

# Análise Experimental da Influência da Energia de Compactação nas Características Mecânicas do Solo

Eduardo Hélio Costa Barros  
Instituto Federal do Ceará, eduardohelio@hotmail.com

João Sabóia de Sousa  
Universidade de Fortaleza, saboia.topocad@yahoo.com.br

Marcos Fábio Porto de Aquiar  
Instituto Federal do Ceará / Universidade de Fortaleza, macosfpa@hotmail.com

Francisco Heber Lacerda de Oliveira  
Universidade de Fortaleza, Fortaleza, Brasil, heberoliveiracivil@hotmail.com

**RESUMO:** Este trabalho teve como objetivo identificar a relação entre a energia empregada na compactação de solos e suas características mecânicas avaliadas por meio do ensaio de Índice de Suporte Califórnia. Na pesquisa foram selecionados três tipos de solos, classificados de acordo com o sistema de classificação TRB, recomendada para o reconhecimento de solos para a construção de pavimentos. Comprovou-se aumento dos parâmetros de resistência de acordo com a energia utilizada na compactação, porém, na maior energia utilizada, vale ressaltar, que solos com pedregulhos podem sofrer degradação de sua estrutura com o excesso de energia de compactação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia de Compactação, Índice de Suporte Califórnia, Degradação estrutural.

## 1 INTRODUÇÃO

O Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER), atual DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) é responsável por regulamentar as energias de compactação utilizadas em projetos rodoviários.

De acordo com a normatização do DNER (1994c) as energias de compactação são conceituadas como normal, intermediária e modificada designadas para identificar a relação entre teor de umidade e peso específico aparente seco do solo compactado.

Os resultados obtidos da análise de dois tipos de solos lateríticos em função da energia de compactação, para verificar as características de permeabilidade e consolidação, sugerem que seria necessário a aplicação de energias diferentes para se obter comportamentos aproximados para os solos observados, portanto, nota-se a necessidade de especificar a energia de compactação levando em

consideração a natureza do solo. (OGUNSANWO, 1989).

Na região nordeste do Brasil existe uma prática de se aplicar uma energia de compactação diferente das energias normatizadas. A utilização dessa energia é justificada pelo fato de se obter com ela um elevado Índice de Suporte Califórnia, muitas vezes mais elevado do que se tivessem sido compactado com energias mais elevadas, pois uma considerável parcela de energia de compactação adicional utilizada para se obter maiores valores de peso específico e melhorar as características geotécnicas do solo na execução das camadas dos pavimentos rodoviários pode ser desperdiçada mais em degradar o material do que em comprimi-lo.

## 2 COMPACTAÇÃO DE SOLOS

O início da técnica de compactação é creditada ao engenheiro norte-americano Proctor, que em 1933 publicou observações sobre a

compactação de aterros, mostrando que, ao aplicar-se certa energia de compactação, o peso específico aparente resultante é função da umidade em que o solo foi compactado (PINTO, 2006).

Dessas publicações surgiu o método de Proctor para identificar a umidade dita ótima, onde através dela é possível encontrar o peso específico aparente seco máximo após a compactação. Vários pesquisadores tentaram explicar a influência da água na microestrutura do solo no processo de compactação.

A teoria de Olson conclui que a adição de água, até certo teor, ajuda na lubrificação e expulsão do ar, provocando um novo rearranjo das partículas a cada esforço aplicado. Quando a quantidade de água presente nos vazios não permitir o rearranjo das partículas, o solo terá atingido o peso específico aparente seco máximo e a umidade ótima (FILHO, 1995).

A criação de “filmes” de água que se formam em volta dos grãos quando o solo está na umidade ótima, ou próxima disso, implica na lubrificação das partículas. A redução da viscosidade da água ocasiona a diminuição do atrito entre os grãos melhorando a eficiência da compactação com aumento do peso específico do solo (HOGENTGLER, 1937).

Existem vários métodos para a realização da compactação de solos e, certamente, todos esses métodos apresentarão resultados diferentes para um mesmo material. Um mesmo método de compactação quando aplicado em amostras distintas poderá apresentar resultados bastante diferentes. Logo os resultados de um processo de compactação dependem de diversos fatores como a natureza do solo e o método utilizado para a compactação (ESSIGMANN Jr *et al*, 1978).

Segundo Godoy (1996), o comportamento de um material após a compactação depende de sua natureza. Solos lateríticos em estado natural são porosos, permeáveis, porém, quando compactados, podem adquirir boa resistência e baixa permeabilidade sem perda significativa ao serem imersos em água.

