



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 10, nº 1 (2024)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n1ID33395>



Efeito da variação do teor e do comprimento de fibras no comportamento de um solo cimentado

Effect of varying the content and length of fibers in the behavior of a cemented soil

Saul Barbosa Guedes¹; Roberto Quental Coutinho²; António Joaquim Pereira Viana da Fonseca³

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil, Caruaru/PE, Brasil. E-mail: saul.guedes@ufpe.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5895-065>

² Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil, Recife/PE, Brasil. E-mail: roberto.coutinho@ufpe.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0471-3908>

³ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto, Portugal. E-mail: viana@fe.up.pt
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9896-1410>

Resumo: Este estudo apresenta os resultados dos efeitos da variação do teor e do comprimento das fibras de polipropileno, quando inseridos em uma mistura solo-cimento, visando seu uso como revestimento primário para estradas de terra. Neste estudo, foram utilizados os modelos experimentais: 5% de cimento de alta resistência inicial, areia argilosa da Formação Geológica Barreiras e fibras de polipropileno de 6 mm e 24 mm de comprimentos, em teores de 0.25%, 0.50% e 0.75% em relação a massa de solo-cimento total seca. Após a realização dos ensaios de compressão não confinada e de tração por compressão diametral, foi verificado que o aumento do teor de fibras na matriz de solo-cimento proporcionou: aumento da resistência dos materiais, aumento do teor dos vazios e das deformações, entretanto, reduz significativamente o módulo tangente inicial tornando o material mais dúctil. Em termos de comprimento, observou-se claramente que a fibra de 24 mm tem uma influência mais forte sobre o comportamento mecânico quando inserida na matriz do material composto desenvolvido.

Palavras-chave: Fibras; Solo-Cimento; Comportamento Mecânico.

Abstract: This study presents the results of the effects of variation in the content and length of polypropylene fibers, when inserted into a soil-cement mixture, aiming its use as a primary coating for dirt roads. In this study, the experimental models were used: 5% fast-curing cement, clay sand of the Barreiras geological formation and polypropylene fibers of 6 mm and 24 mm lengths, at levels from 0.25%, 0.50% and 0.75% relative to the total dry soil-cement mass. After completion of the unconfined compression tests and tensile strength by diametrical compression, it was found that increasing fiber content in the soil-cement matrix provides: increase in resistance of the materials, increase on the voids content and the strain, but, significantly reduces the initial tangent modulus making the more ductile material. In the terms of length, it observed clearly that the 24 mm fiber has a stronger influence on the mechanical behavior when inserted into the matrix of the developed composite material.

Keywords: Fiber; Soil-Cement; Mechanical behavior.

1. Introdução

Em um país com o tamanho do Brasil, as soluções da pavimentação podem exigir uma abordagem regional. A utilização de materiais, soluções e técnicas construtivas não tradicionais pode ser muito diversificada. Os materiais que têm sido utilizados, por vezes sem estudos específicos e bem fundamentados do seu comportamento geomecânico, deverão ser analisados mais detalhadamente, conduzindo a especificações que permitam a sua utilização generalizada e segura.

No caso das estradas de baixo custo existentes, como é o caso das estradas não pavimentadas do Parque Metropolitano “Armando de Holanda Cavalcanti” (PMAHC), na Região Metropolitana do Recife (GPS: lat: 8°21'30,66"S; comprimento: 34°56'42.21"W), as superfícies de circulação são profundamente danificadas por fenômenos erosivos, devido a causas naturais, como as intensas chuvas tropicais alternadas com temperaturas e insolação muito elevadas, bem como por ações antrópicas, como o próprio tráfego de veículos off-road que circulam no parque.

Para aproveitar o mesmo solo das áreas degradadas e utilizá-lo como revestimento primário nas estradas não pavimentadas, este material precisa ser melhorado para dar resistência satisfatória à erosão devido ao intemperismo natural (climático) e às ações induzidas pelas rodas de veículos que circulam durante todo o ano.

Assim, optou-se por desenvolver estudos geotécnicos do comportamento mecânico desse solo quando melhorado/reforçado, respetivamente com cimento e fibras poliméricas.

Com base nos estudos realizados por Feuerharmel (2000), Foppa *et al* (2007), Viana da Fonseca *et al.* (2008), Marques *et al.* (2014), Consoli (2014), Foppa & Consoli (2014), Maghous *et al* (2014), Silva *et al* (2013), Severo (2011), a incorporação do cimento ao solo, tem influência nas seguintes propriedades: resistência à compressão não confinada, resistência à tração diametral, rigidez inicial, módulo de deformação, tensão de escoamento, deformação volumétrica e, principalmente, condutividade hidráulica e resistência ao ataque químico. No caso da inclusão de fibras na mistura solo-cimento, a maioria dos estudos comprova que há melhoria da resistência pela ação das fibras, que induzem ao aumento da ductilidade, Guedes (2013), Consoli *et al* (2013), Festugato & Consoli (2013) e Festugato (2011).

Embora os geomateriais cimentados apresentem um aumento na resistência e na rigidez, algumas desvantagens podem ser identificadas, tais como: os materiais tornam-se demasiado frágeis, a resistência à tração, embora superior, evoluem rapidamente para valores zero após a ruptura, dando origem a um comportamento frágil e perigoso e há tendência a rachaduras na secagem, especialmente quando exposto ao meio ambiente.

Para evitar as desvantagens mencionadas, foram adicionadas fibras de polipropileno à matriz, pois os materiais poliméricos apresentam maior elasticidade, com consequente ductilidade mais variável e ampla, boa resistência à tração, após quebra das ligações cimentícias, tornam-se muito mais versáteis para cargas intensivas situações, tais como carregamento cíclico em situações climáticas transitórias. A combinação desses componentes forma o chamado geomaterial compósito, que tende a desenvolver características geomecânicas e hidráulicas mais adequadas: resistência, rigidez, ductilidade, fragilidade, absorção de energia, capacidade de deformação e comportamento pós-fissuração, maior permeabilidade, quando comparado com solos ou misturas solo-cimento, que deram origem. Portanto, mais adequado para uso como revestimento primário.

Neste estudo os parâmetros fixados foram: tipo de solo, tipo e teor de cimento, tempo de cura, tipo de fibra, densidade e teor de umidade na moldagem. Os parâmetros variáveis foram o teor e o comprimento das fibras. Os ensaios laboratoriais foram realizados para caracterizar o comportamento mecânico dos materiais compósitos, analisando a evolução da resistência à compressão simples e a tração indireta por compressão diametral.

O solo da formação geológica Barreiras utilizado neste trabalho é amplamente utilizado em obras geotécnicas na região metropolitana do Recife, que é uma importante unidade geológica em todo o litoral nordestino, que se estende desde o litoral norte do Amapá até o litoral leste do estado do Rio de Janeiro cobrindo depósitos sedimentares mesozóicos de diversas bacias costeiras (SEVERO, 2011).

2. Programa Experimental

O programa experimental foi desenvolvido em três etapas. A primeira etapa consistiu na caracterização dos materiais envolvidos no presente estudo. Na segunda etapa, foram realizados diversos ensaios de compressão não-confinada para estudar a influência do teor de cimento (CC) e do esforço de compactação aplicado na resistência resultante da mistura solo-cimento. Foi então possível determinar, diante das correlações derivadas do solo estudado, a resistência que poderia ser alcançada quando se alcançasse a compactação aplicada e o teor de cimento utilizado. Foram adotados quatro teores de cimento (3%, 4%, 5% e 6%), testando pelo menos três amostras para cada mistura, e um conjunto com a máxima densidade seca com seu teor ótimo de umidade, obtido a partir de ensaios de compactação aplicando a energia do Proctor

normal (densidade seca máxima, $\gamma_{dmax} = 18,6 \text{ kN/m}^3$ e teor de umidade ótimo $w_{opt} = 12,5\%$), outro com energia de compactação do Proctor intermediário ($\gamma_{dmax} = 19,8 \text{ kN/m}^3$ e $w_{opt} = 11\%$) e o último, correspondente a energia do Proctor modificado ($\gamma_{dmax} = 20,5 \text{ kN/m}^3$ e $w_{opt} = 10,2\%$) definido primeiro com o solo puro (sem adições de cimento).

