

Departamento de Eng. de Transportes da Escola Politécnica da USP
PTR3322 – Pavimentação Rodoviária
Exercício 3: Compactação de solos e agregados para obras viárias
Índice de Suporte Califórnia
Módulo de Resiliência
Profa. Dra. Liedi L. B. Bernucci
Profa. Dra. Kamilla Vasconcelos Savasini

Parte I. Introdução: uso dos materiais em camadas de pavimentos

Duas amostras de solo retiradas do campo foram trazidas ao laboratório para classificação e compactação (**SOLO L** e **SOLO S**). No ensaio de classificação, ambos solos apresentam **classe A-4**, pela classificação rodoviária HRB-AASHO. Estes solos estão sendo pesquisados para uso como material de **reforço do subleito (FIGURA 1)**. Uma amostra de brita graduada simples (**BGS**) foi coletada em uma pedreira para ser utilizada como **base e sub-base** da estrutura de pavimento. No ensaio de classificação, a BGS apresentou **classe A-1-a**, pela classificação rodoviária HRB-AASHO

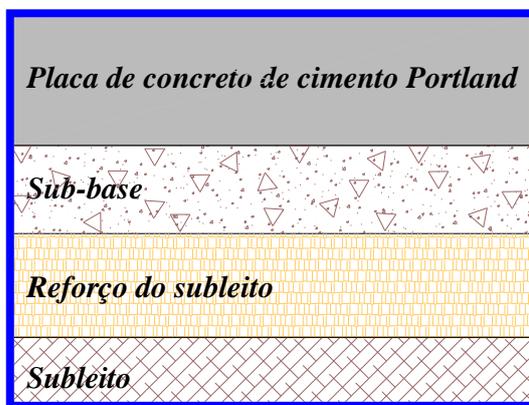


Figura 1 (a): seção esquemática de um pavimento de concreto de cimento Portland

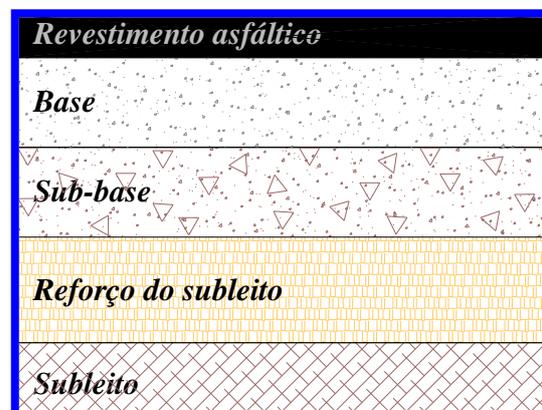


Figura 1 (b): seção esquemática de um pavimento asfáltico

Parte II. Compactação em Laboratório: técnica e resultados

Executou-se no laboratório o ensaio de compactação tipo Proctor, na energia intermediária para os solos e na energia modificada para a brita graduada simples. Veja o cilindro e o soquete usados para compactação em laboratório nas **FIGURAS 2 (a) e (b)**.



Figura 2 (a): cilindro e soquete de compactação

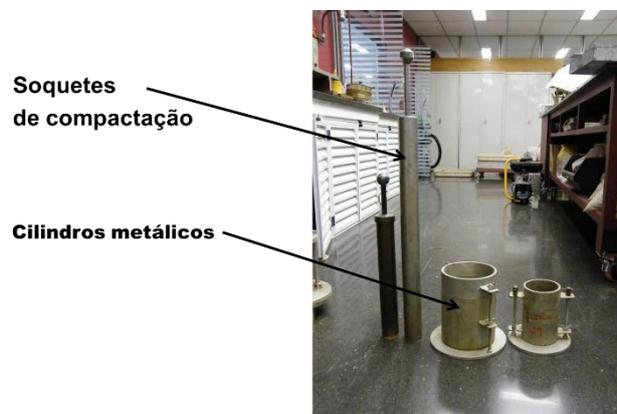


Figura 2 (b): cilindro CBR (à esquerda) e cilindro Proctor (à direita)

Os resultados de laboratório apontam os resultados na **FIGURA 3**:

