

Métodos para estimativa de envoltórias de resistência ao cisalhamento aplicados a uma areia eólica artificialmente cimentada

Methods for estimating failure envelopes applied to an artificially cemented aeolian sand

Romário Stéffano Amaro da Silva & Allan Benício Silva de Medeiros
Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Brasil

Valteson da Silva Santos
Campus Patos, IFPB, Brasil

Thalita Costa Maurício de Souza & **Olavo Francisco dos Santos Júnior**
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UFRN, Brasil. olavo.santos@ufrn.br

Ricardo Nascimento Flores Severo
Campus Natal Central, IFRN, Brasil. ricardo.severo@ifrn.edu.br

RESUMO: A envoltória de resistência consiste em um dos elementos mais importantes de projetos geotécnicos. A sua obtenção normalmente é feita por meio de ensaios de compressão triaxial. Há algumas propostas de obtenção da envoltória de solos cimentados a partir de ensaios de compressão simples associados a ensaios de compressão diametral. Nesse contexto, o trabalho objetiva avaliar como métodos para estimativa de envoltórias de resistência ao cisalhamento disponíveis na literatura se adequam ao caso de uma areia eólica proveniente de dunas da cidade de Natal, Estado do Rio Grande do Norte, Brasil e artificialmente cimentada com uso de cimento Portland. Esse material pode ser aplicado a obras rodoviárias ou como substrato para fundações superficiais, por exemplo. Para tanto, dados de ensaios de resistência à compressão simples e de resistência à compressão diametral de amostras preparadas com diversas combinações entre teor de cimento e índice de vazios de moldagem foram utilizados para gerar as envoltórias de resistência estimadas, a partir dos métodos propostos por Mitchell (1981), Consoli et al. (2012) e Consoli (2014). As envoltórias estimadas foram comparadas com envoltórias determinadas experimentalmente, a partir de ensaios de compressão triaxial drenados. Foi possível concluir que o método proposto por Consoli (2014) tende a superestimar a capacidade resistente do material, enquanto a proposta de Consoli et al. (2012) tende a subestimá-la. De maneira geral, o método proposto por Mitchell (1981), com ângulo de atrito igual a 40°, forneceu o melhor ajuste.

PALAVRAS-CHAVE: Solo cimentado, areia eólica, cimento Portland, melhoramento de solos

ABSTRACT: The failure envelope is a key element in a geotechnical project. Its assessment is typically achieved through triaxial compression tests. There are some proposals for estimating the failure envelope of cemented soils from unconfined compression tests and Brazilian tests. In this context, this paper aims to assess how methods for estimating failure envelopes available in the literature adapt to the case of an aeolian dune sand from Natal, Brazil, artificially cemented with Portland cement. This type of material can be used in road construction or as substrate for shallow foundations. Thus, data from unconfined compression tests and Brazilian tests of samples prepared with various combinations of cement content and void ratios were used to generate estimated failure envelopes, based on the Mitchell (1981), Consoli et al. (2012) and Consoli (2014) methods. The estimated envelopes were compared to experimental envelopes, assessed from drained triaxial compression tests. It was possible to conclude that the method proposed by Consoli (2014) tends to overestimate the strength of the material, while the proposal by Consoli et al. (2012) tends to underestimate it. The method proposed by Mitchell (1981), with a friction angle equal to 40°, provided the best fit.

KEYWORDS: Cemented soil, aeolian sand, Portland cement, soil improvement

1 INTRODUÇÃO

Solos cimentados são uma classe que se situa no meio termo entre a Mecânica dos Solos e a Mecânica das Rochas, uma vez que

parte importante do seu comportamento se deve ao efeito das ligações entre os grãos.

