

Comportamento Deformacional do Solo-Cimento Reforçado com Microfibras

Deformational Behavior of Soil-Cement Reinforced with Microfibers

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

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil, Caruaru/PE, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5895-0653>

² Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil, Caruaru/PE, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0471-3908>

³ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto, Portugal.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9896-1410>

Resumo: Este artigo faz parte de um estudo realizado no Laboratório de Geotecnia da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) em parceria com a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) sobre o comportamento deformacional das fases elástica e plástica de um solo-cimento reforçado com microfibras sintéticas, para uso como revestimento primário em estradas rurais. Inicialmente foi desenvolvido um breve estudo sobre o comportamento de resistência mecânica do solo local. Através de critérios econômicos e técnicos foi estabelecido: teor de cimento (CC) = 5%, densidade máxima de massa seca (γ_d) = 19,8 kN/m³ e teor ótimo de água (w_{op}) = 11%. Os valores de densidade máxima de massa seca e respectivo teor ótimo de água, foram obtidos utilizando o solo no estado puro (sem a incorporação do cimento), após a realização do ensaio de compactação aplicando a energia do Proctor intermediário. O valor de 5% de cimento incorporado ao solo foi adotado por proporcionar ao mesmo uma resistência de 2,1 MPa (NBR-12253/2012), o qual adotou-se ser uma resistência de durabilidade satisfatória e de ordem econômica, a ser utilizada como revestimento primário em estradas rurais. Após a definição do teor de cimento (CC = 5%) iniciou-se a segunda etapa da pesquisa que consistiu na análise do comportamento mecânico da mistura solo-cimento com adição de teores de 0,25%, 0,50% e 0,75% de fibras sintéticas de, 6 mm e 24 mm. de comprimento e 18 μ m de diâmetro. Ao final do estudo constatou-se que o teor de 0,75% de fibra de 24 mm proporcionou o maior aumento de resistência e deformação na matriz solo-cimento-fibra. Na terceira e última etapa do trabalho, para analisar a deformação elástica e permanente da mistura de solo + 5% cimento + 0,75% FibroMac-24, foi realizado um ensaio triaxial cíclico em câmara de alta pressão. Esta é uma máquina especial que permitiu que a pressão confinante oscilasse paralelamente à carga axial distorcional cíclica. A análise dos resultados nestas condições de carregamento ajudou a extrair as seguintes conclusões que serão detalhadas no artigo: constatou-se que a mistura solo-cimento-fibra apresenta redução no módulo de deformação cíclica quando comparado com a mistura solo-cimento, a mesma também apresenta maiores valores de deformação permanente (plástica ou irreversível), por apresentar menor rigidez em relação à mistura solo-cimento.

Palavras-chave: Estrada Rural; Fibra; Cimento; Ensaios; Deformação.

Abstract: This article is part of a study undertaken in the Geotechnics Laboratory of Faculty of Engineering of the University of Porto (FEUP) in partnership with the Federal University of Pernambuco (UFPE) on the deformational behavior of the elastic and plastic phases of a soil-cement reinforced with synthetic microfibers, for use as a primer for low-cost roads. A brief study was first developed on the resistance mechanical behavior of the local soil. Through economic and technical criteria it was established that: cement content (CC) = 5%, maximum dry mass density (γ_d) = 19.8 kN/m³ and optimum water (w_{op}) = 11%. The maximum dry mass density values and their respective optimal water content were obtained using the soil in its pure state (without cement incorporation), after performing the compaction test applying the intermediate Proctor energy. The 5% cement content incorporated into the soil was adopted because it provides a resistance of 2.1 MPa (NBR-12253/2012), which was considered to offer satisfactory durability and economic feasibility, suitable for use as a primary overlay in rural roads. After setting the cement content (CC = 5%) the second stage of research began consisting of analyzing the mechanical behavior of the soil-cement mix with added contents of 0.25%, 0.50% and 0.75% of synthetic fibers, 6 mm and 24 mm in length and 18 μ m in diameter. At the end of the study, it was found that the 0.75% content of 24 mm fiber offered the highest increase in strength and deformation in the soil-cement-fiber matrix. In the third and last stage of the work, in order to analyze the elastic and permanent deformation of the mixture of soil + 5% cement + 0.75% FibroMac-24, a cyclic triaxial test was performed in a high-pressure chamber. This is a special machine that permitted confining pressure to oscillate parallel with the cyclic distortional axial load. The analysis of the results under these loading conditions helped to extract the following instructions that will be presented in the article: it was found that the soil-cement-fiber mixture presents a reduction in the cyclic deformation modulus when compared to the soil-cement mixture, which also presents higher values of permanent deformation (plastic or irreversible), as it presents less difficulty in relation to the soil-cement mixture.

Keywords: Rural Road; Fiber; Cement; Testing; Deformation.

1. Introdução

Este artigo é parte de um estudo desenvolvido no laboratório de geotecnia da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) em parceria com a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) sobre o comportamento de deformação, nas faixas elástica e plástica, de uma mistura de solo-cimento reforçada com microfibras sintéticas, para utilização como revestimento primário em estradas de terra existentes no Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti (PMAHC), no Cabo de Santo Agostinho, distante 41 km da cidade de Recife/PE.

O solo utilizado neste estudo foi proveniente da Formação Geológica Barreiras, um solo comumente utilizado em projetos geotécnicos na região metropolitana do Recife e que constitui uma importante unidade geológica em todo o litoral nordestino, estendendo-se do litoral norte do Amapá ao litoral leste do estado do Rio de Janeiro, abrangendo depósitos sedimentares mesozóicos de diversas bacias costeiras.

Neste estudo, um cimento de alta resistência inicial (ARI) foi adicionado ao solo local com teor de 5% (em relação ao peso da massa seca do solo) para ligar artificialmente os grãos do solo, de modo a torná-lo menos suscetível à ação da água (principalmente da chuva) e mais resistente ao desgaste causado pela circulação frequente de veículos de passeio.

Em outras palavras, adotou-se o valor de 5% de cimento incorporado ao solo para conferir-lhe uma resistência de 2,1 MPa (NBR-12253/2012), o que significa uma resistência que garanta durabilidade e econômica, para ser utilizado como revestimento primário em estradas rurais.

Com base nos estudos realizados por Feuerharmel (2000), Foppa et al. (2007), Viana da Fonseca et al. (2009), 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 influencia as seguintes propriedades: resistência à compressão simples, 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 demonstra que há uma melhora na resistência devido à ação das fibras, o que leva ao aumento da ductilidade, Guedes (2013), Consoli et al (2013), Festugato & Consoli (2013) e Festugato (2011).

Embora os geomateriais cimentados apresentem aumento na resistência e na rigidez, algumas desvantagens podem ser identificadas, tais como: os materiais tornam-se muito frágeis, a resistência à tração, embora superior, evolui rapidamente para valores nulos após a ruptura, dando origem a um comportamento frágil e perigoso e há tendência à fissuração durante a secagem, principalmente quando expostos ao ambiente.

Para evitar as desvantagens mencionadas, as fibras de polipropileno foram adicionadas à matriz, uma vez que os materiais poliméricos apresentam maior elasticidade, com consequente ductilidade mais variável e ampla, boa resistência à tração e, após a ruptura das ligações cimentícias, tornam-se muito mais versáteis para situações de carga intensiva, como carregamento cíclico em condições climáticas adversas. 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, além de maior permeabilidade, quando comparado aos solos ou misturas solo-cimento dos quais se originaram. Portanto, mais adequado para uso como revestimento primário.