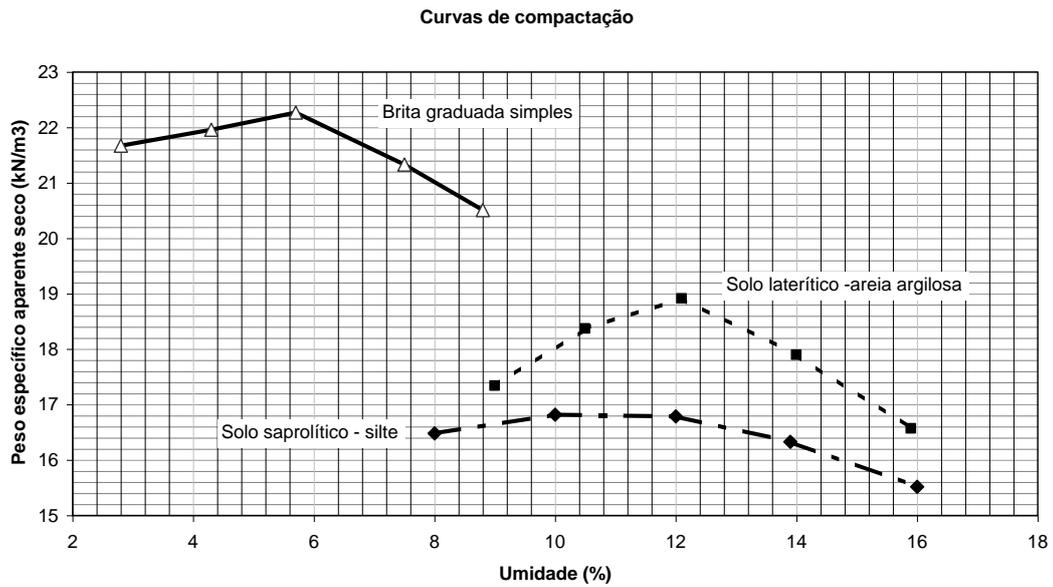


Figura 3: Curvas de compactação dos materiais em estudo (2 solos e uma BGS)

Parte III. Compactação em Campo: técnica

Os ensaios de laboratório foram concebidos para determinar o melhor ESTADO do material escolhido para estar reproduzido, então, em campo. No campo, os solos devem vir das **ÁREAS DE EMPRÉSTIMO**, trazidos por caminhões basculantes, para serem distribuídos na pista (em geral com motoniveladora e compactados (em geral com pé-de-carneiro). Se a umidade for baixa, os solos devem ser umedecidos com um caminhão pipa e serem novamente homogeneizados com grade de discos. Os materiais granulares são trazidos por caminhões basculantes, para serem distribuídos na pista (com motoniveladora ou com vibroacabadora, principalmente para granulares com cimento) e compactados (em geral com rolo liso). Os rolos de pneu podem dar acabamento em alguns casos de materiais principalmente granulares.





Parte IV. Especificação de Projeto (TEXTO PARA LEITURA APÓS AULA):

No que tange à compactação, são especificados:

- a umidade de compactação (em geral $W_{\text{campo}} = W_{\text{ótimo}} \pm x\%$), onde x depende do tipo de material, e
- grau de compactação $GC = (\gamma_{\text{campo}} / \gamma_{\text{max de laboratório}}) \times 100$ (%)
 $GC \geq$ valor especificado pelo projetista.

Este valor em geral é de no mínimo:

- 95 a 97% da energia normal para solos da melhoria do subleito, dependendo do projeto,
- 100% da energia intermediária ou 95% da modificada para camadas de reforço do subleito, sub-base e base
- Para solos muitas vezes a referência é a energia normal ou intermediária, e para materiais granulares a energia intermediária ou modificada
- Para materiais com cimento em geral especifica-se o grau de compactação em relação à normal, ou intermediária, porém é importante que materiais granulares com cimento sejam compactados em relação à modificada.

Parte V. Controle tecnológico (TEXTO PARA LEITURA APÓS AULA):

- O controle tecnológico serve para conferir se os resultados de pista conferem com os solicitados pelo projetista. Em geral estão especificados em projeto diversos dados de compactação, controle geométrico, controle de materiais, etc.

Responda às seguintes questões:

1. O que é compactar um solo, um material para obras viárias?
2. Porquê se compacta um material para uso em obras viárias?