A produção de um solo artificialmente cimentado, com a intenção de melhorar o seu comportamento, é um recurso utilizado

quando não há material ou combinação de materiais disponíveis que atendam aos requisitos de resistência mecânica, deformabilidade, permeabilidade e durabilidade requeridas para o projeto (Foppa 2005). Essa solução tem sido aplicada com bastante sucesso em obras de proteção de taludes, na contenção de plumas de contaminação, na construção de bases de pavimentos rodoviários e ferroviários, e no encapsulamento de solos contaminados (Floss 2012). Ainda, destaca-se o emprego de solos artificialmente cimentados como camada de suporte para fundações superficiais e como mitigação de susceptibilidade à liquefação (Consoli *et al.* 2012).

As propriedades de um solo artificialmente cimentado estão relacionadas principalmente com o tipo e quantidade de agente cimentante, bem como com a porosidade do material moldado e a quantidade de água adicionada à mistura. São também influenciadas por fatores tais como o tipo de solo e as condições de cura do material (Clough *et al.* 1981, Consoli *et al.* 2007, 2009, 2011, 2012 Fonseca *et al.* 2009, Severo 2011, Rios *et al.* 2012, Fontoura, 2015).

Na prática da engenharia, é comum que o solo artificialmente cimentado tenha seu processo de dosagem e de controle tecnológico baseado em ensaios de fácil e rápida execução, tais como o ensaio de compressão simples ou o ensaio de compressão diametral. Esses ensaios, embora econômicos, geralmente não são representativos das reais condições de sollicitação as quais o material estará submetido. Nesse contexto, a resistência ao cisalhamento do material costuma ser uma referência mais adequada para o dimensionamento e a verificação necessários.

Consoli *et al.* (2007) estabeleceram um método racional de dosagem de solos artificialmente cimentados, o qual se baseia na correlação entre a resistência à compressão simples (σ_c) do material e um parâmetro definido como a razão entre a porosidade do material e o teor volumétrico de agente cimentante, denominado fator vazios cimento (n/C_{iv}). Consoli *et al.* (2011) estenderam essa relação para o caso da resistência à tração (σ_t).

Em termos de parâmetros representativos da resistência ao cisalhamento do solo, o intercepto coesivo efetivo (c') e o ângulo de atrito interno efetivo (ϕ') oriundos da envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb são mais comumente empregados. Na falta de dados experimentais que subsidiem a determinação de uma envoltória de ruptura, há na literatura sugestões de métodos capazes de fornecer estimativas de envoltórias baseadas na resistência à compressão simples e à tração do material. Tais métodos são interessantes do ponto de vista prático, e podem ser úteis para etapas preliminares de projeto. Cumpre destacar que, apesar da existência de tais métodos, eles não são substitutos de uma campanha de caracterização experimental abrangente de um material a ser empregado.

Mitchell (1981) estimou os parâmetros que definem a envoltória de Mohr-Coulomb para solos granulares artificialmente cimentados, especificando um intervalo de valores de ϕ' contidos entre 40° e 45°, e c' dado por:

$$c' = 0,225\sigma_c \quad (1)$$

Tendo em vista as particularidades associadas ao comportamento de solos cimentados, alguns trabalhos sugerem a adoção de envoltórias de ruptura alternativas. É o caso da proposta de Consoli *et al.* (2012), baseada no critério de resistência de

Griffith. A envoltória de resistência, nesse caso, baseia-se na seguinte função:

$$\tau^2 = 4\sigma_t^2 + 4\sigma_t\sigma \quad (2)$$

onde τ é a tensão cisalhante, σ_t é a resistência à tração e σ é a tensão normal.

Consoli (2014), através de uma dedução analítica, também propôs um método de estimativa da envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb para solos arenosos artificialmente cimentados, baseado nas resistências à compressão e à tração do material saturado. Nesse sentido, os parâmetros c' e ϕ' são definidos a partir das seguintes relações:

$$\phi' = \arcsen(1 - 4\xi/1 - 2\xi) \quad (3)$$

$$c' = (\sigma_c[1 - 4\xi/1 - 2\xi]) / (2\cos[\arcsen(1 - 4\xi/1 - 2\xi)]) \quad (4)$$

onde σ_c é a resistência à compressão simples e ξ é a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão simples do material

