

Efeito da adição de fibras na resposta ante carregamentos cíclicos em areias limpas

Jorge Hernán Flórez Gálvez

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, [jhfloreszg@gmail.com](mailto:jhflorezg@gmail.com)

Lucas Festugato

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, lucas@ufrgs.br

Nilo Cesar Consoli

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, consoli@ufrgs.br

RESUMO: É avaliado, de forma experimental, o efeito da adição de fibras poliméricas em uma areia uniforme quartzosa quando submetida a carregamentos cíclicos. Foram executados ensaios triaxiais cíclicos CIU com carga controlada, na areia com dois índices de vazios, com e sem a adição de fibras, mantendo constante a tensão efetiva inicial e a frequência de carga, e variando apenas a tensão desvio cíclica. No total foram executados doze ensaios triaxiais, todos até a ruptura da amostra, obtendo para cada ensaio as curvas de evolução da poropressão, deformações permanentes, módulo de elasticidade secante. Foram obtidas também as curvas de razão de tensão cíclica (CSR) para cada índice de vazios avaliado, com e sem fibras. A adição de fibras melhorou a estabilidade dos materiais ao diminuir a taxa de aumento das deformações permanentes e de incremento da poropressão, conseguir uma maior preservação dos módulos de elasticidade secantes, e por fim, incrementar o número máximo de ciclos de carga em todos os casos quando comparados à condição sem fibras. As fibras ainda conseguiram ajudar a controlar as deformações e a integridade dos corpos de prova nos estágios iniciais da liquefação, quando a tensão efetiva alcança valores inferiores a 10 kPa.

PALAVRAS-CHAVE: Solos reforçados com fibras, Carregamentos cíclicos, Triaxial cíclico, Melhoria de solos.

1 INTRODUÇÃO

Os estudos para incorporação de diferentes agentes para melhoramento dos solos existentes, sejam estes produzidos com propósitos comerciais ou originados como subprodutos de outras atividades, vem aumentando tanto em número como também nos tipos de materiais incorporados, mas também vem ganhando importância a determinação de efeitos sob diferentes tipos de solicitações com os respectivos parâmetros a serem determinados em cada caso.

Para o caso de estudo de solos reforçados com fibras, vários têm sido os estudos voltados para a caracterização dos diferentes efeitos decorrentes da adição, tanto de diferentes tipos de fibras como de diferentes comprimentos (Casagrande, 2001, 2005; Consoli, Casagrande, & Coop,

2005; Consoli, Heineck, Casagrande, & Coop, 2007; Diambra & Ibraim, 2015; Diambra, 2010; Festugato, 2008). A maioria destes estudos foram feitos considerando condições estáticas de carregamento.

O emprego destes materiais em locais com regimes cíclicos de carregamento, seja pela presença de equipamentos ou pela ação de sismos ou marés, vem motivando de forma crescente o estudo da resposta destes materiais (Festugato, Consoli, & Fourie, 2015; Festugato, 2011; M. H. Maher & Ho, 1993; Mohamad H. Maher & Woods, 1990).

O presente estudo tem por objetivo a avaliação experimental do efeito da adição de fibras em uma areia sob a ação de carregamentos cíclicos em condição não drenada, até atingir a sua ruptura. São considerados dois índices de vazios na execução dos ensaios para visualizar

também seu efeito no comportamento do material.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi dividido em duas etapas: a primeira correspondeu à caracterização física dos materiais a serem avaliados. Já a segunda parte esteve centrada na execução de ensaios triaxiais cíclicos com carga controlada, necessários para a avaliação experimental dos efeitos estudados.

2.1 Materiais

Foi empregada uma areia quartzosa de granulometria uniforme proveniente do sul do Brasil (Figura 1). O material foi coletado no município de Osorio, próximo da cidade de Porto Alegre. As principais propriedades físicas da areia se encontram sumarizadas na Tabela 1.

