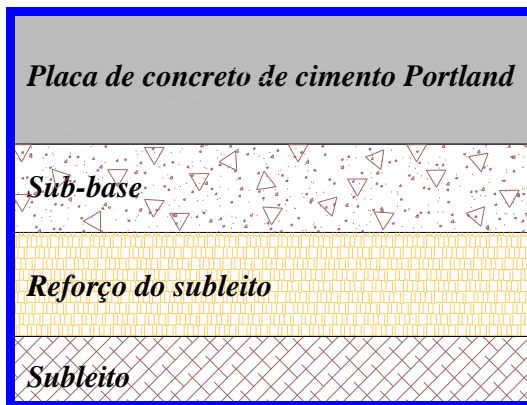


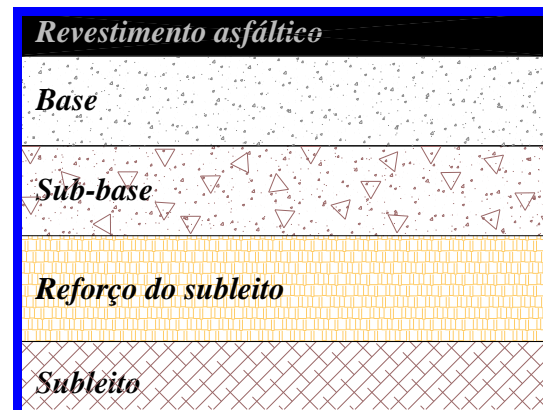
**Departamento de Eng. de Transportes da Escola Politécnica da USP**  
**PTR3322 – Pavimentação Rodoviária**  
**Exercício 4: Compactação de solos e agregados para obras viárias**  
**Índice de Suporte Califórnia**  
**Profa. Dra. Liedi Bernucci**  
**Prof. Dr. Iuri Bessa**

**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



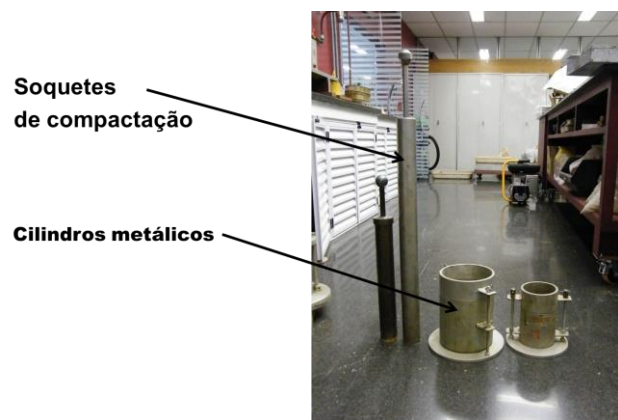
**Figura 1 (b):** seção esquemática de um pavimento asfáltico