Solos de naturezas diferentes possuem curvas de compactação características. Areias possuem um peso específico mais elevado e uma umidade ótima mais reduzida em

comparação às argilas, e ainda apresentam um máximo bem definido na curva de compactação. Já os siltes se comportam de maneira intermediária (MELLO E TEIXEIRA, 1971).

### 3 ENERGIA DE COMPACTAÇÃO

A AASHTO (2010) inicialmente normatizou dois ensaios de compactação, o normal e o modificado e são utilizados dois tipos de cilindros, o Califórnia e o Proctor.

O método de ensaio DNER (1994c) introduz o conceito das energias normal, intermediária e modificada designadas para o método de Proctor que consiste na moldagem de corpos de prova no cilindro proctor divididos em cinco camadas. A energia normal, intermediária e modificada correspondem, respectivamente, 12, 26 e 55 golpes por camada com o soquete padronizado.

O Departamento Estadual de Rodovias do Estado do Ceará (DER-CE) recomenda outro tipo de energia, com intensidade situada entre a as energias intermediária e modificada, que consiste na aplicação de 39 golpes por camada. Segundo alguns pesquisadores, a utilização dessa energia se justifica pelo fato dela ser menor que a modificada, porém suficiente para obter variações positivas do peso específico aparente seco máximo.

Entende-se como compactação o processo que visa reduzir o volume de vazios de um solo, almejando o aumento de sua resistência tornando-o mais estável. Quando se realiza a compactação de um solo sob diferentes condições de umidade para uma única energia de compactação e para várias energias identifica-se a variação dos pesos específicos em função da umidade, Figura 1 (CAPUTO, 1996).

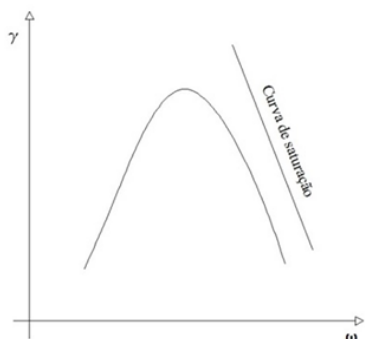


Figura 1. Curva de Compactação (Caputo, 1996)

Quando um material é compactado com teores de umidade abaixo do teor ótimo, a utilização de energias maiores pode acarretar um aumento no peso específico aparente seco do solo, porém existe a possibilidade de se aplicar um esforço de compactação bem maior, no caso da energia modificada, e ocorrer a quebra dos grãos perdendo assim sua capacidade de suporte (CAPUTO, 1996). A Figura 2 mostra o comportamento de curvas de compactação típicas com diferentes energias e a linha de saturação ( $S=100\%$ ).

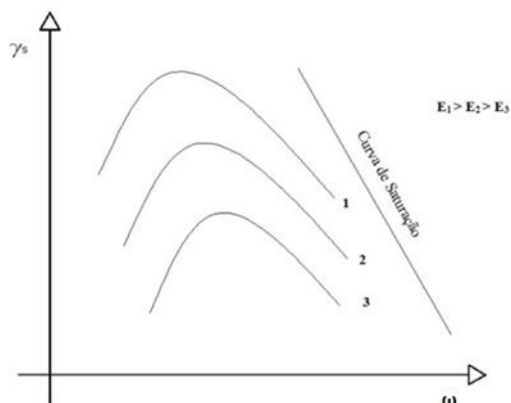


Figura 2 - Comportamento de um material compactado com diferentes energias de compactação (Caputo, 1996)

#### 4 INDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

Também conhecido como ISC, esse índice é de grande importância para o dimensionamento de pavimentos flexíveis. Introduzido por O.J. Porter em 1929 para definir a resistência dos materiais granulares empregados na pavimentação. Esse ensaio relaciona o esforço necessário para a penetração em uma amostra, previamente compactada na energia escolhida, de um pistão padronizado com a penetração desse mesmo pistão em uma amostra

padronizada de pedra britada. Obtemos também desse ensaio a expansão da amostra na presença de água, já que antes da penetração do pistão a amostra fica imersa em água por quatro dias.

A estabilidade do solo depende da distribuição granulométrica, forma da partícula, atrito interno e coesão. Dentre todos esses fatores, a granulometria é considerada a mais importante (YODER, 1959).