Conforme a variedade de métodos disponíveis, a avaliação quanto à adequação de cada um desses ao tipo de solo e de agente cimentante utilizados é necessária para validar a sua aplicação. Dessa forma, o presente trabalho objetiva analisar a acurácia dos três métodos de estimativa de envoltórias de resistência ao cisalhamento destacados, aplicados a uma areia eólica oriunda de dunas. Essa areia é abundante na cidade de Natal, no nordeste brasileiro, e foi objeto de trabalhos que caracterizaram o seu comportamento mecânico, inclusive na condição de artificialmente cimentada com uso de cimento Portland (Fontoura 2015, Medeiros 2019, Silva 2021, Fontoura *et al.* 2021). A areia artificialmente cimentada pode ser aplicada principalmente a obras rodoviárias ou como solução de substrato para fundações rasas. Em um contexto no qual os parâmetros de resistência ao cisalhamento do material foram determinados para um número limitado de combinações entre teor de cimento e porosidade, a validação de um método de estimativa de envoltória de resistência pode ser uma ferramenta útil para balizar especialmente a etapa de dosagem do solo cimentado, uma vez definida a magnitude requerida de resistência ao cisalhamento para atender às necessidades do projeto.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Para a determinação das envoltórias estimadas, utilizou-se dados de ensaios realizados em amostras de um solo cimentado produzido a partir de uma areia eólica oriunda de dunas, coletada na cidade de Natal, no nordeste brasileiro. Na Figura 1, apresentam-se as curvas granulométricas obtidas para o solo em três trabalhos distintos (Fontoura 2015, Medeiros 2019 e Silva 2021). A Tabela 1 indica dados resultantes da distribuição granulométrica e a massa específica dos sólidos da areia eólica.

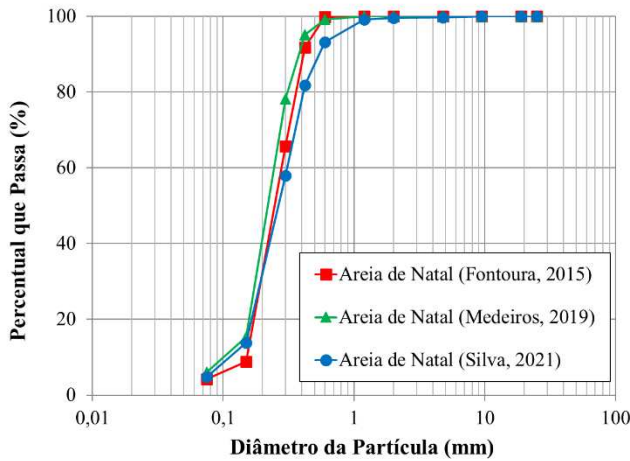


Figura 1. Curva granulométrica da areia eólica (Adaptado de Silva 2021)

O solo é uma areia quartzosa, mal graduada (SP), segundo o Sistema de Classificação Unificado dos Solos (SUCS), pertencente ao grupo A3, segundo o sistema de classificação da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO).

Tabela 1. Caracterização da areia eólica

	Fontoura (2015)	Silva (2021)
Coefficiente de uniformidade	1,86	2,65
Coefficiente de curvatura	0,97	1,16
Diâmetro médio	0,25	0,27
Massa específica dos sólidos (g/cm ³)	2,62	2,63

O agente cimentante utilizado para a produção do solo artificialmente cimentado foi um cimento Portland de Alta Resistência Inicial, o qual apresenta expressivo ganho de resistência ainda nos primeiros dias de cura, o que possibilita agilidade no manuseio das amostras.

2.2 Métodos

Neste trabalho, empregou-se os métodos propostos por Mitchell (1981), Consoli et al. (2012) e Consoli (2014) para determinar envoltórias de resistência ao cisalhamento estimadas para a areia eólica descrita, a partir da inclusão de cimento Portland como agente cimentante. Nesse contexto, utilizou-se os dados provenientes dos trabalhos de Fontoura (2015) e Silva (2021) para obter os parâmetros necessários.

