

Estudo da Correlação entre Compacidade Relativa e Grau de Compactação Considerando Energia Normal e Modificada para Controle Tecnológico de Obras de Terra

Samuel Castro Prado

Mestrando em Tecnologia e Gestão Ambiental, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil, samuelcastroprado@hotmail.com

Marcos Fábio Porto de Aguiar

Professor Associado, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil, marcosporto@ifce.edu.br

Giullia Carolina de Melo Mendes

Mestranda em Geotecnia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, giucmendes@gmail.com

Alipio Oliveira Lima Neto

Engenheiro civil, Estudante de Tecnologia em Estradas, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil, alipio-oliveira@hotmail.com

RESUMO: A crescente demanda por métodos de controle tecnológico para execução de obras de terra vem exigindo cada vez mais esforços dos profissionais de engenharia civil na busca pelo conhecimento acerca de novos métodos executivos e de acompanhamento in situ. Nesse contexto, o trabalho tem o objetivo de estudar o comportamento de dois parâmetros de controle tecnológico, compacidade relativa e grau de compactação, considerando as energias de compactação normal e modificada. Realizou-se a caracterização de oito amostras do solo em estudo, destacando-se os ensaios de compactação e de determinação dos índices de vazio mínimo e máximo, obtendo-se, assim, o peso específico aparente seco máximo e mínimo, a partir dos quais foi possível atribuir uma correlação entre o grau de compactação e a compacidade relativa do solo, utilizando-se do método de regressão linear. A correlação apresenta um satisfatório coeficiente de determinação (R^2), de 0,9986, indicando que a utilização das correlações pode representar significativo instrumento auxiliar de controle tecnológico.

PALAVRAS-CHAVE: Compacidade relativa, Grau de compactação, Controle tecnológico, Obras de terra.

ABSTRACT: The growing demand for methods of technological control for the execution of earth works has been demanding more and more efforts from civil engineering professionals in the search for knowledge about new executive methods and in situ monitoring. In this context, the work aims to study the behavior of two technological control parameters, relative compactness and degree of compaction, considering the normal and modified compaction energies. The characterization of eight soil samples under study was carried out, highlighting the compacting tests and determination of the minimum and maximum void indices, thus obtaining the maximum and minimum dry specific weight, from which it was possible to attribute a correlation between the degree of compaction and the relative compactness of the soil, using the linear regression method. The correlation has a satisfactory determination coefficient (R^2) of 0.9986, indicating that the use of correlations can represent a significant auxiliary instrument for technological control.

KEYWORDS: Relative compactness, Degree of compaction, Technological control, Earthworks.

1 Introdução

Na prática da engenharia geotécnica, principalmente em campo, nem sempre a realização dos procedimentos laboratoriais é de fácil execução, seja por falta do equipamento necessário ou por questão de logística. Dessa forma, poder estimar características desconhecidas do comportamento do solo analisado por meio de correlações, a partir de informações já conhecidas, constitui importante saber a ser exaustivamente ampliado pelos profissionais e estudiosos do ramo, a fim de facilitar a interpretação das situações e a tomada de decisão.

Visando contribuir com a ampliação desses conhecimentos, o presente trabalho busca apresentar e analisar a correlação entre compactidade relativa e grau de compactação considerando energia normal e modificada, almejando o enriquecimento do estudo das características dos solos não coesivos.

2 Índices Físicos

2.1 Compactidade Relativa

A compactidade relativa estabelece uma relação entre os índices de vazio máximo ($e_{\text{máx}}$), mínimo ($e_{\text{mín}}$) e natural (e_{nat}), identificando o estado das areias, conforme Equação 1. Quanto maior o valor de CR, mais compacta a areia se encontra.

$$CR = \frac{e_{\text{máx}} - e_{\text{nat}}}{e_{\text{máx}} - e_{\text{mín}}} \quad (1)$$

Onde: $e_{\text{máx}}$ – índice de vazios do solo no estado mais solto possível; e_{nat} – índice de vazios do solo ao natural; $e_{\text{mín}}$ – índice de vazios do solo no estado mais denso possível.

Apesar de depender de outros fatores, a exemplo da distribuição granulométrica e do formato dos grãos, geralmente, quanto mais compacta a areia, maior sua resistência aos esforços e menor sua deformabilidade, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação das areias x compactidade relativa.