A incorporação de fibras com diâmetro de 18 μm e comprimento de 24 mm, e teor de 0,75% em relação à massa seca de solo e cimento, teve como objetivo desenvolver um material compósito, mais flexível (mas tão resistente quanto o solo-cimento), que reduza o número de fissuras que se desenvolvem com a variação local constante de umidade e temperatura, e que proporcione uma resistência residual mesmo após possível rompimento das ligações de cimento entre as partículas de solo na matriz, após submetido a tráfego pesado de veículos.

Uma câmara de alta pressão foi utilizada para analisar a deformação elástica e permanente da mistura solo-cimento-fibra. Trata-se de uma máquina especial que permitiu que a pressão de confinamento triaxial oscilasse paralelamente a uma carga de distorção axial cíclica. As deformações elásticas e plásticas da mistura de solo com 5% de cimento, utilizada como referência, foram comparadas com a mistura submetida a um estudo mais detalhado: solo-cimento (5,0%) e fibra (0,75%). Ambas as misturas foram submetidas a carregamento cíclico com a tensão desviatória, mas com pressão de confinamento constante, por um lado, e pressão de confinamento variável, por outro, neste caso com a tensão de confinamento aumentando em fase com o aumento da tensão de distorção axial. Este último modelo de ensaio é o mais representativo do estado de tensão ao qual os materiais das camadas de um pavimento são submetidos. As misturas foram submetidas a 260.000 ciclos com faixas constantes de tensões desviatórias axiais e uma frequência constante de 1 Hz.

A análise dos resultados, dentro dessas condições de carregamento, permitiu as conclusões que serão detalhadas no artigo a seguir; constatou-se que a mistura solo-cimento-fibra apresenta menores valores de módulo de deformação

cíclica quando comparada com a mistura solo-cimento correspondente; a mistura solo-cimento-fibra desenvolve maiores valores de deformação permanente (plástica ou irreversível), devido à sua menor rigidez quando comparada com a mistura solo-cimento; constatou-se também que a variação na pressurização cíclica múltipla (axial e confinante), ou seja, quando houve variação simultânea de fase de confinamento e carregamento axial, ocorreu maior deformação permanente, o que significa que este é um caminho de tensões mais danoso para a microestrutura do material, revelando a importância deste protocolo de ensaio.

2. Programa Experimental

O programa experimental foi desenvolvido em três etapas.

A primeira etapa consistiu no estudo para determinar o teor de cimento que deveria ser incluído no solo, para que a mistura resultante atingisse a resistência de 2100 kPa após sete dias de cura, conforme estabelecido na NBR-12253/2012. Nesta etapa, o estudo foi realizado utilizando três pares diferentes de resultados de compactação (γ_d ; w_{Op}), submetidos a quatro diferentes teores de cimento. Ao final da presente etapa, o teor de cimento e o par (γ_d ; w_{Op}) foram escolhidos e estabelecidos em estudos posteriores.

Na segunda etapa da pesquisa, foi realizado um estudo baseado na realização de ensaios de Resistência à Compressão Livre, nos quais o comportamento resistivo e deformacional do solo-cimento foi observado quando fibras poliméricas de 6 mm e 24 mm foram incluídas nos teores de 0,25%; 0,50% e 0,75%, em relação à relação solo-cimento. Após a finalização do estudo, foram selecionados o tamanho da fibra e seu teor que tiveram maior influência no comportamento tensão-deformação da mistura solo-cimento.

Na terceira e última etapa, o comportamento elástico e plástico do solo-cimento e do solo-cimento-fibra foi examinado por meio da realização de um ensaio triaxial cíclico, com e sem variação na tensão de confinamento (σ_3). Nessa etapa, ambas as misturas foram submetidas a um total de 260.000 ciclos de carga e descarga, com a tensão de desvio (σ_1) sendo aplicada com igual frequência de 1 Hz.

2.1. Caracterização do Solo da Formação Geológica Barreiras

O solo estudado pertence à formação geológica de Barreiras, 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). Essa formação abrange depósitos sedimentares mesozóicos de diversas bacias costeiras. Com base nos resultados da caracterização geotécnica, o solo coletado é classificado como argilo-arenoso, com $w_L = 30\%$ e $w_p = 18\%$.

A fração fina do solo pertence ao grupo das argilas inorgânicas de baixa plasticidade. A fração argilosa é considerada inativa, pois apresenta um índice de atividade de $IA = 0,4$. Devido à razão de dispersão de Middleton (1930), o solo é considerado erodível, pois obteve-se $PD = 100\%$. Com base na classificação MCT, o solo foi classificado como areia franco-laterita (LA'). O solo não apresenta comportamento expansivo ou colapsável evidente, como inferido a partir dos ensaios e classificações usuais.

A curva característica resultante, uma curva bimodal, é típica de solos nos quais a distribuição granulométrica é mal graduada, com gradação aberta. Isso está de acordo com a uniformidade do solo, que apresenta uma distribuição estreita de tamanhos de partículas (ver Tabela 1). Por meio de ensaios de cisalhamento direto em condições de alagamento, o solo apresenta um intercepto coesivo $c' = 2,1$ kPa e ângulo de atrito $\phi' = 31,1^\circ$.

A permeabilidade do solo, determinada por um permeâmetro em laboratório, foi: $k = 6,45 \times 10^{-6}$ m/s. A Tabela 2 mostra os valores dos resultados da densidade máxima de massa seca e seus valores ótimos de água para os três tipos de energia Proctor aplicados. Mais informações sobre os ensaios e resultados de laboratório podem ser encontradas em Guedes (2013) e Lafayette (2006).

Tabela 1 – Distribuição Granulométrica.

Fração	Tamanho dos Grãos	Quantidade
Pedregulho Fino	$2.0 \text{ mm} < \phi < 6.0 \text{ mm}$	3%
Areia Grossa	$0.6 \text{ mm} < \phi < 2.0 \text{ mm}$	12%
Areia Média	$0.2 \text{ mm} < \phi < 0.6 \text{ mm}$	28%
Areia Fina	$0.06 \text{ mm} < \phi < 0.2 \text{ mm}$	20%
Silte Grosso	$0.02 \text{ mm} < \phi < 0.06 \text{ mm}$	3%

Silte Médio	$0.006 \text{ mm} < \phi < 0.02 \text{ mm}$	2%
Silte Fino	$0.002 \text{ mm} < \phi < 0.006 \text{ mm}$	2%
Argila	$\phi < 0.002 \text{ mm}$	30%

Fonte: Autores (2025).

Tabela 2 – Parâmetros Obtidos em Função da Energia de Compactação Aplicada.

Parâmetros	Energia de Compactação		
	Normal	Intermediária	Modificada
1 – Energia de Compactação Aplicada (kg.cm/cm ²)	5.7	12.6	26.6
2 – Teor Ótimo de Água (%)	12.5	11.0	10.2
3 – Peso Específico Seco Máximo (kN/m ³)	18.6	19.8	20.5
4 – Volume de Vazios	0.43	0.34	0.29
5 – Porosidade (%)	29.9	25.3	22.6
6 – Grau de Saturação (%)	77.8	86.2	92.4
7 – Conteúdo de Ar (%)	6.6	3.5	1.7

Fonte: Autores (2025).