Para todos os ensaios, as amostras foram moldadas com diâmetro de aproximadamente 50 ± 1 mm e altura de 100 ± 5 mm. As misturas foram preparadas com as quantidades necessárias de

areia, água destilada e cimento, para atingir o percentual de cimento, teor de umidade e índice de vazios estabelecidos para cada amostra. As misturas solo-cimento-água foram compactadas em um molde cilíndrico tripartido. As amostras foram compactadas em quatro camadas, visando atingir o índice de vazios especificado para cada amostra. Foram moldados três corpos de prova para cada condição de ensaio.

Após a moldagem, as amostras foram curadas por 30 dias. Durante a cura, as amostras permaneceram em condições de alta umidade em uma caixa úmida com fundo coberto com solução saturada areia para evitar a evaporação prematura da água necessária para a hidratação do cimento. As amostras foram curadas 30 dias para garantir que as amostras atingiram a máxima resistência possível.

Silva (2021) realizou ensaios de compressão simples e compressão diametral em amostras moldadas em combinações entre vários teores de cimento, em relação à massa de solo seco da mistura, e índices de vazios de moldagem. A partir disso, obteve as funções que relacionam a resistência à compressão simples (σ_c) e a resistência à tração (σ_t) ao fator vazios/cimento (n/C_{iv}).

$$\sigma_c \text{ (kPa)} = 124796(n/C_{iv})^{-2,0} \quad (5)$$

$$\sigma_t \text{ (kPa)} = 13454(n/C_{iv})^{-2,0} \quad (6)$$

A partir das equações definidas, determinou-se a razão entre a resistência à tração e a resistência à compressão simples do material (ξ), de tal modo que:

$$\xi = [13454(n/C_{iv})^{-2,0}]/[124796(n/C_{iv})^{-2,0}] = 0,11 \quad (7)$$

A partir das Equações 5 e 6, e do valor de ξ , foi possível estimar as envoltórias de resistência ao cisalhamento do material, ao empregar as Equações 1, 2, 3 e 4. Essas envoltórias foram comparadas com as determinadas experimentalmente por Fontoura (2015), que realizou ensaios de compressão triaxial adensados hidrosticamente e drenados (CID).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 2, 3 e 4 apresentam a envoltórias experimental e os círculos de Mohr relativos a cada ensaio triaxial drenado comparados com as envoltórias estimadas pelos métodos de Mitchell (1981), Consoli et al. (2012) e Consoli (2014). O critério de ruptura adotado para os casos dos ensaios de compressão triaxial drenados foi o de máxima tensão desviatória.

