UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Hernando da Rocha Borges

VIDA DE FADIGA DE AREIA ARTIFICIALMENTE CIMENTADA REFORÇADA COM FIBRAS

Porto Alegre
novembro 2016

HERNANDO DA ROCHA BORGES

VIDA DE FADIGA DE AREIA ARTIFICIALMENTE CIMENTADA REFORÇADA COM FIBRAS

Projeto de Pesquisa do Trabalho de Diplomação a ser apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Lucas Festugato

Porto Alegre

novembro 2016

HERNANDO DA ROCHA BORGES

VIDA DE FADIGA DE AREIA ARTIFICIALMENTE CIMENTADA REFORÇADA COM FIBRAS

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, novembro de 2016

Prof. Lucas Festugato
Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Rubén Alejandro Quinónez Samaniego
M. Eng. Pela UFRGS

Prof. Lucas Festugato (UFRGS)
Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Nilo Cesar Consoli (UFRGS)
Ph. D. Concordia University

Dedico este trabalho a meus pais, René e Maria Carmem,
que sempre me apoiaram, especialmente durante o período
do meu Curso de Graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Lucas Festugato, orientador deste trabalho, pela orientação e principalmente pela ajuda na escolha do tema. Agradeço, também, pela oportunidade de trabalhar no Legg, um laboratório renomado, onde grandes produções científicas são realizadas.

À minha família, que mesmo distantes, sempre tentaram estar presentes em minha vida, nunca deixando de me apoiar e incentivar.

Agradeço a todos os amigos que fiz em Porto Alegre, que com certeza fizeram de minha adaptação nesta cidade muito prazerosa.

Aos colegas do Legg, em especial a Jorge, Naloan, Ngamuna, João, Gonçalo e Pablo que me ajudaram a tornar este trabalho possível e pelos momentos de descontração.

Agradeço, enfim, a todos que, de alguma forma, toraram possível o desenvolvimento deste trabalho ou que, de alguma forma, tornaram meus dias melhores.

A persistência é o caminho do êxito.

Charles Chaplin

RESUMO

A técnica de solo artificialmente cimentado reforçado com fibras surgiu como uma alternativa de projeto para solucionar problemas de solos que não atendam às necessidades de solicitações impostas. Esta técnica possui diversas aplicações, tais como, resistir a solicitações cíclicas, principalmente na construção de pavimentos, reforço em áreas suscetíveis a sismos e fundações de estruturas costeiras. Nesse sentido, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da inclusão de fibras de polipropileno em uma areia artificialmente cimentada, perante a carregamentos cíclicos. Assim, através de ensaios cíclicos de compressão diametral, foi avaliada a vida de fadiga do compósito, fazendo correlações com a deformação radial final (εr) e com a relação porosidade e teor de cimento (η/ C_{iv}). Finalmente, foi feita uma análise comparativa com os resultados obtidos por Venson (2015), do comportamento de um mesmo tipo de solo, mas sem inclusão de fibras diante solicitações cíclicas.

Palavras-chave: solo-cimento-fibra; fadiga; carregamento cíclico; relação porosidade/teor volumétrico de cimento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Delineamento 17
Figura 2 – Teor de cimento versus resistência à compressão simples 26
Figura 3 – Teor de cimento versus resistência por compressão diametral..... 26
Figura 4 – Variação da resistência à compressão simples em relação a porosidade do solo-cimento..... 27
Figura 5 – Relação água/cimento versus resistência à compressão simples 29
Figura 6 – Relações que contabilizam a variação da resistência à ruptura e resistência à compressão não confinada com η/ Civ e comprimento da fibra 31
Figura 7 – Estágios existentes num processo de fadiga 35
Figura 8 – Vida de fadiga considerando diferentes faixas granulométricas 36
Figura 9 – Areia de Osório 38
Figura 10 – Curva granulométrica 39
Figura 11 – Ensaio de tração das fibras de polipropileno 40
Figura 12 – Fibras de polipropileno 40
Figura 13 – Propriedades mecânicas das fibras 41
Figura 14 – Equipamento para ensaio de vida de fadiga 43
Figura 15 – Curva de carregamento do ensaio de vida de fadiga 44
Figura 16 – Calibração do pulso 44
Figura 17 – Resultados dos ensaios de tração diametral 45
Figura 18 – Ruptura típica por tração no ensaio de fadiga 46
Figura 19 – Ruptura típica por tração do ensaio de fadiga 47
Figura 20 – Correlação de vida de fadiga por η/ Civ obtida por Venson (2015) 48
Figura 21 – Deformação radial final por η/ Civ obtida por Venson (2015) 48
Figura 22 – Correlação de vida de fadiga por deformação radial final obtida por Venson (2015) 49
Figura 23 – Comparação da deformação cisalhante do material não reforçado e do material reforçado com fibras 51
Figura 24 – Correlação de vida de fadiga por η/ Civ 53
Figura 25 – Comparação direta entre as correlações de solo-cimento com solo-cimento-fibra 53
Figura 26 – Deformação radial final por η/ Civ 54
Figura 27 – Vida de fadiga por deformação radial final 54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos resultados de fadiga obtidos por Venson (2015) 48
Tabela 2 – Resumo dos resultados de ensaios de fadiga com adição de fibras 52

