consomem a água adicionada para a hidratação do cimento, resultando em menores umidades residuais, enquanto a emulsão, tal como a cal hidratada, contém água na sua composição, que será evaporada durante o processo de cura. Todavia, quando isso ocorre, forma-se uma película impermeabilizante na superfície do agregado. Esse fato indica que,

de acordo com o estabilizante escolhido, a estrutura formada pela estabilização será função das reações químicas do agente químico e da mineralogia do solo. Esse fato interfere diretamente na capacidade de retenção de água, ou seja, tem um reflexo direto na sucção mátrica e no comportamento mecânico do solo.

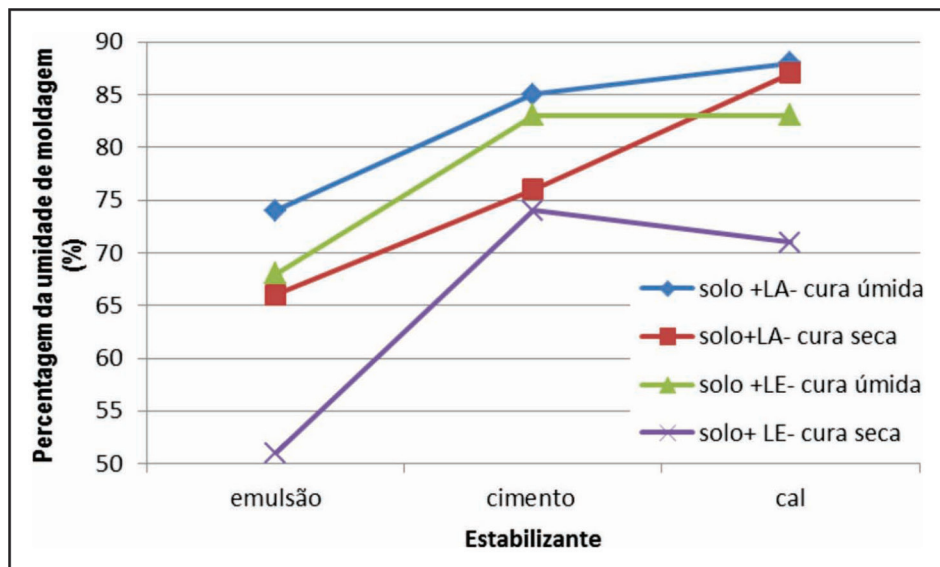


Figura 7 – Relação entre a porcentagem de umidade de moldagem e os estabilizantes para curas úmida e seca

No caso de solos contendo argilominerais expansivos, dois fenômenos devem ser considerados capazes de interferir na sucção/capilaridade matricial atuante no solo e, por consequência, no comportamento mecânico: 1) o processo de expansão mineralógica, diferentemente da estrutural, que ocorre concomitantemente com a variação da umidade ou relaxação das tensões atuantes no solo, quase sempre ocorre de modo significativo em intervalo de compreendido entre 24h e 48h podendo, no entanto, levar vários dias para que seja concluído, como ilustram os resultados obtidos por Mielenz e King (1955) e apresentados por Grim (1962). Esse tempo é superior ao de mistura solo-água-agente cimentante e à sua compactação, e, com isso, parte da expansão continua a ocorrer em intervalos de tempo maiores, fazendo com que a água saia dos vazios e penetre no interior do mineral, entre suas camadas estruturais, potencializando uma ampliação da sucção/capilaridade atuante no solo; 2) no processo de expansão mineralógica, tem-se, ainda, a possibilidade de dois fenômenos atrelados à movimentação da água e alteração da sucção/capilaridade atuante. O primeiro diz respeito ao solo mantido confinado no interior de moldes durante o processo de cura. Nesse caso, a expansão do mineral poderá induzir uma redução dos vazios devido ao impedimento da expansão lateral nos casos em que a expansão vertical não compensa a expansão mineralógica contida, o que interfere na sucção/capilaridade, geralmente, proporcionando a sua ampliação. No segundo caso, sendo a cura efetuada

com o corpo de prova já extraído do molde, a expansão mineralógica tende a ampliar o volume de vazios entre os minerais, o que implicaria uma diminuição da sucção/capilaridade se o volume de água nesses vazios fosse mantido constante durante a cura. No entanto, como a água neles presente também migrará para o interior dos minerais, o resultado poderá ser de aumento ou diminuição da sucção/capilaridade mátrica, conforme o resultado final imposto à variação do grau de saturação. Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021) mostram que, nos casos de expansão mineralógica, faz-se necessário considerar a umidade e o volume de vazios efetivos e não a umidade e o volume de vazios globais normalmente calculados para os solos.

Vale ressaltar que as modificações impostas pela adição de um agente químico promovem alterações nos cátions trocáveis e, consequentemente, no potencial de retenção de água, nas sucções matricial e osmótica e na capacidade de suporte do solo. A Figura 8 exemplifica, com base em resultados obtidos por White (1955) e apresentados por Grim (1962), a relação entre os cátions trocáveis e o coeficiente de atividade de Skempton (a) com o limite de liquidez (b) para uma montmorilonita, uma illita e uma caulinita, considerando-se os cátions trocáveis Ca^{++} , K^{+} , Na^{+} , e Mg^{++} . Cabe lembrar que, nos ensaios de limite de liquidez, sejam eles realizados segundo o método do cone ou de Casagrande, determina-se, respectivamente, a umidade para uma resistência à penetração ou à umidade para um fechamento especificado de um microcanal margeado por dois microtaludes de mesma altura e forma, talhados no solo. Sendo assim, no exemplo apresentado na Figura 8, os valores distintos obtidos para os limites de liquidez, teores de umidade presentes nos solos em estado saturado, mostram energias de interação entre as partículas se alterando em função da mineralogia e dos cátions trocáveis presentes nos solos. Portanto, se o agente químico usado na estabilização altera a concentração e os tipos de cátions trocáveis no solo, e cada um destes conduz a uma capacidade diferente de retenção de água pelo solo, infere-se que reações químicas que propiciam aos minerais maior ou menor plasticidade e coeficiente de atividade irão originar solos com maior ou menor sucção osmótica e mesmo mátrica para um mesmo teor de umidade. Esse efeito da mineralogia e dos cátions trocáveis no limite de liquidez tem, então, o alcance de intervir nas curvas características desses e de outros solos.

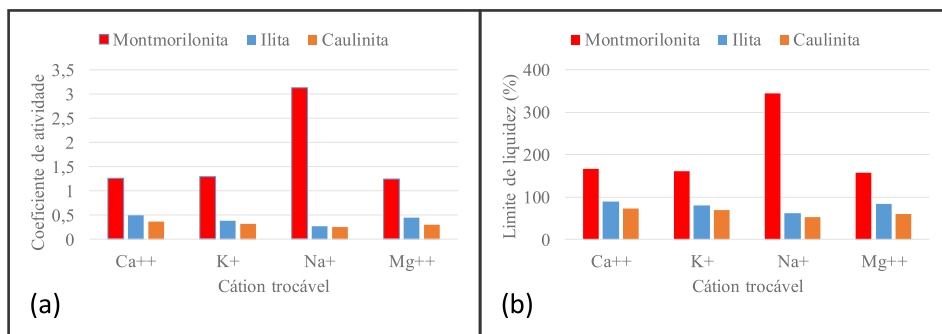


Figura 8 – Relações entre (a) cátions trocáveis e coeficiente de atividade; (b) cátions trocáveis e índice de plasticidade (obtido a partir de White, 1955 citado por Grim, 1962)

Younoussa *et al.* (2008) alertam para as expansões e contrações provocadas pela esmectita, presente em algumas lateritas do oeste da África e que podem alterar o comportamento dos solos em condições não saturadas. Segundo esses autores, deve-se usar o limite de liquidez e o índice de plasticidade, o percentual de finos, a atividade da argila e a superfície específica para verificar essa predisposição nas amostras a expandirem e contraírem.

De acordo com Rollings *et al.* (2002), em regiões tropicais de clima árido pode ser encontrado sulfato de cálcio nas partículas do solo. Este, quando em contato com a água, pode ser dissolvido, formando poros no solo. Contudo, caso o solo seja estabilizado com cimento Portland, ocorre a reação do sulfato com o cimento Portland, formando a etringita, que é um mineral expansivo e, portanto, com possibilidade de consumir a água presente no solo.

As pesquisas supracitadas mostram que, seja pela formação de minerais expansivos ou pelas variações de potencial de retenção de água do solo, as reações químicas entre o agente estabilizante e o solo devem ser meticulosamente analisadas. Assim, a escolha do agente químico a ser empregado não pode ser guiada apenas pelo tipo de solo, mas deve considerar as eventuais reações que podem vir a interferir tanto no caráter expansivo dos minerais formados nestas, como nas mudanças da capacidade de retenção de água. Então, nesse segundo item, residem outros pontos para reflexão: qual a interferência da sucção em solos estabilizados? Como poderia se mensurar essa influência?

Solos tropicais estabilizados podem apresentar mudança de suas propriedades com a redução do conteúdo de água. Isso pode ocorrer devido à tendência de agregação das partículas quando secas ou pela perda de água dos minerais hidratados. A primeira opção pode se refletir em aumento da resistência do solo, enquanto a segunda pode ou não ter esse efeito.

O pavimento está sujeito a variações no grau de saturação, dependendo da incidência de chuvas e elevação do lençol freático e mesmo em função das alterações atmosféricas em consequência da interação solo-atmosfera. Nas regiões tropicais, na maior parte do ano, as umidades dos pavimentos tendem a ser inferiores às determinadas no ensaio Proctor normal, principalmente, nas regiões semiáridas. Portanto, a curva de retenção de água se apresenta como uma relação importante nesses solos, pois descreve a relação entre a sucção e o teor de umidade. No caso de solos estabilizados, as características de posição, forma e inclinação da curva dependem, basicamente, da granulometria, estrutura e mineralogia gerada a partir das interações físico-químicas.

Para integrar os aspectos físico (índice de vazios) e químico (interação mineral-água-estabilizante), pode-se recorrer à definição da curva característica de sucção do solo, transformada em relação ao índice de vazios, que gera, para o solo, uma função de validade generalizada para uma mesma distribuição de poros (Camapum de Carvalho & Leroueil, 2004). Em solos estabilizados, nos quais os agentes químicos alteram o índice de vazios e a distribuição de poros e refletem no estado do solo alterando as curvas características de sucção plotadas como função do grau de saturação, torna-se importante a análise no comportamento mecânico destes nessa nova perspectiva. É igualmente relevante considerar não exatamente uma histerese na curva característica em função do tempo de cura, mas a sua dinâmica temporal uma vez que, com as reações, são formados novos compostos com distintas interações com a água.

Silva (2015), ao estudar um solo saprolítico por quatro processos distintos de compactação (manual, mecânica, manual sem reuso e manual com umedecimento prévio),

obteve a distribuição dos pontos mostrada na Figura 9. Nessa figura, verifica-se que, embora seja um mesmo solo, e os pontos sigam uma mesma tendência, o processo de compactação acaba por interferir na sucção e/ou porosidade do solo. Se tal fato ocorre apenas pela modificação do processo de compactação, há de se supor que comportamento análogo irá ocorrer com a presença de um agente químico, pois este promove alterações mais expressivas na estrutura do solo.

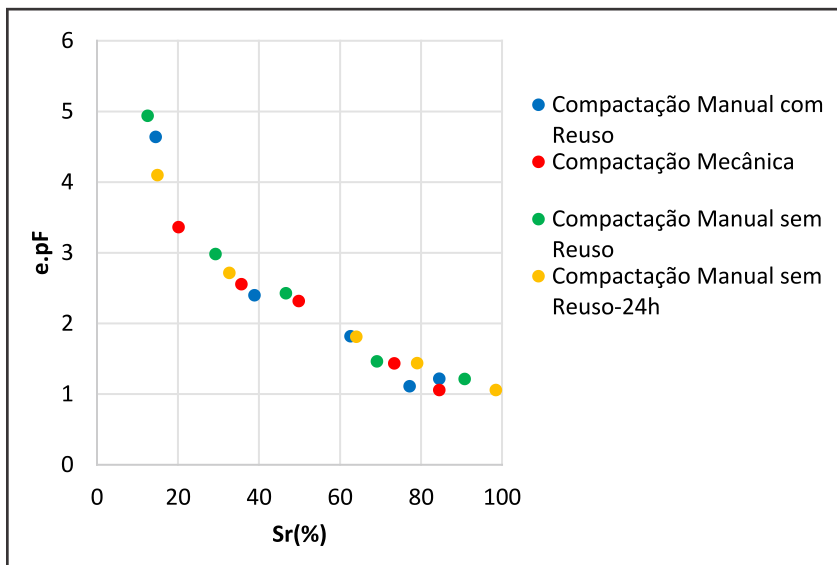


Figura 9 – Curvas características transformadas para um solo saprolítico

Ao longo dos anos, algumas pesquisas foram realizadas no intuito de verificar a influência de diferentes estabilizantes no comportamento dos solos. Entre elas, destacam-se algumas, que, embora não estejam atreladas às curvas características para as amostras, pode-se inferir se ocorre a influência da sucção no comportamento mecânico dos solos.

Elsharef (2013) estudou solos lateríticos estabilizados com cal hidratada. O aditivo promoveu diminuição dos índices de plasticidade e agregou as partículas, promovendo o aumento da permeabilidade. Isso ocorreu, pois a reação química modificou a estrutura do solo, aumentando a sua porosidade e o índice de vazios. Nesse caso, o efeito da sucção foi minorado e, aí, há que se verificar se, em termos de comportamento mecânico, o que se ganhou com as reações químicas superaria as perdas devido à menor sucção.

Far *et al.* (2013) adicionaram polímeros e óleos a solos lateríticos. Os autores fizeram análises das amostras com cura seca e úmida e observaram o aumento da RCS das amostras estabilizadas em detrimento do solo puro, sendo esse aumento mais significativo nas condições de cura seca, evidenciando a ação da sucção. Houve um aumento da RCS com o prolongamento do tempo de cura, mas os autores não fizeram a análise do solo puro para idades diferentes da de moldagem e ruptura, portanto, não é possível quantificar a influência do agente químico e da sucção separadamente. Esses resultados mos-

tram que, no caso de estruturas de pavimentos, em que as vias permanecerão, na maioria das vezes, em estado não saturado durante toda sua vida útil, o estudo da influência dos estabilizantes químicos no comportamento mecânico dos solos deve ser acompanhado da avaliação da influência da sucção nesse comportamento,

Miceli (2006) estudou dois solos lateríticos e um saprolítico, estabilizados com emulsão asfáltica RL-1C. Em uma análise preliminar, o autor realizou ensaios de RCS e RT com amostras estabilizadas nas idades 0, 7 e 28 dias com cura ao ar, verificando o aumento progressivo de resistência e a diminuição da umidade residual com o tempo de cura. Para separar a parcela correspondente ao ganho de resistência devido à ação química do estabilizante da ação da sucção, o autor refez o ensaio para as idades de 7 dias com dois tipos de cura (úmida e seca). Principalmente nos solos lateríticos, verificou-se que as RCS aos 7 dias com cura úmida eram similares às RCS obtidas nos corpos de prova rompidos após a compactação, e ambas eram bem inferiores às alcançadas para 7 dias com cura seca. Infere-se, nesse caso, que o ganho de resistência observado nos ensaios preliminares devia-se à ação da sucção, sendo esta mais expressiva no solo laterítico do que a ação do aditivo.