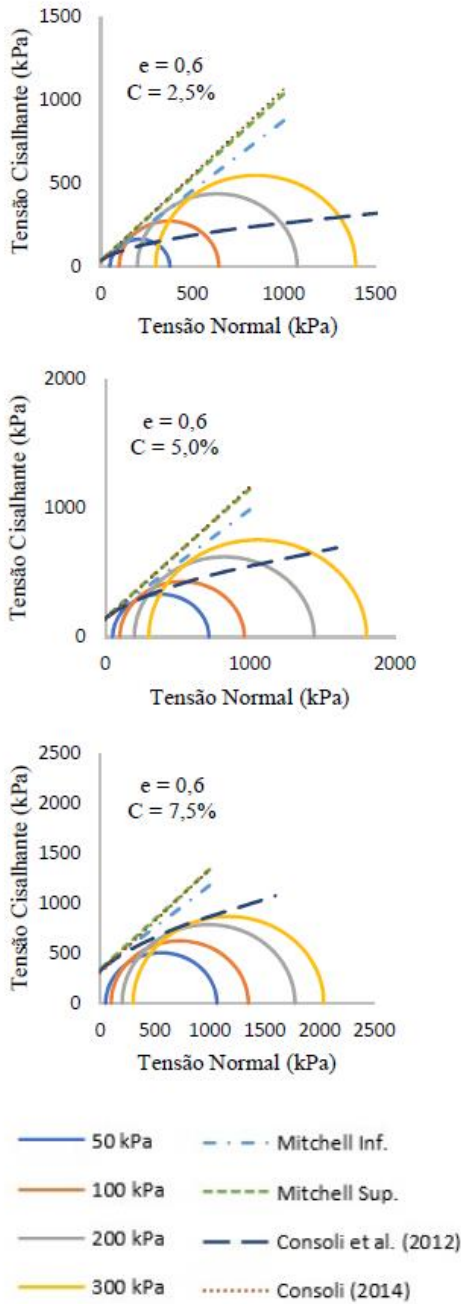


Figura 2. Envoltórias experimental a partir de ensaio CID e estimadas da areia cimentada moldada com variados teores de cimento e índice de vazios de 0,6.

Para o caso do método de Mitchell (1981), representou-se os limites superior e inferior, relativos aos ângulos de atrito efetivos máximo e mínimo estabelecidos pelo intervalo citado pelo autor. Nesse contexto, a envoltória denominada “Mitchell Inf.” Corresponde ao ângulo de atrito efetivo mínimo, igual a 40°. A envoltória denominada “Mitchell Sup.” corresponde ao ângulo de atrito efetivo máximo, igual a 45°.

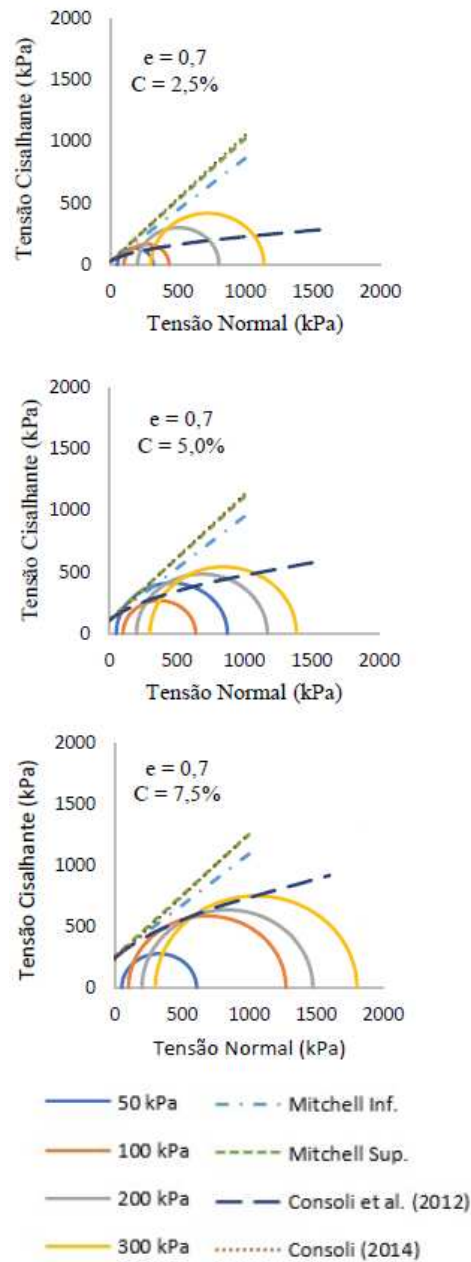


Figura 3. Envoltórias experimental a partir de ensaio CID e estimadas da areia cimentada moldada com variados teores de cimento e índice de vazios de 0,7.

O conjunto de ensaios de compressão triaxial contou com corpos de prova moldados com índices de vazios de 0,6, 0,7 e 0,8. Além disso, com teores de cimento de 2,5%, 5,0% e 7,5%, em relação à massa de solo seco da mistura. Nesse contexto, a comparação foi realizada para os resultados dos ensaios de cada grupo de amostras produzidas a partir da combinação entre essas duas variáveis.