3. Determine os pesos específicos aparentes secos máximos e umidade ótima de ambos solos e da brita graduada simples (FIGURA 3).
4. a) Compare os valores de peso específico aparente seco dos solos e da brita. Veja se há relação entre a presença de material granular ou de material mais fino no peso específico aparente seco.
b) Compare os valores de umidade ótima dos solos e da brita. Veja se há relação entre a presença de material granular ou de material mais fino na umidade ótima de compactação.
5. A umidade ótima varia com a energia de compactação?
6. (EXERCÍCIO FORA DA SALA DE AULA) Em que camada da estrutura de pavimento utilizaria preferencialmente o solo L, o solo S e a brita graduada simples (pense nas vantagens e desvantagens de cada material).
7. (EXERCÍCIO FORA DA SALA DE AULA) In Situ, foi feito controle tecnológico, determinando-se a umidade em campo e o Grau de Compactação. Foram utilizados o solo laterítico no reforço do subleito e a BGS na base.
Para o solo do reforço, o projetista solicitou: $GC \geq 97\%$ da energia intermediária e $\pm 2\%$ de umidade em relação à ótima.
Para a BGS, o projetista solicitou: $GC \geq 97\%$ da energia modificada e $\pm 0,5\%$ de umidade em relação à ótima.
 - a) Em um determinado trecho de 100 metros de extensão, a média da umidade de campo foi de 10% e o grau de compactação de 94% para o solo laterítico. Você, se fosse o fiscal da obra, liberaria o trecho? Quais seriam os eventuais problemas e por quê?
 - b) No trecho subsequente, o controle indicou 16% e grau de compactação de 97%. Você, se fosse o fiscal da obra, liberaria o trecho? Quais seriam os eventuais problemas e por quê?
 - c) Como proceder aos **controles de umidade e de grau de compactação**? Como seriam os **ensaios *in situ*** para esta finalidade?
 - d) Modernamente, tem-se solicitado dados de resistência e/ou deformabilidade da camada compactada. Como você conceberia os ensaios para medir estas propriedades? **Por que a determinação destas propriedades mecânicas é importante para a garantia de boa execução?**

Parte VI. Conceitos de Resistência: Ensaio CBR (California Bearing Ratio)

Veja RESUMO do Ensaio, segundo a norma DNER-ME049/94. O texto foi extraído do “Manual de Pavimentação” – DNIT, 2006, Publicação IPR – 719, e FIGURA 4, do site: <http://www.pavementinteractive.org/>

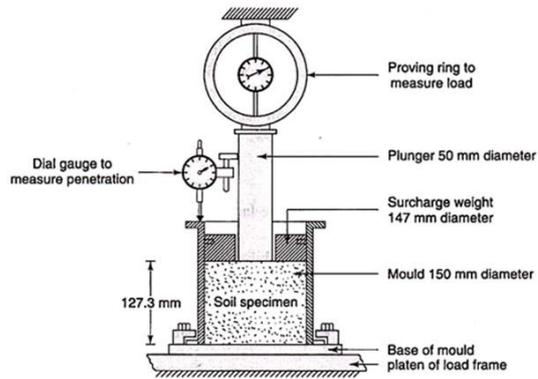


Fig. 10.10 Schematic diagram of CBR test.

https://www.soilmanagementindia.com/wpcontent/uploads/2018/05/clip_image020-3.png

$$CBR = \frac{p}{p_s} \cdot 100\%$$

p = measured pressure for site soils [N/mm²]

p_s = pressure to achieve equal penetration on standard soil [N/mm²]

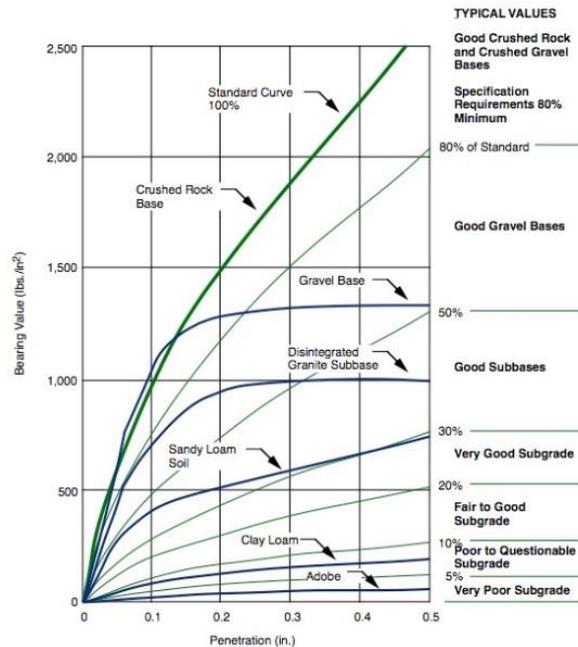


Figura 4: Material padrão (100%) e vários tipos de material (<http://www.pavementinteractive.org/>)

2.1.6.5 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (CALIFORNIA BEARING RATIO) (DNER – ME 049/94)

O ensaio de CBR consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo-de-prova de solo, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa brita padronizada.