Na última etapa, após fixação das condições dos parâmetros de projeto ($\gamma_{dmax} = 19,8 \text{ kN/m}^3$, $w_{opt} = 11\%$ e teor de cimento, CC = 5%), seguiu-se o estudo visando avaliar a influência do teor e comprimento das fibras poliméricas no comportamento mecânico da mistura solo-cimento. Nesta etapa foram utilizados três valores para o teor em fibras: 0,25, 0,50 e 0,75% (em peso: é o peso relativo ao peso total do solo-cimento + 5% de cimento), e dois comprimentos diferentes de fibras: 6 mm e 24 mm.

2.1. Caracterização do solo da formação geológica Barreiras

O solo estudado pertence à formação geológica denominada “Barreiras”, que é uma importante unidade geológica que se estende por toda a costa nordeste brasileira, desde o litoral norte do Amapá até o litoral leste do estado do Rio de Janeiro (SEVERO, 2011).

Esta formação abrange depósitos sedimentares mesozóicos de várias bacias costeiras. Com base nos resultados da caracterização geotécnica, o solo coletado é classificado como areno-argiloso, com $w_L = 30\%$ e $IP = 12\%$.

A fração fina do solo pertence ao grupo das Argilas Inorgânicas de Baixa Plasticidade. A fração argila é considerada inativa, pois seu valor de índice de atividade é $IA = 0,4$. Devido ao índice de dispersão de Middleton (1930) o solo é considerado erodível como resultado do Índice de Dispersão (PD) = 100%. Com base na classificação MCT o solo foi classificado como areia franco-argilosa laterítica (LA').

O solo não apresenta comportamento expansivo ou colapsível, conforme obtidos nos ensaios e classificações usuais. A curva característica obtida, uma curva bimodal, é típica de solos em que a distribuição granulométrica é mal graduada, com gradação aberta. Através de ensaios de cisalhamento direto em condições inundadas, o solo apresenta intercepto coesivo $c' = 2,1 \text{ kPa}$ e ângulo de atrito de $\phi' = 31,1^\circ$. A permeabilidade do solo, determinada por um permeâmetro de laboratório, foi: $k = 6,45 \times 10^{-6} \text{ m/s}$.

2.2. Cimento de alta resistência inicial

O cimento utilizado ao longo da pesquisa foi o Cimento de Alta Resistência Inicial (ARI), também conhecido como Cimento de Cura Rápida. O cimento utilizado é produzido na fábrica de Pacatuba, no estado de Sergipe, e é conhecido pela sigla CPV-ARI.

2.3. Fibras de polipropileno

As fibras utilizadas foram produzidas pela polimerização do propileno, subproduto do petróleo e fornecidas pela empresa MACCAFERRI - América Latina, na forma de filamentos contínuos. As fibras possuem módulo de Young de 3.000 MPa, massa específica de $9,1 \text{ kN/m}^3$, diâmetro de 10^{-6} m e comprimentos de 6 mm a 24 mm.

3. Métodos

3.1. Processos de moldagem, cura e ruptura das amostras – 2ª etapa

Os corpos de prova utilizados nos estudos envolvendo apenas solo e cimento tinham 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro. Após secagem e destorroamento do solo, o mesmo foi passado na peneira ASTM N^o 4 (4,8 mm) e o material retido foi descartado. A justificativa para peneirar o material na malha de 4,8 mm é que o tamanho máximo possível de um grão de solo para as dimensões dos corpos de prova testados deve ser 10,0% ou menos que a menor dimensão dessa amostra (ou seja, 50 mm).

Após a preparação do material e equipamentos necessários à moldagem, a etapa seguinte consistiu na moldagem de corpos de prova, para cada energia de compactação aplicada, com teor de cimento inicialmente fixado em 3%, 4%, 5% e 6% em relação a massa seca de solo seco. Para cada teor de cimento foram moldadas nove amostras, resultando assim num total de 36 amostras, 12 para cada energia de compactação. Apenas seis eram moldadas por dia, três pela manhã e outras três à tarde.

O processo de compactação do solo-cimento foi realizado em três camadas, visando melhor distribuição da densidade ao longo da altura do corpo de prova. Em seguida as amostras foram embaladas em filme de PVC e armazenadas em câmara úmida onde permaneceram por um período de seis dias. No sétimo dia, as amostras foram imersas em água destilada por 24 horas e em seguida levadas para uma prensa mecânica onde foram rompidas a uma velocidade de deformação constante de 1,00 mm/min. Por fim, foram retiradas partes das amostras para medir a umidade do corpo de prova rompido.

3.2. Processos de moldagem, cura e ruptura das amostras – 3ª etapa

Os corpos de provas utilizados nos estudos envolvendo solo, cimento e fibras, tinham 140 mm de altura e 70 mm de diâmetro. Inicialmente, os materiais foram preparados conforme procedimento descrito anteriormente (2ª etapa). No caso das fibras foi necessário soprá-las com pistola de ar para separar os fios e assim proporcionar melhores condições de mistura com o solo-cimento umedecido.

Imediatamente após uma certa quantidade de espalhamento da fibra, uma quantidade de solo-cimento foi misturada de forma a cobrir toda a superfície da fibra. Posteriormente, outra pequena quantidade de fibras foi espalhada criando uma nova camada para cobrir toda a superfície do solo-cimento espalhado. Este processo foi repetido até que toda a quantidade de fibra fosse utilizada.

Os corpos de prova foram compactados em quatro camadas e imediatamente armazenados em câmara úmida onde permaneceram por um período de 24 horas. Em seguida foram desmoldados, pesados e medidas suas dimensões. Em seguida foram envoltos em filme de PVC e permaneceram dentro da câmara úmida por 20 dias. Após 20 dias, eles foram imersos em um recipiente contendo água destilada por 24 horas e então testados até a ruptura em uma prensa automatizada a uma taxa de deformação constante de 1,00 mm/min. Os dados foram armazenados automaticamente em arquivo Excel por meio de software específico (Figura 1).

Após a ruptura, a sucção presente foi medida colocando papel filtro (Whatman N^o 42) exatamente nas duas partes da zona onde ocorreu a zona de ruptura.

A Figura 2 ilustra a metodologia utilizada para realização de ensaio de tração indireta por compressão diametral.



Figura 1 – a) Detalhes da moldagem. b) Sistema de aquisição de dados eletrônicos.
Fonte: Autor (2013).

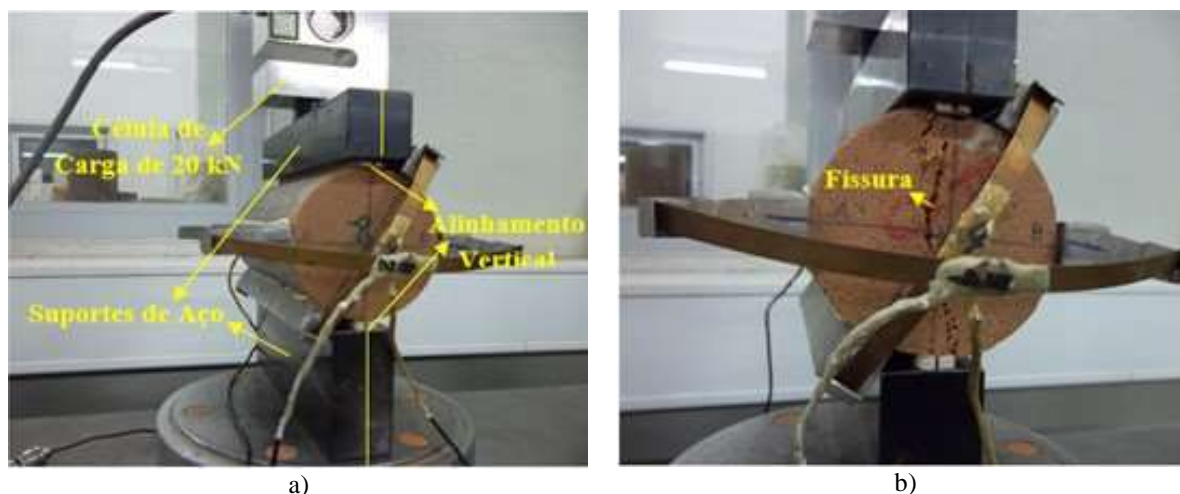


Figura 2 – Ensaio de tração indireta por compressão diametral, com transdutores de deslocamento de alta precisão: a) Alinhamento do diâmetro do CP com braquetes de aço; b) Exemplo de falha de um corpo de prova.
Fonte: Autor (2013).