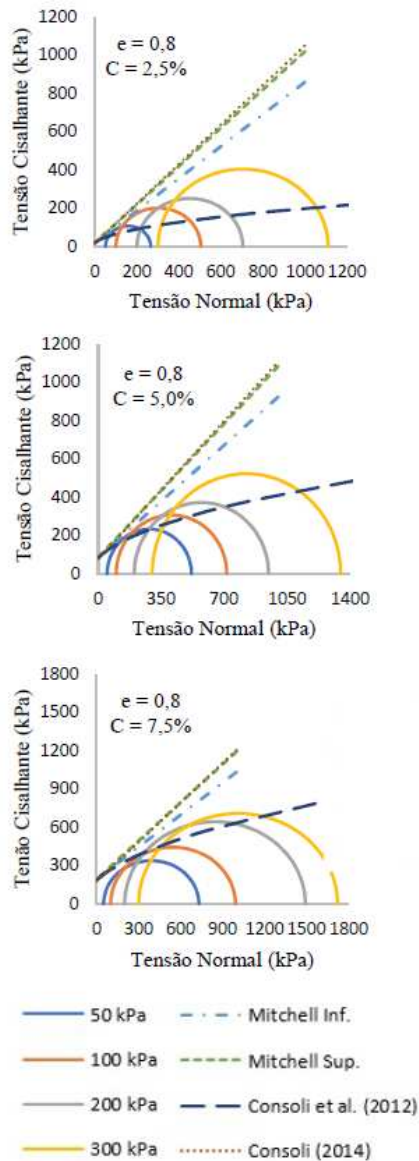


Figura 4. Envoltórias experimental a partir de ensaio CID e estimadas da areia cimentada moldada com variados teores de cimento e índice de vazios de 0,8.

Observa-se que o método de Consoli (2014) tende a superestimar a resistência ao cisalhamento do material. O valor de $\xi = 0,11$ resulta, a partir desse método, em um ângulo de atrito

igual a 45,9°, superior ao máximo sugerido por Mitchell (1981). Para o caso do solo estudado, a estimativa proposta por Consoli (2014) gera uma envoltória de resistência ao cisalhamento concordante com a envoltória determinada pelo método de Mitchell (1981), quando considerado o ângulo de atrito efetivo máximo do intervalo sugerido, igual a 45°.

Esses resultados divergem dos apresentados por Consoli (2014), ao comparar os resultados do seu método com os do proposto por Mitchell (1981), para o caso de uma areia fina artificialmente cimentada com cimento Portland, com $\xi = 0,15$. O método proposto pelo autor resultou em interceptos coesivos efetivos na mesma ordem de grandeza do método comparado, mas ângulos de atrito efetivos menores do que 40°, limite inferior de Mitchell (1981). É importante notar que no método de Consoli (2014), menores valores de ξ resultam em maiores valores de ângulo de atrito efetivo. Nesse contexto, o menor valor de ξ referente ao material estudado neste trabalho, quando comparado com o material estudado por Consoli (2014), justifica o elevado valor de ângulo de atrito, próximo do limite superior proposto por Mitchell (1981). Essa característica destaca as limitações do método, baseado exclusivamente em uma abordagem teórica, quando generalizado para diferentes tipos de solos.

Para a maioria dos casos, a envoltória proposta por Consoli *et al.* (2012) tende a subestimar a resistência ao cisalhamento das amostras. O ajuste apenas se mostra adequado para o caso de amostras moldadas com teor de cimento igual a 7,5% e índice de vazios de 0,6 ou 0,7. O critério de Griffith, no qual se baseia o método de Consoli *et al.* (2012), foi originalmente formulado para materiais com comportamento frágil. Nesse contexto, pode-se supor que as combinações com menores níveis de cimento ou um maior índice de vazios resultam em materiais com menores níveis de cimentação, a ponto de a ductilidade do material ser superior ao limite para a aplicabilidade do critério. Ou seja, para a maioria das amostras, o nível de cimentação não se mostrou elevado o suficiente para condicionar de maneira relevante os mecanismos associados à ocorrência da ruptura.

