

# Avaliação da adição de polietileno tereftalato e cimento portland para melhoria das propriedades de um solo

Carolina Dutra Nichele

Acadêmica do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do IFSC, Florianópolis/SC, Brasil,  
dutranychecarolina@gmail.com

Letícia Alves Pereira

Acadêmica do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do IFSC, Florianópolis/SC, Brasil,  
leticia.alvesp@hotmail.com

Fábio Krueger da Silva

Docente do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do IFSC, Florianópolis/SC, Brasil,  
fabio.krueger@ifsc.edu.br

Fernanda Simoni Schuch

Docente do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do IFSC, Florianópolis/SC, Brasil,  
fernandass@ifsc.edu.br

**RESUMO:** Devido a sua abundância e diversidade, os solos necessitam de procedimentos que o caracterizam e visam determinar sua aplicação e comportamento. Sendo assim, o presente trabalho tem por finalidade comparar a variação da densidade seca máxima e do seu respectivo teor de umidade do solo melhorado com adição de 0,5% e 1,0% de fibra de PET e, 2% e 4% de adição de cimento Portland, bem como avaliar o acréscimo na tensão máxima de ruptura ( $q_u$ ) obtida a partir das melhorias. Ensaiou-se o solo coletado em campo seguindo os requisitos propostos nas normas brasileiras da ABNT, de modo a ser caracterizado a partir dos ensaios de massa específica e granulometria. Além disso, realizou-se os ensaios de compactação e resistência à compressão uniaxial para cada adição com seus teores. Com isso foi possível realizar uma análise comparativa entre as variações dos teores de umidade ótima, da tensão máxima de ruptura ( $q_u$ ) bem como do comportamento tensão x deformação. Observou-se aumento nas umidades ótimas e diminuição das densidades máxima seca do solo com adição de cimento e fibra, além do incremento no valor da ( $q_u$ ) para a mistura de solo e cimento (4%).

**PALAVRAS-CHAVE:** Fibra PET, Solo melhorado, Compactação de Solo, Compressão uniaxial.

## 1 INTRODUÇÃO

A necessidade da melhoria da propriedade física e/ou mecânica de um solo vêm levando os engenheiros e pesquisadores a buscar alternativas, como no caso, misturas de solo com outros materiais. Nesta pesquisa busca-se melhorar o solo com dois materiais distintos entre si cujos objetivos de aplicação no solo também variam. No primeiro caso mistura-se fibra oriunda de um processo de reciclagem de garrafas PET, fibras de (polietileno tereftalato), para a qual se estima uma diminuição

na massa específica do solo sem, no entanto, alterar sua resistência à compressão não confinada. O segundo caso diz respeito à adição de cimento Portland com vistas à melhoria de sua resistência à compressão axial não confinada, medindo-se assim, as variações ocorridas no solo.

Portanto, objetiva-se aqui, comparar a variação da massa específica aparente seca máxima e do respectivo teor de umidade de solo melhorado com adição 0,5% e 1,0%, em diferentes idades de fibra PET e com adição de 2% e 4% de cimento Portland (em 4 idades diferentes: 0, 7, 14 e 28 dias), além de

avaliar o acréscimo na resistência à compressão axial não confinada obtido pelas melhorias citadas. Realizou-se adições em amostra deformada de um solo coletado no município de São José/SC.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Para se conseguir analisar os resultados obtidos em laboratório necessita-se conhecer as teorias desenvolvidas e trabalhos realizados utilizando-se da adição de fibra bem como de cimento em solos.

### 2.1 Solo melhorado com fibras

Segundo Bento (2006) o solo melhorado com fibra é caracterizado como uma material compósito que resulta de uma mistura de dois ou mais materiais que apresentam duas fases: as fibras e a matriz em que a fibra estará incorporada, sendo que a combinação destes resultará em propriedades melhores do que quando avaliadas isoladamente. A fibra resistirá aos esforços externos e a matriz fornecerá o meio de transferência dos esforços. A fibra pode ser inserida na matriz com diferentes características, como tamanho, tipo de material (orgânico ou inorgânico), formatos, além de poder ser misturada de forma ordenada ou aleatória. Porém, todas apresentarão características em comum: maleabilidade ou rigidez e resistência, acrescentando um reforço mecânico a matriz que irá determinar o comportamento do compósito.