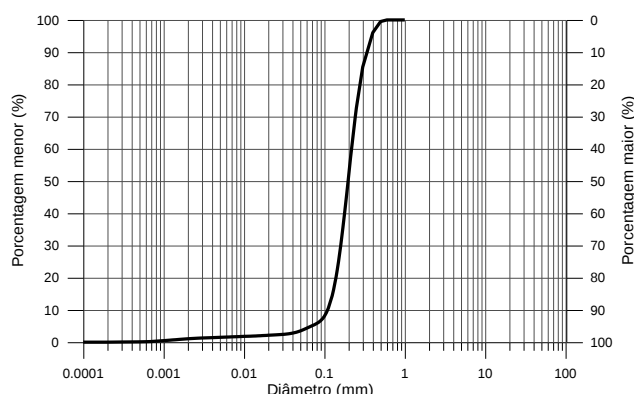


Figura 1. Distribuição granulométrica da areia empregada nos ensaios

Tabela 1. Índices físicos da areia empregada nos ensaios

Índice Físico	Valor
Massa específica real dos grãos (γ_s)	26,2 kN/m ³
Coefficiente de uniformidade, C_u	2,0
Coefficiente de curvatura, C_c	1,1
Diâmetro efetivo, D_{10}	0,11 mm
Diâmetro médio, D_{50}	0,20 mm
Índice de vazios mínimo, $e_{\text{mínimo}}$	0,6
Índice de vazios máximo, $e_{\text{máximo}}$	0,9

Foram empregadas fibras de polipropileno, mantendo constantes as suas propriedades ao longo da pesquisa. O teor de material foi mantido constante em 0,5% do peso seco da areia. As propriedades geométricas e mecânicas das fibras são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades físicas e mecânicas das fibras empregada nos ensaios

Propriedade física e/ou mecânica	Valor
Espessura	0,100 mm
Comprimento	50 mm
Índice aspecto	500
Densidade	0,91
Módulo secante (médio)	10 GPa
Resistência à tração última (média)	200 MPa

Em todos os casos foi empregada água destilada para conseguir a umidade de compactação, a qual foi mantida constante em 10%, calculada com relação ao peso seco da areia mais as fibras, quando usadas.

2.2 Preparação e ensaio dos corpos de prova

O processo de moldagem dos corpos de prova foi executado inicialmente com a mistura dos materiais, adicionando a totalidade da água à areia, feita a homogeneização do produto. Para o caso de corpos de prova reforçados com fibra, a quantidade específica foi adicionada após a homogeneização da umidade, como recomendado por Festugato (2008).

A compactação dos corpos de prova foi feita atendendo os critérios elencados por Ladd (1978). As misturas foram compactadas de forma estática, em três camadas, dentro de um molde tripartido de 100 mm de diâmetro e 200 de altura aproximadamente.

Em razão da falta de coesão dos corpos de prova, cada um foi moldado dentro das membrana de látex necessária para a execução do ensaio triaxial.

Durante o processo de montagem de cada corpo de prova na câmara triaxial, foi mantido o molde de compactação até ser aplicada uma sucção entre 6 e 8 kPa, a qual permitisse manter a integridade da amostra até o momento da aplicação da pressão de confinamento.

No total foram executados doze (12) ensaios triaxiais consolidados – não drenados. O processo de cisalhamento cíclico como carga controlada, atendeu ao descrito na Norma ASTM D5311 (2011). As condições de moldagem e ensaio são apresentadas na Tabela 3. Cabe aclarar que para cada condição foi ensaiado um corpo de prova com fibra e outro sem fibra.