2.2. Caracterização das Fibras de Polipropileno

As fibras utilizadas foram desenvolvidas a partir da polimerização do propileno, um 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, densidade de 9,1 kN/m³, diâmetro de $1,10^{-6}$ m e comprimentos de 6 mm a 24 mm.

2.3. Caracterização do Cimento de Alta Resistência Inicial - ARI

O cimento utilizado na pesquisa foi o Cimento de Alta Resistência Inicial, também conhecido como Cimento de Cura Rápida. Em português, é denominado “Alta Resistência Inicial” (ARI). O cimento utilizado é produzido na fábrica de Pacatuba, no estado de Sergipe, sendo denominado pela sigla CPV-ARI. A Tabela 3 abaixo identifica suas características.

Tabela 3 – Propriedades Químicas, Físicas e Mecânicas do Cimento ARI.

Tipos de Análises							
Química (%)				Física (kN/m ³)	Mecânica - Resistência a Compressão Simples - MPa		
Perda ao Fogo	RS	SO ₃	CaO Livre	Massa Específica	1 Dia	3 Dias	7 Dias
4,50	0,54	3,50	2,15	31,2	19,7	20,7	29,4

Fonte: Autores (2025).

3. Metodos

3.1. Determinação do Teor de Cimento

Após a caracterização dos materiais, iniciou-se o estudo para a determinação do teor de cimento.

Nesta etapa, foi desenvolvido um breve estudo utilizando o ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCC), sobre a influência do teor de cimento e da energia de compactação na resistência da mistura solo-cimento.

No ensaio de RCC, corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura foram moldados em água ótima (w_{op}) e densidade máxima a seco (γ_d), determinadas pelos ensaios de compactação nas energias Proctor normal, intermediária e modificada para solo puro (Tabela 2).

Para cada par (w_{op} ; γ_d), foram utilizados os teores de 3%, 4%, 5% e 6% de cimento em peso, em relação à massa seca do solo.

O tempo de cura estabelecido para os corpos de prova foi de seis dias em câmara úmida e 24 horas imersos em recipiente contendo água destilada à temperatura ambiente. Em seguida, foram secos superficialmente e rompidos a uma velocidade de deformação constante de 1,00 mm/minuto..

Para cada teor de cimento adotado, três (3) corpos de prova foram moldados. Como diretriz de aceitação para o ensaio, assumiu-se que as resistências individuais dos três corpos de prova considerados idênticos não eram maiores ou menores que 10% da resistência média desse grupo. Assim, o total de corpos de prova moldados foi de: três (3) (energia de compactação aplicada) x quatro (4) (teores de cimento utilizados) x três (3) (número de réplicas de cada condição adotada) = 36 CPs.

3.2. Determinação do Teor de Fibras Poliméricas

Após a realização do estudo sobre a influência do cimento na resistência solo-cimento, foi desenvolvido um segundo estudo envolvendo fibras poliméricas na matriz solo-cimento. Neste estudo, os parâmetros fixos foram: teor de cimento = 5%, $w_{Op} = 11\%$ e $\gamma_d = 19,8 \text{ kN/m}^3$. Os parâmetros variáveis foram: teor de fibras (0,25%; 0,50% e 0,75%) e comprimento (6 mm e 24 mm). As fibras de polipropileno Maccaferri foram escolhidas durante o estudo por apresentarem características mais homogêneas em termos de dimensão e propriedades físicas e químicas.

Nesta etapa, foram utilizados corpos de prova cilíndricos com 70 mm de diâmetro e 140 mm de altura.

Após a preparação e moldagem dos corpos de prova, estes foram colocados em câmara úmida, onde permaneceram por um período de 24 horas, sendo posteriormente desmoldados, pesados e dimensionados. Em seguida, os corpos de prova foram novamente colocados na câmara úmida, onde permaneceram por um período de 19 dias. No 20º dia, foram imersos em água potável e removidos após dois (2) dias para a realização do ensaio de Resistência à Compressão Simples. Por fim, após a ruptura do corpo de prova, iniciou-se o processo de determinação da sucção presente, posicionando-se papel de filtro (Whatman nº 42) exatamente sobre as duas partes da zona onde ocorreu a cunha de deformação.

Foram moldados 18 corpos de prova, e o critério de aceitação do ensaio foi o mesmo adotado para a determinação do teor de cimento. Ao final do estudo, constatou-se que o teor de 0,75% de fibra de 24 mm, quando incluído na matriz solo-cimento, influenciou mais fortemente o comportamento tensão-deformação da mistura.

3.3. Análise do Comportamento Deformacional Cíclico

O comportamento deformacional cíclico da mistura solo-cimento-fibra foi analisado por meio do ensaio triaxial cíclico, com e sem variação da tensão de confinamento.

Os ensaios triaxiais cíclicos foram conduzidos utilizando corpos de prova de $\phi = 70,0 \text{ mm}$ e $h = 119,0 \text{ mm}$.

Com o objetivo de, durante o processo de ciclagem radial, eliminar possíveis deformações nas laterais da célula triaxial convencional (a lateral de acrílico) e obter maior precisão na variação da pressão de confinamento registrada pelo manômetro, optou-se pela utilização da câmara de alta pressão (figura 1a), que possui todas as suas partes em aço e suporta uma pressão interna máxima de 10 MPa (dez megaPascal).

Para contribuir ainda mais com a precisão da oscilação da pressão de confinamento, em vez de utilizar tubos de borracha que poderiam dilatar durante o processo de ciclagem radial, utilizou-se tubos de cobre (figura 1b) que conectariam o servomotor (servomotor de pressão de confinamento – responsável pela oscilação da pressão de confinamento no interior da câmara) à câmara triaxial de alta pressão.

Para o sistema triaxial utilizado, a tubulação de água que conecta o servomotor e a câmara triaxial deve ser adaptada ao fluxo circulante, admitindo-se que seja a mais curta e rígida possível, para que sua elasticidade não interfira no servocomando de pressão.

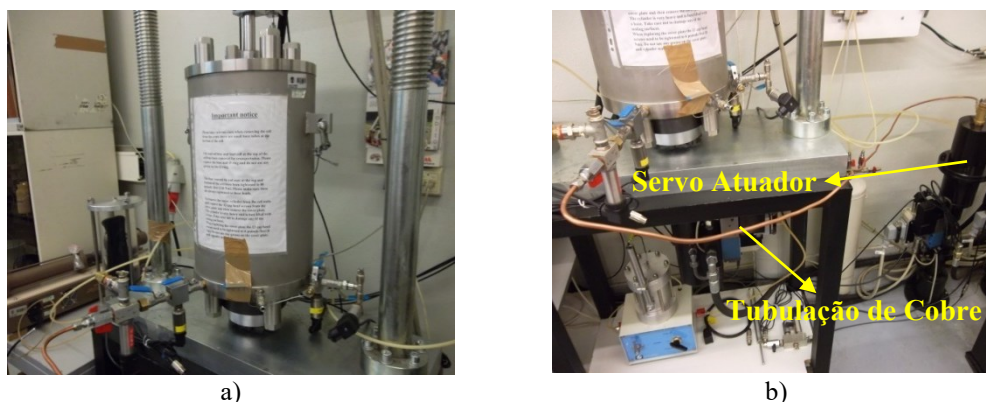


Figura 1 – a) Câmara de Alta Pressão e b) Tubulação de Cobre.