A fibra tem como principal função reforçar mecanicamente a matriz, funcionando como ponte de transferência dos esforços através das fissuras, que garante uma resistência mesmo após a abertura da mesma, pois as pontes formadas pelas fibras que absorveram parte das solicitações criam uma fissuração mais distribuída. (TANESI, 1997 apud BERNARDI, 2003)

Para melhoramento em solos, diversos tipos de fibras podem ser utilizadas. As características finais das fibras provêm do material da qual foram feitas e do seu processo de fabricação, peculiaridades que afetarão o comportamento do compósito. (FEUERHARMEL, 2000)

As fibras podem ser divididas em quatro grandes classificações: naturais, minerais, metálicas e poliméricas.

O Polietileno Tereftalato (PET) é uma fibra de poliéster, um material que apresenta alta densidade, rigidez e resistência. Serve de matéria prima para a produção de garrafas de bebidas gaseificadas. Cada vez mais o consumo desse material tem crescido e em paralelo a preocupação com a disposição final desse resíduo. Uma das soluções encontradas, é a

reciclagem, sendo a fibra PET um material proveniente dessa solução. (BENTO, 2006)

Mesmo a mistura para fibrossolos resultando num material com propriedades ainda não tão conhecidas, pesquisas e trabalhos já foram realizados com a utilização de PET para melhoramento de solos. Prietto et al. (1999) realizou um trabalho onde utilizou fibras com comprimentos de 12,24 e 36 mm com variação de teores 0,1% a 0,9% de fibra em relação a massa seca de solo, os resultados encontrados mostraram que o comprimento da fibra não influenciou nos resultados, mas sim as porcentagens de teor. Já Feuerharmel (2000) realizou um trabalho onde mistura de solo, cimento e fibra que foi feita com variações de teores de 0% e 0,5% com comprimentos de 12 mm e 36 mm e concluiu que para solos argilosos o teor e comprimento das fibras influenciou nos resultados de resistência ao cisalhamento e a energia de deformação absorvida; Lucarelli (2018) estudou o comportamento da mistura solo, cimento e fibra com largura de 2mm, comprimento 1 mm e teor de 1% em relação ao peso seco da mistura solo-fibra e concluiu que a inclusão das fibras gera uma diminuição no peso específico aparente seco máximo da mistura e a resistência ao cisalhamento direto, onde os valores de intercepto de coesão e de ângulo de atrito, são maiores do que os obtidos para o solo puro.

### 2.2 Solo melhorado com cimento

Segundo Cruz (2004), existem dois mecanismos de melhoramento de solo. No primeiro, o aumento da resistência mecânica é devido a ação aglutinante do aditivo, que cimenta as partículas do solo, é evidenciado quando há altos teores de cimento. Enquanto que no segundo caso, acontece a formação de núcleos independentes da massa do solo, podendo ou não vir acompanhada de aumento de resistência, caracterizada pela baixa quantidade de cimento.

Pereira (1970 apud Dias, 2012), relaciona três formas distintas de mistura do solo com cimento, são elas:

a) Solo-cimento ou solo-cimento compactado: são misturas de solo com cimento, que necessitam de quantidades suficientes de aditivo para o endurecimento da mistura, acima de 4% em relação a massa de solo seco, e de teores de água que sirvam para a compactação e hidratação do cimento adequadas;

b) Solo corrigido com cimento ou solo modificado com cimento: são misturas de solo com pequena quantidade de cimento, com o intuito de corrigir

propriedades como plasticidade, expansibilidade e capacidade de carga. A quantidade de aditivo geralmente fica entre 1% e 4% em relação a massa de solo seco. São usados geralmente em pavimentos de estradas de baixo tráfego;

c) Solo-cimento plástico: mistura de solo com cimento em quantidades superiores a 4% em relação a massa de solo seco, e com volume de água suficiente para conferir a mistura consistência semelhante das argamassas. Utiliza-se geralmente em revestimento de valas, canais e taludes.