Amu *et al.* (2011) estudaram a estabilização de solos lateríticos com cal hidratada. Os autores, ao realizarem ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC) com amostras antes e após a imersão em água, verificaram que a absorção de água pelo solo eliminava o ar ocluso e reduzia a resistência destes à penetração do pistão. Ainda, observaram que essa redução era associada ao índice de plasticidade do solo, ou seja, quanto mais fino e ativo o solo, maior a diferença entre os valores de ISC uma vez que solos mais finos e ativos com menor índice de vazios tendem a ter maior sucção. Entretanto, os resultados mostraram que essa diferença é maior nos solos sem adição de cal, ou seja, embora parcela da resistência possa ser atribuída à sucção, a cal também promoveu melhorias no comportamento do solo. Cabe, porém, observar, conforme se depreendeu da discussão sobre a Figura 5, que, dependendo da mineralogia do solo, a troca catiônica oriunda da adição da cal pode, também, alterar a própria sucção.

Nos estudos de Lucena (2012), com resíduos de lodo de ETA e lodo de ETE, estabilizados com cal, cimento e emulsão, verificou-se a importância da cura seca ao ar livre por um período de 7 dias, levando a aumentos significativos de RCS em relação aos submetidos a cura úmida. Essa diferença de RCS foi creditada à ação da sucção. As amostras submetidas à cura seca apresentaram cerca de 10% a menos de umidade residual, corroborando que parte da RCS obtida por essas amostras deve-se à resistência proveniente da ação da sucção. Estudos relacionados à sucção do solo podem ajudar a explicar essa parcela de resistência, de extrema importância, pois as bases e sub-bases encontram-se em condições não saturadas, ou seja, a escolha do resultado mais significativo da RCS está vinculada ao tipo de execução que irá ocorrer em campo e da faixa de umidade de equilíbrio que atuará *in situ*.

Ainda segundo a autora, ao realizar os ensaios de RCS com 28 dias de cura, os maiores valores de RCS foram os que apresentaram maior percentagem de umidade residual em relação à umidade de compactação. Esse fato evidencia que a perda de umidade elevada pode ser prejudicial ao comportamento mecânico do solo, pois pode não só levá-lo a apresentar trincas e microfissuras como também gerar perdas de contatos oriundos da atu-

ação da capilaridade/sucção. Outro aspecto relevante na estabilização com determinados aditivos químicos, como a cal virgem e o cimento, diz respeito à necessidade de água para que ocorram as reações químicas de cimentação. Valencia *et al.* (2007) mostram, para um solo tropical (Figura 10a), que a coesão estimada a partir de ensaios de resistência à tração por compressão diametral, resistência a compressão simples e pela conjugação desses dois ensaios aumenta até um determinado limite com o crescimento da sucção, passando, em seguida, a diminuir. Para esses autores, a perda de coesão se deve ao surgimento de fissuras provocadas pelo ressecamento do solo. No entanto, se observadas as curvas características mostradas para o solo no mesmo artigo (Figura 10b), verifica-se que a coesão passa a diminuir para sucções atuantes em nível de microporos, o que aponta para as possíveis perdas de contato entre microagregados, corroborando, em ambas as hipóteses, com os entendimentos anteriormente apresentados.

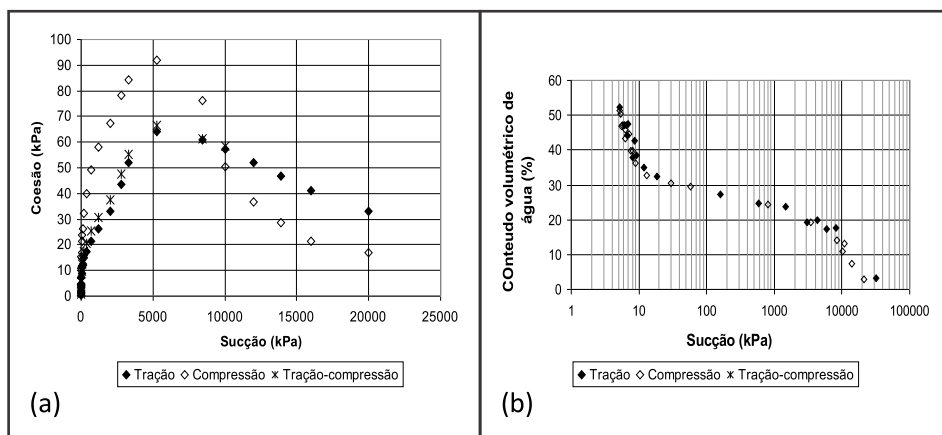


Figura 10 – (a) Influência da sucção na coesão; (b) curva característica de um solo tropical (modificado de Valencia *et al.*, 2007)

Estudos conduzidos por Gondim (2008) e Santos (2003) concluíram que existe uma boa probabilidade de ocorrer relação entre os parâmetros de RCS e a umidade residual, sugerindo que a secagem das amostras em seu processo de cura tem um valor de umidade para o qual se alcança uma RCS máxima e segue tendência parabólica.

Outro aspecto da influência da umidade do solo no comportamento mecânico deve-se à pré-secagem na fase de preparação de amostras. A pré-secagem, nessa fase, propicia a desidratação dos microagregados e mesmo de agregados no caso das lateritas, removendo parte ou a totalidade da água originalmente presente nos microporos. Quando da adição de água para a preparação da mistura e compactação, a água, ao circundar os agregados, aprisiona a fase ar neles presentes, submetendo-a a uma pressão positiva devido à atuação da sucção. Dada à sucção geralmente elevada presente nos microporos, dois fenômenos podem ocorrer: 1) se o agregado for pouco estável, a pressão positiva, na fase ar, poderá destruí-lo; 2) se o agregado for estável, bem cimentado, a atuação da sucção ao longo do tempo gerará a dissolução da fase ar e a penetração de parte da água ocupante

dos macroporos no interior dos microporos, reduzindo, assim, a umidade, que interfere de modo mais marcante no comportamento mecânico, conforme mostrado por Camapum de Carvalho (2010) e Oliveira (2007) e, portanto, ampliando a sucção/capilaridade atuante nos macroporos. Nesse caso, faz-se necessário considerar esse efeito quando se estuda a estabilização química do solo.

Ayala (2020), ao manter por um ano corpos de prova estabilizados com cal hidratada em cura *in situ*, mostrou que, com o tempo, as agregações presentes no solo estudado perdiam a estabilidade, assim como ocorria migração de parte da química usada na estabilização para o solo circundante, que tinha também a estabilidade das agregações afetada. Faz-se necessário, no caso das estabilizações químicas, considerar o impacto na alteração da química do meio nas sucções matricial e osmótica. No contexto da sucção osmótica, dois equilíbrios requerem tempo para que ocorram: o equilíbrio da sucção osmótica entre o fluido presente nos macroporos e mesoporos externos aos agregados e o fluido presente no interior do agregado, lembrando que tal alteração poderá melhorar ou piorar a sua estabilidade proporcionando, por exemplo, a solubilização de oxi-hidróxidos de ferro e alumínio; o equilíbrio da sucção osmótica entre o solo estabilizado quimicamente e o seu entorno com reflexos similares aos colocados em relação às agregações, podendo melhorá-lo ou piorá-lo não só por meio de trocas iônicas como solubilizando agora também ligações cimentícias quando estas se fazem presentes entre as agregações ou entre outros grãos presentes no solo como os grãos de quartzo. Portanto, os resultados obtidos por Ayala (2020) mostram a necessidade de contextualização da estabilização para a situação de campo, pois esta pode ser, a médio e longo prazo, prejudicial ao comportamento mecânico do próprio solo e dos solos circunvizinhos.

Embora experimentos específicos precisem ser realizados quando se faz a estabilização química dos solos, Teixeira *et al.* (2019) apresentam um ensaio simples e rápido para a verificação da sensibilidade do solo ao produto químico utilizado quanto ao seu potencial agregador ou desagregador, lembrando que esse experimento, dado o seu tempo e condições de execução nas quais a própria sucção mátrica é eliminada, apenas sinaliza para a maior ou menor sensibilidade do solo ao produto químico a ele adicionado. O experimento não normatizado constitui-se em colocar 100 g do solo puro e 100 g do solo misturado 24 horas antes do ensaio aos teores de cal estudados, em provetas de 1000 ml. Em seguida, completa-se o nível das provetas com água até atingir 1000 ml, agita-se manualmente e deixa-se as provetas em repouso, observando-as ao longo de 24 horas para verificar se ocorre agregação ou desagregação do solo ou se ele é texturalmente insensível a curto prazo ao produto químico incorporado.

Todos esses estudos apontam para a necessidade de se avaliar o que se passa no processo de estabilização química do solo quanto às variações de umidade, porosidade e cimentação propriamente dita. Exemplificando sobre a importância de também se considerar as variações de porosidade oriundas da estabilização, a Figura 11 (Pessoa, 2004) mostra que, aparentemente, a cal não interferiu nos valores de ISC obtidos sem imersão quando os resultados são avaliados em função da umidade (w) (Figura 11'a), do grau de saturação (S_r) (Figura 11b) e da própria sucção em pF (Figura 11c). No entanto, quando tratados os resultados em função pF/e (Figura 11d), observa-se a tendência de melhoria do comportamento mecânico do solo com o aumento do teor de cal.

Esse tipo de análise é interessante, pois considera conjuntamente o efeito da porosidade e da sucção e ambos podem ser afetados pelo aditivo químico, impactando no comportamento mecânico.

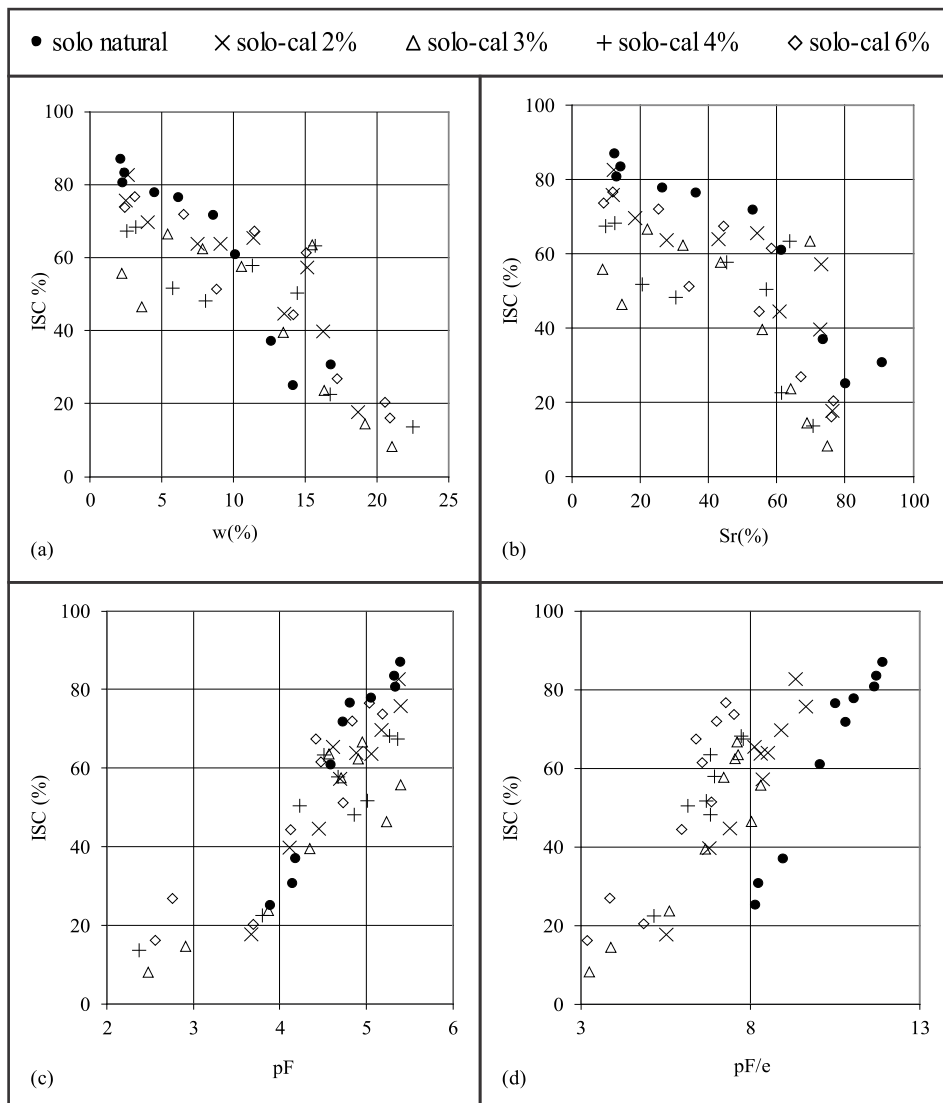


Figura 11 – Variação do Mini - ISC com (a) umidade; (b) Saturação; (c) pF; (d) pF/e (Pessoa, 2004)

Diante das reflexões levantadas, verifica-se que a melhoria do comportamento do solo devido à estabilização química requer análises abrangentes, que vão desde as condi-

ções de cura até o impacto na estrutura do solo e a estabilidade das agregações a médio e longo prazo para condições de cura de campo.

4. CONTEXTUALIZAÇÃO ESPACIAL DAS VIAS

Em uma obra de pavimentação, a condição de não saturação do maciço, estrutura de pavimento e terraplenagem, é extremamente dinâmica quando contextualizada espacialmente, sofrendo influência de fatores como morfologia do terreno, geologia estrutural e hidrogeologia, sazonalidade climática e orientação do maciço em relação às condições de insolação e de vento. Isso gera certa dificuldade de análise, pois, enquanto *in situ* a situação é extremamente dinâmica, mesmo ao longo de uma determinada seção ou ao longo da profundidade em um determinado ponto da estrutura de pavimento (Figura 12, Bernucci, 1995), em laboratório ou mesmo em estudos pontuais de campo, geralmente, os resultados de ensaio e o comportamento do solo em estado não saturado refletem o estado físico do solo no momento do ensaio, a porosidade e a umidade. Por exemplo, quando se define a curva característica de retenção de água de um solo, isso é, geralmente, feito para uma condição de porosidade inicial e quando se estuda o comportamento mecânico do solo, o comum é estudá-lo para uma condição pré-definida de umidade e porosidade, em ambos os casos, não contemplando a dinâmica imposta por características e contornos espaciais, cabendo lembrar que muitos solos apresentam porosidade variando com a sucção atuante, o que, com frequência, não é considerado, mesmo na definição das curvas características.

Alia-se a essa dificuldade, as variações impostas, espacialmente, pelas condições climáticas, como temperatura e intensidade e distribuição das precipitações. Tais peculiaridades impostas pela espacialidade tornam o estudo dos solos não saturados aplicado à construção viária terrestre, ao mesmo tempo, mais complexo e relevante.

O comum é se buscar trabalhar com as condições críticas extremas, condições de pior comportamento mecânico, como avaliando-se o comportamento do solo na condição saturada. No entanto, a dinâmica espacial da sucção e de sua influência no comportamento mecânico termina limitando o campo de validade desse tipo de abordagem, tornando imprescindível uma maior interação entre os estudos experimentais pontuais e o tratamento espacial que pode ser dado por meio de ferramentas numéricas. A título de exemplo, um mesmo solo previsto para ser utilizado na construção de uma sub-base e de uma base, mudando-se apenas a condição de compactação, o que simplifica o problema, pois torna as demais propriedades físico-químicas e mineralógicas iguais, terá nos dois casos condições específicas de porosidade e umidade de compactação e por consequência de sucção e comportamento mecânico. No entanto, mesmo desprezando-se as frequentes variações dessas propriedades na fase construtiva, variações que ocorrem porque se trabalha considerando-se um grau de compactação mínimo e uma faixa de umidade, durante a vida útil da obra, a sucção e o comportamento mecânico do solo ao longo de uma determinada seção e entre seções estarão continuamente variando ao longo do tempo e mesmo em um dado momento entre pontos distintos dessas seções, como ilustrou a Figura 12, apresentada por Bernucci (1995).