Para a grande maioria das amostras, a estimativa de envoltória de Mitchell (1981) que considera o valor de ângulo de atrito efetivo igual a 40° (representado como “Mitchell Inf.”) é a que mais se aproxima dos resultados dos ensaios. Tendo em vista o menor valor de ξ da areia eólica de Natal artificialmente cimentada, o método empírico de Mitchell (1981) representou a melhor opção para uma estimativa mais acurada, uma vez que fornece uma faixa possível de valores de ângulo de atrito efetivo, ao invés de uma equação que fornece um valor único. O ângulo de atrito efetivo de 40° é aproximadamente 13% inferior ao obtido por meio da técnica elaborada por Consoli (2014). Entretanto, é importante ressaltar que o limite inferior do ângulo de atrito efetivo proposto por Mitchell (1981) ainda superestima o valor consideravelmente a resistência ao cisalhamento do material com baixos níveis de cimentação. Além disso, a incerteza referente ao critério para a escolha do ângulo de atrito dentro da faixa de valores sugerida pelo autor pode ocasionar uma acurácia ainda menor na envoltória estimada, tendo em vista que, para o material em questão, o valor inferior foi o mais adequado.

Os valores dos parâmetros obtidos a partir dos métodos experimentais, confrontados com os parâmetros que descrevem as envoltórias de Mohr-Coulomb determinadas experimentalmente por Fontoura (2015), são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Comparação entre os parâmetros determinados experimentalmente e os parâmetros oriundos das estimativas de envoltórias

e	C (%)	Fontoura (2015)		Mitchell (1981)		Consoli <i>et al.</i> (2012)		Consoli (2014)	
		c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
	2,5	52,0	37,3	35,3	40,0	33,8	-	31,8	45,9
0,6	5,0	122,5	39,1	149,4	40,0	143,1	-	134,5	45,9
	7,5	230,8	36,5	342,3	40,0	328,1	-	308,2	45,9
	2,5	45,8	31,9	27,3	40,0	26,1	-	24,6	45,9
0,7	5,0	115,8	32,7	112,6	40,0	107,9	-	101,4	45,9
	7,5	205,7	34,2	256,0	40,0	245,3	-	230,5	45,9
	2,5	24,0	32,5	20,7	40,0	19,8	-	18,6	45,9
0,8	5,0	87,3	32,6	85,7	40,0	82,1	-	77,1	45,9
	7,5	138,7	37,6	196,0	40,0	187,8	-	176,4	45,9

e – Índice de vazios; C – Teor de cimento; c' – Intercepto coesivo; ϕ' – Ângulo de atrito interno efetivo

Para o caso da envoltória proposta por Consoli et al. (2012), o conceito de ângulo de atrito interno efetivo não se aplica, mas o valor do intercepto coesivo efetivo do material foi relacionado com o valor da tensão cisalhante para a condição de tensão normal nula.

É possível perceber a semelhança entre os valores de intercepto coesivo obtidos a partir dos três métodos. Os três métodos tendem a gerar valores de intercepto coesivo mais próximos daqueles determinados por Fontoura (2015) para as amostras com 5% de teor de cimento, enquanto tendem a subestimar os valores correspondentes às amostras com teor de cimento igual a 2,5% e superestimar os valores relacionados às amostras com teor de cimento igual a 7,5%.

4 CONCLUSÕES

Solos artificialmente cimentados são uma solução de melhoramento de solos possível de ser empregada em diversos tipos de obras geotécnicas, mas que demandam uma campanha de ensaios capaz de caracterizar de maneira adequado o comportamento mecânico do material. Em etapas preliminares de projeto, é possível estimar a resistência ao cisalhamento de solos artificialmente cimentados a partir do resultado de ensaios de laboratório mais rápidos e econômicos, tais como o ensaio de compressão simples e o ensaios de compressão diametral.