O valor dessa relação, expressa em percentagem, permite determinar, por meio de equações empíricas, a espessura de pavimento flexível necessária, em função do tráfego.

Em linhas gerais, a seqüência do ensaio é a seguinte:

- a) Compacta-se no molde o material, em cinco camadas iguais de modo a se obter uma altura total de solo com cerca de 12,5 cm, após a compactação. Cada camada recebe 12 golpes do soquete (caso de materiais para subleito), 26 ou 55 (caso de materiais para sub-base e base), caindo de 45,7 cm, distribuídos uniformemente sobre a superfície da camada. O peso do soquete é de 4,5 kg.

- b) Após a compactação, rasa-se o material na altura exata do molde e retira-se o material excedente da moldagem uma amostra representativa com cerca de 100g para determinar a umidade.
- c) Compactam-se outros corpos-de-prova com teores crescentes de umidade, tantas vezes quantas necessárias para caracterizar a curva de compactação.
- d) Colocam-se os corpos-de-prova imersos em água durante quatro dias.
- e) A penetração dos corpos-de-prova é feita numa prensa (Figura 9), a uma velocidade constante de 0,05 pol/min.
- f) Traça-se a curva pressão-penetração conforme é mostrado na Figura 10. Caso exista um ponto de inflexão, traça-se uma tangente à curva nesse ponto até que ela intercepte o eixo das abcissas; a curva corrigida será então essa tangente mais a porção convexa da curva original, considerada a origem mudada para o ponto em que a tangente corta o eixo das abcissas. Seja c a distância desse ponto à origem dos eixos. Soma-se às abcissas dos pontos correspondentes as penetrações de 0,1 e 0,2 polegadas a distâncias c . Com isso obtêm-se, na curva traçada, os valores correspondentes das novas ordenadas, que representam os valores das pressões corrigidas para as penetrações referidas.
- g) O índice de suporte Califórnia (CBR), em percentagem, para cada corpo-de-prova é obtido pela fórmula:

$$\text{CBR} = \frac{\text{pressão calculada ou pressão corrigida}}{\text{pressão padrão}}$$

Adota-se para o índice CBR o maior dos valores obtidos nas penetrações de 0,1 e 0,2 polegadas.

- h) Para o cálculo do Índice de Suporte Califórnia (CBR) final, registram-se de preferência, na mesma folha em que se representa a curva de compactação, usando a mesma escala das umidades de moldagem, sobre o eixo das ordenadas, os valores dos índices do Suporte Califórnia (CBR) obtidos, correspondentes aos valores das umidades que serviram para a construção da curva de compactação. O valor da ordenada desta curva, correspondente à umidade ótima já verificada, mostra o índice de Suporte Califórnia (Figura 11).

Parte VII. Aplicação Prática do CBR:

Executou-se em laboratório o ensaio CBR em duas amostras de solos L (laterítico) e S (saprolítico), classificados com A-4, cujos resultados de compactação constam do Exercício anterior. A compactação dos corpos-de-prova foi realizada sempre na umidade ótima e peso específico seco máximo. Após a compactação, o corpo-de-prova, ainda dentro do cilindro, é submerso em água para que o solo ou material entre em contato com a água, que pode provocar expansão do material. A expansão axial é medida por meio de extensômetro. A expansão, dependendo das partículas (da natureza), processa-se em diferentes velocidades. O ensaio é feito por 96 horas e o resultado é a diferença entre a altura do corpo-de-prova (medida é axial, o diâmetro não se altera) após 96 horas em contato com a água e aquela inicial. O resultado é expresso em porcentagem.

Responda às seguintes questões:

- 8. O que é CBR (Índice de Suporte California, em português)?
- 9. Calcule a expansão dos solos S e L após 96 horas de imersão em água. (A expansão E é dada em %). A altura do CP é de 125mm. Comente as diferenças entre os dois solos. A brita graduada simples apresenta expansão de 0,0%. Compare com os solos.