**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)**.

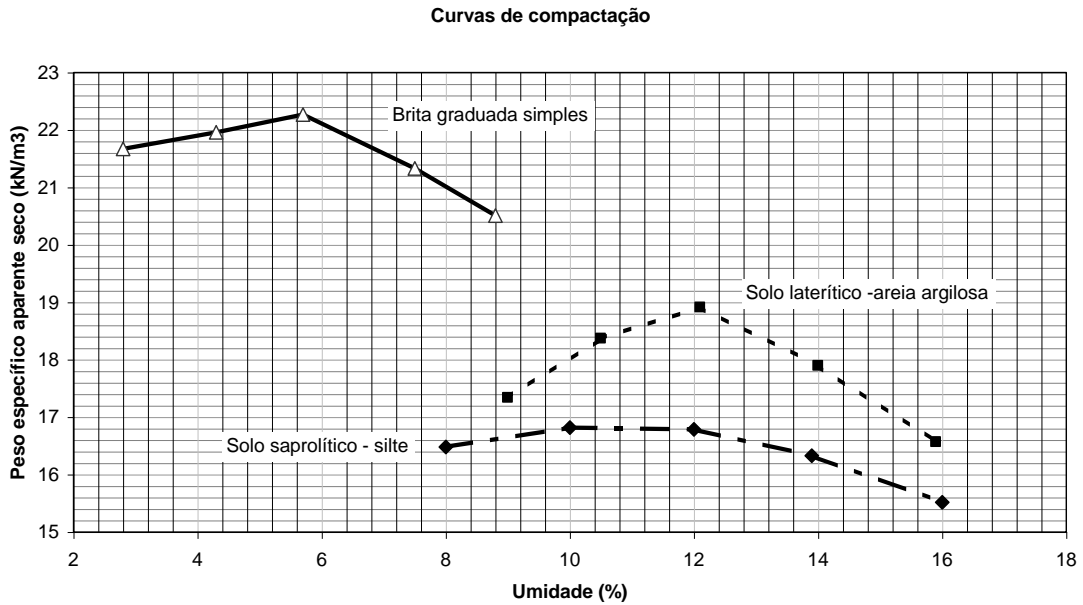


**Figura 2 (a):** cilindro e soquete de compactação



**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:**

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:**

- 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. a) Determine os pesos específicos aparentes secos máximos de ambos solos e da brita graduada simples.  
b) Por que os valores são expressos em peso específico seco e não úmido?  
c) 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.
2. a) Se você tivesse que optar em fazer compactação em campo de uma camada com o **Solo L**, em que umidade você especificaria o serviço? Por quê?  
b) Se você tivesse que optar em fazer compactação em campo de uma camada com o **Solo S**, em que umidade você especificaria o serviço? Por quê?  
c) Se você tivesse que optar em fazer compactação em campo de uma camada com a **BGS**, em que umidade você especificaria o serviço? Por quê?

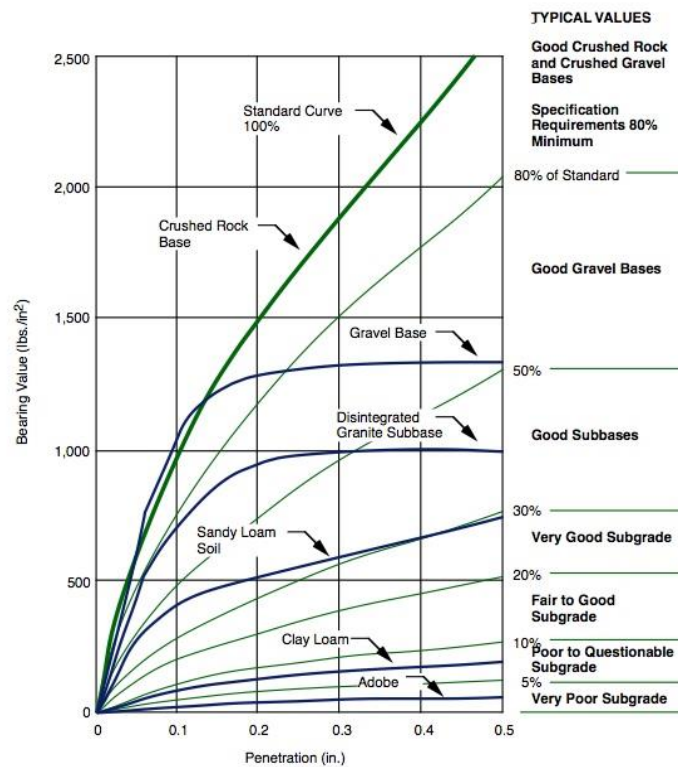
Veja se há relação entre a presença de material granular ou de material mais fino na umidade ótima. A umidade ótima varia com a energia de compactação?

3. 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).
4. *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)

### 5. O que é CBR?

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/>



**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 porcentagem, 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:

- 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 do 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.

6. 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	

7. 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/cm<sup>2</sup>.