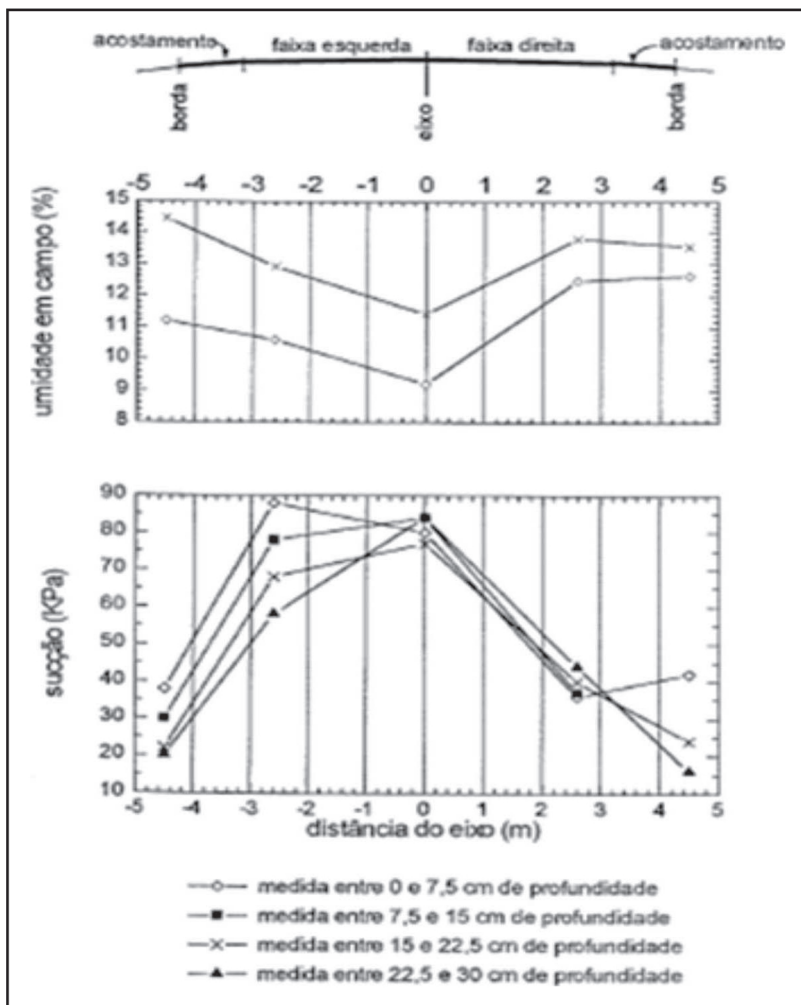


Figura 12 – Variação da umidade e da sucção com a profundidade e com a posição do ponto em relação à estrutura de pavimento (Bernucci, 1995)

Exemplificando, considere o traçado da via mostrado na Figura 13a, no qual se utilizou o mesmo perfil de solo tropical nas três camadas compondo a estrutura de pavimento, reforço de subleito, sub-base e base. O reforço de subleito foi construído com a camada de solo menos intemperizado e contendo pequena fração de argilomineral expansivo. As camadas de sub-base e de base foram construídas com um cascalho laterítico profundamente intemperizado, isento de argilominerais expansivos, porém, contendo pequena fração de haloisita hidratada. O reforço de subleito foi compactado na condição ótima da energia Proctor normal. A sub-base foi compactada na condição ótima da energia Proctor intermediário e a base foi compactada na condição ótima da energia Proctor modificado.

A presença do argilomineral expansivo na camada de reforço de subleito e de haloisita hidratada no solo profundamente intemperizado nas camadas de sub-base e base, embora não tendo uma influência direta sobre o que se discutirá a seguir, foi proposital para chamar a atenção do leitor sobre dois aspectos: quando se submete um solo expansivo à secagem em laboratório, deve-se, antes da realização dos ensaios, aguardar a reidratação por, pelo menos, 24 horas, mesmo sabendo que ela não se completa nesse intervalo de tempo. Já no caso dos solos profundamente intemperizados, é preciso que se saiba que, quando eles possuem haloisita hidratada, sua desidratação é irreversível e proporciona diferenças de umidade em relação ao campo, sendo, portanto, de grande relevância considerá-la, quando presente, no estudo do comportamento dos solos não saturados. Finalmente, os solos tropicais profundamente intemperizados são, geralmente, ricos em agregados e microagregados. Esses elementos agregados contêm, em seus interiores, pequenos poros, em geral, microporos, que, ao se desidratarem, são de difícil reidratação, porque, ao se adicionar a água ao solo, ela envolve grande parte desses agregados, isolando, em seus interiores, a fase ar, que passa a impedir ou simplesmente dificultar a entrada da água. Essa observação é igualmente relevante para o estudo das propriedades e do comportamento dos solos não saturados, pois pode tornar a situação de campo, na qual os microporos encontram-se geralmente saturados com água, muito distinta daquela de laboratório obtidas sobre amostras pré-secas, pois nelas os microporos encontram-se, na grande maioria, preenchidos com a fase ar. Logo, entender tais peculiaridades é de grande relevância para que os estudos do comportamento dos solos não saturados em laboratório sejam mais coerentes com o comportamento do solo *in situ*.

Retornando à questão central deste item, referente à contextualização espacial do solo não saturado no estudo das vias terrestres, a Figura 13b é representativa das seções 1, 2 e 3. No momento da compactação, os pontos a, b e c dessas seções apresentavam propriedades e comportamento semelhantes e correspondentes aos obtidos na fase de projeto. No entanto, durante a vida útil do projeto, essas propriedades e esse comportamento tenderão a variar de modo distinto e contínuo segundo as variações climáticas nas seções 1, 2 e 3. Nas seções 1, 2 e 3, as variações, em especial, da umidade, serão condicionadas pela geometria da via, sendo que, na seção 1, as variações dos bordos (a, f) para o centro (c, d) da via tenderão a ser uniformes a partir das duas extremidades. Já na seção 2, assim como na seção 3, as variações de umidade de “a” para “c” tenderão a ser distintas das verificadas de “f” para “d” devido a alterações nas geometrias das superfícies de hidratação e desidratação. Aliás, apesar da pequena diferença, a Figura 12 (Bernucci, 1995) aponta para certa dinâmica se comparadas as umidades e sucções de um lado com o outro da via monitorada, diferença que pode ocorrer em função de elementos inevitáveis, como direção do sol e dos ventos predominantes. Portanto, embora se estude, em laboratório ou mesmo por meio de ensaios de campo, as propriedades e o comportamento dos solos para condições específicas de não saturação, em uma obra, as condições hídricas dos solos são dinâmicas e associadas à dinâmica ambiental e a aspectos como o geomorfológico, o que impõe uma dinâmica ao comportamento capaz de intervir em fenômenos como o da fadiga e mesmo ocasionar rupturas em taludes de cortes e de aterros. A conjugação do estudo do comportamento dos solos não saturados com ferramentas numéricas de modo a contemplar essa dinâmica é de fundamental importância.

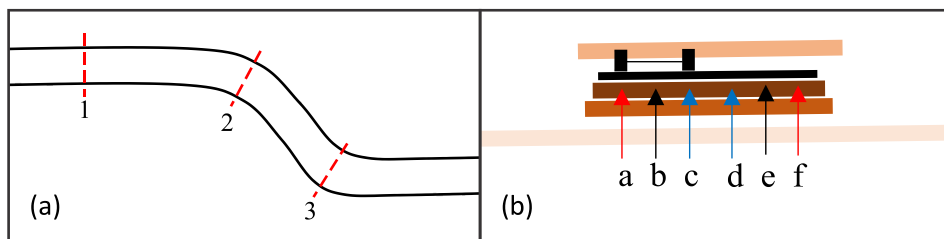


Figura 13 – (a) traçado da via; (b) corte tipo para as seções 1, 2 e 3

Outro aspecto merece aqui ser destacado, devido ao fato de que os estudos de subleito são realizados apenas no corpo estradal e em profundidade geralmente limitada, é a geomorfologia de subsuperfície. Essa geomorfologia quase não é tratada nos estudos de geomorfologia, que, geralmente, dedica-se aos estudos dos contornos da superfície do terreno, o que torna necessária sua definição. Entende-se por geomorfologia de subsuperfície a forma como espacialmente se distribuem as camadas de solo até atingirem o extrato rochoso. No caso dos solos não saturados, ela é importante, pois atua condicionando o fluxo, a distribuição de umidade e mesmo o lençol freático quando presente. Isso torna, em muitos casos de construção viária, relevante a sua análise, pois, embora a geomorfologia da superfície em um determinado trecho possa ser a mesma, as variações da geomorfologia de subsuperfície podem impactar no desempenho da estrutura de pavimento ao longo do trecho.

Em síntese, o estudo dos solos não saturados deverá ser contextualizado espacialmente, levando-se em consideração, dentre outros, a morfologia do terreno em superfície e subsuperfície, a geologia estrutural e hidrogeologia, a sazonalidade climática e a orientação do maciço em relação às condições de insolação e de vento, pois todos esses fatores são intervenientes no equilíbrio solo-atmosfera. Essa percepção amplia a importância do estudo dos solos não saturados nas obras viárias, pois, por exemplo, a simples diferença de rigidez imposta pelas variações de umidade entre as trilhas de roda podem, por si sós, ser indutoras de fadiga estrutural ao longo da vida útil da via. Outro exemplo diz respeito à comparação entre uma via urbana e rural, pois, embora estudos de laboratório possam revelar resultados semelhantes ao se tratar de um mesmo solo, as configurações espaciais são distintas, refletindo diretamente na umidade de equilíbrio e no comportamento não saturado do solo. Logo, a contextualização espacial é fundamental para que a relevância do estudo dos solos não saturados seja mais bem evidenciada e considerada.

5. CONTEXTUALIZAÇÃO TEMPORAL DAS VIAS

Os estudos técnicos aplicados na engenharia viária terrestre assumem, quase sempre, caráter estático quanto à questão temporal. Alguns ensaios, como os indutores de carregamento cíclico, assumem a dinâmica temporal, mas sem que consiga conjugá-la com a dinâmica climática e de variação da umidade de equilíbrio. A título de exemplo, a Figura 12, apresentada por Bernucci (1995), muito embora a autora, certamente, tenha feito medições ao longo do tempo, apresenta apenas a realidade da via em um determinado momento, talvez, até o mais crítico. No entanto, assim como se considera o efeito dos ciclos

de carga sobre a estrutura de pavimento, faz-se necessário considerar os ciclos de energia e os níveis de energia impostos à estrutura de pavimento pelas variações climáticas.

No campo, o solo, após ser compactado em uma determinada condição de umidade e peso específico, submete-se, ao longo da vida útil da via, a “n” ciclos de carga. No entanto, essa submissão não se dá, exatamente, para aquela condição de umidade de compactação, mas sim para uma faixa de umidade de equilíbrio, que será, para um determinado solo, tanto mais ampla quanto mais amplas forem as variações climáticas indutoras de variações de umidade do solo. Então, em qual condição se deve estudar o solo? Certamente, a resposta será, na mais crítica, e mais crítica em termos de solos não saturados é geralmente aquela em que o solo apresenta menor sucção. Contudo, a engenharia requer mais reflexões que certezas, e, muitas vezes, nas obras viárias, os ciclos de carga em situações de solo muito ressecado podem ser cruciais para que a fadiga seja atingida mais precocemente. Também, as alternâncias entre estados do solo pouco úmido e muito úmido impõem alterações nos estados de tensão mobilizados, podendo, também, atuarem como aceleradores da fadiga da estrutura de pavimento. Para maior clareza sobre a questão temporal, serão discutidas, a seguir, mesmo que de modo resumido, algumas questões relacionadas à umidade de compactação e de equilíbrio das camadas que compõem a estrutura de pavimento.

A influência temporal sobre as propriedades e os comportamentos dos solos depende, também, do contexto espacial. Assim, o impacto temporal é distinto não só devido à morfologia de superfície e subsuperfície do terreno e da via, mas também em função do espaço e da forma que ocupa a estrutura de pavimento. Por exemplo, ainda que considerando um mesmo solo, a influência temporal na umidade de equilíbrio de uma camada de sub-base e de base será distinta, pois as condições de troca com a atmosfera e com o subleito são diferentes.

Para iniciar a discussão sobre a umidade de compactação e de equilíbrio, são apresentados, na Figura 14, cinco modelos de curvas características de retenção de água, sendo: 1) curva característica típica de um solo com distribuição de poros uniforme; 2) curva característica típica de um solo com distribuição de poros bem graduada; 3) curva característica típica de um solo com distribuição de poros graduada sendo que o solo (3) apresenta um índice de vazios maior que o (3’); 4) curva característica típica de distribuição de poros bimodal; 5) curva característica típica de solos expansivos e materiais que fluem sob o efeito da sucção, como as misturas betuminosas (Camapum de Carvalho *et al.*, 2000). As formas das curvas de compactação para esses solos, além de depender de outros fatores, como mineralogia e textura, dependem, também, da sucção e, portanto, da forma da curva características de retenção de água. A Figura 15 ilustra modelos de curvas de compactação para esses solos, mantendo-se os mesmos itens de referência, incluindo-se, porém, para dois deles, o solo 4 e o solo 5, o efeito da pré-secagem. Comparando-se os resultados apresentados para os solos arenoso uniforme e arenoso bem graduado mostrados nas Figuras 14 e 15, observa-se que a inclinação do ramo seco da curva de compactação (Figura 15) é influenciada pela sucção atuante no solo (Figura 14).

Atentando-se, no entanto, para os gráficos apresentados na Figura 14, depreender-se-á que as curvas características correspondem a índices de vazios específicos, pois, para o solo 2, foram mostradas curvas distintas para índices de vazios diferentes. Logo, surge aí um problema: que curva característica usar ao buscar associar a forma da curva de com-

pactação à sucção atuante no solo? Indo além, como o processo de compactação tanto em laboratório como no campo conduz à redução progressiva do índice de vazios do solo até que ele seja concluído, para qual índice de vazios deve-se definir a curva característica do solo se ele varia ao longo do processo de compactação e se o próprio grau de saturação apresenta certa variação ao longo de uma obra?