Os resultados da realização de ensaios em solos finos, para vários teores de umidade, a fim de entender a contribuição da energia de compactação em ensaios de ISC, mostram que a resistência à penetração se aproxima de zero quando a amostra é compactada no ramo úmido da curva de compactação. Nota-se também o crescimento do peso específico aparente seco máximo e a redução da umidade ótima quando se eleva a energia de compactação (TUMBULL E FOSTER, 1956)

De acordo com DNIT (2006) o solo deve comprovar determinadas características para que possa ser empregado em uma camada da estrutura de um pavimento (Tabela 1). Esses critérios limitantes de índice de suporte e expansão são essenciais para a qualidade e durabilidade.

Tabela 1. Parâmetros de Suporte Para Camadas de Pavimento

| Camadas              | CBR                   | Expansão     |
|----------------------|-----------------------|--------------|
| <b>Subleito</b>      | $\geq 2\%$            | $\leq 2\%$   |
| <b>Ref. Subleito</b> | $\geq$ CBR SUBLEITO   | $\leq 1\%$   |
| <b>Sub-base</b>      | $\geq 20\%$           | $\leq 1\%$   |
| <b>Base</b>          | $\geq 60\%$ ou $80\%$ | $\leq 0,5\%$ |

#### 5 CLASSIFICAÇÃO TRB

Um método de classificação de solos cuja proposta é estabelecer uma hierarquização para os solos do subleito a partir da realização dos ensaios de Limites de Liquidez (DNER, 1994a), Plasticidade (DNER, 1994b) e Granulometria (DNER, 1994d).

Segundo AASHTO (2010), a classificação TRB, Transportation Research Board, tem sido bastante utilizada no reconhecimento de solos para a construção de pavimentos rodoviários. Essa classificação subdivide-se em grupos e subgrupos, cada um atendendo a diferentes

faixas de graduação, limites de Atterberg e Índice de Grupo.

Esse sistema auxilia em um estudo preliminar de amostras de solo. A Tabela 2 relaciona valores prováveis de ISC em função da classificação TRB, ou seja, relaciona o parâmetro de resistência com a natureza do material (SENÇO, 1997).

Tabela 2. Classificação TRB x ISC Provável

| Solo<br>(Classificação TRB) | ISC Provável<br>% |
|-----------------------------|-------------------|
| <b>A-1-a</b>                | 40 a 80 (ou mais) |
| <b>A-1-b</b>                | 20 a 80 (ou mais) |
| <b>A-2-4 e A-2-5</b>        | 25 a 80 (ou mais) |
| <b>A-2-6 e A-2-7</b>        | 12 a 30           |
| <b>A-3</b>                  | 15 a 40           |
| <b>A-4</b>                  | 4 a 25            |
| <b>A-5</b>                  | 2 (ou menos) a 10 |
| <b>A-6 e A-7</b>            | 2 (ou menos) a 5  |

## 6 ESTUDO DE CASO

Atualmente é bastante difícil encontrar no nordeste brasileiro um material natural que possa ser utilizado como componente estrutural das camadas de base e sub-base de um pavimento. Esta situação pode ser resolvida utilizando-se das técnicas de estabilização de solos, que é um procedimento que tem como finalidade a melhoria das propriedades do mesmo.

Existem dois tipos de estabilização, a físico-química, quando são utilizados aditivos como cal, cimento, asfaltos ou betumes e produtos químicos industrializados, e a estabilização mecânica com o melhoramento granulométrico e com a compactação desse material.

Uma estabilização mecânica geralmente é mais fácil e mais barata de se executar, porém os materiais que serão utilizados necessitam de um estudo mais detalhado de suas propriedades. A dificuldade para se realizar uma estabilização por compactação está em adequar a energia utilizada na compressão do solo com as características intrínsecas do mesmo, para que essa correlação seja benéfica para o aumento do suporte do solo. Apenas compactar sem conhecer suas propriedades pode acarretar em

um desempenho insatisfatório causando desperdício de tempo e dinheiro.

Foi com experiências de desgaste na estrutura do solo que os engenheiros rodoviários do DNER reduziam o esforço utilizado na compactação dos materiais, criando uma energia suficiente para melhorar a capacidade de suporte do solo e não destruir as partículas do mesmo, isto é, otimizando os resultados de melhoramento do solo.

As amostras estudadas estão sendo empregadas na construção de vias no estado do Ceará. Com o intuito de melhorar o entendimento de como a energia intermodificada atua no suporte do solo, foram escolhidas três amostras com classificações diferentes segundo a terminologia TRB para que sejam estudados os seus comportamentos diante da compactação nas 3 energias regulamentadas pelo DNIT e em mais uma energia, denominada intermodificada, usualmente utilizada no Ceará.