Assim sendo, a mistura que será utilizada classifica-se como solo corrigido com cimento ou modificado com cimento, visto que, as porcentagens de cimento previstas estão compreendidas entre 1% e 4%.

### 3 MÉTODO DA PESQUISA

Coletou-se a amostra deformada do solo em campo, o qual foi ensaiado conforme as normas brasileiras da ABNT para caracterização. Os ensaios de massa específica, granulometria e compactação, seguiram os requisitos da NBR 6458, NBR 7181 e NBR 7182 respectivamente.

#### 3.1 Adição de fibra PET

A adição de fibra PET (polietileno tereftalato) com comprimento de 15 mm, de massa específica 1,34 g/cm<sup>3</sup>, ocorreu nas proporções de 0,5% e 1,0% em relação ao seu peso seco. A fibra PET utilizada nesta pesquisa foi gentilmente doada pela empresa Corodaria Brasil de Joinville/SC e foi obtida por um processo de extrusão de garrafas PET recicladas.

A mistura do solo com a fibra em seus respectivos teores foi realizada de forma manual, adicionando-se primeiramente a fibra no solo seco em estufa e, a partir da homogeneização manual, adicionou-se a água destilada em pequenas quantidades até obter-se a umidade ótima definida nos ensaios.

#### 3.2 Adição de cimento portland

Outra porção da amostra do solo recebeu adição de cimento CP II - F, nas proporções de 2% e 4% também em relação ao seu peso seco. Repetiu-se o ensaio de compactação para as amostras de solo com adição nas diferentes proporções. Assim como a mistura de solo com fibra, a mistura do solo com cimento foi feita de maneira manual, adicionando-se primeiramente o cimento no solo seco em estufa e posteriormente a água destilada em pequenas

quantidades, até obter-se a umidade ótima para cada teor (apresentada nos resultados deste artigo).

Posteriormente a moldagem, os corpos de prova com cimento foram submetidos ao processo de cura, sendo armazenados em uma caixa com água no seu interior, mas sem contato com o solo moldado, para manter a umidade dos CPs.

#### 3.3 Ensaio de Compressão uniaxial

O ensaio de resistência à compressão uniaxial não confinada foi realizado na prensa universal EMIC DL30000 obedecendo-se a NBR 12770, com uma velocidade de 1mm/min.

Os corpos de prova com os dois tipos de adições, para a ruptura a compressão uniaxial, foram moldados no molde pequeno 100/50mm com compactação manual estática, através da prensagem das camadas com o auxílio de um soquete metálico com marcações laterais correspondentes às alturas das camadas, sendo, por último, extraído do molde. Após a ruptura dos CPs, compilou-se os dados em planilhas de Excel, onde se obteve valores de tensão máxima de ruptura e analisou-se o comportamento das misturas através da curva tensão x deformação. A tensão máxima de ruptura foi avaliada estatisticamente. Primeiramente fez-se uma análise para a retirada de pontos espúrios através da análise da média e do desvio padrão aceitável para 3 amostras, depois, analisou-se a normalidade das amostras.

A seguir, realizou-se os testes de Bartlett e de Duncan. O teste de Bartlett analisa a variância das médias de populações cujos dados são normalmente distribuídos enquanto o de Duncan, mostra se a variação entre os valores médios medidos é significativo. Estas análises se fazem necessárias pois, foram moldados 3 corpos de prova para cada mistura e realizadas médias de valores, logo, necessitou-se saber se a diferença de valores medidos têm significado. A análise da curva de tensão x deformação ocorre pela avaliação da forma da curva e de suas tensões de ruptura e da tensão residual.

Foram moldados 3 (três) corpos de prova para cada teor sendo um total de 33: 3 de solo sem adição (S), 3 com 0,5% de fibra (0,5%F), 3 com 1% de fibra (1%F), 3 com 2% de teor de cimento rompido aos zero dias (2%Ci), 3 com 2% de teor de cimento rompido aos 7 dias (2%Ci7d), 3 com 2% de teor de cimento rompido com 14 dias (2%Ci14d) e 3 com 2% de teor de cimento rompido aos 28 dias (2%Ci28d), 3 com 4% de teor de cimento rompido aos zero dias (4%Ci), 3 com 4% de teor de cimento rompido aos 7 dias (4%Ci7d), 3 com 4% de teor de

cimento rompidos com 14 dias (4%Ci14d) e 3 com 4% de teor de cimento rompidos com 28 dias (4%Ci28d).