Fonte: Autores (2013).

O processo de ciclagem da amostra utilizou dois (2) modelos:

3.3.1 Ciclagem Apenas Axial

Neste modelo, os corpos de prova foram submetidos a ciclos de aumento e diminuição de tensão apenas na direção axial, mantendo-se a pressão de confinamento constante em 20 kPa. A escolha do seu valor deveu-se ao fato de o material examinado ser projetado como um primer de pavimentação, com a estrutura localizada na superfície da estrada.

A tensão axial máxima aplicada correspondeu à tensão de contato pneu-pavimento, considerando o eixo padrão estabelecido pela AASHTO (Associação Americana de Oficiais de Rodovias e Transportes Estaduais), conhecido como eixo padrão rodoviário, que consiste em um eixo simples com pneus duplos, cuja tensão de pressão de contato pneu-pavimento é de $5,6 \text{ kgf/cm}^2 = 560 \text{ kPa}$.

Após a inspeção geral do sistema, iniciou-se o processo de ciclagem, que consistiu na aplicação de 260.000 ciclos ininterruptos de carga e descarga. Considerando uma frequência de 1 Hz, ou seja, um ciclo de carga e descarga em um período de um segundo (T), o ensaio durou aproximadamente 72 horas (três dias x 24 horas x 60 minutos x 60 segundos = 259,200 segundos → 259,200 ciclos).

Por se tratar de um ensaio não destrutivo, utilizou-se apenas um corpo de prova para cada material.

3.3.2 Ciclagem Axial e Radial

Neste modelo de ciclagem, os corpos de prova foram submetidos a ciclos de aumento e alívio de pressão tanto na direção axial quanto radial.

Para a realização dos ensaios de ciclagem axial e radial, ambos simultaneamente, os primeiros procedimentos adotados foram os mesmos descritos para o ensaio de ciclagem axial. No entanto, o aumento da pressão de confinamento foi programado no sistema eletromecânico em 20 kPa, simultaneamente ao momento em que a tensão axial atingiu 560 kPa. Quando a tensão axial atingiu a pressão de 560 kPa, a pressão de confinamento foi de 40 kPa. No momento do alívio, ou seja, tensão axial nula, a pressão de confinamento caiu para 20 kPa.

Esses dois tipos de procedimentos foram realizados para a mistura de solo + 5% de cimento e solo + 5% de cimento + 0,75% de FibroMac-24. A Figura 2 ilustra o diagrama da aplicação de carga para os dois modelos de ciclagem utilizados.

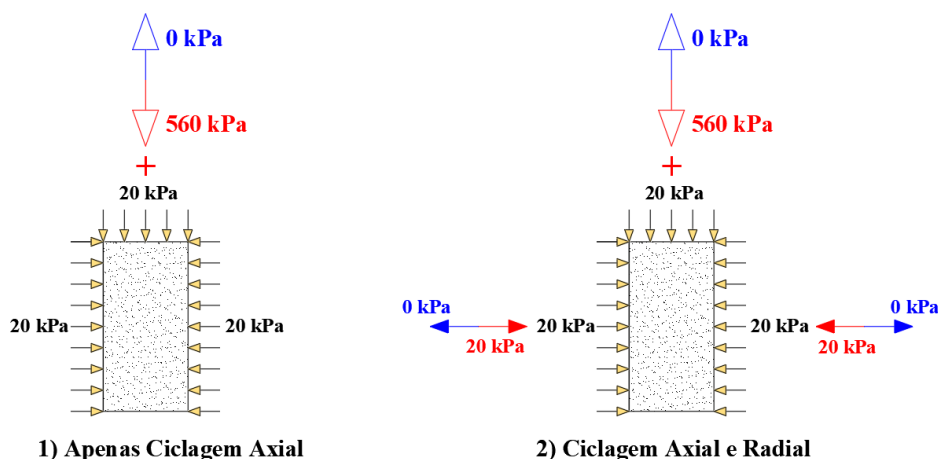


Figura 2 – Processo de Ciclagem.

Fonte: Autores (2013).

4. Resultados e Discussões

4.1. Análise da Influência do Teor de Cimento e da Energia de Compactação nas Características das Misturas

4.1.1. Análise do Efeito do Teor de Cimento na Resistência do Solo-Cimento

A Figura 3 mostra o gráfico da variação da resistência à compressão não confinada com o 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 na 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 reto, e proporcional à energia de compactação aplicada (a massa específica e seu teor ótimo de água). Conclui-se, portanto, que a cimentação é mais eficaz para vazios menores na mistura.

O comportamento mecânico de ensaios de especificação simples, em uma mistura de solo com aumento do teor de cimento em sua matriz, conforme mostrado 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. (2009), Foppa et al. (2007) e Consoli et al. (2006). Este é um comportamento comum ao adicionar teor de cimento a um solo, seja ele argiloso, siltooso, arenoso ou cascalhoso.

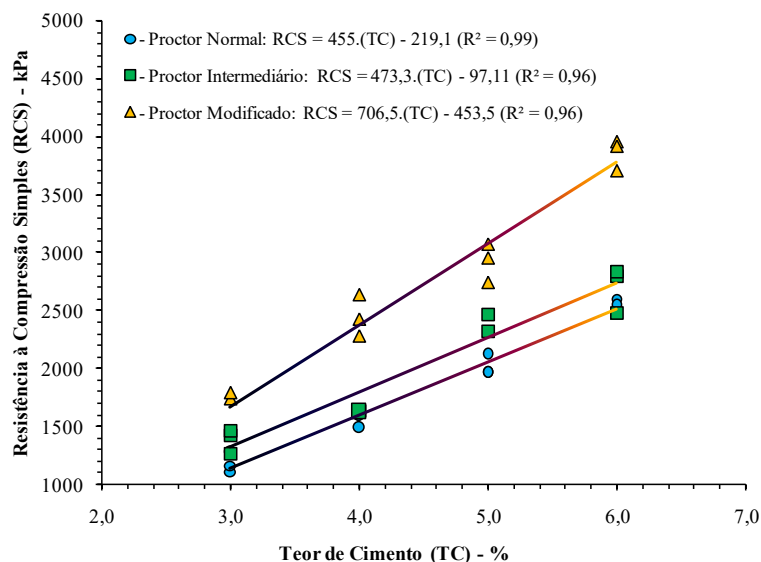


Figura 3 – Variação da resistência mecânica em função do teor de cimento e da compactação.

Fonte: Autores (2013).

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

4.1.2. Análise da Relação Vazios/Cimento na Resistência Solo-Cimento

A Figura 4 apresenta o gráfico da variação do UCS com a razão entre o volume de vazios e o teor de cimento. A curva de ajuste foi obtida com base na média do UCS e da razão Vazios/Cimento, de todos os três corpos de prova relevantes em cada teor de cimento e compactação. Analisando o gráfico, pode-se observar que o aumento do UCS 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 o UCS e uma razão entre Razões de Vazios (ou Porosidade) sobre o Teor de Cimento. Para as condições testadas, a curva de ajuste que resulta no maior coeficiente de correlação é o tipo de potência.