A amostra A foi coletada da construção do acesso à nova sede da reitoria do IFCE, no município de Fortaleza, a amostra B de uma jazida próxima do Porto do Pecém, no município de São Gonçalo do Amarante, e a amostra C do material que está sendo utilizado na duplicação do Anel Viário, no município de Maracanaú.

Os solos foram classificados segundo a classificação TRB. Também foram realizados os ensaios de Limites de Liquidez (DNER, 1994a) e Plasticidade (DNER, 1994b), Tabela 3, Granulometria (DNER, 1994d), Compactação (DNER, 1994c), e CBR (ABNT, 1987)

Tabela 3. Caracterização das Amostras

| Amostra                     | LL<br>(%) | IP<br>(%) | IG | TRB   |
|-----------------------------|-----------|-----------|----|-------|
| <b>Solo A - IFCE</b>        | NP        | NP        | 0  | A-3   |
| <b>Solo B - Pecém</b>       | 29,80%    | 7%        | 0  | A-2-4 |
| <b>Solo C - Anel Viário</b> | 31%       | 8%        | 2  | A-4   |

## 7 RESULTADOS

Por meio de resultados de ensaio de granulometria por peneiramento (Figura 3) é possível identificar como estão distribuídas as faixas de dimensão das partículas das amostras. O Solo A, um material arenoso e pedregulhoso, mostrou-se bem graduado. O Solo B, um material argiloso e pedregulhoso, apresentou uma dimensão média maior. Já o Solo C, material argiloso e arenoso, mostrou-se com uma graduação ligeiramente descontínua.

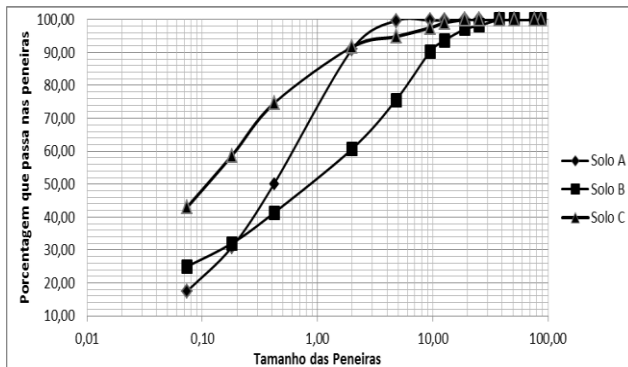


Figura 3. Granulometria das Amostras

Através da relação entre a energia de compactação e os resultados de ISC (Figura 4) é possível visualizar o melhoramento do solo com o acréscimo do esforço de compactação.

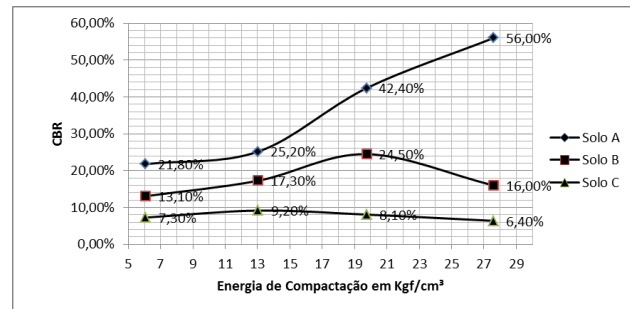


Figura 4. Energia de Compactação x ISC

Os ensaios de compactação em quatro estágios de energia (Tabela 4) apresenta o comportamento individual das amostras com o acréscimo de energia. Em alguns casos identificou-se o melhoramento do suporte com o acréscimo da energia de compactação.

Tabela 4. Compactação em Diferentes Estágios de Energia

| Amostra | Propriedades  | Energias                 |                          |                          |                          |
|---------|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|         |               | Normal                   | Intermediária            | Intermodificada          | Modificada               |
| Solo A  | $\gamma$ max  | 2,060 gf/cm <sup>3</sup> | 2,100 gf/cm <sup>3</sup> | 2,150 gf/cm <sup>3</sup> | 2,189 gf/cm <sup>3</sup> |
|         | $\omega$ otm% | 7,00%                    | 7,50%                    | 6,50%                    | 6,10%                    |
| Solo B  | $\gamma$ max  | 2,040 gf/cm <sup>3</sup> | 2,065 gf/cm <sup>3</sup> | 2,133 gf/cm <sup>3</sup> | 2,069 gf/cm <sup>3</sup> |
|         | $\omega$ otm% | 13,00%                   | 9,80%                    | 9,50%                    | 11,30%                   |
| Solo C  | $\gamma$ max  | 2,069 gf/cm <sup>3</sup> | 1,905 gf/cm <sup>3</sup> | 1,972 gf/cm <sup>3</sup> | 1,956 gf/cm <sup>3</sup> |
|         | $\omega$ otm% | 11,30%                   | 12,10%                   | 11,86%                   | 11,50%                   |

O Solo A não obteve ganhos significativos para ser empregado nas camadas de maior suporte de um pavimento, porém, após a compactação na energia modificada, tornou-se excelente para compor a camada de Sub-base de um pavimento. Por ser o de melhor graduação de classificação A-3, obteve ganhos sucessivos de CBR ao se elevar a energia de compactação e reduzindo o teor de umidade, tendo seu suporte melhorado de 21,80% na energia normal para 56,00% na energia modificada.