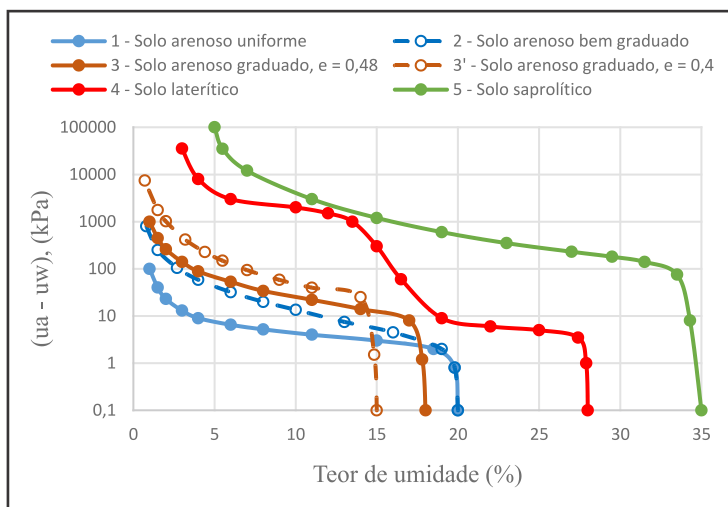


Figura 14 – Curvas características de retenção de água típicas para diferentes distribuições de poros

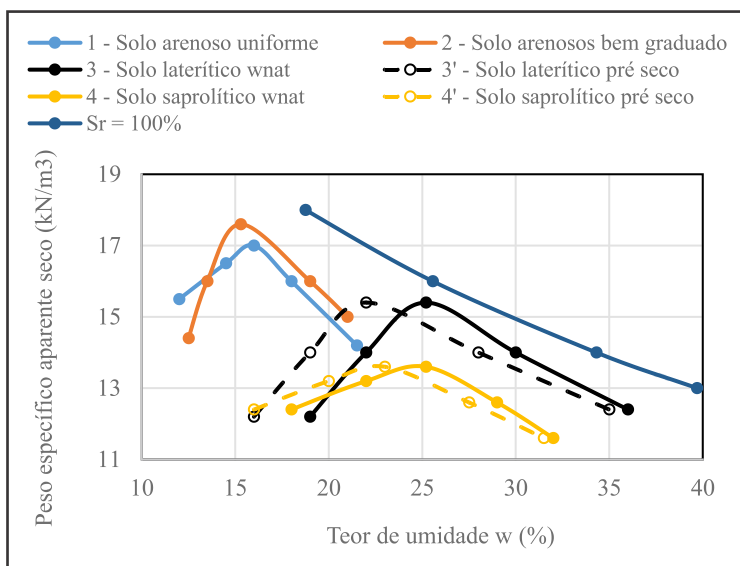


Figura 15 – Curvas de compactação para diferentes tipos de solo

Até que sejam desenvolvidas análises teóricas que possibilitem a solução prática do problema relacionado às diferenças nos índices de vazios, pode ser usada a proposta semiempírica apresentada por Camapum de Carvalho e Leroueil (2004), na qual traça-se o gráfico da sucção em pF (pF é igual ao logaritmo da sucção em centímetros de coluna de água), transformada em relação ao índice de vazios *versus* o grau de saturação (Sr). A Figura 16 ilustra a aplicação do método proposto por esses autores para os pontos com sucção superior às de entrada de ar pertencentes aos gráficos apresentados na Figura 3 para o solo 2 com índices de vazios 0,48 e 0,4. Com o gráfico transformado, é possível, então, chegar-se à sucção atuante no solo para um índice de vazios qualquer desde que mantida, aproximadamente, a mesma distribuição de poros. O uso do método para os solos 3 e 4 da Figura 3 requer, respectivamente, que se considere a distribuição de poros (Camapum de Carvalho *et al.*, 2002) e as variações de distância interplanar basal quando se trata de solos mineralogicamente expansivos (Campos *et al.*, 2008).

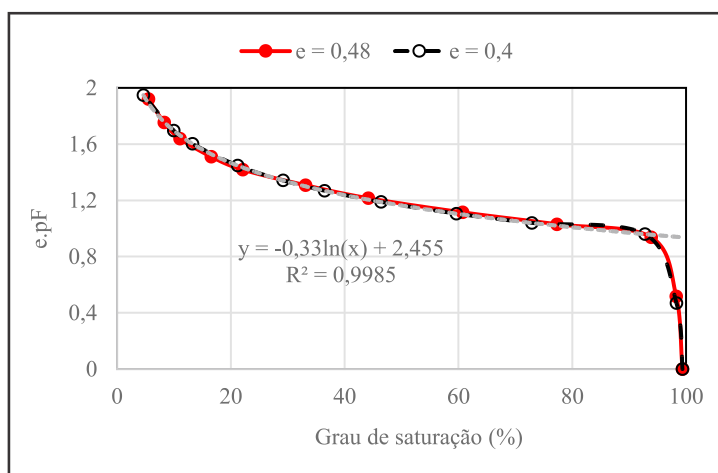


Figura 16 – Curvas características transformadas em relação aos índices de vazios 0,48 e 0,4

Embora não se vá, aqui, entrar em detalhe, outra questão poderia ser colocada: se a curva característica de retenção de água é função da porosidade, o comportamento mecânico do solo também não seria? Certamente que sim, no entanto, também, nesse caso, é possível simplificar o estudo, adotando a relação entre o comportamento mecânico e a sucção em pF normalizada em relação ao índice de vazios (pF/e) quando o parâmetro de avaliação do comportamento diminui com o aumento do índice de vazios, por exemplo, a coesão do solo (Camapum de Carvalho *et al.*, 2001). Quando o parâmetro aumenta com a ampliação do índice de vazios, faz-se a transformação da sucção em pF pelo índice de vazios (e.pF), por exemplo, no caso do colapso estrutural do solo faz-se a relação com e.pF (Camapum de Carvalho *et al.*, 2002). É evidente, que no caso do comportamento mecânico, deve-se, como no caso da curva característica, considerar a distribuição de poros e a presença de argilominerais expansivos quando for o caso.

Entrando-se na questão da umidade de compactação do solo em laboratório e no campo, busca-se, por meio da curva de compactação Proctor, estabelecer a umidade ótima do solo para uma determinada energia. No campo, trabalha-se com uma faixa de umidade situada nas proximidades da umidade ótima (w_{ot}), por exemplo, $w_{ot} \pm 2\%$. A faixa de umidade depende de uma série de fatores, como da forma da curva de compactação e das condições climáticas regionais. Exemplificando, o solo 2, cuja curva de compactação está mostrada na Figura 15, geralmente, admite uma faixa de compactação no campo mais estreita que o solo 1, mostrado na mesma figura. Essa observação encontra fundamento nas próprias curvas características dos dois solos, mostradas na Figura 14, onde sobressai um formato com inclinação mais suave da curva característica correspondente ao solo 1 em umidades próximas à ótima. Curvas de compactação com o ramo seco menos íngreme, como é o caso do solo 1, permitem, então, faixas de umidade de compactação mais amplas. Outro fator definidor tanto da umidade como da energia de compactação diz respeito às condições climáticas de execução da obra. Por exemplo, compactações no ramo seco na região Amazônica são mais difíceis que no Centro-Oeste, assim como o é a compactação no ramo úmido no polígono da seca nordestino.

Hoje, no Brasil e no mundo, a maioria dos projetos de estruturas de pavimento ainda são elaborados com base no comportamento mecânico do solo saturado, o que constitui um erro, pois, embora a favor da segurança, dispensa-se a economia que poderia ser gerada, tirando-se proveito do melhor comportamento mecânico do solo em estado não saturado. Alguns trabalhos, como o de Parreira (2004), apontam para o fato de que o comportamento do solo varia pouco entre o estado saturado e o correspondente à umidade ótima, e isso é verdade, pelo menos, para a maioria dos solos usados na construção de estruturas de pavimento, pois, como a umidade ótima corresponde ao ponto onde ocorre a oclusão da fase ar, as sucções atuantes são, geralmente, pequenas. Contudo, é nesse ponto que entra a necessidade de se considerar a umidade de equilíbrio e sua dinâmica, ou seja, a sua faixa de variação diária e sazonal. Quando a faixa de umidade de equilíbrio encontra-se abaixo da linha ótima, o comportamento mecânico do solo é melhorado pela atuação da sucção. De qualquer forma mesmo em regiões muito úmidas, como a Amazônica, embora seja temerário contar com a sucção na avaliação do comportamento mecânico do solo para fins de projetos de estruturas de pavimentos, considerar a dinâmica da sucção em função da dinâmica da umidade de equilíbrio é, muitas vezes, fundamental. Avaliando trincas longitudinais (Figura 17a) e transversais (Figura 17b) em estruturas de pavimento localizadas em Urucu, Estado do Amazonas, Camapum de Carvalho e Gitirana (2006) mostraram que essas trincas estavam, respectivamente, associadas à atuação da sucção nos fenômenos de expansão e contração e não à fadiga propriamente dita, imposta pelas solicitações do tráfego, que, aliás, na obra em questão, era baixíssimo, senão desprezível. No caso dos cortes e aterros, a consideração da faixa de umidade de equilíbrio assume grande relevância por questões de ordem econômica e de segurança, por interferir diretamente na estabilidade dos taludes, cabendo lembrar serem as geomorfologias de subsuperfície e subsuperfície, assim como a orientação do talude em relação à insolação e aos ventos predominantes, impactantes na faixa de umidade de equilíbrio atuante.

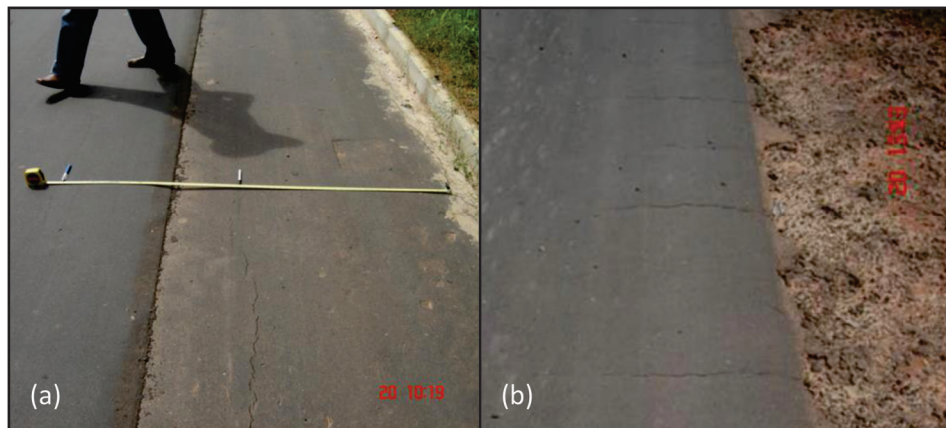


Figura 17 – Trincas na estrutura de pavimento: (a) longitudinais; (b) transversais (Camapum de Carvalho e Gitirana (2006))

Sendo frequente, no Brasil, o uso da secagem prévia do solo na fase de preparação da amostra para ensaio de compactação, a Figura 15 mostra, para os solos 3 e 4, como tal secagem pode interferir no resultado obtido para a curva de compactação. Cabe destacar que, embora, nessas curvas, tenha sido mantido o peso específico máximo para os solos com e sem secagem, ele pode vir a ser maior ou mesmo menor que o obtido para o solo sem secagem prévia. Por exemplo, no caso do solo 4, a desidratação de argilominerais expansivos com a secagem leva não só à redução da umidade ótima em relação à amostra sem secagem prévia, como também, devido ao aumento da densidade real dos grãos com a desidratação dos argilominerais expansivos, tende a ocorrer o aumento do peso específico aparente seco. Já para o caso do solo 3, tudo depende do nível de estabilidade dos agregados presentes no solo. Em alguns casos, a secagem prévia compromete a estabilidade estrutural dos agregados, possibilitando o aumento do peso específico com a compactação. Em outros casos, porém, os agregados são estabilizados com a secagem, ocorrendo o efeito contrário. Observa-se, então, que, dependendo do tipo de solo e do tratamento a ele dispensado em laboratório e considerando-se o tratamento convencional dado ao solo em que se considera o peso específico aparente seco (embora seja a porosidade que comanda as propriedades e os comportamentos hidromecânicos), ter-se-á, em campo, um material com comportamento distinto, dificultando, dentre outros, o próprio controle da compactação. Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021) mostram a relevância, nos casos dos solos laterítico e dos solos contendo argilominerais expansivos, de se analisarem as curvas de compactação e os comportamentos em função do índice de vazios efetivos e não do global, como ocorre quando se analisa, por exemplo, a curva de compactação em função do peso específico aparente seco.

A curva característica de retenção de água 4, mostrada na Figura 14, é típica de solos usados na construção de estruturas de pavimento no Brasil. Ela é também representativa de misturas usando materiais reciclados de construção civil e demolição (RCD) misturados ao solo. Essa curva característica coloca em evidência, nesse caso, a distribuição pre-

dominante dos poros presentes no solo em micro e macroporos. Nesse caso, o comportamento mecânico do solo é quase sempre função da macroporosidade, como mostrou Camapum de Carvalho (2017) e Oliveira (2007) para misturas de RCD e solo.

A curva característica de retenção de água 5 da Figura 14 é representativa de solos expansivos e de materiais que se submetem à fluência ao longo do tempo. Muitas vezes, torna-se inevitável projetar a estrutura de pavimento envolvendo solos expansivos, como é o caso dos trechos rodoviários de Urucu, no Estado do Amazonas. Em outros casos, essa convivência, apesar de, muitas vezes, inevitável, dá-se de modo localizado em subleitos em cortes. A forma não linear dessa curva para sucções superiores à pressão de entrada de ar se deve a variações de porosidade impostas por variações da distância interplanar basal dos argilominerais expansivos ou mesmo por expansões e contrações oriundas da estrutura imposta ao solo pelo processo de compactação (Campos *et al.*, 2008). Essas variações de porosidade se refletem, igualmente, no comportamento mecânico do solo e devem ser consideradas no projeto e execução das estruturas de pavimento em que se fazem presentes. Observa-se que, quando a questão está atrelada à expansão e à contração, as variações diárias e sazonais da umidade de equilíbrio impõem, ao solo, ciclos de variação volumétrica, que podem se estabilizar com o tempo. No entanto, se essa forma de curva foi obtida para materiais que fluem como as misturas betuminosas, as variações diárias e sazonais da umidade de equilíbrio tendem a conduzir o material apenas para reduções de porosidade até que se estabilize, mas tais variações, dependendo da situação, podem ser significativas e agravar problemas como as trilhas de roda.

Sobressai, dessa breve discussão, ser fundamental nos projetos de estruturas de pavimento e nas próprias execuções das obras, que se leve em consideração as propriedades e o comportamento dos solos não saturados.

6. ASPECTOS AMBIENTAIS, QUÍMICO-MINERALÓGICOS E ESTRUTURAIS NO CONTEXTO DAS ESTRUTURAS DAS VIAS

As estruturas das vias terrestres se inserem, dentre outros, nas rodovias, ferrovias, aeroportos, vias urbanas e estacionamentos. O bom desempenho dessas finalidades requer considerações e análises distintas nas diferentes etapas de sua vida útil desde a concepção, passando pelos estudos preliminares, projeto, execução, até atingir a própria manutenção. Isso torna relevante o conhecimento dos aspectos ambientais, químico-mineralógicos e estruturais de modo a dispor do solo na estrutura de pavimento, tirando o máximo proveito de suas propriedades e comportamento, e evitando erros previsíveis no âmbito da engenharia.

Esse item fará, então, uma introdução sobre esses aspectos de modo a contextualizar a importância de considerá-los em estudos, projetos, execução e manutenção dos sistemas viários.

6.1 Aspectos ambientais

As propriedades e o comportamento do solo, em especial, daqueles contendo argilo-minerais e compostos químicos, como os carbonatos e os oxi-hidróxidos de ferro e alúmi-

nio, estão diretamente relacionados à sua composição químico-mineralógica. Essa composição químico-mineralógica é, geralmente, sensível ao meio, podendo, portanto, alterar as propriedades e o comportamento do solo, inclusive sua própria estabilidade estrutural.

Grim (1962), por exemplo, mostra que as propriedades físicas, como plasticidade, e comportamentos, como curvas de compactação e compressibilidade, dependem da química e da mineralogia do solo. Cardoso (1995) mostrou que o fenômeno do colapso está fortemente ligado às transformações químico-mineralógicas e estruturais pelas quais passou o solo. Rezende (2003), ao estudar a estabilização química de solos tropicais profundamente intemperizados, mostrou que sendo o pH do solo menor que o correspondente ao seu ponto de carga zero e, portanto, em função de sua química, a cal irá desagregá-lo em lugar de agregá-lo, como seria esperado (Figura 18). A desagregação do solo interfere na distribuição de poros, influenciando diretamente na curva característica de retenção de água e no comportamento mecânico do solo em estado não saturado e mesmo no estado saturado.