Neste trabalho, comparou-se envoltórias de resistência ao cisalhamento determinadas experimentalmente com envoltórias de resistência ao cisalhamento estimadas a partir dos métodos de Mitchell (1981), Consoli et al. (2012) e Consoli (2014), para o caso de uma areia eólica artificialmente cimentada com uso de cimento

Portland. Foi possível avaliar que o método proposto por Consoli (2014) tende a superestimar a capacidade resistente do material, enquanto a proposta por Consoli et al. (2012) tende a subestimá-la. De maneira geral, o método proposto por Mitchell (1981), com ângulo de atrito interno efetivo de 40°, resultou em uma melhor aproximação com relação à envoltória de Mohr-Coulomb determinada experimentalmente.

O método proposto por Consoli *et al.* (2012) resultou em ajustes satisfatórios para o caso das amostras moldadas com índices de vazios iguais a 0,6 e 0,7, e teor de cimento igual a 7,5%. O resultado sugere que pode haver um limite de aplicabilidade para o método, que deve ser função da intensidade da cimentação do material.

5 REFERÊNCIAS

- Clought, W.; Sitar, N.; Bachus, R. C.; Rad, N. S. Cemented Sand under Static Loading. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, v. 107, n. 6, 1981.
- Consoli, N. C.; Foppa, D.; Festugato, L.; Heineck, K. S. Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils. ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 133, n. 2, 2007.
- Consoli, N. C.; Fonseca, A. V.; Cruz, R. C.; Heineck, K. S. Fundamental Parameters for the Stiffness and Strength Control of Artificially Cemented Sand. ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 135, n. 9, 2009.
- Consoli, N. C.; Fonseca, A. V.; Cruz, R. C.; Silva, S. R. Voids/Cement Ratio Controlling Tensile Strength of Cemented-Treated Soils. ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 137, n. 11, 2011.
- Consoli, N. C., Cruz, R. C., Consoli, B. S., Maghous, S. Failure envelope of artificially cemented sand. Géotechnique, London, v. 62, n. 6, 2012.
- Consoli, N. C. A method proposed for the assessment of failure envelopes of cemented sandy soils. ELSEVIER, Engineering Geology, v. 169, 2014.
- Floss, M. F. Parâmetros de controle da resistência e rigidez de solos granulares artificialmente cimentados. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – UFRGS. 191f. Porto Alegre-RS, 2012.
- Foppa, D. Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – UFRGS. 143f. Porto Alegre-RS, 2005.
- Fonseca, A. V.; Cruz, R. C.; Consoli, N. C. Strength properties of sandy soil-cement admixtures. SPRINGER, Geotechnical and Geological Engineering, v. 27, n. 6, 2009.
- Fontoura, T. B. Comportamento tensão – deformação e resistência ao cisalhamento de uma areia de duna cimentada artificialmente. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – UFRN. 168 f. Natal – RN, 2015.
- Fontoura, T. B.; Santos Jr, O. F.; Severo, R. N. F.; Coutinho, R.Q. Drained behaviour of artificially cemented dune aeolian sand, Geomechanics and Geoengineering, v. 17, n. 6., 1695-1706, 2021.
- Medeiros, J. K. Comportamento Mecânico de uma Areia de Duna Cimentada Artificialmente na Cidade de Natal-RN. Monografia de Graduação em Engenharia Civil - UFRN. 61 f. Natal – RN, 2019.
- Mitchell, J. K., Soil improvement - state-of-the-art report. Proc., 10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Eng., vol. 4. International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, pp. 509–565. 1981.
- Rios, S.; Fonseca, A. V.; Baudet, B. A. Effect of the porosity/cement on the compression of cemented soil. ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 138, n. 11, 2012.
- Severo, R. N. F. Caracterização geotécnica da falésia da Ponta do Pirambu

em Tibau do Sul – RN considerando a influência do comportamento dos solos nos estados indeformado e cimentado artificialmente. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – UFPE. 280 f. Recife – PE, 2011.

Silva, R. S. A. Comportamento Drenado e Não Drenado de Sedimentos Eólicos Artificialmente Cimentados. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil – UFRN. 68 f. Natal-RN. 2021.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.