O Solo B obteve ganhos de suporte com o acréscimo da energia de compactação, porém houve uma redução do seu suporte ao ser submetido ao esforço de compactação modificado, mostrando assim que, por ser um material com considerável concentração de pedregulhos, o acréscimo de energia pode ter modificado sua estrutura.

O Solo C não obteve ganhos significativos de suporte, sendo que nas duas energias mais

elevadas houve um decréscimo de energia do mesmo.

## 8 CONCLUSÃO

A tentativa de correlacionar a classificação TRB com o suporte do solo mostrou-se eficiente para as amostras estudadas.

Nos ensaios de compactação os valores de peso específico aparente seco máximo aumentaram para determinados casos.

Um dos solos estudados apresentou decréscimo significativo de peso específico aparente seco após a compactação no nível modificado, mostrando que, para esse caso, a energia intermodificada é mais adequada no melhoramento das características do material.

Os ensaios de ISC demonstraram que os suportes das amostras compactadas com energias mais elevadas tendem a ser maiores, porém, para alguns tipos de materiais, a utilização de energias menores que a energia modificada e superiores a energia intermediária, pode resultar na melhor condição de capacidade de suporte.

## REFERÊNCIAS

- AASHTO (2010), Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1987), NBR 9895, 02.423 Solos – Índice de Suporte Califórnia – Método de Ensaio.
- Caputo, H. P. (1996), Mecânica dos solos e suas aplicações. Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A. Rio de Janeiro, RJ.
- DNER, Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (1994a), DNER-ME 122, Solos- Determinação do Limite de Liquidez – Método de ensaio.
- DNER, Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (1994b), DNER-ME 082, Solos- Determinação do Limite de Plasticidade – Método de ensaio.
- DNER, Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (1994c), DNER-ME 162, Solos-Ensaio de Compactação Utilizando Amostras Trabalhadas – Método de ensaio.
- DNER, Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (1994d), DNER-ME 080, Solos-Análise Granulométrica por Peneiramento – Método de ensaio.
- DNIT, Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (2010), Manual de Pavimentação.
- IPR/DNER/ABNT. Publ. IRP – 719. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ.
- Essigmann JR, M. F.; Aaltschaeffl, A., G.; Lovell, C. W. (1978).Method for specifying soil compaction. Transportation Research Record, n. 690, p. 29-34.
- Filho, A. G. C. (1995). Compactação de solos com energias, aproximadamente, iguais e diferentes procedimentos. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, SP.
- Godoy, H.; Bernucci, L. B.; Nogami, J. S. (1996). Diretrizes para a identificação expedita de solos lateríticos para o uso em obras viárias. pp.557-568.
- Hogentogler, C. A. (1937). Engineering properties of soil. McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Mello, V. F. B.; Teixeira, A. H. (1971). Mecânica dos solos, fundações e obras de terra. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, SP.
- Ogunsanwo, O. (1989) Some Geotechnical Properties of Two Laterite Soils Compacted at Different Energies. Engineering Geology, 26: 261-269. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, Netherlands.
- Osei, A.; Dallas, N. L.; Tutumleur, E. (2000). Effect of Compaction on Orthotropic Properties of Unbound Aggregate Bases. European Workshop On Compaction of Soils and Granular Materials, pp. 17-26 Paris, France.
- Pinto, Carlos de Souza (2006). Curso Básico de Mecânica dos Solos. 2ª Ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Saboia, J. S. (2012). Estudo da Influencia da Energia de Compactação no Índice de Suporte Califórnia em Solos. – Monografia. Universidade de Fortaleza, CE.
- Senço, W. (1997). Manual de técnicas de pavimentação. Editora Pini Ltda. São Paulo, SP.
- Turnbull, W. J.; Foster, C. R. (1956).Stabilization of materials by compaction. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol. 82, n.2, pp.934.1-934.23.
- Yoder, E. J., (1959). Principles of pavements design. John Wiley & Sons, Inc