4. Resultados e Discussões

4.1. Análise da influência do teor de cimento e da energia de compactação nas características das misturas

Esta primeira seção contém detalhes dos resultados da influência do aumento do teor de cimento no solo da Formação Geológica Barreiras e do aumento da densidade seca máxima e da umidade das misturas solo-cimento, obtidas em função dos resultados de compactação nas energias normal, intermediária e modificada do Proctor.

4.1.1. Análise do efeito do teor de cimento na resistência do solo-cimento

A Figura 3 apresenta o gráfico da variação da resistência à compressão não confinada em função do teor de cimento (CC), revelando uma correlação linear, para diferentes índices de vazios após a compactação, ou seja, para diferentes energias de compactação aplicadas.

Analisando o ajuste linear, individualmente, verifica-se que há um aumento linear da resistência com o aumento do teor de cimento. Em relação ao conjunto de retas, é perceptível a taxa de aumento da resistência, representada pela inclinação do ajuste da reta, e proporcional à energia de compactação aplicada (o seu peso unitário e seu respectivo teor ótimo de água). Conclui-se, portanto, que a cimentação é mais eficaz para vazios menores da mistura.

O comportamento mecânico dos ensaios de compressão não confinada, em uma mistura de solo com aumento de teor de cimento em sua matriz, conforme apresentado na Figura 3, também foi apresentado nos trabalhos de Chaiyaput *et al.* (2022), Wang *et al.* (2022), Karpisz *et al.* (2018), Jaritngam *et al.* (2012), Rios *et al.* (2012), Viana da Fonseca *et al.* (2008), Foppa *et al.* (2007) e Consoli *et al.* (2006). Este é um comportamento comum quando se adiciona cimento a um solo, seja argiloso, silteoso, arenoso ou cascalho.

Por exemplo, Cruz (2008) analisou as características mecânicas, através da realização de ensaios de compressão não confinada, de areia fina da cidade de Osório – Rio Grande do Sul, mediante incorporação de cimento. O mesmo observou que, à medida que aumentava o teor de cimento na areia, mantendo constante a densidade da mistura, maior era o aumento da resistência e da rigidez inicial da amostra de solo-cimento. Cruz (2008) também analisou outras variáveis como porosidade e índice de vazios na influência do comportamento mecânico da mistura solo-cimento quando o teor de cimento aumentava e também transmitiu o mesmo comportamento observado nas Figuras 3, 4 e 5. Cruz (2008) estudou o comportamento desse solo, pelo fato de ser muito utilizado em obras geotécnicas em sua região e também por possuir características geotécnicas que nem sempre se enquadram nas especificações de projetos de construção civil.

Ressalta-se que esta relação só é válida para a faixa de teor de cimento estudada, acreditando-se que possa se comportar de forma diferente para percentagens elevadas de cimento, tendendo a um valor limite.

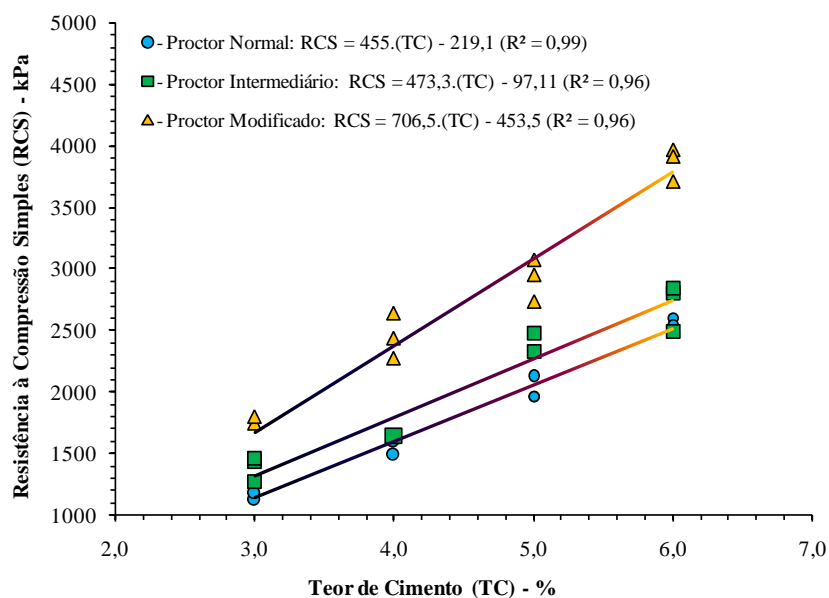


Figura 3 – Variação da resistência mecânica devido ao teor de cimento e compactação.
Fonte: Autor (2013).

4.1.2. Análise da variação da porosidade na resistência solo-cimento

A Figura 4 apresenta a curva de ajuste (exponencial) para os valores médios de resistência à compressão simples (RCS) em cada composição, variando a porosidade (n) e o teor de cimento. Ao analisar individualmente essas curvas, observa-se que a RCS aumenta exponencialmente com a diminuição da porosidade, o que é consequência da limitação da condição de máxima densidade seca alcançada ao variar a energia de compactação. Para os teores de 4% e 6% de cimento a relação não foi muito satisfatória, mas percebe-se que a porosidade influencia significativamente a resistência.

Segundo Foppa *et al.* (2007), o mecanismo pelo qual a redução da porosidade influencia no aumento da resistência solo-cimento está relacionado à existência de maior número de contatos e melhor intertravamento entre as partículas do solo. Segundo os autores, quanto mais próximos forem os contatos entre as partículas do solo, maior será a hidratação do cimento, melhorando em grande parte as ligações efetivas entre elas.

4.1.3. Análise da relação vazios/cimento versus resistência solo-cimento

A Figura 5 apresenta o gráfico da variação da RCS com a relação entre o volume de vazios e o teor de cimento.

A curva de ajuste foi obtida com base na média da RCS e dos vazios/cimento, relação das três amostras relevantes em cada teor de cimento e compactação.

Ao analisar o gráfico, verifica-se que o aumento do RCS é proporcional ao aumento do teor de cimento e inversamente proporcional ao aumento do volume de vazios. Portanto, uma correlação razoável pode ser inferida entre a RCS e a razão de vazios (ou porosidade) sobre o teor de cimento. Para as condições testadas, a curva de ajuste que resultou no maior coeficiente de correlação é do tipo potência.

Larnach (1960) citado por Foppa (2005), Foppa (2005), Severo (2011) e Rios *et al.* (2012), realizaram estudos analisando fatores que influenciam a resistência de misturas solo-cimento, observando que o aumento da relação vazios/cimento refletiu na diminuição da resistência solo-cimento.