#### 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Os ensaios de caracterização mostraram se tratar de um solo silto argiloso (55,32% de silte e 23,76% de argila – Tabela 1), com massa específica dos grãos de 2,65 g/cm<sup>3</sup>. Como pode ser observada nas curvas de compactação (Figuras 1 e 2), a densidade seca máxima da mistura é correlacionada com a porcentagem de adição a mistura, ou seja, quanto maior a porcentagem de fibra ou cimento na mistura, menor o peso específico seco máximo, o que se justifica devido ao peso específico dos materiais usados como adições serem menores que o do solo. No caso das misturas de solo com fibra, deve-se levar em consideração que a distribuição das fibras foi feita de forma aleatória durante a moldagem do corpo de prova para a realização do ensaio, em algumas camadas o teor de fibra pode ter sido maior do que o da mistura inicial, influenciando assim, no resultado final.

Tabela 1 – Dados de granulometria e massa específica dos grãos

Granulometria - Frações Distribuídas	
Argila	23,76%
Silte	55,32%
Areia Fina	0,13%
Areia Média	0,46%
Areia Grossa	0,21%
Pedregulho	20,12%
Massa Específica dos grãos passantes na malha de 4,8mm (g/cm <sup>3</sup> )	2,65

O ensaio de compactação foi realizado para cada uma das misturas bem como para o solo sem adição, assim, foi possível averiguar a variação da densidade e umidade ótima para cada caso. A partir disso, obteve-se para solo puro, solo + cimento nos seus respectivos teores e solo + fibra com seus dois teores, nas curvas de compactação apresentadas a seguir.

A partir da análise gráfica, obtiveram-se os valores de umidade ótima para os teores de adição de fibra de 0%, 0,5% e 1% encontrou-se 17,89%, 20,94%, 18,87%, respectivamente e densidade seca máxima de 1,67 g/cm<sup>3</sup>, 1,63 g/cm<sup>3</sup>, 1,64 g/cm<sup>3</sup>. Assim como a análise da fibra, para a adição de cimento nos teores de 2% e 4% encontrou-se, respectivamente, umidade ótima nas porcentagens

de 20,32% e 20,47% e densidade seca máxima 1,58 g/cm<sup>3</sup> e 1,60 g/cm<sup>3</sup>.

Figura 1. Curva de compactação Solo + Fibra PET.

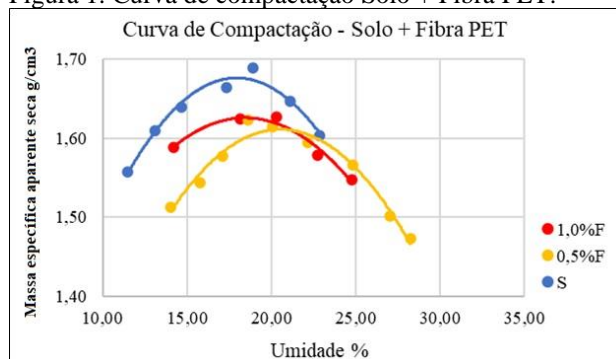
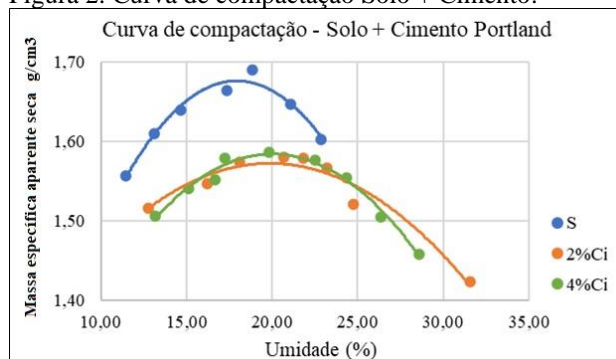


Figura 2. Curva de compactação Solo + Cimento.