LISTA DE SIGLAS

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

FLC – Fator laboratório-campo

CP – Cimento Portland

PET – Polietileno tereftalato

NBR – norma brasileira

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

η – porosidade (%)

C_{iv} – teor volumétrico de cimento (%)

q_u – resistência à compressão simples (kPa)

q_t – resistência por compressão diametral (kPa)

e – índice de vazios

C – teor de cimento (%)

a/c_i – relação água cimento

γ_d – massa específica aparente seca (g/cm³)

R^2 – coeficiente de correlação.

N – número de repetições necessárias

Nf – vida de fratura

NS – vida de serviço

$\Delta\sigma$ – diferença entre tensão máxima de compressão e de tração

εt – deformação de tração

εr – deformação radial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
2 DIRETRIZES DA PESQUISA 15
2.2 QUESTÃO DE PESQUISA 15
2.2.1 Objetivo Principal 15
2.2.3 Objetivos Secundário 15
2.3 HIPÓTESE 15
2.4 PRESSUPOSTO 15
2.5 PREMISSA 16
2.6 DELIMITAÇÕES 16
2.7 LIMITAÇÕES 16
2.8 DELINEAMENTO 16
3 VISÃO GERAL DE SOLO CIMENTADA E SOLO COMENTADO REFORÇADO COM FIBRAS 19
3.1 MISTURA SOLO-CIMENTO 19
3.2 MISTURA SOLO-FIBRAS..... 20
3.2.1 Solo 20
3.2.2 Cimento..... 21
3.2.3 Tipos de fibras 21
3.2.3.1 Fibras naturais 22
3.2.3.2 Fibras poliméricas 22
3.2.3.2.1 Fibras de polipropileno 23
3.2.3.2.2 Fibras de poliéster 24
3.2.3.2.2 Fibras de poliamida 24
3.2.3.3 Fibras minerais 24
3.2.3.3.1 Fibras de vidro 24
3.2.3.3.2 Fibras de carbono 24
3.2.3.3.3 Fibras de asbesto 25
3.2.3.4 Fibras metálicas 25
3.3 EFEITO DO CIMENTO 25
3.4 EFEITO DA POROSIDADE 26
3.5 INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA 28
3.6 TEOR DE UMIDADE 28
3.7 RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO 28

3.8 RELAÇÃO VAZIO/CIMENTO 29
3.9 INTERAÇÃO SOLO-FIBRA 29
3.10 ANÁLISE DA RIGIDEZ 31
3.11 COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO 31
3.12 ENVOLTÓRIA DE RUPTURA E RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO 32
4 CARREGAMENTO CÍCLICO 33
4.1 VIDA DE FADIGA 34
5 PROGRAMA EXPERIMENTAL 38
5.1 COMPONENTES DA MISTURA 38
5.1.1 Areia de Osório 38
5.1.2 Cimento 39
5.1.3 Fibras 39
5.1.4 Água 41
6.1 DOSAGEM 41
6.2 MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA 42
6.3 ENSAIO DE VIDA DE FADIGA 42
6.3.1 Equipamento 43
6.3.2 Calibração do equipamento 43
6.3.3 Procedimento de Ensaio 45
7 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS COM E SEM A INCLUSÃO DE FIBRAS 46
7.1 MODO DE RUPTURA DAS AMOSTRAS SEM E COM A INCLUSÃO DE FIBRAS 46
7.2 AVALIAÇÃO DA VIDA DE FADIGA E DEFORMAÇÃO RADIAL FINAL SEM E COM A INCLUSÃO DE FIBRAS 47
8 CONCLUSÕES 55
REFERÊNCIAS 56