O valor do expoente do parâmetro vazios/cimento ($n/C_{iv}^{0,77}$) obtido durante este estudo foi menor quando comparado aos obtidos para solos com composição granulométrica maior que a do solo em estudo. No entanto, concorda com os resultados dos testes realizados por Severo et al. (2010), Vitali (2008), Cruz (2008) e Foppa (2005). Esses pesquisadores constataram que quanto maior a composição granulométrica do solo, maior o expoente de ajuste no denominador dos parâmetros vazios/cimento $[n/(C_{iv})^{\text{Expoente}}]$ nas curvas da razão UCS x $n/(C_{iv})^{\text{Expoente}}$.

Ao final do estudo, por razões tanto econômicas quanto técnicas, optou-se por utilizar as variáveis: CC = 5%; w_{Op} = 11% e γ_d = 19,8 kN/m³.

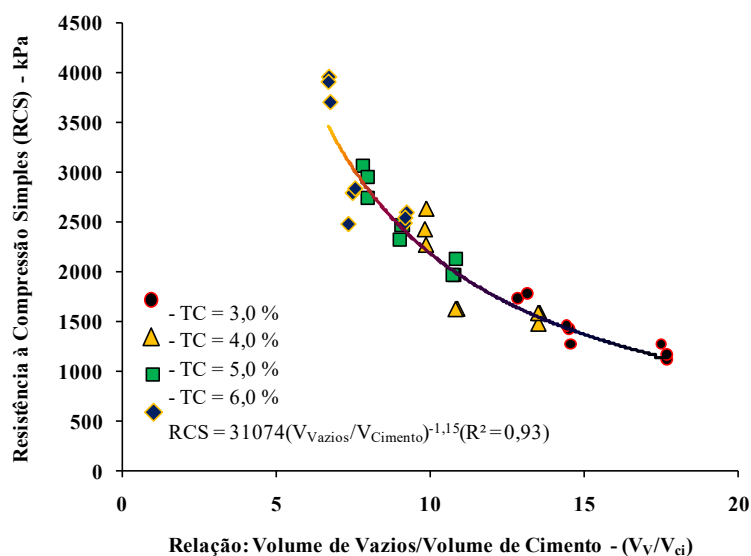


Figura 4 – Variação da Resistência à Compressão Não Confinada da Relação Vazios/Cimento.
Fonte: Autores (2013).

4.1.3. Análise da Influência do Teor e Comprimento das Fibras na Relação Solo-Cimento

Neste estudo, observou-se que a inclusão de fibras na matriz solo-cimento contribui para o aumento da resistência à compressão. Observou-se que o aumento da resistência foi mais pronunciado com o uso de fibras com comprimentos maiores (24 mm).

Os resultados apresentados na figura 5 referem-se apenas à resistência desenvolvida pela ligação coesiva do cimento (resistência estrutural-química), ao grau de compactação (componente físico: tecido) e à influência da presença de fibras (flexibilidade) na matriz, ou seja, ao valor da carga de ruptura ou de ruptura subtraído da pressão de sucção que pode atuar em condições não saturadas.

Este último componente da sucção foi considerado irrelevante, visto que, em média, seu valor corresponde a 3,22% do UCS.

Observando o gráfico da figura 5, observa-se que, mesmo para o menor teor de fibras (0,25%), além da contribuição da matriz solo-cimento, observa-se um aumento significativo na resistência à compressão uniaxial.

Observa-se, em primeiro lugar, que não é o teor máximo de cimento que confere a máxima resistência à mistura solo-cimento, pois uma pequena quantidade de fibras na matriz solo-cimento não acarreta aumento da resistência à compressão simples do compósito, tendo em vista a quebra das ligações de ligação entre os grãos do solo desenvolvidas pelo cimento. Portanto, seria de se esperar uma reversão proporcional da resistência, devido à queda das ligações de cimento entre os grãos do solo causada pela presença das fibras e também uma possível redução do atrito entre os grãos devido à sua presença.

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

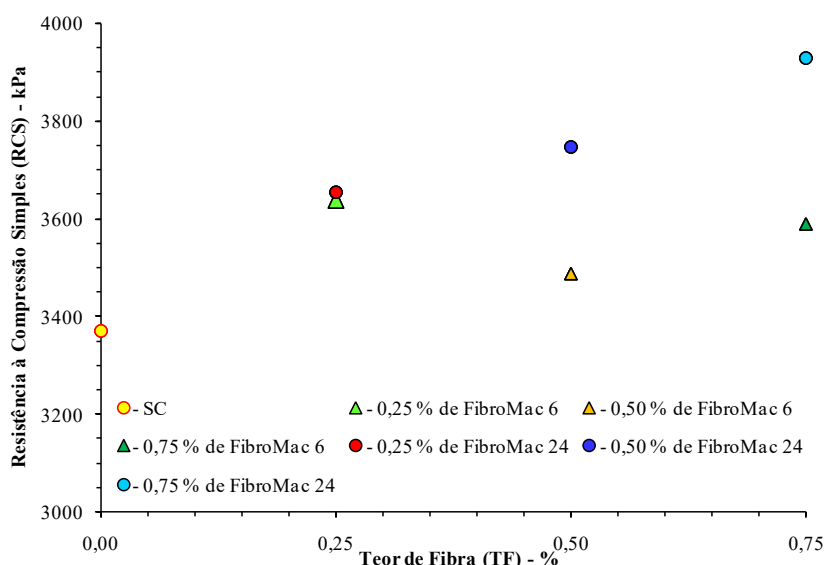


Figura 5 – Resistência média à compressão não confinada versus conteúdo e comprimento das fibras.
Fonte: Autores (2013).

4.1.4. Análise da Relação Entre Resistência à Compressão Não Confinada e Conteúdo e Comprimento de Fibra

A Figura 6 ilustra a variação das deformações de cada corpo de prova em função do aumento do teor e do comprimento das fibras utilizadas na mistura.

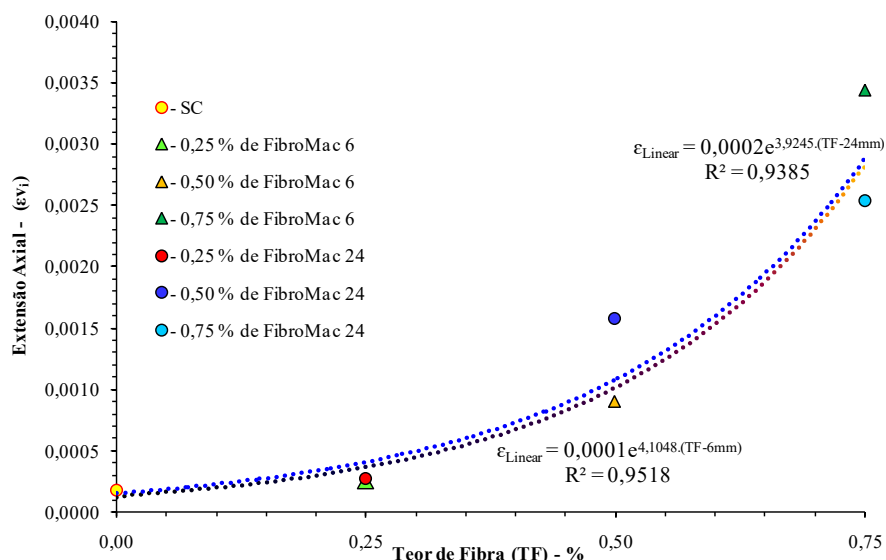


Figura 6 – Variação da Deformação Axial Média com o Conteúdo e o Comprimento da Fibra.
Fonte: Autores (2013).