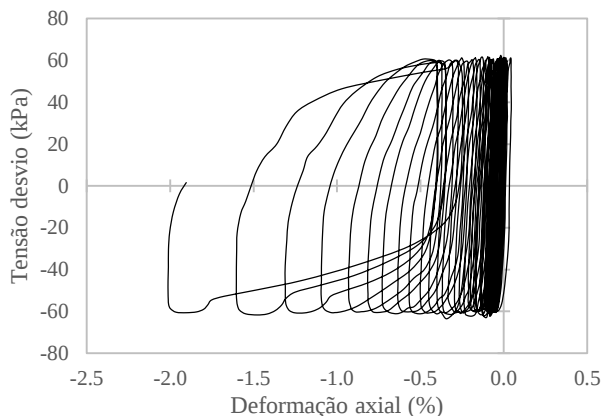
Tabela 3. Condições de moldagem e ensaio

Índice de vazios	σ_D (kPa)	Frequência (Hz)	Onda de carga	p'_0
0.75	± 20	0.1	Senoidal	100
0.75	± 40			
0.75	± 60			
0.63	± 40			
0.63	± 60			
0.63	± 80			

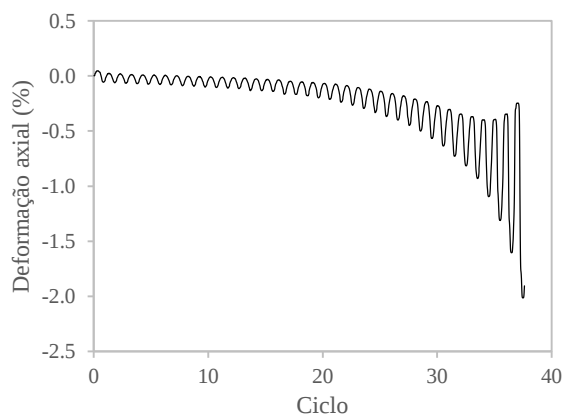
A condição de ruptura foi estabelecida quando a tensão efetiva atingida por cada corpo de prova foi menor a 10 kPa.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

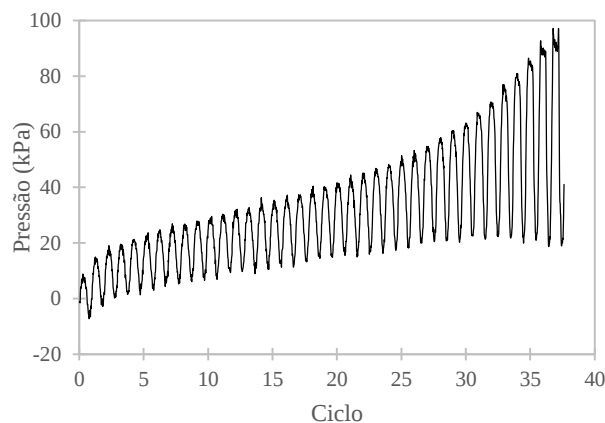
Em todos os casos os corpos de prova foram levados até a ruptura, permitindo além da obtenção do número de ciclos de carga necessários para atingir ruptura, a evolução do comportamento durante o ensaio. Na Figura 2 (partes a, b e c) é apresentado um exemplo dos resultados obtidos para um dos ensaios executados em um corpo de prova sem adição de fibra.



(a) Comportamento tensão Vs. deformação axial



(b) Evolução das deformações axiais ao longo do ensaio



(c) Evolução da poropressão ao longo do ensaio

Figura 2. Exemplo de resultados obtidos em corpo de prova ensaiado com tensão desvio ± 60 kPa, $e = 0,63$, sem adição de fibras

Os valores de número de ciclos de carga obtidos (N_f) para a totalidade dos ensaios são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Número máximo de ciclos por ensaio

Índice de vazios	σ_D (kPa)	N_f	
		0,5% de fibra	Sem fibra
0.75	± 20	635	234
0.75	± 40	14	6
0.75	± 60	3	1
0.63	± 40	1637	962
0.63	± 60	89	36
0.63	± 80	13	11

Segundo os resultados da tabela anterior, em todos os casos houve incremento no número máximo de ciclos, tanto pela adição de fibras, como pela diminuição no índice de vazios (ensaios com $\sigma_D \pm 40$ e ± 60 kPa).