1 INTRODUÇÃO

Muitas vezes as técnicas tradicionais de Engenharia Geotécnica esbarram em dificuldades impostas por altos custos e problemas ambientais. Um exemplo é quando se utilizam bases granulares na construção de rodovias e a jazida se encontra muito longe do local da obra, elevando custos e impactos ambientais. Um outro exemplo é quando se tem um solo com baixa capacidade de suporte e a execução de fundações profundas se torna inviável devido a custos associados a solução de empreendimentos de baixo orçamento.

Nestes casos, alternativas para a melhoria de solo através da adição de agentes cimentantes ou através de inclusões de elementos discretos ou com orientação aleatoriamente distribuídas, tais como fibras, podem ser utilizados. Apesar das numerosas aplicações, há limitados estudos sobre dosagem metodológica baseadas em critérios racionais para solos cimentados reforçados por fibras como no caso da tecnologia do concreto.

Com isso, a resistência de solos cimentados reforçados com fibras é normalmente avaliada por numerosos testes laboratoriais com objetivo de encontrar a quantidade mínima de cimento que atende as propriedades de interesse. Esta abordagem resulta provavelmente do fato do solo-cimento-fibra mostrar um complexo comportamento que é afetado por muitos fatores, como, propriedades físico-químicas do solo, características da fibra, a quantidade de cimento, e o teor de umidade e porosidade no momento da compactação.

Nesse sentido, Consoli et al. (2010) quantificaram a influência da quantidade de cimento, da porosidade e do teor de umidade na resistência de solos arenosos reforçados por fibras e solos artificialmente cimentados não reforçados, também avaliaram a utilização do índice de vazios/cimento e sua relação com a resistência à compressão simples.

Em relação ao tipo de carregamento, o conhecimento sobre o comportamento de solos cimentados reforçados por fibras e submetido a carregamento cíclico é limitado. Neste contexto, este trabalho analisará o comportamento de solos cimentados reforçados por fibras quando submetido a carregamento cíclico.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa é: conhecidos os resultados de um solo cimentado sem fibras, qual, comparativamente, é o comportamento desta mesma composição se as fibras forem adicionadas?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a avaliação da influência da inclusão de fibras no comportamento cíclico das misturas de solo-cimento estudadas.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são estabelecer uma correlação entre a vida de fadiga e a relação porosidade/teor volumétrico de cimento e avaliar os níveis de deformação na ruptura.

2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que a inclusão de fibras ao material cimentado proporciona melhora na resistência a tração, quando submetido a ensaio cíclico de fadiga.

2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que os procedimentos de ensaios de corpos de prova descritos pela *British Standard (2004)* são válidos para definição do comportamento cíclico do solo estudado: BS EM 12697-24:2004

2.5 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que é necessário o maior conhecimento sobre o comportamento de solos cimentados reforçados por fibras submetidos a carregamentos cíclicos, pois estão normalmente sujeitos a esse tipo de esforço.

2.6 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao uso de areia de Osório a ser reforçada com Cimento Portland CP-V e fibras de polipropileno.