Observa-se que o módulo de Young (EI) da tangente inicial foi bastante reduzido com o aumento da inclusão de fibras na matriz solo-cimento, sendo essa redução fortemente influenciada pelo elevado aumento da deformabilidade das misturas com fibras adicionadas. Esse comportamento é justificado pelo aumento da deformação devido ao aumento da flexibilidade da estrutura do solo, onde as fibras tendem a apresentar um efeito "esponjoso", 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 composição dessas misturas, as fibras não estão alongadas na matriz, ou seja, não estão incluídas já esticadas, o que implica que precisam se deformar para atingir sua resistência.

Para concentrações de 0,25% a 0,50%, a maior extensão dos compostos formados pela fibra mais longa em comparação com a fibra mais curta é consequência da necessidade de as fibras mais longas se deformarem mais para atingir sua resistência.

Para um teor de fibras de 0,75%, esse comportamento não foi observado, provavelmente devido à influência da homogeneização mais satisfatória das fibras maiores em relação às fibras menores. Estas últimas podem ter aderido de forma mais eficaz, formando um filamento de maior diâmetro, que, ao ser mobilizado em deformação, começou a deslizar um sobre o outro para melhor se acomodar no traçado, a fim de começar a contribuir para a resistência à compressão da mistura.

4.2. Análise do Comportamento Deformacional Cíclico dos Materiais

Os Dados das deformações irreversíveis e reversíveis e dos módulos resilientes de cada material foram obtidos para os seguintes números de ciclos: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 50, 100, 200, 400, 1.000, 2.500, 5.000, 7.500, 10.000, 12.500, 30.000, 40.000, 50.000, 60.000, 70.000, 80.000, 90.000, 100.000, 120.000, 140.000, 160.000, 180.000, 200.000, 220.000, 250.000 e 260.000.

O módulo cíclico (MC) foi obtido calculando-se a tangente da reta que une os pontos máximo e mínimo da deformação causada durante um ciclo de carga e descarga.

A fórmula utilizada para o cálculo do módulo cíclico, com a pressão de confinamento variando em fase com a tensão desviatória, depende não apenas da deformação axial, mas também da deformação radial, como pode ser observado na equação (1) a seguir.

$$MC = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot (\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3)}{(\sigma_1 + \sigma_3) \cdot \varepsilon_1 - 2 \cdot \sigma_3 \cdot \varepsilon_R} \quad (1)$$

4.3. Comportamento do Módulo Cíclico (MC)

Na Figura 7 mostra-se detalhadamente o comportamento do módulo cíclico durante os 260.000 ciclos de carga e descarga para o solo-cimento-fibra em comparação com o solo-cimento.

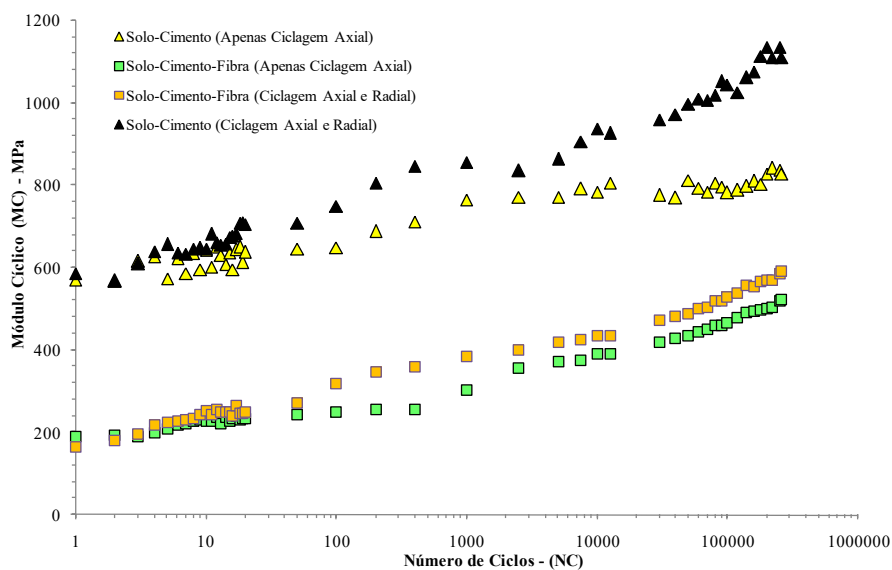


Figure 7 – Cyclic Modulus Function Cyclic Number.

Source: Autores (2013).

É evidente que o solo-cimento é o material que apresenta o maior valor de módulo cíclico. Esse comportamento se justifica única e exclusivamente pela sua rigidez, que contribui significativamente para uma menor deformação axial quando se aplica um certo aumento de carga, em comparação ao solo-cimento-fibra.

Solo-cimento-fibra é o material que apresenta menor valor de módulo cíclico (MC), por se tornar mais deformado na direção da aplicação da carga, devido à presença de fibras que tornam o material menos rígido, aumentando o comportamento esponjoso com o aumento do teor de fibras.

Comparando o comportamento dos módulos cíclicos de ambos os materiais, verifica-se que ambos apresentam uma tendência de aumento devido ao número de ciclos. Possivelmente, esse aumento é causado pela redução da deformação elástica com um aumento crescente da deformação plástica ou irreversível, devido às quebras nas ligações cimentícias.

Observa-se também que os resultados dos módulos cíclicos são sempre maiores para a condição em que a pressão de confinamento oscila simultaneamente à tensão desviatória (condição: axial e radial).

Possivelmente, a variação da pressão de confinamento com a tensão desviatória contribuiu para uma menor deformação elástica do material, aumentando o confinamento, o que, por sua vez, aumenta imediatamente a consolidação da estrutura do material durante a aplicação da carga axial.

Constata-se também que a condição usual de determinação do módulo cíclico ($\sigma_3 = \text{constante}$) oferece maior dano à estrutura do pavimento, por causar maior deformação elástica nos materiais das camadas.

4.4. Comportamento da Deformação Elástica (ϵ_e)

Ao comparar os materiais (Figura 8), verifica-se que o solo-cimento-fibra é o material que apresenta maior diminuição da extensão elástica com o aumento do número de ciclos (o que proporcionou maior aumento no modelo cíclico).

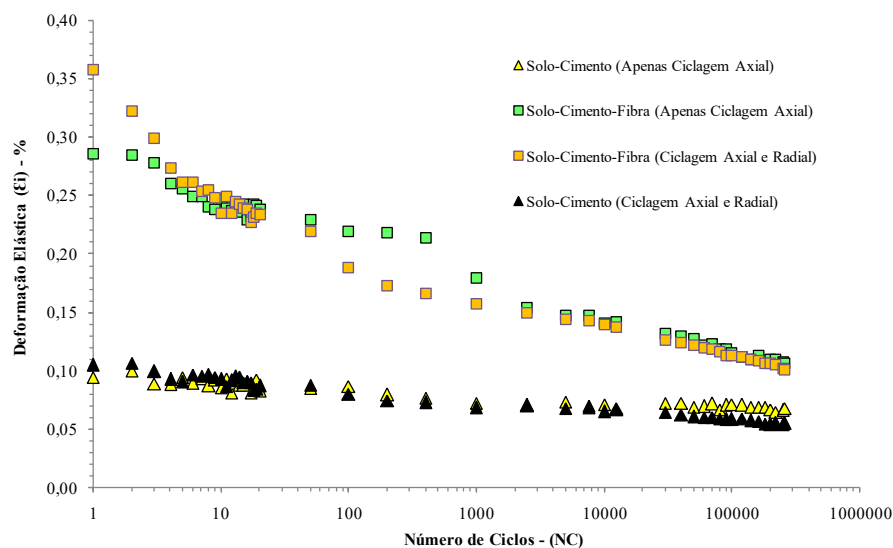


Figura 8 – Função de Comprimento Elástico Número Cíclico.