Os resultados de expansão do CP imerso em água estão a seguir:

Tempo decorrido de ensaio (horas)	Solo L (L-leitura em mm)	Expansão (%) (L _{final} -L _{inicial})/H _{inicial} do CP)	Solo S (L-leitura em mm)	Expansão (%) (L _{final} -L _{inicial})/H _{inicial} do CP)
0	0		0	
24	0,193		1,01	
48	0,208		1,83	
72	0,250		2,35	
96	0,251		2,62	

10. Calcule os valores CBR para os solos L e S (ver FIGURA 5), sabendo-se que:

$$\text{CBR 1 (\%)} = \frac{\text{tensão } (\sigma_{0,1''}) \times 100}{70}$$

$$\text{CBR 2 (\%)} = \frac{\text{tensão } (\sigma_{0,2''}) \times 100}{105}$$

Adota-se o maior dos valores entre os CBR1 e CBR2.

Tensão dada em kgf/cm².



1º Compactação do corpo-de-prova



2º Imersão dos corpos-de-prova em tanque de água por 96 horas e medida de expansão axial



3º Ensaio de penetração de pistão padrão no corpo-de-prova e medida da penetração e resistência

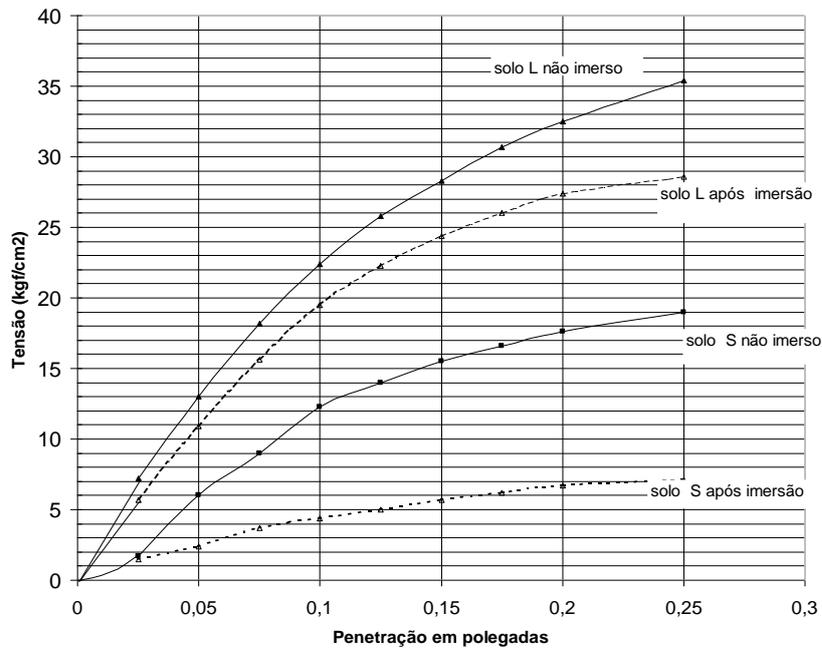


Figura 5: resultados de ensaio de CBR (curvas tensão x penetração)

11. Com cada amostra de solo foram realizados dois tipos de ensaio:

- Compare os valores de CBR (feito após imersão em água – ensaio convencional) para os solos L e S.
- Compare os valores de CBR não-imerso (ensaio excepcional, não usual) e após imersão em água para o solo L. Faça o mesmo para o solo S. Compare os dois solos.

12. Foram realizados 3 ensaios de CBR após imersão em água com a brita graduada simples estudada no exercício anterior. A expansão é 0,0% nas três amostras testadas, em três umidades e pesos específicos aparentes secos diferentes. Observe os resultados de CBR (já calculados) expressos em uma curva e os resultados do ensaio de compactação (ver FIGURA 6).

- Explique a tendência das curvas.
- Compare o valor de CBR máximo com os valores obtidos para os solos L e S, após imersão por 96 horas.

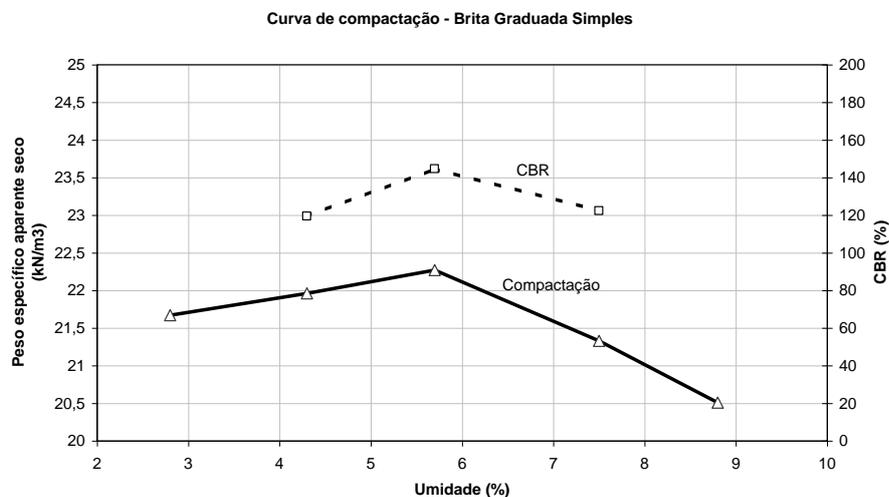


Figura 6: resultados de ensaio de CBR e a curva de compactação da brita graduada simples