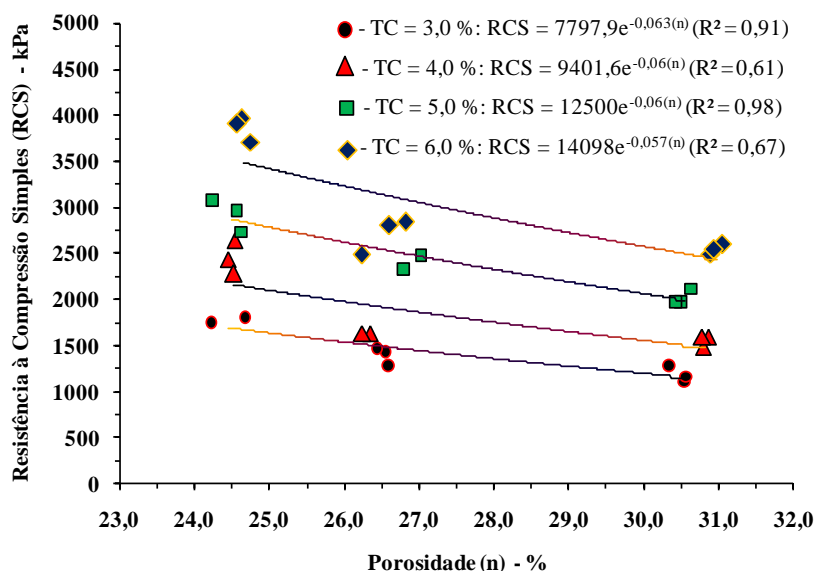


Figura 4 – Variação da resistência à compressão simples em função da porosidade e do teor de cimento. Fonte: Autor (2013).

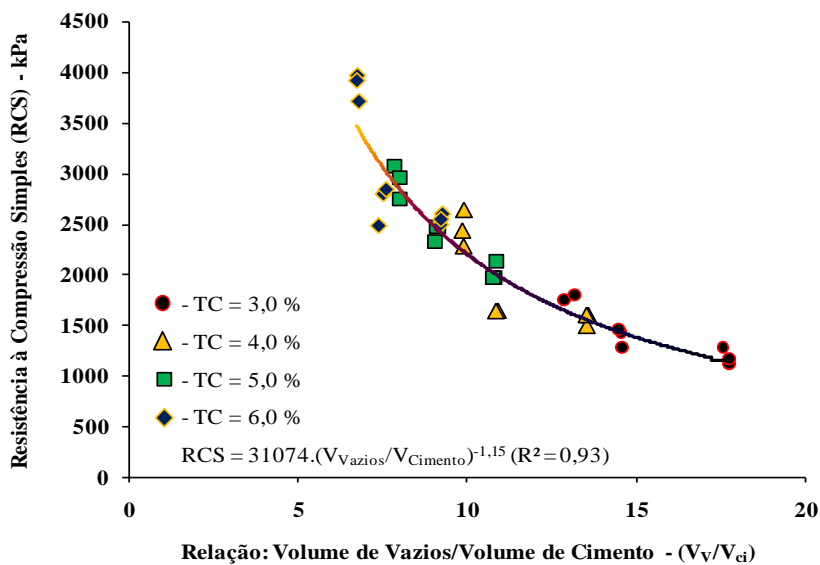


Figura 5 – Variação da resistência à compressão simples da relação vazios/cimento. Fonte: Autor (2013).

4.2. Análise da influência do teor e comprimento das fibras no solo-cimento

Esta seção apresenta os resultados dos ensaios de compressão simples, compressão diametral e durabilidade, devido à variação de três teores (0,25%, 0,50% e 0,75%) e dois comprimentos (6 mm e 24 mm) de fibras incorporadas na matriz de solo-cimento.

4.2.1. Análise da relação entre resistência à compressão não confinada com teor e comprimento da fibra

Antes de iniciar a análise detalhada dos resultados dos ensaios de compressão simples em materiais compósitos, é importante notar que muitos pesquisadores que utilizaram fibras em seus estudos afirmaram que, os fatores que afetam o

comportamento do solo-fibra ou de misturas solo-cimento-fibra, são diversas e complexas (Figura 6). Existem inúmeras combinações de variáveis que alteram significativamente os mecanismos de interação.

Por exemplo, para uma determinada combinação de variáveis, os resultados podem ser convenientes para uma determinada aplicação do compósito, mas podem não ser para outra. Portanto, é importante compreender primeiro o comportamento mecânico do material e os fatores que o condicionam, para depois poder comparar o material reforçado com fibras, com ou sem cimento.

Neste estudo constatou-se que a inclusão de fibras na matriz solo-cimento contribui para o aumento da resistência à compressão. Observa-se que o aumento da resistência foi mais acentuado quando se utilizou fibras mais longas (24 mm).

Para o teor de 0,50% de fibra, incorporada à matriz solo-cimento, já há aumento de resistência para a fibra mais longa. Por outro lado, há menor resistência quando são utilizadas fibras mais curtas, embora com valores superiores à correspondente mistura solo-cimento. Este resultado pode ser justificado pela dificuldade de garantir uma boa separação e homogeneização das fibras de 6mm em comparação com as fibras de 24mm.

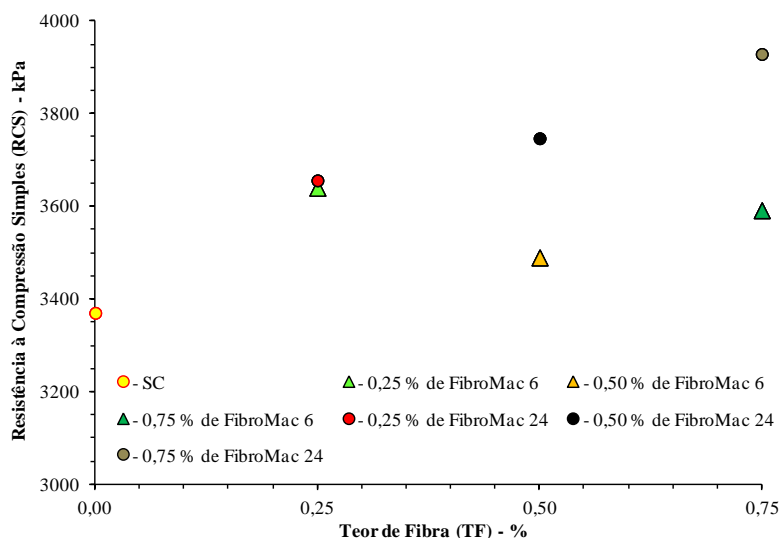


Figura 6 – Resistência média à compressão não confinada versus conteúdo de fibra e comprimento das fibras. Fonte: Autor (2013).

Os valores da RCS para o teor de fibra de 0,75% também são justificados com base na interpretação descrita no parágrafo anterior. Portanto, a resistência desenvolvida pelas fibras de 6 mm (devido ao aumento proporcionado pelo número de contatos entre os grãos da matriz solo-cimento e as fibras) continuou a aumentar, embora em menor proporção quando comparada às fibras de 24 mm.

Com base nos resultados, no caso do aumento da resistência com o teor de fibra, pode-se definir um teor ótimo de fibra: 0,25% para fibras de 6 mm e 0,75% para fibras de 24 mm. Para fibras mais curtas, parece que a matriz solo-cimento é reforçada com alto teor de fibras associado a um número muito grande de filamentos, e as fibras não estão suficientemente engajadas entre as partículas solo-cimento, diminuindo assim os benefícios deste reforço (criação de redes de tração no solo + matriz de cimento).

Na literatura técnica existem muitos trabalhos acadêmicos desenvolvidos, envolvendo misturas compostas como: solo-cimento, solo-fibra e também solo-cimento-fibra. Porém, até o momento, nenhuma pesquisa foi desenvolvida envolvendo o mesmo tipo de solo, fibra, teor de cimento, densidade e umidade utilizados na presente pesquisa para comparar os resultados.

4.2.2. Análise da relação entre índice de vazios versus teor de cimento e comprimento das fibras

Analisando a relação entre o índice de vazios das misturas em função do teor de cimento e comprimento de fibras utilizadas, fica claro no gráfico da Figura 7 um aumento proporcional do índice de vazios, devido ao aumento da

incorporação de fibras na matriz solo-cimento, e esse aumento é mais pronunciado nas misturas que utilizaram fibras de 24 mm.