Houve, como esperado, diminuição no número máximo de ciclos com o aumento na tensão desvio cíclica. Todos os corpos de prova ensaiados atingiram a ruptura ocasionada pelo processo de liquefação, deflagrado pelo incremento sucessivo da poropressão com cada ciclo de aplicação de carga.

No entanto, a tendência de acumulo de poropressões apresentou marcadas diferenças pela inclusão das fibras (ver Figura 3 para $e=0,63$ e Figura 4 para $e=0,75$), ao diminuir o ganho de diminuição da tensão efetiva, criando duas zonas de comportamento do material: a primeira de fluxo plástico e a segunda de colapso incremental (Werkmeister, Dawson, & Wellner, 2005).

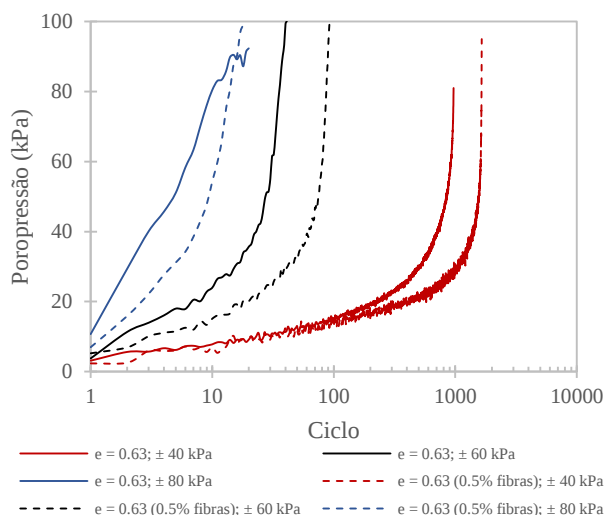


Figura 3. Comportamento da poropressão em corpos de prova com $e = 0,63$

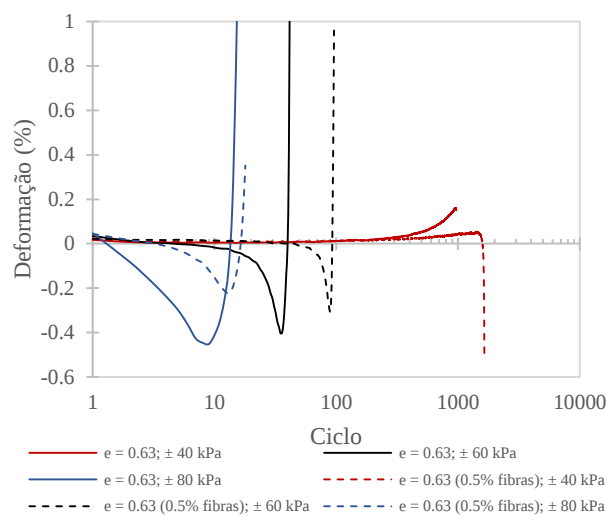


Figura 5. Desenvolvimento de deformações permanentes em corpos de prova com $e = 0,63$