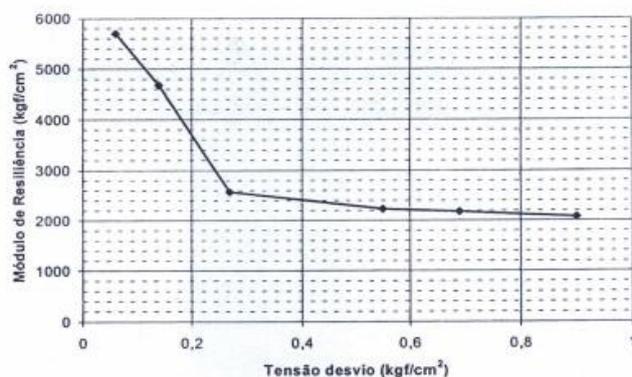
Parte VIII. Conceitos de Deformabilidade: Ensaio MR (Módulo de Resiliência)

13. Definições:

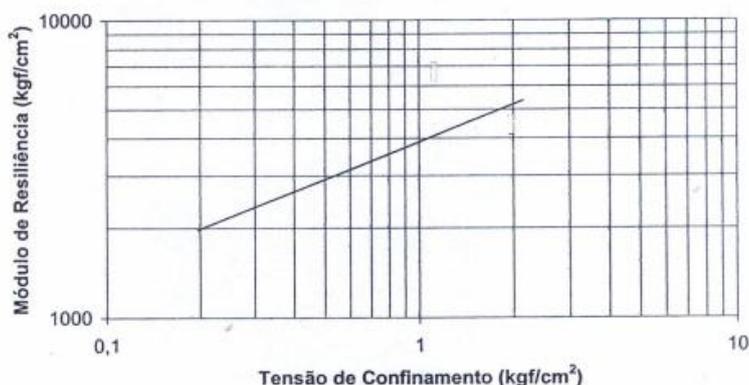
- Defina Módulo de Resiliência.
- Por que este ensaio é importante para a pavimentação? Por que é feito com cargas repetidas e não estaticamente até a ruptura?
- Como esta propriedade pode ser empregada em dimensionamento de estruturas de pavimentos?

14. Abaixo estão representados dois materiais de uso muito comum em estruturas de pavimento e mesmo como subleito. Analise o comportamento do material 1 e do material 2 e explique se estes materiais são granulares, coesivos, cimentados, etc.

Material 1:



Material 2:



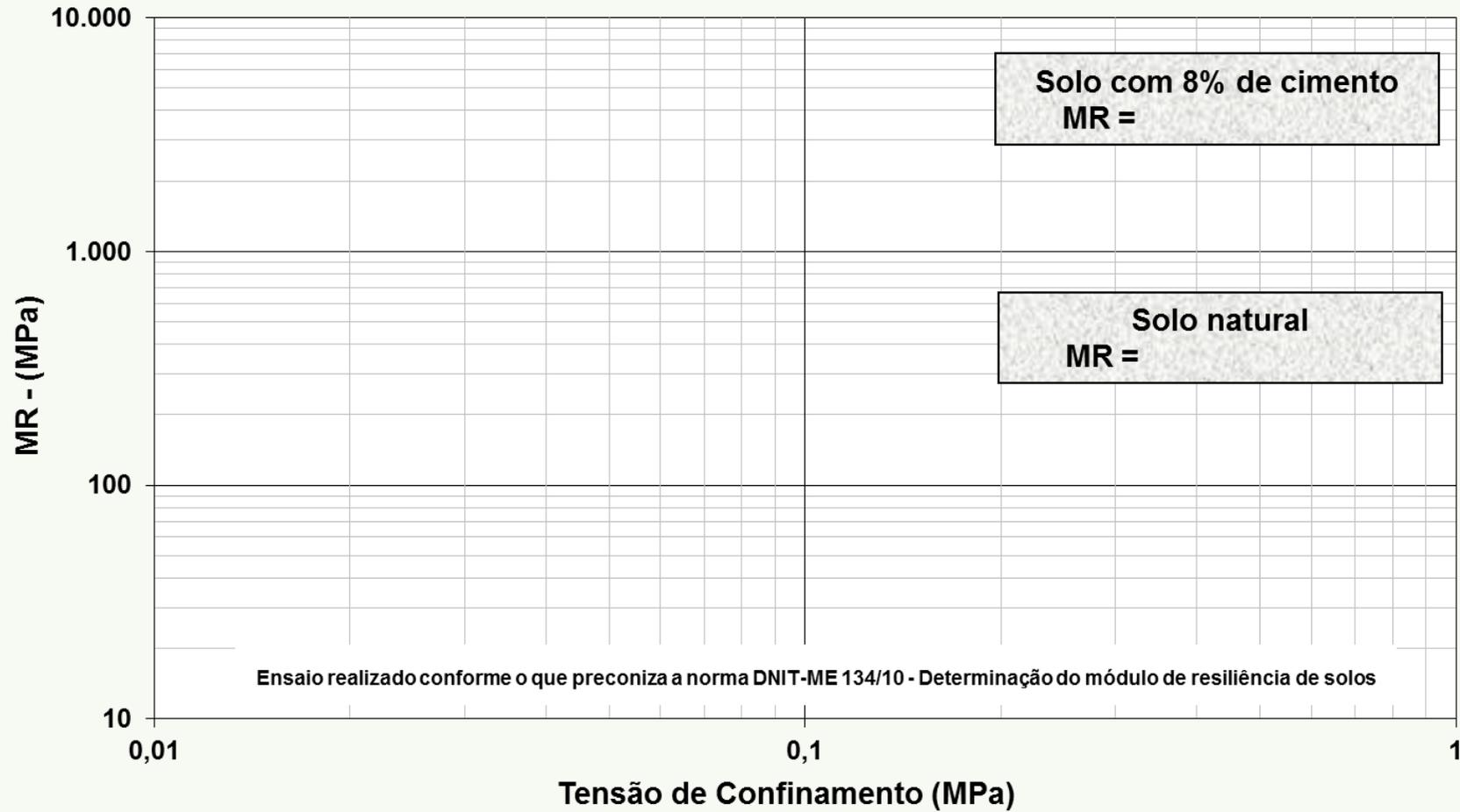
15. (EXERCÍCIO FORA DA SALA DE AULA) Abaixo constam dados de dois materiais (um solo laterítico areno-argiloso e o mesmo solo com adição de 8% de cimento Portland). Os solos e materiais estabilizados com cimento precisam de cura. Os resultados em questão foram obtidos após 7 dias. Calcule os módulos de resiliência e trace os gráficos. Interprete os resultados e analise o efeito do cimento.

Determinar os valões de módulo de resiliência das duas amostras e traçar os gráficos de MR × σ_3 .

Amostra de solo LA' (natural)						
Tensão de confinamento	Dados coletados para cálculo de σ_d ; $\sigma_d = \text{carga}/\text{área do CP}$			Diâmetro (mm)	H (mm)	MR (MPa)
	Carga (N)	D- Deslocamento (mm)		Deformação ($\epsilon = D_{\text{médio}}/H$)	σ_d (MPa)	
σ_3 (MPa)			LVDT-A	LVDT-B	ϵ	aplicado
0,0207	300	0,0584	0,0597	3,0E-04	0,038	129
0,0207	440	0,0811	0,0816			
0,0207	590	0,1027	0,1070			
0,035	380	0,0759	0,0532			
0,035	680	0,1173	0,0928			
0,035	890	0,1505	0,1194			
0,0504	520	0,0945	0,0633			
0,0504	980	0,1587	0,1106			
0,0504	1360	0,2053	0,1466			
0,0689	600	0,1021	0,0662			
0,0689	1200	0,1768	0,1188			
0,0689	1790	0,2427	0,1685			
0,1029	980	0,1371	0,0863			
0,1029	1810	0,2311	0,1395			
0,1029	2590	0,3092	0,1904			
0,138	1240	0,1616	0,0958			
0,138	2450	0,2830	0,1691			
0,138	3470	0,3968	0,2353			