Neste estudo foi observado que o aumento do teor de fibra causou um efeito desfavorável na densidade seca máxima, devido ao fato da inclusão dos elementos poliméricos desenvolver uma matriz “esponjosa” implicando na recuperação do volume inicial após a compactação. Diante deste comportamento, sempre após a compactação da última camada, o corpo de prova continuou prensado por mais cinco minutos.

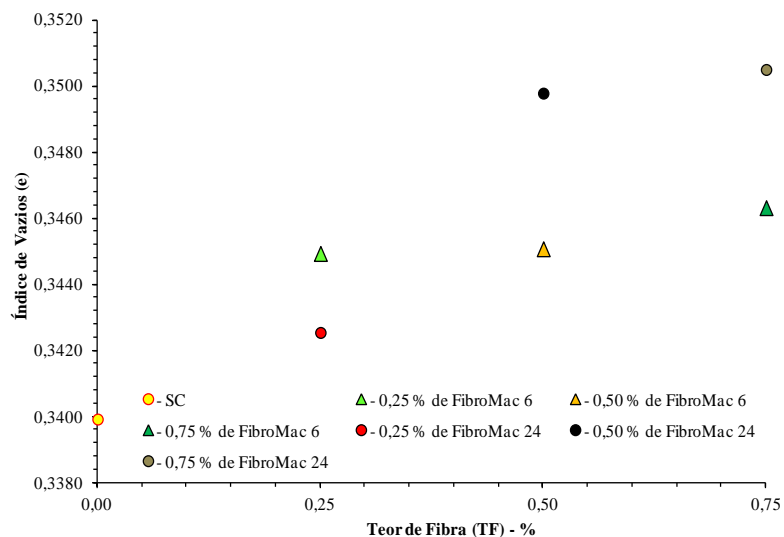


Figura 7 – Razão média de vazios versus conteúdo e comprimento de fibra.

Fonte: Autor (2013).

Portanto, durante os testes, foi garantida a densidade definida e não a energia de compactação a ser aplicada. Como resultado, a densidade de cada corpo de prova ficou dentro da faixa aceitável estabelecida no programa experimental. Assim, o aumento do índice de vazios com a inclusão das fibras foi bem controlado.

4.2.3. Análise da relação entre o módulo elástico tangente (ET) e o teor de fibras e seu comprimento

A Figura 8 ilustra o comportamento individual obtido do módulo tangente inicial de cada corpo de prova das misturas estudadas. Observa-se claramente uma redução muito elevada do módulo com o aumento do teor de fibras na matriz solo-cimento. Observa-se também que, para um mesmo teor, a influência do comprimento das fibras no módulo de Young é insignificante.

Para o cálculo do módulo tangente elástico inicial (ET) foram adotados os critérios da norma europeia EN 13286-43/março de 2004 (Misturas Não Ligadas e Ligadas Hidraulicamente – Parte 43: Método de Teste para a Determinação do Módulo de Elasticidade de Misturas Ligadas Hidraulicamente).

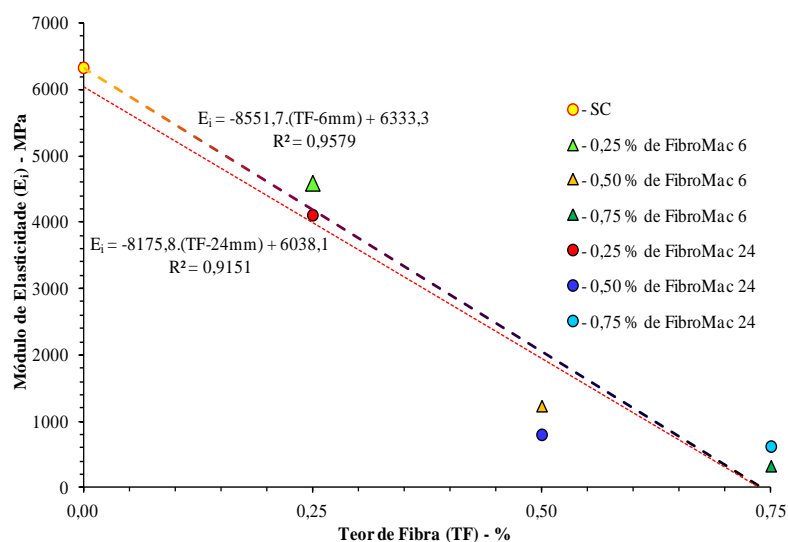


Figura 8 – Módulo de Young médio da tangente inicial versus conteúdo e comprimento de fibra.
Fonte: Autor (2013).

As misturas com fibras incorporadas mais longas, apesar do aumento de resistência obtido a partir do teor de fibras, apresentaram redução significativa na rigidez em comparação ao solo-cimento não reforçado.

Esse comportamento é justificado pelo fato de que o aumento da resistência se deve ao desencadeamento do rendimento das fibras sob tensão de tração após a ruptura da matriz solo-cimento, ocorrendo com progressiva deformação global.

4.2.4. Análise da relação entre a deformação axial (ϵ_1) e o teor e comprimento da fibra

Com base nos resultados descritos anteriormente, observa-se que a deformação axial (ϵ_1) foi bastante elevada com o aumento da inclusão de fibras na matriz solo-cimento, e este aumento foi significativamente influenciada pelo elevado aumento da deformabilidade das misturas com adição fibras. A Figura 9 ilustra a variação das deformações de cada corpo de prova devido ao aumento do teor e comprimento das fibras utilizadas na mistura.

Este comportamento é justificado pelo aumento das deformações devido ao aumento da flexibilidade da estrutura do solo onde as fibras tendem a dar um efeito “esponja”, induzindo maior deformabilidade quando a resistência é gradualmente transferida da matriz cimentada para as fibras.

Um fator não desprezível para a alta deformabilidade do compósito solo-cimento-fibra é o fato de que na montagem dessas misturas as fibras se apresentam na matriz como não cedíveis, ou seja, as fibras não são inseridas já esticadas, o que implica que eles precisam se deformar para ativar sua força.

Verifica-se que, para concentrações de 0,25% a 0,50%, compostos mais longos são formados pela fibra mais longa em comparação com fibras mais curtas, a consequência disso é que as fibras mais longas precisam se deformar mais para acionar sua resistência.

Para um teor de fibra de 0,75%, este comportamento não foi observado provavelmente devido à influência da homogeneização mais satisfatória proporcionada pelas fibras maiores em comparação às fibras menores.

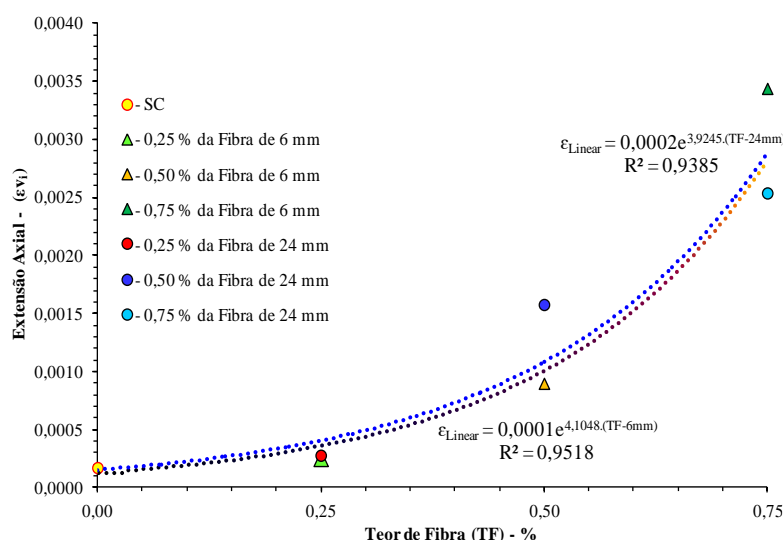


Figura 9 – Variação da deformação axial média com o teor e comprimento das fibras.
Fonte: Autor (2013).