Fonte: Autores (2013).

A justificativa para esse comportamento se deve ao aumento mais acentuado na acomodação das partículas causado pelo número de ciclos.

Esse aumento na acomodação das partículas na matriz contribuiu para um maior número de contatos entre elas, o que resultou em maior atrito e, conseqüentemente, menor deslocamento entre as partículas, causando menor deformação elástica durante os ciclos.

Para a mistura solo-cimento, a deformação elástica durante os ciclos apresenta comportamento praticamente idêntico para as duas condições de ciclagem. No entanto, em torno de 30.000 ciclos, as condições axial e radial proporcionam menor deformação elástica, contribuindo para valores mais elevados do módulo cíclico.

Para a mistura solo-cimento-fibra, maiores deformações são encontradas apenas para a condição de ciclagem axial, portanto, maior resultado para o módulo cíclico. No entanto, há uma tendência de aproximação dos resultados ao longo do número de ciclos.

O ensaio triaxial cíclico, com tensão de confinamento constante, é o ensaio mais utilizado na determinação de parâmetros elásticos dos materiais em estudo para dimensionar as espessuras das camadas de um pavimento, mas o ensaio triaxial cíclico, com tensão de confinamento oscilante em conformidade com a tensão desviatória, é o modelo de ensaio que mais se aproxima do estado real de tensões ao qual os materiais das camadas do pavimento estão submetidos. Observa-se, no entanto, que o processo de ciclagem mais utilizado (apenas axial) contribui para um dimensionamento mais seguro, ao proporcionar maiores espessuras para as camadas do pavimento devido ao baixo valor obtido do módulo cíclico.

4.5. Comportamento da Deformação Permanente (ϵ_p)

Ao analisar a deformação permanente dos materiais durante os 260.000 ciclos realizados no ensaio triaxial cíclico com $\sigma_3 =$ constante, verifica-se que esta aumenta em decorrência do aumento do número de ciclos (Figura 9).

Constata-se que o solo-cimento-fibra é o material com maior deformação irreversível, ou seja, a maior deformação plástica entre os materiais. Provavelmente, o aumento significativo da deformação permanente neste material em particular se deve à baixa rigidez proporcionada pela estrutura de sua matriz.

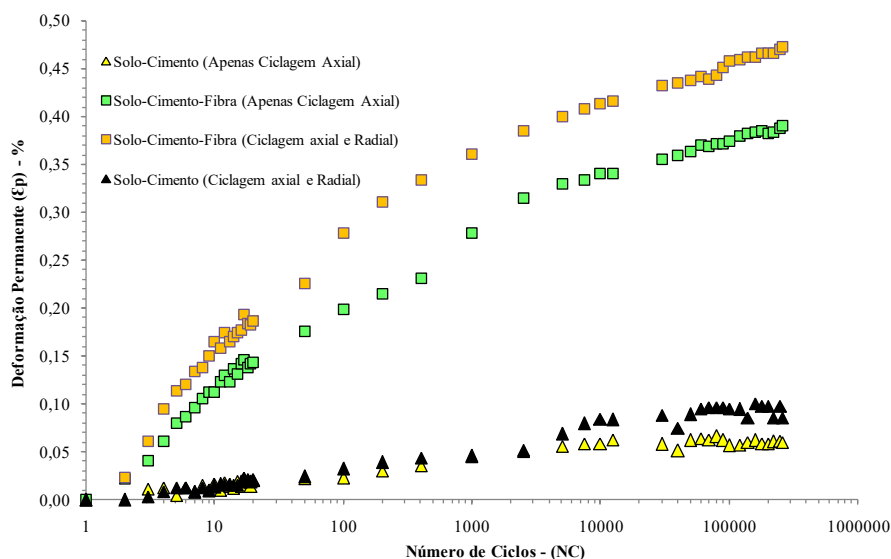


Figura 9 – Número Cíclico da Função de Deformação Permanente.

Fonte: Autores (2013).

O solo-cimento apresentou alta rigidez, devido ao baixo índice de vazios, combinado com a alta coesão causada pela cimentação artificial, sendo o material com menor deformação permanente durante os ciclos. Possivelmente, devido à estreita ligação existente entre o solo e as partículas de cimento, a deformação permanente se desenvolve pela quebra das ligações cimentícias e não pela acomodação das partículas.

Ao se tratar do material solo-cimento-fibra, devido ao modelo estrutural de sua matriz, possivelmente a deformação permanente se desenvolveu inicialmente pelo rearranjo das partículas seguido pela quebra das ligações cimentícias.

Em ambos os tipos de misturas, constatou-se que a ciclagem axial e radial proporcionou maior deformação permanente, digamos plástica, enquanto esse comportamento foi mais desenvolvido para a mistura solo-cimento-fibra.

5. Conclusões

Com base nos ensaios e resultados do presente estudo, pode-se concluir o seguinte:

Quanto à análise da influência do Teor de Cimento e da Energia de Compactação nas características das misturas:

Entendeu-se que o mecanismo pelo qual a redução da porosidade influencia o aumento da resistência solo-cimento está relacionado à existência de um maior número de contatos e maior intertravamento entre as partículas do solo, e que o aumento da resistência à compressão simples foi proporcional ao aumento do volume de cimento e inversamente proporcional ao aumento do volume de vazios.

Ao abordar o parâmetro vazios/cimento ($n/C_{iv}^{0,77}$) obtido neste estudo, o valor do expoente (0,77) foi menor quando comparado aos obtidos para solos com composição granulométrica maior que a do solo estudado. No entanto, isso corrobora os resultados dos ensaios realizados por Severo et al. (2010), Vitali (2008), Cruz (2008) e Foppa (2005). Esses pesquisadores constataram que quanto maior a composição granulométrica do solo, maior o expoente de ajuste no denominador dos parâmetros vazios/cimento $[n/(C_{iv})^{\text{Expoente}}]$ nas curvas da razão UCS x $n/(C_{iv})^{\text{Expoente}}$.

Em relação à análise da influência do teor e comprimento das fibras na matriz solo-cimento:

A inclusão de fibras na matriz solo-cimento contribuiu para o aumento da resistência à compressão livre, sendo esse aumento mais pronunciado para as fibras mais longas (24 mm).

Foi evidenciado que o aumento da extensão axial desenvolvida durante o processo de ruptura dos corpos de prova é proporcional ao aumento do teor de fibras na matriz solo-cimento.

Em relação ao comportamento deformacional cíclico:

O solo-cimento-fibra é o material que apresenta menor valor de módulo cíclico, tornando-se mais deformado na direção da aplicação da carga, devido à presença de fibras que tornam o material menos rígido, proporcionando um aumento no comportamento esponjoso com o aumento do teor de fibras.

Constatou-se que, por ser menos rígida, a mistura solo-cimento-fibra é o material que apresenta a maior deformação irreversível; ou seja, maior deformação plástica entre os materiais, enquanto o solo-cimento, por assumir alta rigidez, é o material que apresenta menor deformação permanente durante os ciclos. No entanto, considerando o tráfego e o tipo de veículo ao qual o material é submetido, ele se comportará de forma eficiente.