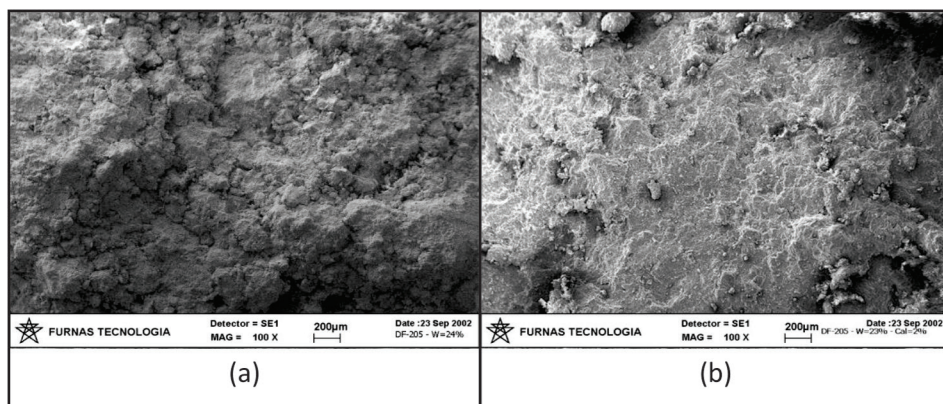


Figura 18 – Microscopias obtidas para um solo laterítico argiloso compactado na energia Proctor intermediário: (a) solo natural, $w=24\%$; (b) solo estabilizado com 2% de cal, $w = 23\%$ (Rezende, 2003)

Diante desses exemplos sobre a importância da química e da mineralogia do solo para o seu comportamento e de sua sensibilidade a agentes químicos a ele adicionados, torna-se, hoje, imprescindível que se leve em consideração as questões ambientais sobre as propriedades e o comportamento que terá o solo na estrutura de pavimento, aí se incluindo como ele se comportará frente à compactação.

Hoje, na grande maioria dos laboratórios destinados à realização de estudos voltados para a definição das estruturas de pavimento, utiliza-se água tratada nos ajustes de umidade e na saturação do solo. No entanto, no campo, não será essa a água a ser utilizada. Lá, na fase de construção, utilizar-se-á água proveniente de cursos d'água e, mais esporadicamente, de reservatórios. Além disso, atualmente, grande parte dos corpos d'água encontra-se sujeita a diferentes níveis e origens de contaminações. Em áreas agrícolas, são as contaminações provenientes do carreamento pela água da chuva dos insumos agrícolas, que são, evidentemente, importantes para o plantio e, por isso, são usados, mas não ne-

cessariamente para as propriedades e o comportamento do solo do ponto de vista geotécnico. Em áreas urbanas, os cursos d'água e mesmo os reservatórios são frequentemente contaminados por águas servidas, inclusive provenientes de indústrias. Exemplificando, Coelho *et al.* (2016) mostram, ao estudar um solo tropical profundamente intemperizado, que o uso de água contaminada pode afetar a curva de compactação.

Outro aspecto ambiental que merece destaque diz respeito à qualidade da água da chuva, pois essa, sendo variável ao longo do ano em função das condições ambientais da atmosfera, pode impactar na fase de construção e durante a vida útil do pavimento, sendo esse um tema que merece maiores estudos e reflexão.

No que tange ao comportamento do solo não saturado, a química do fluido interferirá na sucção osmótica e, ao intervir nas trocas iônicas, interferirá de modo direto no próprio comportamento hidromecânico do solo.

Portanto, no que se refere aos estudos voltados para a implantação e para a própria vida útil das estruturas de pavimento, faz-se necessário considerar a qualidade da água a ser utilizada em campo e mesmo aquela oriunda das precipitações, o que é, inevitavelmente, de mais difícil avaliação devido a sua variabilidade temporal, embora, em alguns casos, relevante.

Outro aspecto ambiental importante diz respeito às condições atmosféricas, em especial, umidade relativa e temperatura, pois ocorre uma continuada interação solo-atmosfera, sendo a umidade e, por consequência, a sucção atuante no solo diretamente associada a essa interação. Portanto, considerando-se um mesmo solo e a condição de compactação, o tratamento dado a ele em termos de entendimento e consideração do seu comportamento mecânico não pode ser o mesmo se usado nas regiões sul, sudeste, centro-oeste, norte e nordeste, pois as umidades de equilíbrio oriundas da interação-solo atmosfera variará de região para região. É evidente que a questão não está ligada às unidades geográficas, mas sim às condições climáticas, que podem variar inclusive em função de microclimas.

6.2 Aspectos químico-mineralógicos

Discutida a questão da influência ambiental nas propriedades e no comportamento dos solos, serão tratados os aspectos químico-mineralógicos enquanto características dos solos, relevantes para estudos, projeto, construção e vida útil das vias terrestres.

A interação entre as partículas de solo varia com suas características físicas e químico-mineralógicas. Nos solos granulares, essa interação é, na maioria, de natureza física e se dá, predominantemente, pelo contato direto entre as partículas. Já nos solos argilosos, essas interações são, marcadamente, de natureza eletromagnética e, por consequência, dependem da estrutura individual de cada mineral e do meio no qual eles se encontrem (Camapum de Carvalho *et al.*, 1987). No solo, esses minerais podem se agrupar formando agregados e pacotes de argilas que interagem entre eles não só eletromagneticamente como também fisicamente, devido a sua forma e tamanho. A forma agregada, geralmente, faz-se presente nos solos profundamente intemperizados e os pacotes de argila nos solos pouco intemperizados, devendo-se evitar confusão de entendimento entre as duas formas de agrupamento de partículas, pois cada uma interfere no comportamento mecânico e hidráulico dos solos de forma distinta.

Segundo Lambe (1958), citado por Camapum de Carvalho *et al.* (1987), a interação entre dois coloides depende de quatro tipos de forças: forças externas aplicadas, forças de contato, forças de atração e de repulsão. Portanto, no processo de compactação presente na construção da estrutura de pavimento e, depois, durante sua vida útil, a energia externa é apenas um dos fatores controladores da interação entre partículas.

Na condição não saturada, a água irá atuar na interação entre partículas, agregados de partículas e pacotes de argila, fisicamente, por meio da capilaridade ou quimicamente, por meio das forças de adsorção, gerando energia de sucção no solo. Em materiais menos ativos, como as areias, a atuação será de natureza capilar e, nos mais ativos, como as argilas, atuará a sucção. Em solos argilosos, é comum a atuação das duas energias.

No caso dos solos tropicais, as interações entre partículas dependem, ainda, do arranjo já existente entre elas no solo em estado natural. Nesses solos, quando pouco intemperizados, solos saprolíticos, a estrutura contém traços da estrutura da rocha mãe, mas as partículas se encontram em estado relativamente livre e com arranjo suscetível de ser condicionado pela energia externa e pelas condições de sua aplicação, umidade do solo e tipo e intensidade da energia. Já os solos tropicais profundamente intemperizados, solos lateríticos, apresentam grande parte de suas partículas formando agregados pouco suscetíveis à desagregação durante as diferentes etapas da construção da via, aí se incluindo o próprio processo de compactação.

A partir da rocha, a intemperização provoca alterações químico-mineralógicas ao longo do perfil, dotando o solo de propriedades e comportamento que variam com o grau de intemperização sofrido. No início do processo de intemperização, predominam os minerais primários e começam a surgir os argilominerais 2:1, com camadas compostas por uma folha octaédrica entre duas tetraédricas. Parte desses minerais, como é o caso das esmectitas, apresentam uma fraca ligação entre as camadas devido à natureza não polar da interação entre elas, possibilitando a variação da distância interplanar basal em função da hidratação e da desidratação. Esse é um aspecto importante, pois a variação da sucção no solo impõe variações volumétricas que superam aquele que seria entendido como o limite de contração do solo. De um modo geral, o limite de contração corresponde à porosidade em que se dá a entrada de ar no solo, no entanto, nos solos expansivos, continua a ocorrer variações no volume de vazios após a entrada de ar devido a variações na distância interplanar basal dos argilominerais expansivos, conforme mostrado por Campos *et al.* (2008).

Embora não se vá discutir, aqui, os diferentes minerais primários nem os grupos e tipo, de minerais de argila, destaca-se que, continuando o processo de intemperização, dá-se origem aos argilominerais do grupo 1:1, cujas camadas são formadas por uma folha tetraédrica interagindo com uma folha octaédrica. Essa estrutura faz com que a interação entre camadas seja de natureza polar, conferindo, às partículas, propriedades não expansivas. Por consequência, nesses solos, o ponto de entrada de ar na curva característica de retenção de água geralmente corresponde ao limite de contração. Destaca-se, com essas características, o grupo da caulinita, integrado pela caulinita propriamente dita e pela haloisita, que pode encontrar-se em condição hidratada ou desidratada. Embora a característica não expansiva desses minerais simplifique a análise do comportamento dos solos não saturados, faz-se necessário verificar se eles não possuem, em sua composição, o argilomineral haloisita hidratada, pois, nesse caso, estudos de propriedades e comportamento

do solo a partir de amostras submetidas à pré-secagem conduzem, como já discutido, a resultados que não condizem com a situação de campo, levando a problemas relacionados ao ajuste da umidade de compactação, pois a umidade ótima de laboratório corresponderá a um ponto no ramo seco do solo compactado *in situ*. Será gerada, também, uma pseudo-histerese entre as trajetórias de secagem e umedecimento na definição da curva característica de retenção de água. O comportamento mecânico definido em laboratório para uma determinada sucção correspondente a um determinado teor de umidade também se distorcerá em relação ao campo, pois, lá, essa umidade corresponderá a uma sucção maior.

Continuando o processo de intemperismo, são formados os oxi-hidróxidos de alumínio, sendo um dos mais frequentes a gibbsita. Os oxi-hidróxidos de ferro são formados ao longo do processo de intemperização. Também, ao longo do processo de intemperização vão sendo formados os micro e macroagregados. Esses elementos assumem papel de grande relevância no entendimento de propriedades e comportamentos dos solos profundamente intemperizados saturados e não saturados. Essa relevância será discutida no subitem seguinte.

Para exemplificar a importância do processo de intemperismo no comportamento do solo, a Figura 19 apresenta as curvas de compactação obtidas por Delgado (2007) para as profundidades de 3 m, (solo profundamente intemperizado) e 9 m (solo de transição entre o solo profundamente intemperizado e o solo pouco intemperizado) nas energias normal (EM) e intermediária (EI). Mineralogicamente, o solo coletado a 3 m de profundidade é rico em gibbsita e caulinita, e a 9 m de profundidade, ele passa a ser composto, predominantemente, por caulinita e illita, deixando de existir a gibbsita (Carvalho, 1995).

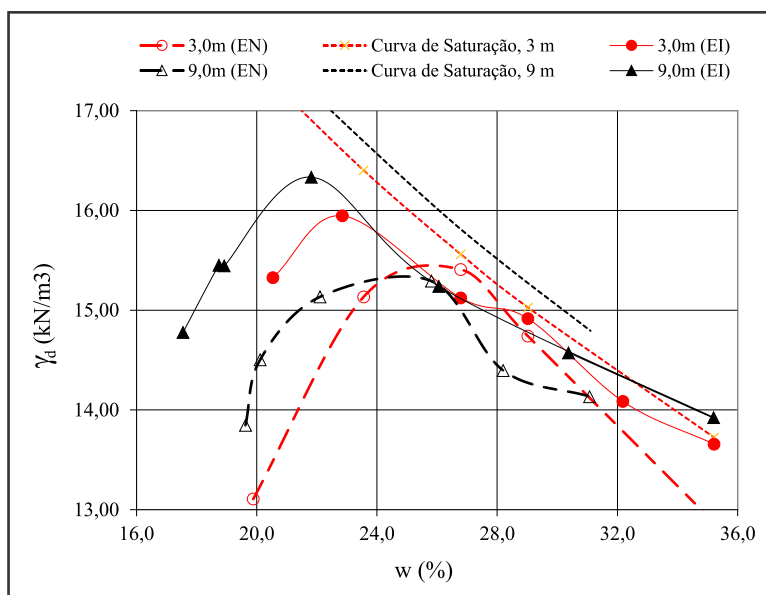


Figura 19 – Curvas de compactação para solos coletados a 3 m e 9 m de profundidade (Delgado, 2007)

Na Figura 20a, são mostradas as curvas de isosucção obtidas para a profundidade de 3 m a partir de amostras compactadas na energia Proctor normal, usando-se a técnica da transformação da curva característica proposta por Camapum de Carvalho e Leroueil (2004). A Figura 20b apresenta essas curvas de isosucção obtidas para a profundidade de 9 m. Verifica-se uma mudança de comportamento nas curvas de isosucção obtidas para uma profundidade em relação à outra. Observa-se certa tendência de modificação nas curvas de isosucção a partir das umidades ótimas definidas para as duas profundidades. Destaca-se, ainda, que a inclusão de um ponto na curva de compactação obtida para a profundidade de 9 m na energia Proctor normal muda o entendimento do comportamento do solo que se poderia ter com base na curva mostrada na Figura 19 para o mesmo solo e profundidade. Antes (Figura 19), o que apontava para uma importante influência da sucção no ramo seco da curva de compactação abre, agora (Figura 20b), espaço para atribuir aquela inclinação acentuada a apenas um problema de heterogeneidade do solo dado ao fato de ele se encontrar na zona de transição entre o solo profundamente intemperizado e o solo saprolítico.

Comparando-se o aspecto geral das curvas de compactação mostradas na Figura 20, observam-se duas questões importantes: a primeira é que a curva de compactação obtida para a profundidade de 3 m na energia Proctor normal (Figura 20a) apresenta os dois ramos mais íngremes que a curva obtida para a profundidade de 9 m com a mesma energia (Figura 20b), ou seja, a curva obtida para a profundidade de 9 m é mais suave; a segunda questão diz respeito, ao se observar as curvas obtidas para as duas profundidades na energia Proctor intermediário, na Figura 19, ao fato de que a diferença de comportamento verificada para a energia Proctor normal apresentou tendência a desaparecer, o que aponta para uma significativa influência da estrutura inicial do solo na forma da curva de compactação, questão a ser discutida no próximo subitem.

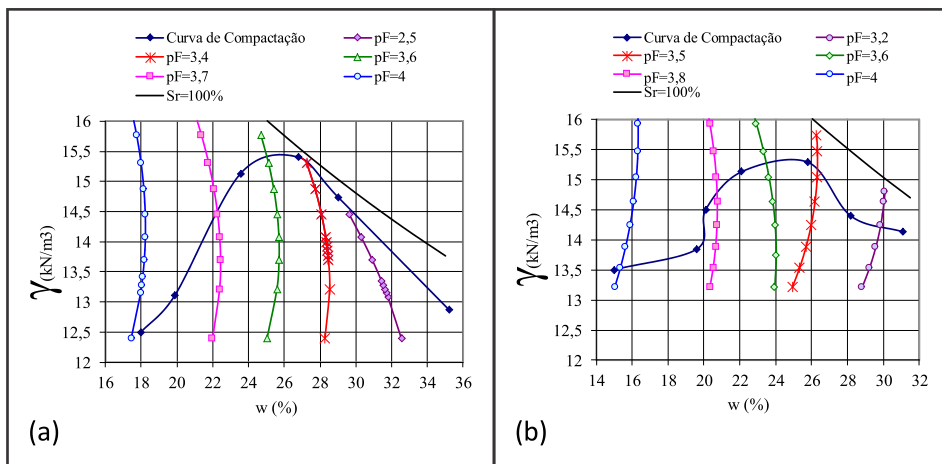


Figura 20 – Curvas de isosucção: (a) profundidade 3 m; (b) profundidade 9 m

A composição químico mineralógica dos solos assume ainda grande relevância quando se estuda sua estabilização química e constitui-se, muitas vezes, em ferramen-

ta importante para o entendimento do comportamento mecânico. Exemplificando, Freitas (2018), ao estudar a estabilização química de um solo tropical com cinza de casca de arroz (CCA) e cimento (C), encontrou dificuldade em relacionar os comportamentos obtidos para diferentes teores de CCA e C, variando-se o tempo de cura com a propriedades geralmente consideradas como umidade, índice de vazios e grau de saturação dada a grande dispersão dos resultados (Figura 21a). No entanto, ao incorporar, nas análises, os teores dos minerais reagentes, minerais totais menos o quartzo e a cristobalita, os resultados convergiram para uma tendência única, como exemplifica a Figura 21b. As análises realizadas por Freitas (2018) mostram a importância de se buscar entender os comportamentos em vez de simplesmente aceitar ou rejeitar os solos e as técnicas potenciais de serem usados em uma obra viária.