Outra análise que pode ser retirada das curvas de compactação é a variação dos teores de umidade ótima das adições de cimento e fibra. Comparando-se as curvas de compactação de 0%, 2% e 4% de cimento, observa-se que a maior umidade ótima foi atingida com o teor de 4%, o que se justifica a partir de duas hipóteses. A primeira está relacionada a reação de hidratação do cimento, uma vez que adicionando-se mais cimento à mistura, necessita-se de maior quantidade de água para que ocorra essa reação. A outra suposição está atrelada ao aumento da quantidade de finos, pois quanto maior a quantidade de finos em uma mistura, maior será a quantidade de água necessária para envolver as partículas.

Na curva de compactação do solo com fibra, a maior umidade ótima atingida foi no teor de 0,5%, porém, não foi possível estabelecer uma relação entre essa variação e a adição de fibras.

Após, partiu-se para o ensaio de resistência à compressão não confinada uniaxial onde, se obteve dados de tensão máxima de ruptura e curva Tensão x Deformação, cujos resultados e discussão são mostrados a seguir.

##### 4.1 Tensão máxima de ruptura



Como descrito no método da pesquisa, foram rompidos 21 corpos de prova. Os valores de tensão máxima de ruptura obtida seguem na tabela abaixo:

Tabela 2. Tensão máxima de ruptura para os corpos de prova.

		SOLO	Solo + 0,5% Fibra	Solo + 1% Fibra	Solo + 2% Cimento - 7 dias	Solo + 2% Cimento - 14 dias	Solo + 4% Cimento - 7 dias	Solo + 4% Cimento - 14 dias
Tensão máxima de ruptura (MPa)	CP1	0,499	0,409	0,672	0,533	0,616	<b>1,517</b>	1,241
	CP2	0,455	0,499	0,608	0,550	0,723	1,220	1,398
	CP3	0,543	0,470	0,753	<b>0,804</b>	0,674	1,183	1,555
	Média	0,499	0,459	0,678	0,541	0,671	1,201	1,398

Os valores em negrito na Tabela 2 mostram os pontos considerados espúrios eliminados do cálculo da média após análise. A seguir, verificou-se que os valores obtidos estavam dentro da normalidade, o método de Bartlett mostrou haver variâncias iguais. Utilizou-se o teste de Duncan para se saber se as diferenças entre os valores médios de tensão máxima encontrados são significativas. O teste mostrou que as médias dos corpos de prova S; 0,5%F; 1%F; 2%Ci7d, 2%Ci14d e 2%Ci28d não diferem entre si significativamente.

No entanto, comparando-se o valor médio obtido para a adição de 1%F percebe-se um incremento 1,35 vezes maior comparando-se com o solo sem adição. A mistura 0,5%F mostrou um decréscimo no valor médio se comparado com S. Na análise do teste de Duncan esta diferença não se mostrou significativa podendo ser considerados iguais sob a análise estatística. Para se cegar, no entanto, a uma análise mais acurada, entende-se ser pertinente repetir o ensaio com um maior número de amostras, de modo a se concluir pelo real decréscimo da tensão máxima de ruptura ou não.

Observou-se também que no caso das amostras melhoradas com cimento, a média de 2%Ci28d corresponde a 1,39 vezes a tensão máxima de ruptura do solo sem adição e, a mistura 4%Ci28d corresponde a 3,26 vezes a tensão obtida para a referência (S).

#### 4.2 Comportamento tensão x deformação

Após as rupturas e análise dos resultados, foi possível gerar os gráficos de tensão x deformação para cada mistura e seus respectivos teores.

Como se pode observar na figura 3, o comportamento do solo com fibra teve uma variação considerável quanto ao seu comportamento

mecânico. De acordo com Maragon (2018), as curvas mostram um solo com ruptura frágil, como o esperado para em solos argilosos rijos ou duros e areias compactas, pois após a tensão máxima resistida ser atingida, essa tensão apresenta um decréscimo ao se aumentar a deformação.