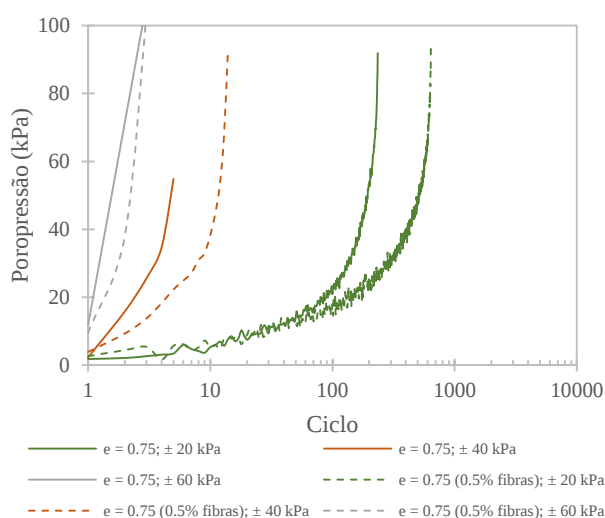


Figura 4. Comportamento da poropressão em corpos de prova com $e = 0,75$

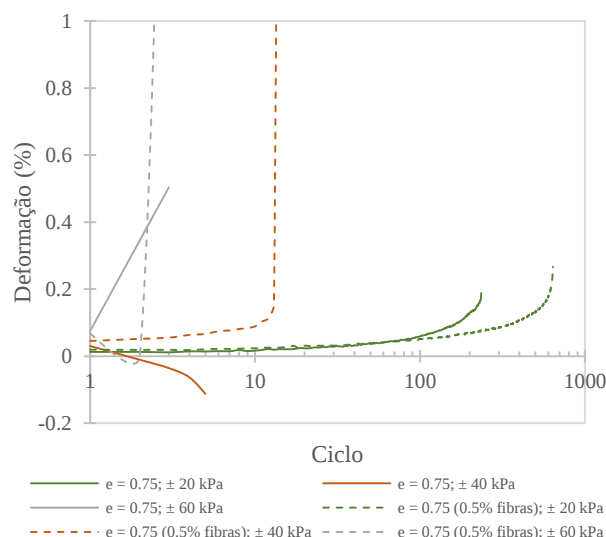


Figura 6. Desenvolvimento de deformações permanentes em corpos de prova com $e = 0,75$

A tendência de acúmulo de deformações permanentes apresentou uma situação distinta em função do índice de vazios: os corpos de prova de menor índice de vazios (0,63) (ver Figura 5) na maioria dos casos apresentaram uma maior tendência de acúmulo de deformações de tração até o momento da ruptura, situação distinta àquela apresentada pelas amostras com maior nível de vazios (0,75) (Figura 6).

Para os resultados das amostras da anterior figura se teve um forte efeito das fibras pela solicitação à tração durante o ensaio, o que não trouxe como resultado um maior valor de N_f para as amostras.

Para os corpos de prova ensaiados com as menores tensões desvio cíclicas, nas duas condições de compactação, houve tendência de acúmulo de deformações permanentes de compressão, o que gerou uma aparente perda do efeito das fibras até os materiais sem fibras atingirem a ruptura. Esta situação é também refletida pelas curvas de variação da poropressão em ambos os casos (ver Figuras 3 e 4).

A variação do módulo de elasticidade secante dos corpos de prova durante o ensaio reflete uma

grande preservação deste valor durante a parcela do ensaio em que o material apresenta baixo acúmulo de deformações permanentes (ver Figuras 7 e 8).