4.2.5. Análise da relação entre resistência à compressão simples e índice de vazios (e)

Embora não exista uma correspondência particularmente satisfatória para as fibras mais curtas, as fibras mais longas parecem ajustar-se melhor, embora abaixo do valor mínimo aceitável para o fator de correlação (R^2). Como foram utilizados quatro pontos no gráfico para traçar a linha de tendência para cada tipo de fibra e um nível de significância máximo de $\alpha = 5\%$, o menor valor crítico deverá ser $R^2 = 0,95$.

Analisando o gráfico da Figura 10 verifica-se que a menor fibra incorporada na matriz solo-cimento não apresenta aumento significativo nos vazios. Porém, para as fibras mais longas há uma variação mais significativa deste índice físico.

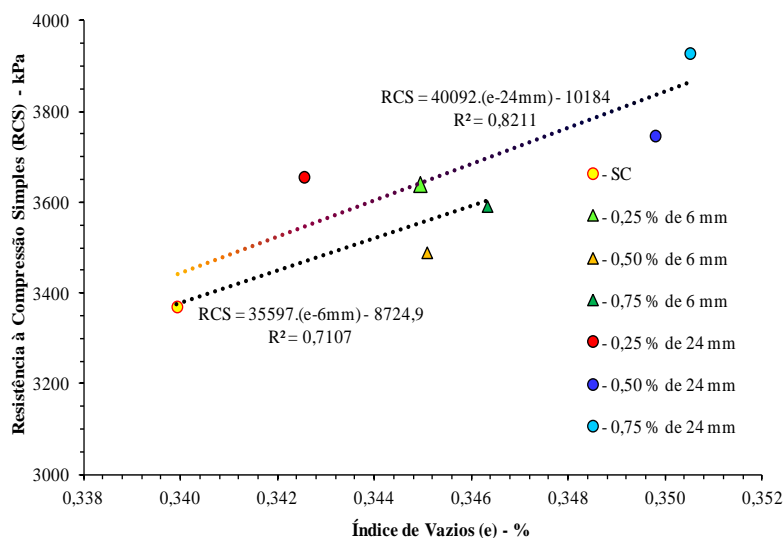


Figura 10 – Relação entre as médias de resistência obtidas em referência ao índice de vazios para cada variável investigada.
Fonte: Autor (2013).

Pelos motivos descritos anteriormente, entende-se que as misturas com fibra mais longa resistem mais à compressão, possivelmente devido a uma melhor distribuição entre as fibras e as partículas de solo e cimento proporcionando um efeito de amortecimento “esponjoso” (Falorca *et al.*, 2002).

Talvez pelo tamanho menor, a fibra de 6 mm se ajusta melhor entre os vazios deixados pelos grãos, tendo assim menos contato entre os grãos e, com isso diminuindo o fenômeno da “esponja”, diminuindo assim a necessidade de maior esforço o que contribui para uma redução no número de contatos entre os elementos constituintes da matriz.

Porém, a estrutura do solo mais cimento, juntamente com o grau de compactação exercido, é por natureza densa, contribuindo com baixos vazios ($e = 0,340$) que as fibras não tendem a preencher.

Uma tentativa de explicação é que, devido à sua menor dimensão, as fibras apresentam maior resistência à separação dos filamentos, principalmente para teores mais elevados, tendendo a formar emaranhados e também grupos de filamentos agregados, que se comportam como um único filamento de grande diâmetro que em sua maioria estarão trabalhando mais separados na matriz solo-cimento.

Os autores deste estudo acreditam que devido às fibras de 24 mm estarem melhor distribuídas no arranjo, um maior número de fibras estará interceptando os planos de falha na ruptura e, portanto, esse reforço será mais eficiente. Benson & Khire (1994), afirmam que o número de fibras que cruzam o plano de ruptura é mais importante do que a resistência à tração desencadeada.

A Figura 11 ilustra a distribuição das fibras de 6 mm e 24 mm de comprimento na matriz fibra-solo-cimento, com teor de 0,75% nas amostras após ruptura por compressão simples não confinada.

Procurando tornar mais visível a referida relação, relativa à resistência à compressão simples com o índice de vazios, verificou-se que esta resultou numa correlação muito baixa com misturas preparadas com fibras mais pequenas, e ligeiramente melhorada ($R^2 = 0,8337$) para misturas moldadas com fibras mais longas. A Figura 12 ilustra o gráfico dessa relação.

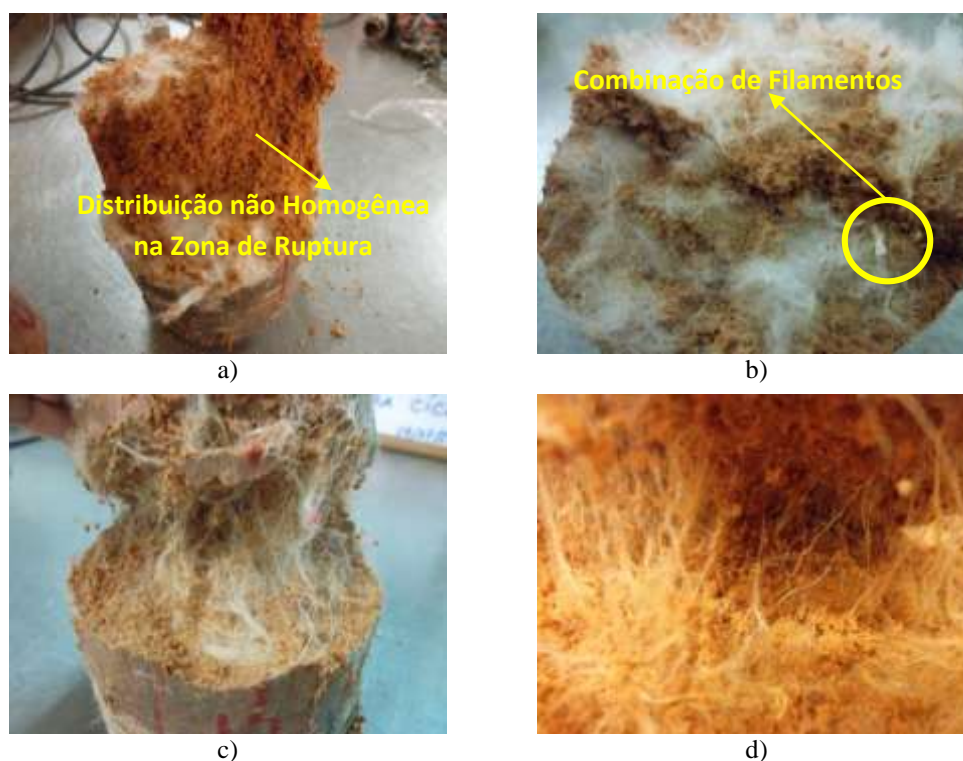


Figura 11 – Exemplos de distribuição de fibras na matriz de compósitos formados com 0,75% de teor de fibra: a) e b) FibroMac 6 mm; c) e d) FibroMac 24 mm.

Fonte: Autor (2013).

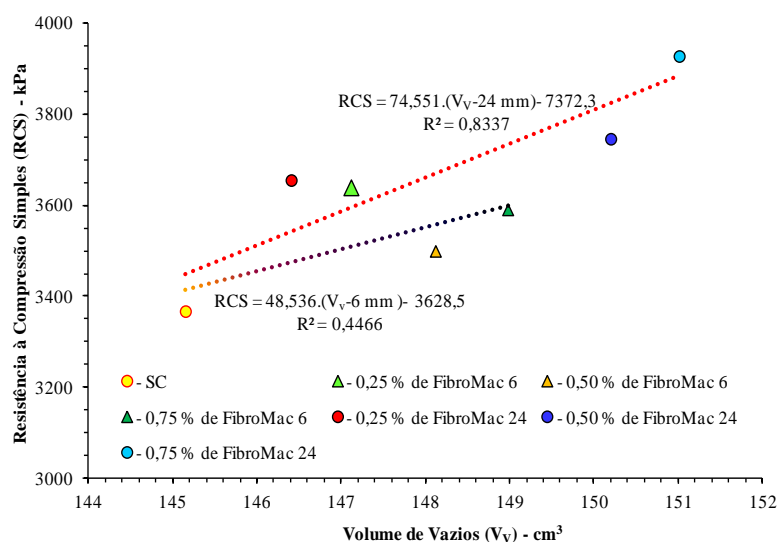


Figura 12 – Ilustração da influência da distribuição das fibras na matriz para diferentes teores e comprimentos de fibras.