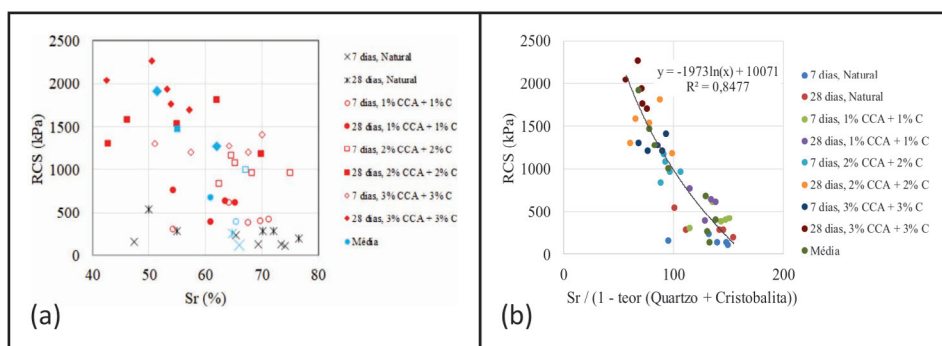


Figura 21 – Resistência a compressão simples (RCS) em função do grau de saturação (Sr) (a) e de $Sr / (1 - \text{teor de (quartzo + cristobalita)})$ (b) (Freitas, 2018)

6.3 Aspectos estruturais

Diante do exposto, depreende-se que a estrutura do solo compactado integrante da estrutura de pavimento depende não só dos fatores externos, umidade, energia e tipo de compactação, como de fatores internos inerentes à sua formação e estágio de evolução. A estrutura do solo compactado impacta diretamente em suas propriedades e comportamentos, interferindo, inclusive, na própria forma da curva característica de retenção de água.

A Figura 22 ilustra a estrutura de um solo profundamente intemperizado (a) e a de um solo pouco intemperizado (b). Farias *et al.* (2011) mostraram que, muitas vezes, a energia de compactação, nos níveis em que é normalmente aplicada não perturba a estrutura interna dos microagregados presentes em solos, como o mostrado na Figura 22a. Solos como os mostrados na Figura 22b, devido à maior liberdade entre as partículas, são mais suscetíveis de orientá-las durante o processo de compactação, aproximando-se sua estrutura daquela preconizada por Lambe (1958).

Delgado (2007) apresenta a estrutura de diferentes solos tropicais compactados, indo daqueles pouco intemperizados, solos saprolíticos finos, aos profundamente intemperizados, solos lateríticos. Essa autora mostra, ainda, a influência da cal hidratada na estrutura desses solos compactados.

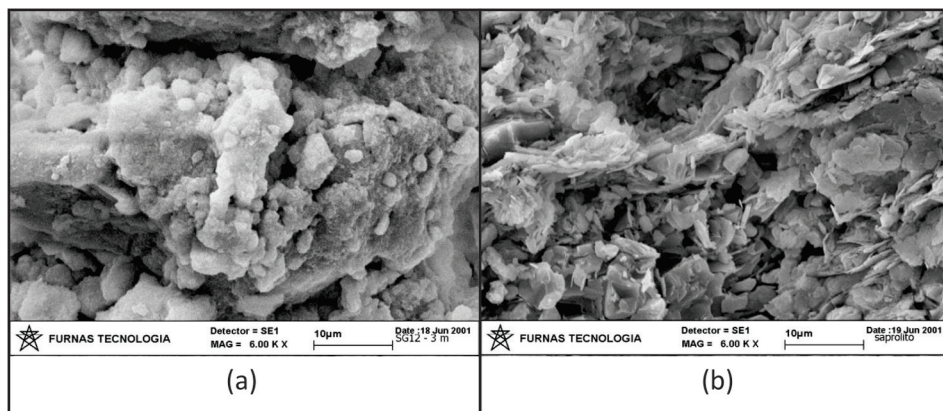


Figura 22 – Microscopias obtidas para dois solos: (a) solo profundamente intemperizado, solo laterítico; (b) solo pouco intemperizado, solo saprolítico

A Figura 23 mostra a estrutura interna de dois tipos de agregados lateríticos: um com elevada porosidade interna (a) e o outro mais compacto (b). É evidente que o impacto dessas estruturas, devido ao seu maior ou menor potencial de quebra durante o processo de compactação, ocorrerá de modo distinto nos estudos que fundamentam o projeto, no processo construtivo e no desempenho da estrutura de pavimento. Por exemplo, o pacote de argila presente no interior da concreção mostrada na Figura 23a só terá alguma importância para o comportamento do solo compactado se essas partículas forem liberadas com a quebra da concreção. Outro aspecto a ser realçado é o fato de que a quebra dessa concreção certamente provocará o aumento do peso específico aparente seco devido à redução da porosidade interna, no entanto, por tornar a matriz do solo mais fina, para fins de estrutura de pavimento, será prejudicial ao comportamento.

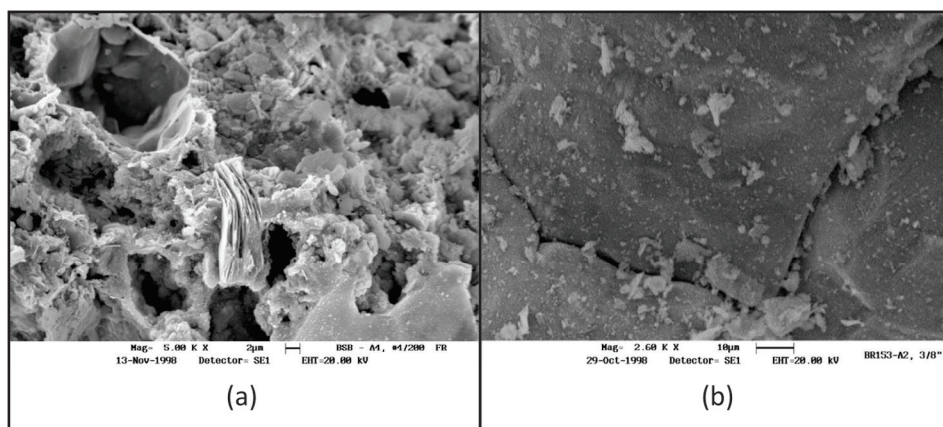


Figura 23 – Microscopias de duas concreções lateríticas: (a) porosa; (b) compacta

Exemplificando, Guimarães *et al.* (1997) mostraram que os solos agregados finos podem ter os agregados quebrados pela energia de compactação, dando origem a uma ampliação do peso específico aparente seco, mas piorando o comportamento mecânico do solo.

Outro aspecto relevante quanto à estrutura dos solos compactados em estruturas de pavimento diz respeito à distribuição de poros, pois, enquanto nos solos pouco intemperizados, essa distribuição tende a variar entre uniforme e bem graduada, nos solos profundamente intemperizados e nos resíduos provenientes de construção e demolição de obras de engenharia, ela tende a ser bimodal, intervindo diretamente na forma da curva característica de retenção de água (Figura 3) e no próprio comportamento mecânico, como ilustram Camapum de Carvalho (2017) e Oliveira (2007). Portanto, a estrutura dos solos é importante não só como definidora da compactabilidade do solo, mas também como interveniente no desempenho da estrutura da via.

7. ESTUDO DE CASO DE DUAS RODOVIAS

Com fundamento nos estudos realizados por Rezende (2003) e Pessoa (2012) para duas rodovias construídas com argila laterítica, misturas dessa argila com cal e proteção da camada de argila com geotêxtil no Distrito Federal, serão discutidas questões relacionadas à interferência da sucção no comportamento de pavimentos executados com solos finos lateríticos não saturados.

Os trechos experimentais estudados estão localizados na DF-205 Oeste (Trecho 1) e na ligação da DF-440 com a DF-001 (Trecho 2). A Figura 24 apresenta as seções transversais de cada trecho, e a Tabela 2 detalha os materiais utilizados em cada subtrecho, sendo que o foco apresentado neste item é referente apenas aos resultados observados nos locais onde o solo fino laterítico foi utilizado em maior quantidade nas camadas de sub-base e base.

Outra questão que deve ser ressaltada nesses estudos, refere-se ao procedimento recomendado por Nogami e Villibor (1995) e Villibor *et al.* (2000) de expor as camadas argilosas ao sol depois de compactadas por, no mínimo, 48 horas, visando o aumento do peso específico aparente seco por meio da retração. Isso, por si só, já mostra a grande importância da atuação da sucção/capilaridade no comportamento mecânico do solo, pois, por meio dela, consegue-se impor, ao solo, uma porosidade menor que aquela oriunda da energia de compactação. A Figura 25 apresenta as fotos dos subtrechos onde essa questão foi levada em consideração. Observa-se, na Figura 25b, que, no subtrecho 2 do Trecho 2, onde não seria esperado o aparecimento de trincas pelo fato de a camada não ter sido exposta como as dos demais subtrechos, elas apareceram; isso, certamente, devido à interação solo-atmosfera impondo uma variação de sucção ao solo superficial no pequeno espaço de tempo decorrido entre as operações na obra. No entanto, nos subtrechos 3 dos Trechos 1 (Figura 25a) e 2 (Figura 25c), onde a técnica foi adotada, a quantidade, a profundidade e a espessura das trincas foram maiores.

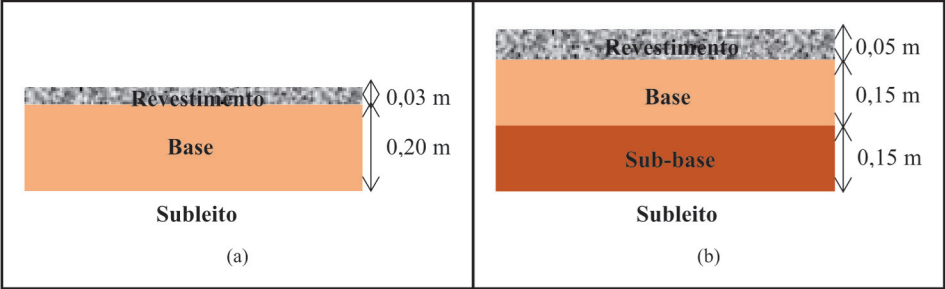


Figura 24 – Seção transversal dos trechos experimentais:
(a) DF-205 Oeste-Trecho 1; (b) DF-440/DF-001-Trecho 2

Tabela 2 – Identificação dos materiais utilizados nas camadas dos trechos experimentais

Trecho 1 (DF-205 Oeste)					
Subtrecho	Extensão (m)	Subleito	Sub-base	Base	Revestimento
1	80	Corte	-	Solo-brita (1:4)	Tratamento superficial duplo (TSD) com capa selante
2	80	Aterro	-	Expurgo	
3	80	Aterro	-	Solo fino com exposição ao sol	
4	80	Corte	-	Solo-cal (2%)	
5	40	Corte	-	Solo fino com geotêxtil entre base e revestimento	
6	40	Corte	-	Solo fino com geotêxtil entre subleito e base	
7	40	Corte	-	Solo fino envelopado com geotêxtil	
Trecho 2 (DF-440/DF-001)					
Subtrecho	Extensão (m)	Subleito	Sub-base	Base	Revestimento
1	60	Aterro	Solo-cal (3%)	Solo-cal (6%)	Concreto asfáltico (CA)
2	100		Solo fino sem exposição ao sol	Solo fino sem exposição ao sol	
3	100		Solo fino com exposição ao sol	Solo fino com exposição ao sol	

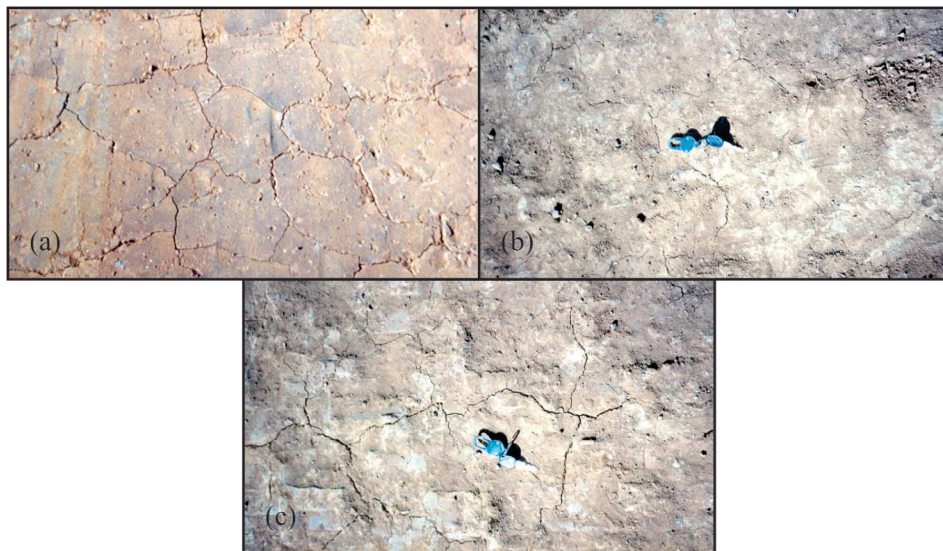


Figura 25 – Padrão de trincamento das camadas argilosas após compactação:
 (a) Subtrecho 3 do Trecho 1; (b) Subtrecho 2 do Trecho 2;
 (c) Subtrecho 3 do Trecho 2 (Rezende, 2003)

A Tabela 3 apresenta o resumo das principais características determinadas em laboratório para os materiais utilizados nas camadas de subleito, sub-base e base dos trechos experimentais. Em campo, o subleito foi compactado na energia Proctor normal, e as camadas de sub-base e base, na energia Proctor intermediário. Observa-se que os materiais estudados apresentam identificações semelhantes dentro de um mesmo sistema classificatório, mas, quando compactados e estabilizados quimicamente, são obtidos resultados distintos. Nesses casos, recomenda-se a realização de ensaios complementares como análise químico-mineralógica e microscopia para melhor avaliação das propriedades e comportamento do solo.