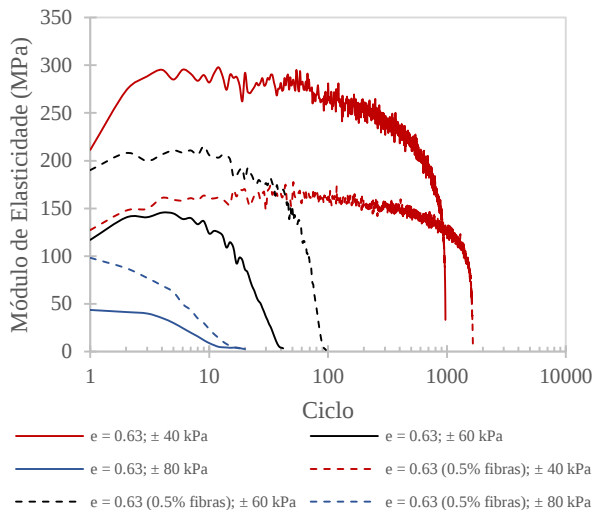


Figura 7. Evolução do módulo de elasticidade em corpos de prova com $e = 0,63$

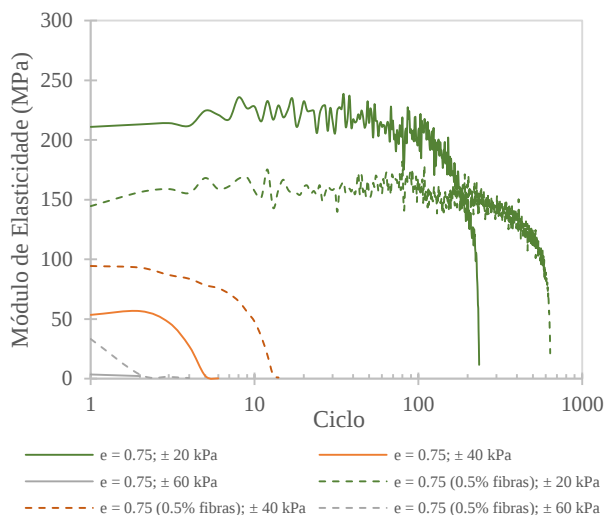


Figura 8. Evolução do módulo de elasticidade em corpos de prova com $e = 0,75$

Em função do nível de carregamento imposto ao material, existe um valor inicial do módulo secante apresentado pelo corpo de prova. Os maiores valores de módulo secante inicial, correspondentes às menores tensões desvio cíclicas, permitem diminuir sua degradação, incrementando assim o valor de N_f . A adição de fibras em cada caso trouxe alteração no valor no módulo secante inicial, aumentando nos casos de maior tensão desvio cíclica e diminuindo nos menores, porém apresentando menores

variações deste valor durante o ensaio.

As curvas determinadas a partir dos valores do CSR (equação 1) permitem observar o efeito da diminuição do índice de vazios e da adição de fibras à areia estudada (ver Figura 9).

$$CSR = \frac{\sigma_d}{2 \sigma'_c} \quad (1)$$

Onde:

σ_d : Tensão desvio (metade da amplitude do padrão de carga;

σ'_c : Tensão confinante efetiva inicial de ensaio.

Em ambos os casos, a adição de fibras acarretou a alteração das tendências de comportamento da matriz arenosa, sendo que os acréscimos na resistência ao carregamento cíclico são facilmente identificados pelos deslocamentos sofridos pelas curvas.

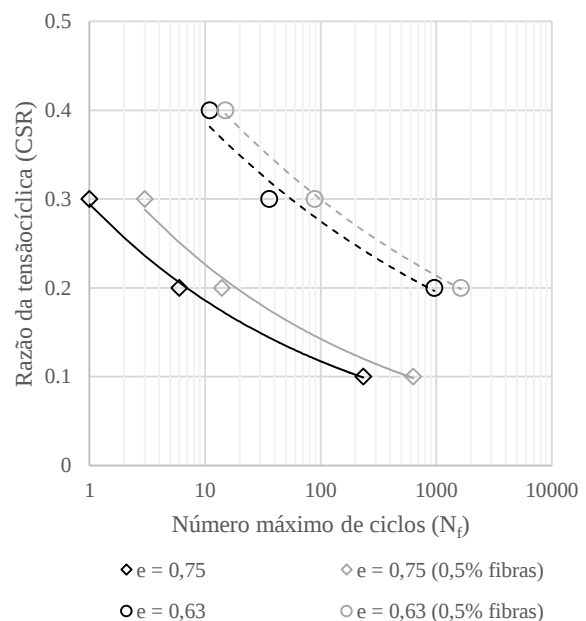


Figura 9. Razão da tensão cíclica (CSR) para as condições ensaiadas

Mesmo após ter atingido tensões efetivas próximas de zero, nos casos de corpos de prova adição de fibras, sua geometria foi mantida parcialmente, assim como a integridade ao não se apresentar ruptura física durante a parcela de extensão axial.