2.7 LIMITAÇÕES

O trabalho limita-se a:

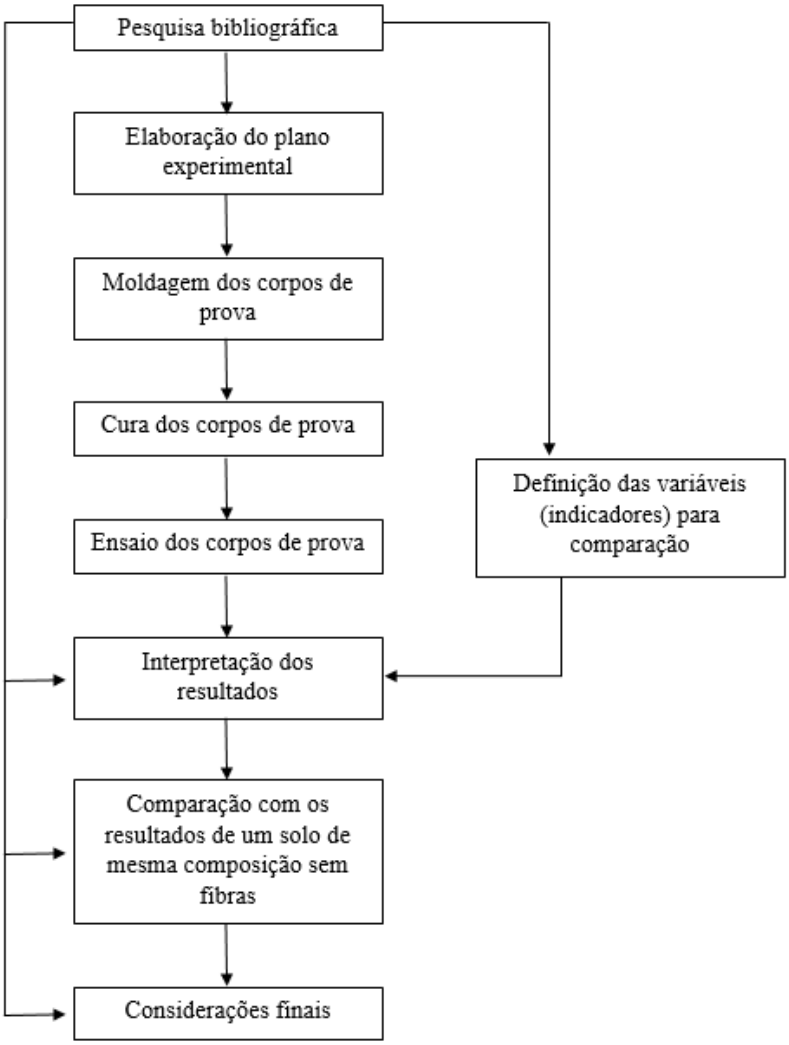
a) teor de umidade do solo a 10%;
b) teores de cimento de 1, 2, 3, 5, 7 e 9%;
c) porcentagem de fibra em relação ao peso do solo mais cimento igual a 0,5%, baseado em experiências internacionais e nacionais;
d) tempo de cura das amostras de 7 dias.

2.8 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado através das etapas apresentadas a seguir que estão representadas na figura 1 e são descritas nos próximos parágrafos:

a) pesquisa bibliográfica;
b) definição das variáveis (indicadores) para comparação
c) elaboração do plano experimental;
d) moldagem dos corpos de prova;
e) cura dos corpos de prova;
f) ensaios dos corpos de prova;
g) interpretação dos resultados;
h) comparação com os resultados de um solo de mesma composição sem fibras;
i) considerações finais.

Figura 1 – Delineamento



(fonte: elaborado pelo autor)

A **pesquisa bibliográfica** teve como objetivo ampliar o conhecimento sobre o tema escolhido e obtenção de informações sobre a mistura solo-cimento e solo-fibras. Buscou-se, também, em publicações recentes quanto a solos com aglomerantes, seus materiais constituintes e métodos de dosagem.

Na etapa de **elaboração do plano experimental** foram definidas as propriedades da amostra:

a) índices de vazios;
b) teores de umidade;
c) teores de cimento;
d) teores de fibra;
e) tempo de cura das amostras.

A etapa seguinte, iniciou-se a **moldagem dos corpos de prova**, respeitando as propriedades estabelecidas na etapa anterior. As **curas dos corpos de prova** ocorreram num período de 7 dias sem imersão.

Após essa etapa, iniciou-se os **ensaios dos corpos de prova**. Foi utilizada um equipamento com sistema pneumático para o ensaio cíclico de fadiga. O carregamento foi aplicado diametralmente com o corpo de prova em uma posição horizontal, por um período 0,1 segundo por ciclo, contabilizando o número de ciclos necessário para o rompimento da amostra.