Classificação	Compactidade relativa (%)
Areia fofa	Abaixo de 33
Areia média	Entre 33 e 66
Areia compacta	Acima de 66

Fonte: Pinto (2006).

É possível, ainda, determinar a compactidade relativa utilizando os pesos específicos aparentes seco máximo ($\gamma_{d \text{ máx}}$), mínimo ($\gamma_{d \text{ mín}}$) e natural ($\gamma_{d \text{ nat}}$) do solo em análise, conforme Equação 2.

$$CR = \frac{\gamma_{d \text{ máx}}(\gamma_{d \text{ nat}} - \gamma_{d \text{ mín}})}{\gamma_{d \text{ nat}}(\gamma_{d \text{ máx}} - \gamma_{d \text{ mín}})} \quad (2)$$

Onde: $\gamma_{d \text{ máx}}$ – peso específico aparente máximo, obtido conforme especificado pelo método de ensaio orientado pela NBR 12004 (ABNT, 1990); $\gamma_{d \text{ mín}}$ – peso específico aparente mínimo, obtido conforme especificado pelo método de ensaio descrito pela NBR 12051 (ABNT, 1991); $\gamma_{d \text{ nat}}$ – peso específico aparente do solo, obtido no campo ou por amostra indeformada.

2.2 Índice de Vazios

O Índice de Vazios (e) é um índice físico que representa o estado de compactidade em que se encontram os solos arenosos em determinada situação. Determina-se seu valor pela razão entre o volume de vazios (V_v) e o volume de sólidos (V_s), sendo, portanto, adimensional e maior que zero, conforme Equação 3.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3)$$

Pinto (2006) adverte que o valor isolado desse índice físico não é conclusivo e não acrescenta informações suficientes ao entendimento de seu comportamento, visto que é necessário analisá-lo confrontando-se com os índices de vazios máximo e mínimo. Com uma areia pura, em seu estado mais fofo possível, pode-se determinar o índice de vazios máximo, enquanto que, ao vibrar essa areia, ela ficará em estado compacto que corresponde ao índice de vazios mínimo.

Valores típicos dos índices de vazios máximo e mínimo são indicados na Tabela 2, sendo os valores tão maiores quanto mais angulares os grãos e mais mal graduadas as areias (PINTO, 2006).

Tabela 2. Valores típicos de índices de vazios.

Características das areias	$e_{\text{mín}}$	$e_{\text{máx}}$
Areia uniforme de grãos angulares	0,70	1,10
Areia bem graduada de grãos angulares	0,45	0,75
Areia uniforme de grãos arredondados	0,45	0,75
Areia bem graduada de grãos arredondados	0,35	0,65

Fonte: Pinto (2006).

Sua determinação, em laboratório, é feita em função do peso específico das partículas do solo (γ_s) e do peso específico do solo seco (γ_d), conforme Equação 4.

$$e = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_d} \right) - 1 \quad (4)$$

2.3 Compactação

De acordo com o DNER (1994b), o ensaio de compactação tem como objetivo a determinação de correlação entre o teor de umidade de solo e sua massa específica aparente seca, para assim, obter sua curva de compactação. O ensaio mais comum é o de Proctor (normal, intermediário ou modificado), que é realizado através de sucessivos impactos de um soquete padronizado na amostra.

Quando se realiza a compactação de um solo, para diferentes condições de umidade e para uma determinada energia de compactação, a curva de variação dos pesos específicos aparentes secos (γ_d), em função da umidade (w) apresenta um ponto máximo, caracterizado pelo peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{d \text{ máx}}$) e a umidade ótima ($w_{\text{ótima}}$), sendo a obtenção destes dois parâmetros, o objetivo desse ensaio.

2.3.1 Grau de Compactação

De acordo com DNIT (2006), denomina-se grau de compactação (GC) o quociente resultante da divisão do peso específico aparente seco máximo (γ_d *in situ*) obtido em campo pelo peso específico aparente seco máximo obtido no laboratório ($\gamma_{d \text{ máx}}$), conforme Equação 5.

$$GC = \frac{\gamma_d \text{ in situ}}{\gamma_{d \text{ máx}}} \times 100 \quad (5)$$

Onde: GC – grau de compactação (%); γ_d *in situ* – peso específico aparente seco “in-situ” (gf/cm³); $\gamma_{d \text{ máx}}$ – peso específico aparente seco máxima de laboratório (gf/cm³).