O valor máximo no gráfico seria a resistência de pico ( $q_u$ ) e temos a resistência residual, que segundo Caputo (1988) ocorre após um decréscimo da resistência e aumento das deformações, após essas grandes deformações temos uma resistência final, que seria a residual. Porém, como a medição da resistência residual do solo pode ser obtida com base em outro ensaio, será admitida a nomenclatura resistência de pico e pós-pico.

A diminuição da resistência não confinada ao longo do ensaio ocorre devido a reorientação das partículas, assim como as expansões volumétricas quando se deformam sob a ação do esforço cortante.

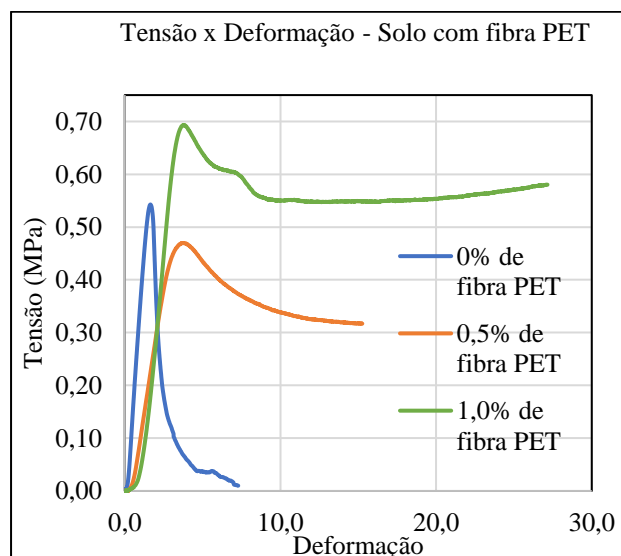


Figura 3. Comportamento do solo com adição de fibra PET.

Com a inserção da fibra no solo, percebe-se o aumento da resistência pós-pico, com pouca alteração na resistência de pico.

Nos CPs com adição de cimento, aos 7 dias percebe-se um incremento na tensão máxima de pico ( $q_u$ ) para o teor de 4% de cimento enquanto que para S e 2% os valores se assemelham. Analisando-se as curvas observa-se também que a tensão pós-pico é maior para o teor de 2% em relação ao S e, ainda maior se compararmos ao de 4% (Figura 4 'B').

Aos 14 dias e 28 dias de cura observa-se haver um incremento nos valores de tensão máxima de pico ( $q_u$ ) para 2% e 4% de adição de cimento em relação ao solo sem adição, sendo a amostra de 4% mais significativa. A tensão pós-pico no entanto não mostra variações significativas.

Além disso, pode-se analisar que as amostras com 4% de adição de cimento, obtiveram incremento nos seus valores de tensão máxima de pico com o decorrer das idades. Enquanto que para o teor de 2% de cimento, não se obteve a mesma avaliação (Figuras 4 'C' e "D").