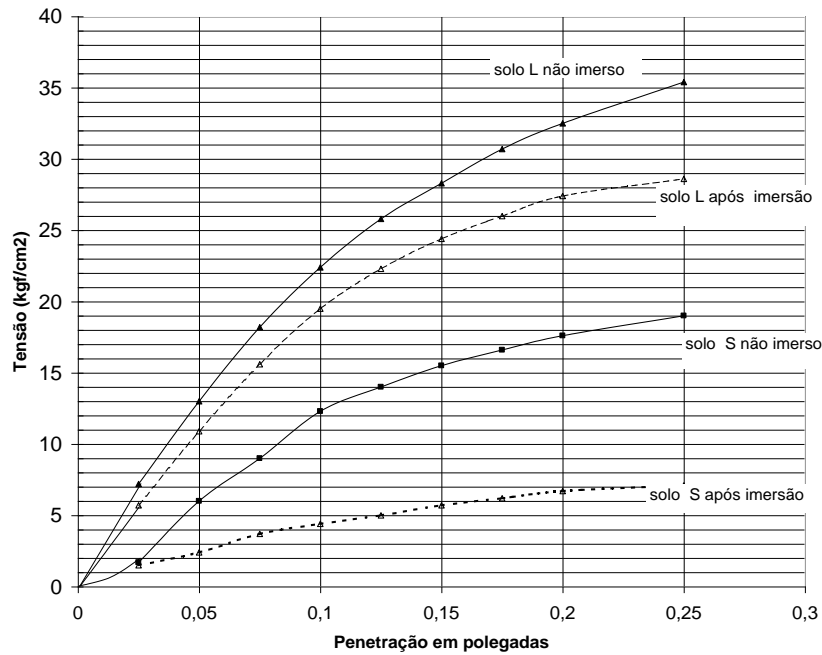
1º Compactação do corpo-de-prova



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



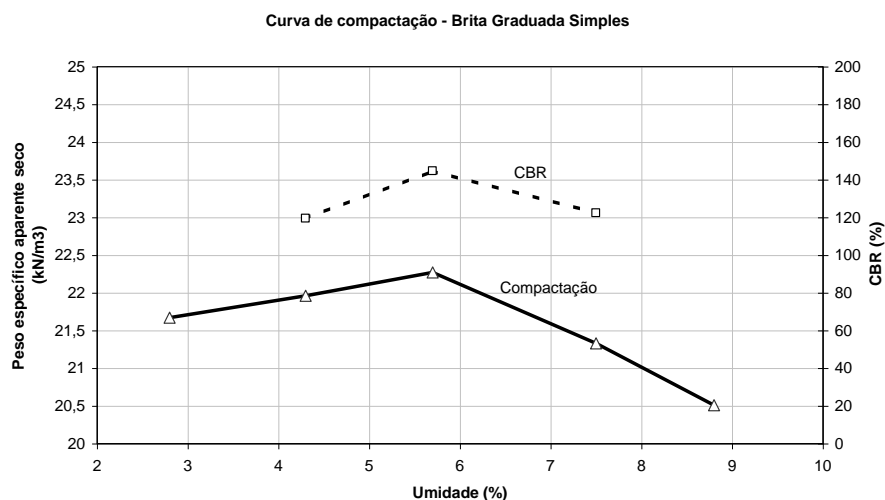
3º Ensaio de penetração de pistão padrão no corpo-de-prova e medida da penetração e resistência



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

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.
8. 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



9. O CBR é feito em geral com solo coletado na pista (que comporá o subleito, por exemplo), ou com solo de jazida (área de empréstimo para ser usado na camada final de terraplenagem ou já como camada de reforço do subleito, por exemplo, ou ainda como sub-base).

Há um ensaio denominado DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*) que é uma haste com um cone na ponta e pode ser penetrado em solos naturais ou em solos compactados, com auxílio de golpes aplicados através de um peso que cai de uma altura constante. Estes ensaios são de resistência ao cisalhamento e todos os ensaios penetrométricos, como o CBR feito em laboratório, são ensaios simples e são uma medida de resistência. Há ensaios de penetração feitos em campo, com diferentes técnicas, para estudar o subsolo para fundações de edifícios, por exemplo.

No caso rodoviário, o DCP é usado para avaliar principalmente os trabalhos de compactação pois avaliam no local a resistência. Veja como é este ensaio pelas **FIGURAS 7 (a) e (b)**.

Calcule o CBR “in situ” por meio dos resultados de DCP que foi cravado em campo em um aterro com duas camadas compactadas (**FIGURA 8**).

**Tabela 3 - Correlações da Norma D6951-09**

<b>CORRELAÇÕES</b>	<b>TIPO DE SOLO</b>
$CBR = \frac{292}{DN^{1,12}}$	Para todos os solos exceto para Argilas com baixa plasticidade com CBR<10% e argilas altamente plásticas.
$CBR = \frac{1}{(0,432283 \times DN)^2}$	Para Argilas com baixa plasticidade com CBR<10%.
$CBR = \frac{1}{(0,002871 \times DN)}$	Para Argilas altamente plásticas.

Fonte: Adaptado pelo autor ASTM,2009, p. 4.

DN = profundidade penetrada em mm por golpe  
 Correlações entre CBR e DN (profundidade/golpes)  
 (apud: Fernandes, 2015)

**Atenção: Segunda equação em polegadas/golpes!!!**