Em seguida, foi feita a **interpretação dos resultados** e posteriormente uma **comparação com os resultados de um solo de mesma composição sem fibras.** Por fim, as **considerações finais** foram baseadas na etapa de interpretação e de pesquisa bibliográfica.

3 VISÃO GERAL DE SOLO CIMENTADO E SOLO CIMENTADO REFORÇADO COM FIBRA

Neste capítulo são vistos tópicos pertinentes à contextualização e compreensão dos pontos estudados na pesquisa. Inicialmente, apresenta-se uma visão geral sobre as técnicas de estabilização de solo. Em seguida, são apresentados os materiais utilizados na mistura solo-cimento-fibras.

3.1 MISTURA SOLO-CIMENTO

Segundo a NBR 12024, solo-cimento é definido como sendo o "Produto endurecido, resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem executada conforme NBR 12253." (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA, 1992b).

A técnica de solo-cimento, teve início, no Brasil, especificamente em São Paulo, na década de 40, devido a necessidade de ampliação da malha rodoviária, sendo utilizada como base e sub-base de rodovias, segundo Senço 2001. Isso reduziu significativamente a quantidade de material granular usado na construção de rodovias, pois esta técnica passou a ser bastante empregada, por possuir um desempenho similar, em relação a técnica com uso de material granular, com um baixo custo.

Além disso, segundo Dalla Rosa (2006) é comum em muitos casos de Engenharia, deparar-se com solos de baixa capacidade de suporte, ou seja, solos que não são adequados para execução de determinados projetos. Isso por vezes, inviabiliza o empreendimento, devido a altos custos associados a soluções tradicionais.

Por isso, a importância do estudo e desenvolvimento de técnicas de melhoramento de solo, possibilitando o uso de métodos racionais, minimizando custos em obras, tais como transporte e escolha dos materiais utilizados.

Destaca-se alguns autores nacionais no estudo de solos cimentados, dentre os quais pode-se citar Consoli et al. (2010), Foppa (2005), Vendruscolo (2003), Dalla Rosa (2006) e Cruz (2008)

e também internacionais, como Taylor (2000) que abordaram o comportamento de solos cimentados aonde são analisados aspectos característicos dos materiais tais como granulometria, propriedades físicas, tensões atuantes, resistência e comportamento tensão-deformação.

3.2 MISTURA SOLO-FIBRAS

A adição de fibras ao solo é uma técnica desenvolvida para melhorar as propriedades mecânicas dos solos através da inserção de materiais que possuam resistência à tração elevada, aumentando a resistência e diminuindo a compressibilidade dos solos. Esta técnica é conhecida e empregada há mais de três mil anos. Hastes de bambu e junco eram utilizadas no reforço de tijolo de barro e solos, para auxiliar na construção de diversas obras de terra na Antiguidade. Palha também foi utilizada no reforço de tijolos argilosos (HANNANT, 2001, tradução nossa).

Segundo Hannant (2001, tradução nossa) a maioria dos reforços utilizados é de origem polimérica. No último século, como o crescimento da indústria de petróleo, o desenvolvimento de polímeros como plásticos, fibras, borrachas e adesivos ganhou força. Grandes avanços tecnológicos na área dos materiais plásticos, como o Kevlar, com densidade menor que a unidade e com a resistência à tração que supera cinco vezes a do aço, surgiram das necessidades das indústrias aeronáuticas e automobilísticas.

A técnica de reforçar solos com fibras encontra-se inserida na tecnologia dos materiais compósitos, a qual vem despertando um interesse cada vez maior no meio científico. Prova disse se encontra em alguns dos livros mais recentes de engenharia dos materiais, onde os materiais compósitos fibrosos são abordados em capítulos específicos (HANNANT, 2001; HOLLAWAY, 2001; TAYLOR,2000).

3.2.1 Solo

De acordo com Rosa (2010) qualquer tipo de solo pode ser tratado com cimento. Sendo que em solos arenosos, há uma maior eficiência, pela facilidade da mistura e maiores resistências atingidas, sendo que em solos com granulometrias mais finas exigem maiores quantidades de cimento para atingir resistências adequadas.