A principal utilização desse parâmetro é percebida no controle tecnológico de obras de pavimentação, onde é necessário comprovar se o processo de compactação está sendo realizado de acordo com as especificações estabelecidas em projeto e, uma vez não atingidas, o material deverá ser revolvido e recompactado.

3 Resultados

Propôs-se a correlação entre a compacidade relativa e o grau de compactação, considerando a energia de compactação modificada, com dados obtidos de ensaios realizados com areia fina, mal graduada, com extensão a solos não coesivos em geral.

3.1 Compactação

Considerando o estabelecido na ABNT (1986) e da DNER (1994c), que preveem os procedimentos a serem realizados para a correta execução do ensaio de compactação, a Tabela 3 resume os principais parâmetros das curvas. Identificou-se que o peso específico aparente seco máximo médio das amostras foi de 1,72 gf/cm³ com respectiva umidade ótima de 11,2%.

Tabela 3. Resumo das curvas de compactação

Amostra	Umidade ótima (%)	Peso específico aparente seco máximo (gf/cm ³)
Energia modificada		
1	11,85	1,63
2	11,85	1,69
3	9,36	1,77
4	10,77	1,72
5	11,54	1,67
6	11,24	1,85
7	11,17	1,67
8	10,99	1,77
9	12,04	1,72
Média	11,20	1,72
Desvio padrão	0,81	0,07

Fonte: Prado (2018).

3.2 Índices de Vazios

Em conformidade com as normas ABNT (1990) e ABNT (1991), que determinam o método de ensaio para determinação do índice de vazios máximo e mínimo para solos não coesivos, respectivamente, realizou-se os procedimentos para nove amostras de solo. A Tabela 4 resume os valores de $e_{\text{máx}}$ e $e_{\text{mín}}$ obtidos. O valor médio das amostras foi de $e_{\text{máx}} = 0,81$ e $e_{\text{mín}} = 0,58$.

Tabela 4. Índice de vazios máximo das amostras

Amostra	$e_{\text{máx}}$	$e_{\text{mín}}$
1	0,85	0,61
2	0,79	0,57
3	0,84	0,57
4	0,79	0,58
5	0,8	0,59
6	0,76	0,56
7	0,84	0,60
8	0,8	0,59
9	0,79	0,57
Média	0,81	0,58
Desvio padrão	0,03	0,02

Fonte: Prado (2018).

O resultado do peso específico aparente seco máximo médio obtido pelo ensaio de índice de vazios mínimo foi de $1,647 \text{ gf/cm}^3$ e pelo ensaio de compactação, na energia modificada, foi de $1,724 \text{ gf/cm}^3$. Adotou-se como valor de peso específico aparente seco máximo para a correlação o valor de $1,647 \text{ gf/cm}^3$ e para o peso específico aparente seco mínimo médio, o valor obtido pelo ensaio de índice de vazio máximo, que foi de $1,442 \text{ gf/cm}^3$, conforme especificado na Tabela 5.

Tabela 5. Pesos específicos aparentes secos máximo e mínimo.

Amostra	Índice de Vazios		Ensaio de Compactação
	$\gamma_d \text{ máx}$	$\gamma_d \text{ mín}$	$\gamma_{d\text{máx}}$
	ABNT (1991)	ABNT (1990)	DNER (1994c)
	Método B.2 (gf/cm^3)	Método B (gf/cm^3)	(gf/cm^3)
1	1,651	1,433	1,63
2	1,649	1,450	1,69
3	1,691	1,448	1,78
4	1,621	1,430	1,73
5	1,647	1,457	1,67
6	1,619	1,438	1,86
7	1,649	1,437	1,67
8	1,646	1,448	1,77
9	1,647	1,438	1,72
Média	1,647	1,442	1,724
Desvio padrão	0,021	0,009	0,070

Fonte: Prado (2018).