1. CONCLUSÕES

A partir das informações obtidas durante o presente estudo, pode-se dizer que:

A adição de fibras trouxe uma melhoria importante no desempenho do material sob ação de carregamentos cíclicos, não apenas pelo incremento no número máximo de ciclos de aplicação de carga, mas também pela preservação do módulo de elasticidade e controle do acúmulo de deformações permanentes durante o ensaio.

O efeito das fibras no controle da magnitude das deformações permanentes e do incremento das poropressões, mesmo em condições de compressão, confirma o estudo feito por Consoli *et al* (2005) sob condições de compressão isotrópica para o mesmo tipo de areia.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam a sua gratidão ao Laboratório de Ensaaios geotécnicos e geoambientais (LEGG) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul por permitir a execução dos ensaios necessários para produzir o presente estudo. Também querem agradecer à CAPES e ao CNPq pelo auxílio financeiro que permite a manutenção do grupo de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ASTM-D5311. (2011). *Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil. ... Cyclic Triaxial Strength of Soil*, *Annual Book of ASTM* American Society for Testing and Materials. <http://doi.org/10.1520/D5311-11.2>
- Casagrande, M. D. T. (2001). *Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais* (Dissertação (Mestrado em Engenharia)). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Casagrande, M. D. T. (2005). *Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações* (Tese (Doutorado em Engenharia)). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Consoli, N. C., Casagrande, M. D. T., & Coop, M. R. (2005). Effect of Fiber Reinforcement on the Isotropic Compression Behavior of a Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:11\(1434\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:11(1434))
- Consoli, N. C., Heineck, K. S., Casagrande, M. D. T., & Coop, M. R. (2007). Shear Strength Behavior of Fiber-Reinforced Sand Considering Triaxial Tests under Distinct Stress Paths. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(11), 1466–1469. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:11\(1466\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:11(1466))
- Diambra, A. (2010). *Fibre reinforced sands: Experiments and constitutive modelling* (Dissertation (Doctor of Philosophy)). University of Bristol, Bristol.
- Diambra, A., & Ibraim, E. (2015). Fibre-reinforced sand: interaction at the fibre and grain scale. *Géotechnique*, 65(4), 296–308. <http://doi.org/10.1680/geot.14.P.206>
- Festugato, L. (2008). *Análise do comportamento mecânico de um solo micro - reforçado com fibras de distintos índices de aspecto* (Dissertação (Mestrado em Engenharia)). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Festugato, L. (2011). *Comportamento de hidratação e resposta cisalhante cíclica de resíduo de mineração cimentado reforçado com fibras* (Tese (Doutorado em Engenharia)). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Festugato, L., Consoli, N. C., & Fourie, A. (2015). Cyclic shear behaviour of fibre-reinforced mine tailings. *Geosynthetics International*, 22(2), 196–206. <http://doi.org/10.1680/gein.15.00005>
- Ladd, R. S. (1978). Preparing Test Specimens Using Undercompaction. *Geotechnical Testing Journal*, 1(1), 16–23. <http://doi.org/10.1520/GTJ10364J>
- Maher, M. H., & Ho, Y. C. (1993). Behavior of Fiber-Reinforced Cemented Sand Under Static and Cyclic Loads. *Geotechnical Testing Journal*. <http://doi.org/10.1520/GTJ10054J>
- Maher, M. H., & Woods, R. D. (1990). Dynamic Response of Sand Reinforced with Randomly Distributed Fibers. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(7), 1116–1131. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1990\)116:7\(1116\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:7(1116))
- Werkmeister, S., Dawson, A. R., & Wellner, F. (2005). Permanent Deformation Behaviour of Granular Materials. *Road Materials and Pavement Design*, 6(1), 31–51. <http://doi.org/10.1080/14680629.2005.9689998>