Fonte: Autor (2013).

4.2.6. Análise dos resultados dos testes de tração indireta

Para analisar de forma mais simples os resultados da tração por compressão diametral das misturas, a Figura 13 ilustra a relação entre os valores médios da resistência à tração com o teor de fibras. Analisando o gráfico da figura, percebe-se que a incorporação de fibras na matriz solo-cimento levou a um aumento na resistência à tração da mistura, padrão semelhante ao observado nos ensaios de compressão simples.

Nota-se que o aumento da resistência foi mais pronunciado quando se utilizou uma fibra de 24 mm. Observa-se que os resultados obtidos para a resistência à tração apresentam o mesmo comportamento dos resultados dos ensaios de compressão simples: a resistência à tração aumenta com fibras mais longas.

No caso das fibras mais curtas, esse aumento também é notado, mas em menor proporção quando comparado à resistência proporcionada pelas fibras mais longas. No caso das fibras mais curtas houve também uma ligeira diminuição da resistência à tração para o teor de 0,50% de fibra, semelhante aos resultados observados para os ensaios de compressão.

Conclui-se então que o aumento do comprimento da fibra proporciona maior benefício ao incluir esta fibra na matriz de solo-cimento. Obtém-se uma boa correlação ($R^2 = 0,9673$) com uma maior resistência à tração com maior teor de fibras, enquanto, no caso de fibras mais curtas esta correlação é significativamente menor ($R^2 = 0,5641$).

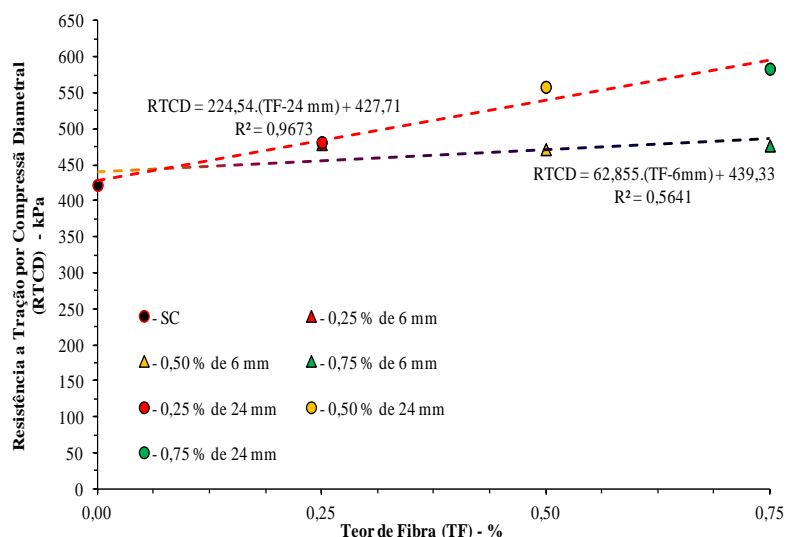


Figura 13 – Resistência média à tração por compressão diametral das misturas versus teor e comprimento de fibras. Fonte: Autor (2013).

Em média, a fibra mais curta contribui para um aumento de cerca de 13% em comparação com a resistência à tração da mistura solo-cimento. A fibra mais longa de 24 mm melhora muito mais significativamente a resistência à tração devido à melhor distribuição no arranjo dos filamentos, proporcionando uma separação satisfatória quando comparada à fibra menor, e também devido ao seu tamanho, correspondendo a quatro vezes o menor tamanho da fibra.

Para um teor de fibra de 0,75%, as fibras mais longas podem aumentar a resistência à tração em cerca de 38,1%. Para o teor de fibra de 0,25%, ambas as fibras proporcionam substancialmente o mesmo valor. Comparando os resultados do comportamento dos ensaios de compressão e tração, observa-se o mesmo padrão de variação, ou seja, para o teor de 0,25% ambas as fibras apresentaram resultados bastante semelhantes.

Para um teor de fibra de 0,50% as fibras mais curtas ainda reduzem a resistência, enquanto as fibras mais longas continuam aumentando quase linearmente os valores de resistência até 0,75% de teor de fibra. Dessa maneira, o processo de homogeneização das fibras com o solo-cimento não influenciou no comportamento dos resultados.

5. Conclusões

Com base nos testes e resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir o seguinte:

A inclusão de fibras na matriz de solo-cimento contribuiu para aumentar a resistência à compressão simples, enquanto esse aumento foi mais pronunciado para a fibra mais longa (24 mm).

Verificou-se também que o aumento do volume de vazios é proporcional ao aumento do teor de fibra, sendo este aumento mais pronunciado para a fibra mais longa.

Ficou claro que quanto maior a porcentagem de fibras embutidas na matriz solo-cimento, maior a energia de compactação necessária para manter a densidade de projeto e que o aumento no teor de fibras contribuiu para desenvolver o efeito esponjoso.

Pode-se alegar que a fibra mais longa é distribuída de forma mais homogênea entre os contatos das partículas de solo cimentadas, com maior impacto na resistência à compressão.

Há evidências de que o aumento na deformação axial desenvolvida durante o processo de ruptura das amostras é proporcional ao aumento no teor de fibras poliméricas incluídas na matriz solo-cimento.

Com base nos resultados de resistência à tração por compressão diametral, constatou-se que a inclusão de fibras na matriz solo-cimento auxiliou no aumento da resistência à tração do compósito formado, da mesma forma que visto nos resultados do ensaio de resistência à compressão simples.

Verificou-se também que, independentemente do teor utilizado, as fibras de 6 mm contribuíram para uma resistência à tração média correspondente a 13,3% em relação à sua resistência à compressão simples, enquanto a fibra mais longa

contribuiu para uma resistência à tração correspondente a 14,9% da sua resistência à tração livre. resistência à compressão, para os teores de 0,50% e 0,75%.

É uma ilusão que a inclusão de fibras numa matriz, cimentada ou não, aumente a resistência à tração do material muito mais do que a resistência à compressão não confinada. Até o momento, em estudos que relatam a utilização de fibras como material de reforço, não foi encontrado nenhum caso que afirme aumento da resistência à tração acima do limite máximo do intervalo acima especificado.

Agradecimentos

O primeiro autor expressa seus agradecimentos ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPE, à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, à FACEPE, ao CNPq, ao Projeto REAGEO (PRONEX), ao Programa CNPq da Universidade do Porto e aos orientadores deste artigo.