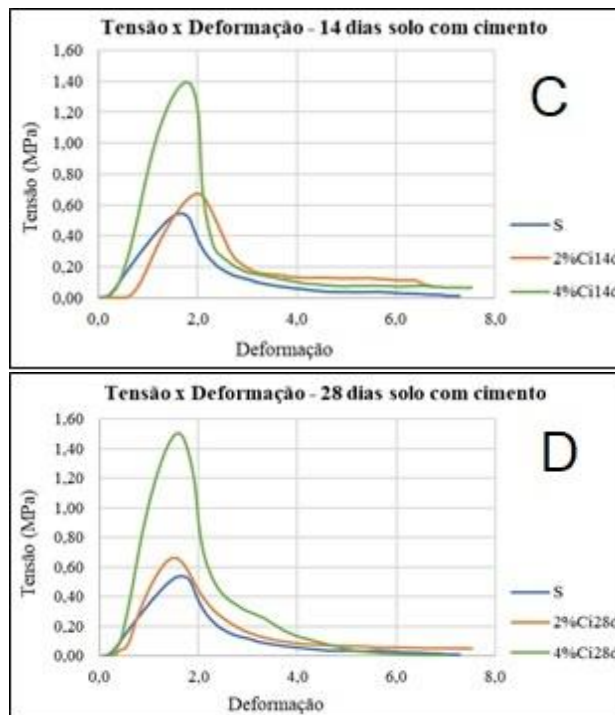
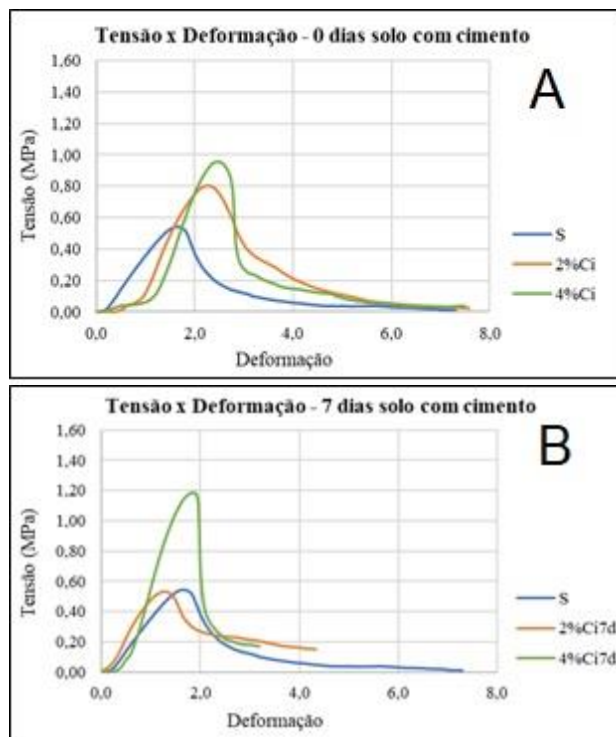


Figura 4. Comportamento de mistura solo + cimento

## 5 CONCLUSÕES

Após a análise e resultados dos dados apresentados nessa pesquisa, conclui-se que tanto nas curvas de compactação da mistura com fibra quanto na mistura de cimento há uma diminuição da densidade aparente seca máxima bem como um ligeiro aumento nos teores de umidade ótima.

No solo com adição de cimento, quando adicionado 2% em relação a peso seco na mistura, não se verifica ganho de resistência de pico significativo, entretanto a adição de 4% mostrou um incremento na resistência média de pico ( $q_u$ ) tanto aos 7 quanto aos 14 dias, se comparado ao solo sem adição, 2,4 e 2,8 vezes maior, respectivamente.

A adição de fibra mostrou provocar uma mudança no comportamento da tensão x deformação do solo argilo siltoso no que diz respeito à tensão pós-pico que se mantém após a ruptura. Na média da tensão máxima de ruptura ( $q_u$ ) a adição de fibra não mostrou provocar alteração significativa nos teores de 0,5% e pouca variação para o teor de 1% (1,4 vezes maior).

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12770: Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada*. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

- \_\_\_\_\_. *NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- \_\_\_\_\_. *NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- \_\_\_\_\_. *NBR 7181: Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- \_\_\_\_\_. *NBR 7182: Solo – Ensaios de compactação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- BENTO, Priscila Fiochi. *Uso de cal e fibras na melhoria de materiais para utilização em estruturas de pavimentos*. 2006. 132 f. Dissertação (Mestrado em geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- BERNARDI, Stefania Tesi. *Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar*. 2003. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- CAPUTO, Homero Pinto. *Mecânica dos Solos e Suas Aplicações: Fundamentos*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988. 244 p.
- CRUZ, Maria de Lurdes Santos da. *Novas tecnologias da aplicação de solo-cimento*. 2004. 240 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Minho, Guimarães, 2004.
- DIAS, João José da Fonseca Marques Simões. *Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas*. 2012. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia | Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.
- FEUERHARMEL, M. R. *Comportamento de Solos Reforçados com Fibras de Polipropileno*. 2000. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- LUCARELLI, Daniely Camargo *Estudo do comportamento mecânico de solos reforçados com fibras de Polietileno Tereftalato (PET) de distribuição aleatória*. 2018. 169 f. Dissertação (Magister Scientiae) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.
- PRIETTO, P.D. MONTARDO, J. P., CONSOLI, N.C. (1999). *Comportamento Mecânico de uma Areia Cimentada Reforçada com Fibras PET*. Geossintéticos 99, Rio de Janeiro – RJ, p.199-206.