3.2 Correlação entre GC x CR

Utilizando-se os dados de pesos específicos aparente seco apresentados, prosseguiu-se com o cálculo do grau de compactação e de compactação relativa, com o γ_d *in situ* simulado, obtendo-se assim, a correlação entre compactação relativa e grau de compactação, conforme exposto na Tabela 6.

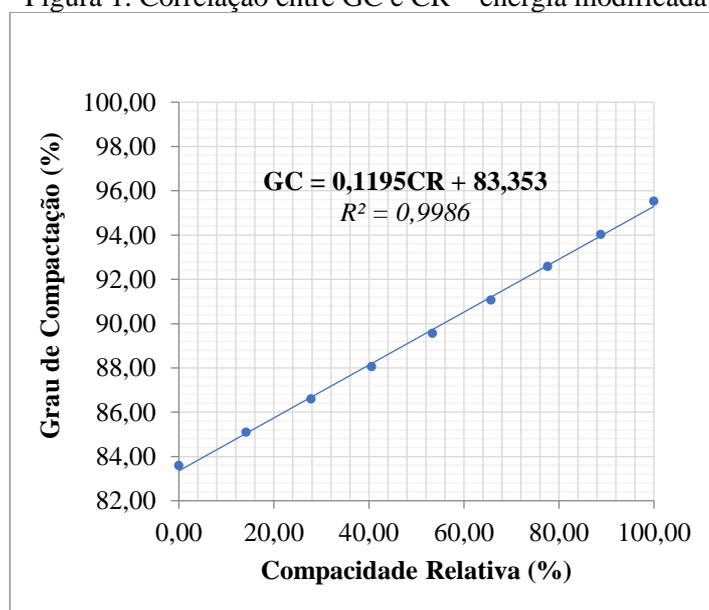
Tabela 6. Aplicação da correlação entre GC x CR – energia modificada.

Índice de Vazios		Ensaio de Compactação	γ <i>in situ</i> simulado (gf/cm ³)	CR (%)	GC (%)
γ_d máx (gf/cm ³)	γ_d min (gf/cm ³)	γ_d máx (gf/cm ³)			
1,647	1,442	1,724	1,442	0,00	83,58
1,647	1,442	1,724	1,467	14,17	85,09
1,647	1,442	1,724	1,493	27,85	86,60
1,647	1,442	1,724	1,518	40,56	88,05
1,647	1,442	1,724	1,544	53,34	89,56
1,647	1,442	1,724	1,570	65,69	91,07
1,647	1,442	1,724	1,596	77,65	92,58
1,647	1,442	1,724	1,621	88,78	94,03
1,647	1,442	1,724	1,647	100,00	95,53

Fonte: Prado (2018).

Observa-se que, para os valores de CR e GC, para um mesmo peso específico aparente seco *in situ* simulado, gerou-se o gráfico da correlação entre compactação relativa e o grau de compactação, bem como a equação da correlação entre estes índices, conforme exibido na Figura 1.

Figura 1. Correlação entre GC e CR – energia modificada



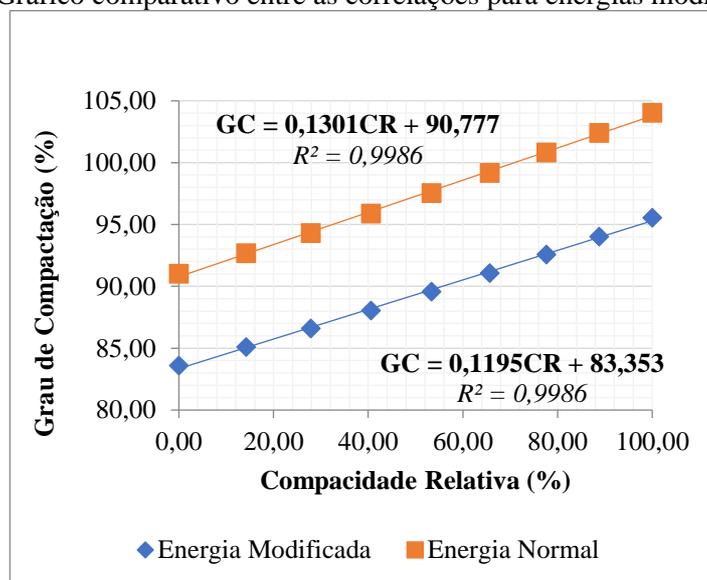
Fonte: Prado (2018).