Amostra de solo LA' + 8% de cimento - 7 dias de cura						
Tensão de confinamento	Dados coletados para cálculo de σ_d ; $\sigma_d = \text{carga}/\text{área do CP}$			Diâmetro (mm)	H (mm)	MR (MPa)
	Carga (N)	D- Deslocamento (mm)		Deformação ($\epsilon = D_{\text{médio}}/H$)	σ_d (MPa)	
σ_3 (MPa)			LVDT-A	LVDT-B	ϵ	aplicado
0,0207	300	0,00248	0,00227	1,2E-05	0,038	3217
0,0207	450	0,00313	0,00381			
0,0207	580	0,00482	0,00488			
0,035	385	0,00296	0,00321			
0,035	680	0,00530	0,00531			
0,035	900	0,00684	0,00686			
0,0504	510	0,00438	0,00401			
0,0504	970	0,00673	0,00681			
0,0504	1320	0,00950	0,00987			
0,0689	610	0,00419	0,00475			
0,0689	1250	0,00813	0,00850			
0,0689	1680	0,01275	0,01290			
0,1029	985	0,00507	0,00735			
0,1029	1800	0,01320	0,01210			
0,1029	2550	0,01773	0,01746			
0,138	1275	0,00802	0,00800			
0,138	2440	0,01720	0,01803			
0,138	3480	0,02400	0,02589			

MÓDULO DE RESILIÊNCIA
Amostra de solo - LA' (natural)
Amostra de - LA' com adição de 8% de cimento e 7 dias de cura



16. EXERCÍCIO FORA DA SALA DE AULA Tendo em vista a variação do Módulo de Resiliência dos materiais granulares com as tensões atuantes, é indiferente ou há diferença do ponto de vista de resposta estrutural da camada compactada (com uma certa espessura fixada) em ela estar posicionada na camada de base ou na camada de reforço do subleito??
17. EXERCÍCIO FORA DA SALA DE AULA Tendo em vista a variação do Módulo de Resiliência dos materiais coesivos com as tensões atuantes, é indiferente ou há diferença do ponto de vista de resposta estrutural da camada compactada (com uma certa espessura fixada) em ela estar posicionada na camada de base ou na camada de reforço do subleito??
18. EXERCÍCIO FORA DA SALA DE AULA Os valores de CBR de um material granular dependem da natureza do material, granulometria, forma, etc e das propriedades de estado (grau de compactação, empacotamento das partículas, arranjo interno, etc). O módulo de resiliência, depende ainda das tensões atuantes, ou seja, a elasticidade é não-linear. Com base nisto, você acredita que possa realizar uma correlação entre CBR e MR?
19. Com base nas duas figuras de PREUSSLER (1983), quais as vantagens e desvantagens de se compactar uma camada no ramo seco (abaixo da umidade ótima)?
20. Com base nas duas figuras de PREUSSLER (1983), quais as vantagens e desvantagens de se compactar uma camada no ramo úmido (acima da umidade ótima)?

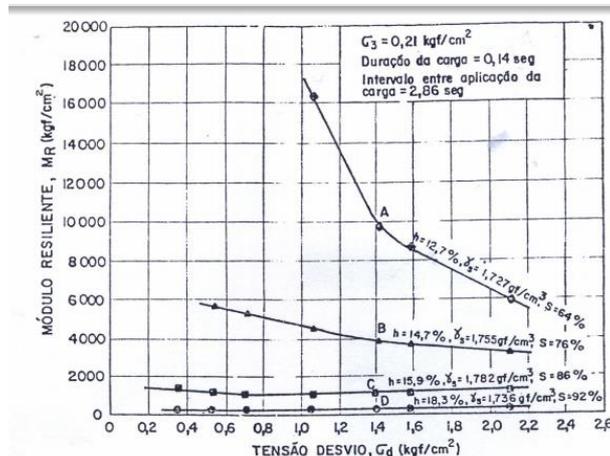


FIG. 4.13.a.-EFEITO DA UMIDADE (h) NO RELACIONAMENTO MÓDULO RESILIENTE (M_R) "versus" TENSÃO DESVIO (σ_d) - SOLO 19

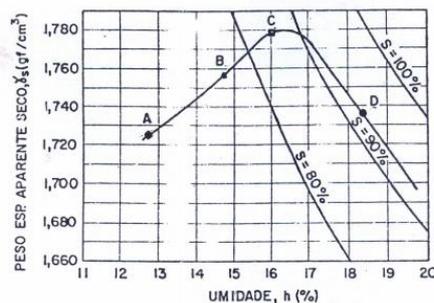


FIG. 4.13. b. - CONDIÇÕES DE COMPACTAÇÃO