Notação

Os seguintes símbolos são usados neste documento:

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas;
 c = Intercepto Coesivo;
 CC = Teor de Cimento;
 CP = Corpo de Prova;
 CP V – ARI = Cimento de Alta Resistência Inicial;
 D = Diâmetro do Corpo de Prova Expresso em Milímetros (mm);
 $E_T = (1.2.FR)/(\pi.D^2.\epsilon_3)$ = Módulo de Elasticidade, Expresso em MegaPascals (MPa);
 T_F = Teor de Fibra;
 F_R = Força de Resistência, Expresso em Newtons (N);
 I_A = Índice de Atividade da Fração Argila;
 $I_P = W_L - W_P$ = Limite de Plasticidade;
 ISSMFE = Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica;
 LA' = Areia Argilosa Laterítica;
 L_F = Comprimento Axial Final da Amostra;
 L_I = Comprimento Axial Inicial do Corpo de Prova;
 W_L = Limite de Liquidez;
 W_P = Limite de Plasticidade;
 k = Permeabilidade;
 MCT = Miniatura Compactada Tropical;
 n = Porosidade;
 NBR = Norma Brasileira;
 PD = Razão de Dispersão;
 PMAHC = Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti;
 PP = Polipropileno;
 R^2 = Coeficiente de Correlação;
 TSDC = Resistência à Tração por Compressão Diametral;
 RCS = Resistência à Compressão Não Confinada;
 $U_{CSSolo-Cimento(7\text{ Dias})}$ = Resistência à Compressão Não Confinada após 7 Dias de Cura;
 V_C = Volume de Vazios;
 W_{Opt} = Teor Ótimo de Umidade;
 γ_{dMax} = Densidade Seca Máxima;
 ΔL = Variação Axial no Comprimento da Amostra Após o Teste;
 ϵ_1 = Deformação Axial;
 ϵ_3 = Deformação Longitudinal da Amostra, Quando $F = 0.3.FR$;
 $\epsilon_v = (L_F - L_I)/L_I = \Delta L/L_I$ = Extensão Axial;
 ϕ' = Ângulo de Atrito Efetivo.

Referências

- THE ASTM. “Standard test methods for compression strength of molded soil-cement cylinders”. ASTM D 1633-00. Philadelphia, USA, 2003.
- BENSON. C. H., KHIRE. M. U. “Reinforcing sand with strips of reclaimed high-density polyethylene”. Journal of Geotechnical Engineering. v. 121. p. 838-855, 1994.
- BRAZILIAN STANDARDS ASSOCIATION. (1994). “Mortar and concrete: determination of tensile strength by diametrical compression of cylindrical specimens” (in portuguese). NBR 7222. Rio de Janeiro. Brazil.
- CHAIYAPUT, S., ARWAEDO, N., KINGNOI, N., TRONG, N. N., AYAWANNA, J. “Effect of curing conditions on the strength of soil cement”. Elsevier - Case Studies in Construction Materials Vol. 16 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01082>.
- CONSOLI. N. C. “A method proposed for the assessment of failure envelopes of cemented sandy soils”. Engineering Geology. v. 169. p. 61-68, 2014.
- CONSOLI. N. C., MORAES, R. R., FESTUGATO, L. “Variables controlling strength of fibre-reinforced cemented soils”. Proceedings of the ICE - Ground Improvement. v. 166. p. 221-232, 2013.
- CONSOLI, N. C., ROTTA, G. V., PRIETTO, P. D. M. “Yielding-compressibility-strength relationship for an artificially cemented soil cured under stress”. Géotechnique. v. 56. N. 1. p. 69-72, 2006.
- FALORCA, I. M. C. F. G. et al. “Residual Shear Strength of Sandy Clay Reinforced with Short Polypropylene Fibres Randomly Oriented”. 8th International Conference on Geosynthetics. IGS. Yokohama. v. 4. p. 1663-1666. 2006.
- FESTUGATO, L. “Hydration behavior and cyclic shear response of fiber-reinforced cemented mining waste” (in Portuguese). 2011. 224 f. Thesis (Doctorate in Civil Engineering). UFRGS. Porto Alegre, Brazil, 2011.
- FESTUGATO, L., F. A., and CONSOLI. N. C. “Cyclic shear response of fibre-reinforced cemented paste backfill”. Géotechnique Letters. v. 3. p. 5-12, 2013.
- FEUERHARMEL. M. R. “Behavior of Reinforced Soils with Polypropylene Fibers” (in portuguese). 2000. 152 f. Dissertation (Master in Civil Engineering) – Civil Engineering Post-graduate Program. UFRGS. Porto Alegre, Brazil, 2000.
- FOPPA, D., FESTUGATO, L., CONSOLI, N. C., HEINECK, K. S., FONSECA, A. J. P. V. “Key variables in the mechanical resistance control of soil-cement mixtures” (in portuguese). Geotechnics”. Geotecnia (Lisbon), v. 109, p. 25-42, 2007.
- FOPPA, D., AND CONSOLI, N. C. “Porosity/Cement ratio controlling initial bulk modulus and incremental yield stress of an artificially cemented soil cured under stress”. Géotechnique Letters. v. 4. p. 22-26, 2014.
- FOPPA. D. “Analysis of Key Variables in the Control of the Mechanical Resistance of Artificially-cemented Soils” (in portuguese). 2005. 146 f. Dissertation (Master in Civil Engineering) – Post-graduate Civil Engineering Program, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2005.
- GUEDES, S. B. “Study of the mechanical performance of a micro-reinforced cement with synthetic fibers for use as primary coating on unpaved roads” (in portuguese). 515 f. Thesis (Doctorate in Civil Engineering) – Post-graduate Civil Engineering Program, UFPE, Recife, Brazil, 2013.
- JARITNGAM, S., YANDELL, W. O., TANEERANANON, P. “Development of Strength Model of Lateritic Soil-Cement” ENGINEERING JOURNAL Volume 17 Issue 1, 2013. DOI:10.4186/ej.2013.17.1.69.
- KARPISZ, I., PYDA, J., CICHY, L., SOBALA, D. “Study of the effect of cement amount on the soil-cement sample strength”. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. DOI:10.1088/1757-899X/365/4/042061.

-
- LAFAYETTE, K. P. V. “*Geological-Geotechnical Study of the Erosive Process on Slopes in the Metropolitan Park Armando de Holanda Cavalcanti - Cabo de Santo Agostinho / PE*” (in portuguese). 2006. 358 f. Thesis (Doctorate in Civil Engineering) – Post-graduate Civil Engineering Program, Federal University of Pernambuco, Recife, Brazil. 2006.
- LARNACH, W. J. “*Relationship between dry density, voids/cement ratio and strength of soil-cement mixtures*”. Civil Engineering and Public Works Reviews. London: Lomax Erskine and Co. Vol. 55. N. 648. p. 903-905, 1960.
- MAGHOUS, S., CONSOLI, N.C., FONINI, A., PASA DUTRA, V. F. “*A theoretical-experimental approach to elastic and strength properties of artificially cemented sand*”. Computers and Geotechnics. v. 62. p. 40-50, 2014.
- MARQUES, S., CONSOLI, N.C., ALMEIDA AND SOUZA, J. “*Testing cement improved residual soil layers*”. Journal of Materials in Civil Engineering. v. 26. p. 544-550, 2014.
- MIDDLETON, H. E. “*Properties of soils which influence soil erosion*”. U.S. Department Agricultural Technical Bulletin, No. 178. 16 p, 1930.
- RIOS, S., VIANA DA FONSECA. A. J. P., BAUDET, B. A. “*The effect of the porosity/cement ratio on the compression of cemented soil*”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering: Vol. 138. No. 11. pp. 1422–1426, 2012.
- SEVERO, R. N. F. “*Geotechnical Characterization of the Ponta do Pirambu Cliff in Tibau do Sul-RN Considering the Influence of Soil Behavior in Undeformed and Artificially Cementated States*” (in Portuguese). 280 f. Thesis (Doctorate in Civil Engineering), UFPE, Recife, Brazil. 2011.
- SILVA, S. R., FONSECA, A. J. P. V., CONSOLI, N. C., FLOSS, M. F., CRISTELO, N. “*Influence of grain size and mineralogy on the porosity/cement ratio*”. Géotechnique Letters, v. 3., p. 130-136, 2013.
- VIANA DA FONSECA, A. J. P., CABERLON, R., CONSOLI, N.C. “*Strength properties of sandy soil–cement admixtures*”. Geotech. Geol. Eng., 27(6):681–686, 2008.
- WANG,S., GUO, S., GAO, X., ZHANG, P., LI, G. “*Effects of cement content and soil texture on strength, hydraulic, and microstructural characteristics of cement-stabilized composite soils*”. SPRINGER. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 81: 264. 2022. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02734-8>.