Tabela 3 – Propriedades dos materiais de subleito, sub-base e base utilizados nos trechos experimentais (modificado de Rezende, 2003)

Propriedades	Trecho 1 (DF-205 Oeste)			Trecho 2 (DF-440/DF-001)		
	Subleito	Solo fino	Solo-cal (2%)	Subleito/Solo fino	Solo-cal (3%)	Solo-cal (6%)
Pedregulho (%)	2,8	0,6	0,3	0,2	0,2	0,2
Areia (%)	11,3	3,1	10,1	1,9	8,2	6,8
Silte+Argila (%)	85,9	96,3	89,6	97,7	91,6	92,9
ρ (g/cm ³)	-	2,780	-	2,760	-	-
w _L (%)	45	58	52	52	52	54

Propriedades	Trecho 1 (DF-205 Oeste)			Trecho 2 (DF-440/DF-001)		
	Subleito	Solo fino	Solo-cal (2%)	Subleito/ Solo fino	Solo-cal (3%)	Solo-cal (6%)
w_p (%)	31	39	37	41	38	41
IP (%)	14	19	15	11	14	13
Classificação TRB	A-7-5	A-7-5	A-7-5	A-7-5	A-7-5	A-7-5
SUCS	ML	MH	MH	MH	MH	MH
Classificação MCT	-	LG'	-	LG'	-	-
w_{ot} (%) - EN	18,5	24,0	-	28,5	29,8	30,4
γ_{dmax} (kN/m ³) - EN	15,90	15,20	-	13,60	13,40	13,10
ISC (%) - EN	6	17	-	17	16	24
Expansão (%) - EN	0,67	0,24	-	0,06	0,07	0,01
w_{ot} (%) - EI	-	22,9	23,2	28,2	29,0	29,0
γ_{dmax} (kN/m ³) - EI	-	16,50	16,20	14,60	14,50	14,30
ISC (%) - EI	-	23	90	18	29	60
Expansão (%) - EI	-	0,00	0,06	0,01	0,01	0,01

ρ = massa específica dos grãos; w_L = limite de liquidez; w_p = limite de plasticidade; IP = índice de plasticidade; TRB = "Transportation Research Board"; SUCS = Sistema Unificado de Classificação dos Solos; w_{ot} = umidade ótima; γ_{dmax} = peso específico aparente seco máximo, ISC = Índice de Suporte Califórnia; EN = energia normal; EI = energia intermediária.

Por meio do método do papel filtro, foram realizados ensaios de laboratório para determinação das curvas características de retenção de água dos materiais de sub-base e base compactados na energia Proctor intermediária. As curvas características obtidas em termos de pF (logaritmo da sucção em cm de coluna d'água) estão apresentadas na Figura 26 tanto em função do teor de umidade (Figura 26a) como do grau de saturação (Figura 26b), não sendo observadas curvas características diferentes para os materiais estudados. Para umidades superiores a 17% (Figura 26a) e valores de grau de saturação acima de 55% (Figura 26b), ocorre redução significativa no valor de sucção. O limite máximo atingido para o grau de saturação (80% a 90%, Figura 26b), com valores já pequenos de sucção ($pF = 2,5$, o que corresponde a 32 kPa) aponta para a preservação de certa macroporosidade no solo após compactado. Observa-se, ainda, nessa mesma figura, que as curvas características se deslocam para a direita com o uso da cal, apontando para a desagregação e a redução da macroporosidade em consequência da ação química da cal.

Utilizando-se a transformação da sucção conforme apresentado por Camapum de Carvalho e Leroueil (2004), são obtidas as curvas mostradas na Figura 26c. Nesse caso, verifica-se a existência de maiores valores de sucção para a mistura solo-cal com 6% de cal utilizada no Trecho 2, fato que aponta para uma diferenciação na distribuição de poros dessa mistura em relação aos demais materiais e confirma a ação desagregadora da cal nesses solos.

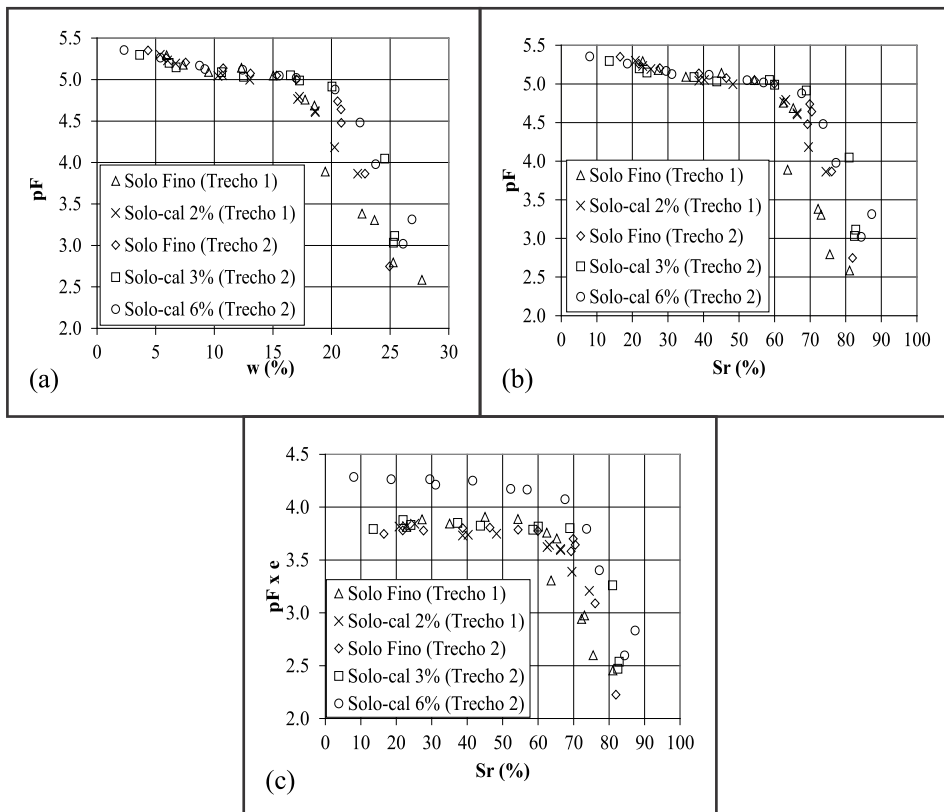


Figura 26 – Curvas características obtidas em laboratório:
(a) pF x e; (b) pF x Sr; (c) Curva transformada e.pF x Sr

Imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) confirmam essa mudança na estrutura dos materiais (Figura 27). Ao acrescentar-se 2% de cal no solo fino do Trecho 1, verifica-se a existência de uma estrutura mais fechada (Figura 27b), mas com menor presença de agregados quando comparados com a Figura 27a. Ao acrescentar-se 3% e 6% de cal no solo fino do Trecho 2, também se observa a existência de uma estrutura mais fechada (Figuras 27d e 27e). No entanto, com 6% de cal (Figura 27e), houve aumento de agregação em relação ao solo fino (Figura 27c), aumento esse que deve ser visto como reagregação após desfazimento dos agregados naturais, pois a imagem mostra agregados em formação com partículas individualizadas se aglutinando. Essas alterações podem estar associadas ao aumento do teor de cal e/ou à composição química do solo, pois já foi constatado que solos tropicais que apresentam maior quantidade de alumínio livre apresentam melhores resultados quando estabilizados com cal (Rezende, 2003). O desfazimento dos agregados presentes no solo natural geralmente se dá quando a variação de pH imposta ao solo faz com que ele passe pelo ponto de carga zero, conforme indicado por Rezende (2003).

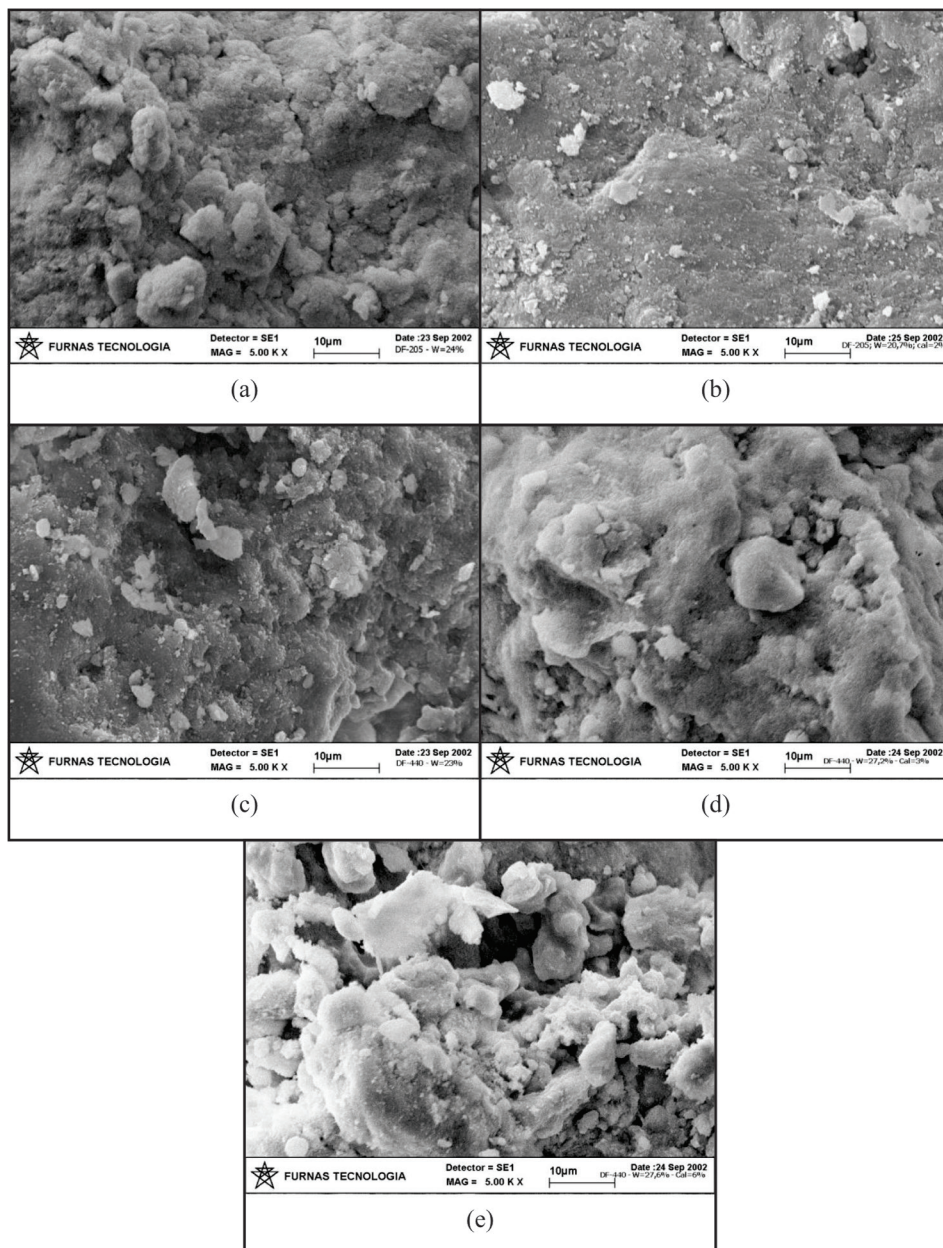


Figura 27 – Microscopia dos materiais compactados em suas umidades ótimas – aumento de 5000x: (a) Solo fino do Trecho 1; (b) Solo-cal 2% do Trecho 1; (c) Solo fino do Trecho 2; (d) Solo-cal 3% do Trecho 2; (e) Solo-cal 6% do Trecho 2 (Rezende, 2003)

Durante a realização de ensaios de campo nas rodovias, foi possível obter valores de umidade *in situ*. Utilizando-se as curvas características obtidas em laboratório em termos de curva transformada, é possível obter equações de regressão para cada trecho de cada curva. Conhecendo-se os valores de índice de vazios das camadas compactadas em campo a partir de resultados de ensaios de frasco de areia executados durante a construção dos trechos, obtêm-se as curvas características representativas das condições de campo. A partir daí, com os valores de umidade *in situ*, podem ser estimados valores de sucção *in situ* (Figura 28). Verifica-se que, para o Trecho 1 (Figura 28a), a umidade de campo da camada de base variou entre 12% e 25%, correspondendo à variação da sucção pF entre 3,0 (100kPa) e 5,5 (31.000 kPa). Para o Trecho 2 (Figura 28b), a umidade dos materiais de base variou numa faixa semelhante ao Trecho 1, entre 12 e 28% (Figura 28b), gerando variação da sucção pF entre 2,5 (32 kPa) e 5,0 (10.000 kPa). Cabe salientar que aumentos de sucção na zona de microporosidade, ou seja, com a sucção atuando no interior dos agregados, geralmente, não interfere no comportamento mecânico do solo, exceto na variação de resistência do próprio agregado, podendo, no entanto, começar a piorar o comportamento mecânico devido ao desaparecimento da sucção em pontos de contato agregado-agregado, mineral-mineral e agregado-mineral.

Conforme constatado, também em laboratório, para valores de umidade superiores a 17%, são observadas quedas nos valores de sucção. Assim, quando compactados em suas umidades ótimas, os materiais em questão irão apresentar menores valores de sucção. No entanto, ao permitir a secagem da camada para aparecimento e tratamento das trincas, os valores de umidade reduzirão, o que poderá gerar aumento significativo no valor da sucção. Dependendo das condições climáticas regionais, essas sucções poderão apresentar grandes variações em relação à umidade de compactação em função da umidade de equilíbrio atingida ao longo do tempo.

Outra observação interessante pode ser realizada: nas camadas de base do Trecho 1, foram obtidos menores índices de vazios (0,73 em média) do que nas camadas de base do Trecho 2 (0,86 em média). Essa diferença no grau de compactação das camadas pode explicar o fato de que, em função do teor de umidade, nas bases do Trecho 1, podem ser obtidos maiores valores de sucção do que nas bases do Trecho 2.

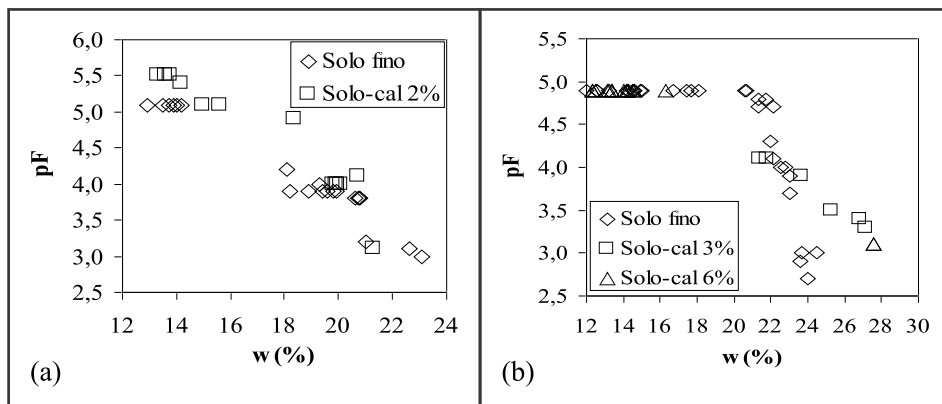


Figura 28 – Valores de sucção obtidos para as umidades “*in situ*” para os materiais de base: (a) Trecho 1; (b) Trecho 2

Pessoa (2012) determinou valores de umidade em campo e realizou ensaios com o penetrômetro do tipo PANDA para avaliar as resistências das camadas nas duas rodovias em questão após 10 anos de construção dos trechos. A partir dos gráficos mostrados na tese de Pessoa (2012), na Tabela 4, são apresentados os valores médios de umidade e resistência obtidos para as bases executadas com solo fino. Com esses valores de umidade de campo, obtiveram-se, também, os valores de sucção estimados a partir dos gráficos apresentados na Figura 28.