Chegou-se, por fim, a relação entre grau de compactação (GC) e compacidade relativa (CR), como mostra a Equação 6.

$$GC = 0,1195CR + 83,353 \quad (6)$$

A Figura 2, por sua vez, mostra uma comparação entre as relações propostas para energia de compactação modificada e para energia normal (Figura 2).

Figura 2. Gráfico comparativo entre as correlações para energias modificada e normal



Fonte: Prado (2018).

Verificou-se que, para obtenção de 100% de compacidade relativa para o solo estudado, é necessária, para energia normal de compactação, um grau de compactação de 104,4%, enquanto na energia modificada corresponde a 95,53%.

Observou-se, ainda, que o processo de reajuste das partículas feito pela mesa vibratória, próprio de solos granulares, comprova grau de compactação 100%, para energia normal de compactação, com 71% de compacidade relativa. Já para energia modificada, o valor estipulado pela correlação seria de 139% de compacidade relativa, o que na prática, não é obtido.

4 Conclusão

O presente trabalho realizou uma completa caracterização do solo em estudo, que foi classificado como SP – Areia mal graduada, pela SUCS, e A-3 – Areia fina mal graduada pela metodologia HRB, que representa um material com comportamento geral de bom a excelente como subleito.

Por meio da análise granulométrica foi possível identificar que todas as amostras do solo em estudo possuem menos de 12% em massa de material passante na peneira nº 200 (abertura de 0,075 mm), o que permite a utilização da ABNT (1990) e ABNT (1991) para determinação do peso específico aparente seco máximo e mínimo, bem como o índice de vazios máximo e mínimo.

Tendo como referência que a adoção do grau de compactação com parâmetro de controle de qualidade de aterros compostos de materiais granulares, ou não coesivos, permite mitigar ou até mesmo eliminar algumas inseguranças a respeito de valores muito baixos de compacidade relativa, instituiu-se correlação entre grau de

compactação com energia modificada e compacidade relativa, seguindo metodologia semelhante à de Pimentel (2018), que teve um satisfatório coeficiente de determinação (R^2), de 0,9986.

Os ensaios com energia normal e modificada não reproduzem, com acurácia, o índice de vazios mínimo ou peso específico aparente seco máximo, que podem ser determinados pelo ensaio de emín, conforme ABNT (1991).

De maneira geral, após a análise dos resultados, é possível afirmar que o controle tecnológico de aterros executados com material granular, não coesivo, deve seguir às determinações das normas técnicas de cálculos de índices de vazios máximo e mínimo e adotar a compacidade relativa como índice de controle. O grau de compactação também poderá ser utilizado como parâmetro de controle, uma vez determinada a correlação entre CR e GC. No caso deste trabalho, para energia modificada, propôs-se $GC = 0,1195CR + 83,353$.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pela bolsa do primeiro autor e ao Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (*Campus Fortaleza*) pela disponibilidade do Laboratório de Mecânica dos Solos e Asfalto para realização dos ensaios laboratoriais, contribuindo para o desenvolvimento da pesquisa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. (1986) *ABNT NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro-RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. (1990) *ABNT NBR 12004: Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos*. Rio de Janeiro-RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. (1991) *ABNT NBR 12051: Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos*. Rio de Janeiro-RJ.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, DNER. (1994a) *DNER-ME 080: Solos – Análise granulométrica por peneiramento*. Brasília-DF.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, DNER. (1994b) *DNER-ME 093: Solos – Determinação da Densidade Real*. Brasília-DF.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, DNER. (1994c) *DNER-ME 162: Solos – Ensaio de Compactação Utilizando Amostras Trabalhadas*. Brasília-DF.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, DNIT. (2006) *Manual de Pavimentação*. Rio de Janeiro-RJ.

Pimentel, T. F. (2018) *Estudo da Compacidade Relativa de Solos Arenosos para Controle de Aterros Hidráulicos*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de Fortaleza. Fortaleza-CE.

Pinto, C. de S. (2006) *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. 3ª ed. Oficina de Textos. São Paulo-SP.

Prado, S. C. (2018) *Estudo de correlações entre parâmetros geotécnicos para areia mal graduada*. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará. Fortaleza-CE.