Também foi evidenciado que a variação da pressão de confinamento no modelo do tipo fase, com a variação do desvio de tensão, é a condição que proporciona um caminho de tração mais prejudicial à estrutura do material, pois proporciona uma alta deformação permanente ao longo dos ciclos de carga e descarga.

Ao final dos 260.000 ciclos de carga e descarga, o material solo-cimento-fibra apresentou uma deformação irreversível de 0,46%, ou seja, 0,552 mm (nos ensaios triaxiais cíclicos foram utilizados corpos de prova de 120 mm de altura e 70 mm de diâmetro) de deformação permanente. Essa deformação é considerada desprezível para uma estrada não pavimentada, pois apresenta apenas uma redução em centímetros. Transformando o número de carga do eixo padrão (8,2 tf por eixo) para o eixo de um veículo de passeio (0,50 tf por eixo), utilizando o fator de agressão (f), verifica-se que para produzir a deformação permanente de 0,552 mm nas condições estabelecidas, é necessário o tráfego de 9.404.106 veículos de passeio. Trata-se de um número extremamente alto de veículos, e para reparar os sulcos causados pelas rodas na estrada, envolve um período muito longo entre um reparo e outro. Segundo Medina & Motta (2005), em alguns países, o valor admissível de profundidade de sulcos de rodas em rodovias pavimentadas é de 10 mm, e para estradas com menor volume de tráfego pode ser de 16 mm, mas se atingir 20 mm exigirá reparo imediato.

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 ao orientador deste trabalho.

Notação

Os seguintes símbolos são usados neste artigo:

Civ - Conteúdo Volumétrico de Cimento

INCT-REAGEO - Instituto Geotécnico para Reabilitação do Sistema Encosta-Planície e Desastres Naturais

PRONEX - Programa de Apoio a Núcleos de Excelência

CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

FNDCT - Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

FAPEMIG - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais

FAPERJ - Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro

FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
NBR - Norma Brasileira
MCT - Ministério da Ciência e Tecnologia
 γ_d - Densidade Máxima da Massa Seca
 w_{Op} - Teor Ótimod e Água
 w_L - Limite de Liquidez
 w_P - Limite de Plasticidade
PD - Razão de Dispersão
MCT - Miniatura, Compactado, Tropical
 c' - Intercepto Coesivo
 ϕ' - Ângulo de Atrito
 k - Coeficiente de Permeabilidade
CP - Corpo de Prova
CPs - Corpos de Prova
 σ_3 - Pressão Confinada
 σ_1 - Tensão Axial = Tensão
 ϵ_1 - Deformação Axial
 ϵ_R - Deformação Radial
 ϵ_P - Deformação Permanente
 ϵ_E - Deformação Elástica
MC - Módulo Cíclico
IA - Índice de Atividade da Fração Argila
LA' - Areia Argilosa Laterítica
CP V - ARI - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
RS - Resistência ao Sulfato
UCS - Resistência à Compressão Livre
 ϕ - Diâmetro do Corpo de Prova
 h - Altura do Corpo de Prova
AASHTO - Associação Americana de Oficiais de Rodovias e Transportes Estaduais
CC - Teor de cimento
NC - Número de Ciclos
FibroMac - Fibras de Polipropileno Fabricadas Pela Empresa Maccaferri
 E_1 - Módulo de Young
 n - Porosidade

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2012). *“Dosagem Para Camada de Pavimento”*. NBR - 12253, Rio de Janeiro, Brasil.
- 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., 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. *“A Method Proposed for the Assessment of Failure Envelopes of Cemented Sandy Soils”*. Engineering Geology. v. 169. p. 61-68, 2014.
- CONSOLI, N. C., RUVER, C. A., GIRARDELLO, V., FESTUGATO, L., THOMÉ, A. *“Effect of Polypropylene Fibers on The Uplift Behavior of Model Footings Embedded in Sand”*. Geosynthetics International, no. 19 (February 2012): 79-84. <https://doi.org/10.1680/gein.2012.19.1.79>

- CONSOLI, N. C., ROTTA, G. V., PRIETTO, P. D. M. “*Yielding-compressibility-strength relationship for an artificially cemented soil cured under stress*”. Géotechnique, no. 56 (February 2006): 69-72. <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.1.69>
- CRUZ, R. C. (2008). “*Influência de Parâmetros Fundamentais na Rigidez, Resistência e Dilatabilidade de Uma Areia Cimentada Artificialmente*”. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – UFRGS, Porto Alegre.
- FESTUGATO, L. “*Comportamento de Hidratação e Resposta Cíclica ao Cisalhamento de Rejeito de Mineração Cimentado Reforçado com Fibras*”. 2011. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). UFRGS. Porto Alegre, Brasil, 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. “*Comportamento de Solos Reforçados com Fibras de Polipropileno*”. 2000. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. UFRGS. Porto Alegre, Brasil, 2000.
- FOPPA, D. “*Análise de Variáveis-Chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Cimentados Artificialmente*”. 2005. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2005.
- FOPPA, D., FESTUGATO, L., CONSOLI, N. C., HEINECK, K. S., FONSECA, A. J. P. V. “*Variáveis Chave no Controle da Resistência Mecânica de Misturas Solo-Cimento*”. Geotecnia”. Geotecnia (Lisboa), 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.
- GUEDES, S. B. (2013). “*Estudo do Desempenho Mecânico de um Cimento Microrreforçado com Fibras Sintéticas Para Uso Como Revestimento Primário em Estradas não Pavimentadas*”. 515 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFPE, Recife, Brasil.
- 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. “*Estudo Geológico-Geotécnico do Processo Erosivo em Encostas do Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti - Cabo de Santo Agostinho / PE*”. 2006. 358 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil. 2006.
- 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.
- MEDINA, J. & MOTTA, L. M. G. “*Pavimento da Mecânica*”. 2ª ed. Rio de Janeiro. 2005. 574 pág..
- MIDDLETON, H. E. (1930) “*Properties of Soils Wich Influence Soil Erosion*”. U.S. Department Agricultural Technical Bulletin, N0 178, 16 p.

- RIOS, S. VIANA DA FONSECA, A. &BAUDET, B. A. “*The Effect of the Porosity/Cement Ratio on The Compression of Cemented Soil*”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, no. 11 (January 2012): 1422–1426. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000698](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000698)
- SEVERO, R. N. F. et al. “*Estudo da Influência da Cimentação de Uma Areia Argilosa da Formação Geologica Barreira*”. In: COBRAMSEG, Gramado/RS, Brazil, 2010.
- SEVERO, R. N. F. (2011). “*Caracterização Geotécnica da Falésia da Ponta do Pirambu em Tibau do Sul-RN Considerando a Influência do Comportamento do Solo em Estados Indeformados e Cimentados Artificialmente*”. 280 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), UFPE, Recife, Brasil.
- 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., CABERLON R., CONSOLI N.C. (2009) “*Strength Properties of Sandy Soil–Cement Admixtures*”. Geotech. Geol. Eng., 27(6):681–686.
- VITALI, O. P. M. “*Efeito da Composição de Misturas Solo-Cimento nos Parâmetros de Rigidez e Resistência*”. 2008. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. 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 Compositesoils*”. SPRINGER. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 81: 264. 2022. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02734-8>.