Tabela 4 – Valores médios de umidade e resistência de campo obtida com o PANDA para as bases de solo fino estudadas nos trechos experimentais

Trecho 1 (DF-205 Oeste)				
Subtrecho	Base	Umidade “<i>in situ</i>” (%)	Resistência (MPa)	Sucção estimada (kPa)
3	Solo fino com exposição ao sol	17,1	7,5	10.000
4	Solo-cal (2%)	17,3	7,5	10.000
5	Solo fino com geotêxtil entre base e revestimento	18,9	6,5	630
6	Solo fino com geotêxtil entre subleito e base	16,4	10,8	10.000
7	Solo fino envelopado com ge- otêxtil	17,6	8,5	10.000
Trecho 2 (DF-440/DF-001)				
Subtrecho	Sub-base/Base	Umidade “<i>in situ</i>” (%)	Resistência (MPa)	Sucção estimada (kPa)
1	Solo-cal (3%)/Solo-cal (6%)	23,9/23,2	13,0/17,0	630/1.000
2	Solo fino sem exposição ao sol	22,8/22,3	9,0/12,5	1.000/2.000
3	Solo fino com exposição ao sol	17,8/18,3	15,5/20,5	6.300/6.300

Para os materiais da base do Trecho 1, observa-se que todos os valores de umidade obtidos em campo são inferiores à umidade ótima (aproximadamente, 7% a menos). Rezende (2003) verificou que, na compactação dessas camadas, durante a construção do trecho, o teor de umidade obtido já era cerca de 5% inferior à umidade ótima especificada em laboratório. Na Tabela 4, constata-se que, quando os valores de umidade estão mais próximos de 17%, os valores de resistência e de sucção são maiores. Nessa análise, a inclusão de 2% de cal ao solo fino não gerou alteração significativa na resistência e na sucção existente na camada.

Para os materiais utilizados nas camadas de sub-base e base do Trecho 2, os valores de umidade em campo também foram menores que a umidade ótima tanto durante a construção como no período ensaiado por Pessoa (2012). No entanto, os valores de umidade existentes em campo são superiores a 17%, fato que, somado à obtenção de menores valores de sucção para esse solo já em laboratório, gerou a obtenção de menores valores de

sucção também em campo. No entanto, em termos de resistência, os valores obtidos foram maiores do que aqueles observados para o Trecho 1. Nesse caso, o primeiro aspecto a ser realçado é que sobressai a influência a longo prazo do maior teor de cal usado no Trecho 2. Para o solo não estabilizado com cal, dois fatores podem ter conduzido ao melhor desempenho do Trecho 2 após 10 anos da construção, a contração a que o solo foi submetido pelo efeito da secagem, salientando que essa contração ocorreu, embora em menor grau, mesmo para a camada de solo não submetida à secagem atmosférica por 48 horas, como mostrou a Figura 25b, e a eventual influência de prováveis diferenças na constituição mineralógica entre os solos dos dois trechos.

A estabilização química do solo fino usado no Trecho 2, com mais de 3% de cal hidratada, bem como a evolução de suas propriedades ao longo do tempo, influenciam significativamente a resistência, mas não a sucção. Já o procedimento de expor a camada de solo fino ao sol, gerou maiores valores de sucção no solo do Trecho 1, mas maiores valores de resistência no solo do Trecho 2. Se observadas as Figuras 25a (Trecho 1) e 25b (Trecho 2), constata-se uma mais intensa fissuração do solo no Trecho 1 que no 2, o que, provavelmente, refletiu na resistência e deve conduzir a uma maior reflexão sobre os limites de utilização a serem recomendados para a técnica, pois quanto maior a sucção, mais intensa tende a ser a fissuração, ou seja, faz-se necessário um maior controle do tempo de exposição à secagem, tempo que deve depender, inclusive, das condições atmosféricas atuantes no processo.

Por fim, constata-se que o assunto é complexo e que ainda existem poucos dados de campo disponíveis para análise. No caso de solos tropicais aplicados em camadas de pavimentos, vão existir inúmeras variáveis que irão interferir no desempenho dessa estrutura. De qualquer forma, ressalta-se que, nesses estudos, ensaios convencionalmente realizados em pavimentação não são capazes de responder a todas as questões e que será necessário considerar a realização de ensaios complementares para a definição de quais são os solos lateríticos que apresentam maior potencial de uso em pavimentação e quais são os procedimentos executivos que devem ser adotados para obter pavimentos mais duráveis.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As discussões apresentadas neste capítulo apontam para a necessidade de estudos mais integrados entre as análises do comportamento hidromecânico dos elementos integrantes da estrutura de pavimento e o meio físico, pois este impõe condicionantes espaciais e temporais de grande relevância para o comportamento da obra ao longo de sua vida útil.

O comportamento dos solos não saturados, apesar de, ainda, pouco considerado nos projetos e na execução das estruturas de pavimento, são definidores da qualidade técnica e econômica mais refinada do projeto e execução da obra. Em regiões de clima tropical, as estruturas de pavimento, salvo raras exceções, são, geralmente, construídas e vão existir com os solos que as compõem em condições de não saturação, daí a grande relevância do estudo do comportamento dos solos não saturados quando se projeta, executa-se e se faz a manutenção das obras viárias em países como o Brasil.

Cabe salientar, no entanto, que o uso em pavimentação de conceitos e teorias relacionadas às propriedades e comportamentos dos solos não saturados requer não só a ampliação dos estudos para maior compreensão do tema como também a busca de simplifi-

cações e de maior uso integrado de métodos numéricos e técnicas de modelagem. Assim, será possível obter percepções mais amplas e racionalizadas do comportamento da estrutura de pavimento, integrada ao meio físico, assim como de outras obras realizadas na implantação do sistema viário como cortes e aterros.

A grande variabilidade ambiental, e, por vezes, também, de material e de comportamento, que caracteriza muitas obras do sistema viário, impõe a necessidade dessas simplificações e análises integradas.

REFERÊNCIAS

AASHTO (1993). Guide for Design of Pavement Structures. Volume I & II, Joint Force on Pavements, Highway Subcommittee on Design, American Association of State Highway and Transportation Official. Washington D.C. 700 p.

AASHTO (2008). Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice. American Association of State Highway and Transportation Official Interim Edition, Washington D.C., 212 p.

AMU, O.O.; BAMISAYE, O.F. & KOMOLAFE, I.A. (2011). The Suitability and Lime Stabilization Requirement of Some Lateritic Soil Samples as Pavement. International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology, pp 29-46.

ANGELIM, R.R. (2005). Influência do Procedimento de Misturas da Cal Hidratada ao Solo no Comportamento do Solo Estabilizado para Fins de Pavimentação Rodoviária. II Simpósio sobre solos tropicais e processos erosivos no Centro-Oeste, Goiânia, pp. 261-266.

AYALA, R.J.L. (2020). Melhoria de solos com fibras provenientes da indústria avícola. Tese de Doutorado G.TD - 159/2020, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 272 p.

Bernucci, L.L.B. (1995). Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 237 p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2017). Solo como material de construção. IBRACON - Materiais de Construção Civil. 3ª Edição. 1: 538-574.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; CRISPEL, J.J.; MIEUSSENS, C. & NARDONE, A. (1987). La reconstitution des éprouvettes en laboratoire: Théorie et pratique opératoire. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Rapport de recherche LPC N° 145, Paris, França, 54 p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; FARIAS, M.M. & REZENDE, L.R. (2012). Infiltração em pavimentos: problemas e soluções. CARVALHO, J.C.; GITIRANA JÚNIOR, G.F.N.

& CARVALHO, E.T.L. (orgs.). Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais. Faculdade de Tecnologia, Brasília, p. 607-620.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. & GITIRANA JR, G.F.N. (2006). Análise preliminar do desenvolvimento de trincas em pavimentos construídos na Região Amazônica. XXX-VII RAPv/11º ENACOR. Goiânia, v. 1, 10 p.

CAMPAPUM DE CARVALHO, J. & GITIRANA JR., G.P.N. (2021). Unsaturated soils in the context of tropical soils. In: *Soils and Rocks*, 44(3). www.soilsandrocks.com

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GUIMARÃES, R.C. & PEREIRA, J.H.F. (2002). Courbes de Retention d'eau d'un profil d'alteration. Third International Conference on Unsaturated Soils, Recife, v. I, pp. 289-294.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; KONRAD, J. & MUMA, M. (2000). Fluência em material granular estabilizado com emulsão. XXXII Reunião Anual de Pavimentação, Brasília, v. I, pp. 175-183.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. & LEROUEIL, S. (2004). Curva característica de sucção transformada. Solos e Rochas, (27) 3: 231-242.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. & PEREIRA, J.H.F. (2001). Estudo do comportamento mecânico dos solos não saturados com base na sucção normalizada. IV Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Porto Alegre, pp.134-148.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; PEREIRA, J.H.F. & GUIMARÃES, R.C. (2002). Effondrement de Sols Tropicaux. Third International Conference on Unsaturated Soils, Recife, v. II, pp. 851-856.

CAMPOS, I.C.O.; GUIMARÃES, E.M.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2008). Busca de entendimento da curva característica de materiais expansivos. XIV COBRAMSEG, Búzios, pp. 1-8.

CARDOSO, F.B.F. (1995). Análise química, mineralógica e micromorfológica de solos tropicais colapsáveis e o estudo da dinâmica do colapso. Dissertação de Mestrado, D.DM-026A/1995, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, DF, 142 p.

CARVALHO, M.N. (1995). Análise mineralógica de um perfil de solo do Distrito Federal através de raios X. Seminário sobre Geotecnia dos Solos Tropicais, Universidade de Brasília, pp. 1-7.

CERATTI, J.A.P.; GEHLING, W.Y.Y. & NÚÑEZ, W.P. (2004). Seasonal variations of a subgrade soil resilient modulus in southern Brazil. Transportation Research Record, Washington, D.C., 1874: 165-173.

COELHO, J. A.; AQUINO, S. C. N. & CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2016). Análise da influência da qualidade da água na compactação de solos tropicais. Brasília: ABPv, Proc. 45ª RAPv, 19º ENACOR, pp. 1-13.

DE WERK, S.M. (2000). Estudo da influência da estrutura no comportamento resiliente de solos compactados. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 154 p.

DELGADO, A.K.C. (2007). Estudo do comportamento mecânico de solos tropicais característicos do Distrito Federal para uso na pavimentação rodoviária. Tese de Doutorado G. TD - 045A/07, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 392 p.

FAR, S. Y. Z.; KASSIM, K. A.; EISAZADEH, A. & KHARI, M. (2013). An evaluation of the tropical soils subjected physicochemical stabilization for remote rural roads. *Procedia Engineering*, 54: 817-826.

FARIAS, W.M.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; DA SILVA, G.F.; CAMPOS, I.C.O. & SANTOS NETO, P.M. (2011). Influência da compactação nos micro e mesoporos nanoestruturados e na área superficial específica de um solo laterítico. VII Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados, Pirenópolis, GO, v. 1, pp. 169-175.

FREITAS, J.E. (2018). Uso de Cinza da casca de arroz na estabilização de solos para uso em pavimento rodoviário. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, G.DM-302/2018, 114 p.

GEHLING, W.Y.Y.; CERATTI, J.A.P.; NÚÑEZ, W.P. & RODRIGUES, M.R. (1998a). A study of the influence of suction on the resilient behavior of soils from southern Brazil. *International Conference on Unsaturated Soils*, v. I. pp. 47-53.

GEHLING, W.Y.Y, CERATTI, J.A.P.; NÚÑEZ, W.P. & NAKAHARA, S. M. (1998b). Soil suction and *in situ* resilient modulus – A study developed at a Pavement Testing Facility in southern Brazil. *International Symposium on subdrainage in roadways pavements and subgrades*, Granada, Espanha, Asociación Técnica de Carreteras, v. I, pp. 137-144.

GONDIM, L. M. (2008). Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do Agropólo do baixo Jaguaribe/estado do Ceará. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 12 p.

GRIM, R.E. (1962). *Applied clay mineralogy*. McGraw-Hill Book Company, New York, 422 p.

GUIMARÃES, R.C.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. & FARIAS, M.M. (1997). Tecnologia de pavimentação de baixo custo com uso em bases de solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego. X Simpósio Internacional de Pavimentação de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego, ABPv, Rio de Janeiro, Brasil, v. II, pp. 469-477.

KLINCEVICIUS, M.G.Y. (2012). Estudo de propriedades, de tensões e do comportamento mecânico de lastros ferroviários. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP, São Paulo, 171 p.

LAMBE, T.W. (1958). The structure of compacted clay. ASCE, J. Soil Mech. Found. Div., 84(SM2): 1654/1-1654/34.

LUCENA, L.C.F.L. (2012). Estudo da aplicação da mistura solo-lodo em base e sub-base de pavimentos. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 263 p.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. Mecânica dos Pavimentos. 3 ed., Rio de Janeiro: Interciência, 2015, 638p

MICIELLI, JR. (2006). Comportamento de Solos do Estado do Rio de Janeiro Estabilizados com Emulsão Asfáltica. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 455p

MIELLENZ, R.C. & KING, M.E. (1955). Physical-chemical properties and engineering performance of clays. Calif. Div. Mines Bull. 169, pp. 196-254.

NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. (1995). Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. Vilibor, São Paulo, 213 p.

NÚÑEZ, W.P. (1997). Análise experimental de pavimentos rodoviários delgados com basaltos alterados. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 291 p.

OLIVEIRA, J.C. (2007). Indicadores de Potencialidades e Desempenho de Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil em Pavimentos Flexíveis. Tese de Doutorado G.TD - 049A/07, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 167 p.

PESSOA, F.H.C. (2004). Análise dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia Universidade de Brasília, 151 p.

PESSOA, F.H.C. (2012). Avaliações Funcional e Estrutural de Trechos de Rodovias no Distrito Federal Construídos com Diferentes Materiais. Tese de Doutorado. Publicação G.TD-078/2012, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 210 p.

PINTO, L.L.C.A. (2011). O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização de solo urbano. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Escola Politécnica da USP, 255 p.

PMSP. (2013). ETS-03/2013 – Pavimentos Permeáveis com Revestimento Asfáltico Poroso – CPA. Prefeitura do Município de São Paulo, São Paulo, 14 p.

REZENDE, L.R. (2003). Estudo do Comportamento de Materiais Alternativos Utilizados em Estruturas de Pavimentos Flexíveis. Tese de Doutorado. Publicação G.TD-014A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 372 p.

ROLLINGS, M.P; ROLLINGS, R.S & DAVIT, A.J. (2002). Tropical Pavement Construction. www.pavement.wes.army.mil/papers/64/paper64.PDF. Acessado em 15/08/2015

SANTOS, A.D. (2003). Estudo das possibilidades de reciclagem dos resíduos de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 265 p.

SENAHA, S.C.F. (2019). A quartzização em perfis de intemperismo tropical. Brasília: Dissertação de Mestrado G.DM. – 332/2019, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 159 p.

SILVA, A.M. (2015). Estudo de parâmetros Proctor no comportamento mecânico dos solos. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. 189 p

TEIXEIRA, D.I.B.; MARINO, D.M.; PAULA, G.F. & CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2019). Estudo da estabilização química de um solo tropical do Distrito Federal com adição de cal. Brasília: 21º ENACOR. 9 p.

VALENCIA, Y.G.; MUNIZ, M.F.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. & CARDAO NETO, M.P. (2007). Determinação dos parâmetros da envoltória de ruptura em solos não saturados a partir de diversos ensaios simples de laboratório. VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Salvador, Bahia, v. I, pp. 339-342.

VILLIBOR, D.F.; NOGAMI, J.S.; BELIGNI, M. & CINCERRE, J.R. (2000). Pavimentos com solos lateríticos e gestão de manutenção de vias urbanas. Associação Brasileira de Pavimentação/Universidade Federal de Uberlândia, São Paulo, 138 p.

Virgiliis, A.L.C. (2009). Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP. 196 p.

YOUNOUSSA, M; KARFA, T.; RAGUILNABA, O; KALSIBIRI, K; PHILIPPE, B & JEAN, T. (2008). Geotechnical, mechanical, chemical and mineralogical characterization of a lateritic gravels of Sapouy (Burkina Faso) used in road construction. Construction and Building Materials, 22: 70-76.