Oliveira[1] et al. (2013, apud PAULA, 2013, p. 22, tradução nossa) também afirma que, quando o solo a ser estabilizado possui um elevado teor de matéria orgânica, podem ser observadas grandes deformações. Isso leva ao aumento no custo de manutenção do empreendimento durante o tempo em que será explorado, podendo até levar ao comprometimento da funcionalidade de tal estrutura.

A norma NBR 12253 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992b) limita os tipos de solos a serem empregados nas misturas solo-cimento a solos que:

a) enquadrem-se nas classificações A1, A2, A3 e A4 da norma ASTM D 3282 – classification of soils and aggregate mixtures for highway construction purposes;
b) tenham 100% do material passando na peneira de abertura 76 mm;
c) tenham no máximo 45% de material retido na peneira de abertura 4,8 mm.

3.2.2 Cimento

Segundo Foppa (2005, p. 29), "[...] não existem restrições quanto ao tipo de cimento para uso em solo-cimento.". Visto que, aos 7 dias atinge grande parte de sua resistência, o cimento Portland de alta resistência inicial (CP-V ARI) permite que os corpos de prova sejam rompidos em um tempo inferior se comparado com outros tipos de cimento Portland.

Sendo que Oliveira et al. (2013, apud PAULA, 2013, tradução nossa, p. 34) ressalta a importância do efeito de uma baixa quantidade de cimento adicionada ao solo:

> [...] a quantidade de cimento Portland presente na mistura tem um papel importante, uma vez que ele origina reações hidráulica (primeiramente) em um tempo curto com a produção de $Ca(OH)_2$, o que promove o desenvolvimento, ao longo do tempo, de reações pozolânicas (secundariamente). Assim, quando a quantidade de cimento Portland adicionado ao solo é reduzida, as características de compressibilidade do solo estabilizado se deterioram consideravelmente, evoluindo para o comportamento de um solo não-estabilizado.

3.2.3 Tipos de fibras

Um grande número de tipos de fibras vem sendo usados no reforço de solos, as quais diferem umas das outras desde seu processo de fabricação: composição química e física, características

[1] OLIVEIRA, P. J. V., CORREIA, A. A. S.; GARCIA, M. R. Effect os stress level and binder composition on secondary compression of na artificially stabilized soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Reston, v. 139, n. 5, p. 810-820, May 2013.

mecânicas e de resistência a meios agressivos, etc. Essas características afetam intimamente o comportamento do material compósito.

Assim, a compreensão do mecanismo de interação matriz-reforço e da parcela de contribuição de cada uma das fases no comportamento do material compósito como um todo é fundamental para a definição do tipo de fibra a ser empregado. Essa definição dependerá fundamentalmente das características da matriz a ser reforçada e das características desejadas do material compósito resultante (CASAGRANDE, 2005).

As fibras podem ser classificadas em quarto grandes classes: naturais, poliméricas, minerais e metálicas.

3.2.3.1 Fibras naturais

O reforço de materiais de construção com fibras naturais é conhecido há milênios. Como exemplo, pode-se citar o emprego de fibras vegetais como reforço de gesso que vem desde o Renascimento, ou a utilização de mantas de raízes para reforço de maciços de terra. Essas fibras vegetais podem ser de bambu, juta, capim elefante, malva, coco, piaçava, sisal, linho e cana-de-açúcar (HANNANT, 2001, tradução nossa).

A avaliação da durabilidade dos compostos formados com fibras vegetais é o principal problema a ser investigado, pois podem ser degradadas pela ação de fungos e microorganismos. A exposição das fibras vegetais em ambientes alcalinos causa uma rápida degradação das fibras, como é o caso, por exemplo, do emprego das fibras vegetais como reforço de materiais cimentados com cimento Portland.

3.2.3.2 Fibras poliméricas

Dentre os diversos tipos de fibras utilizadas como reforço de solos, a família das fibras poliméricas talvez são as mais promissoras. Os polímeros, de acordo com sua estrutura química, apresentam diferentes denominações e comportamentos, dando origem a diferentes tipos de fibras.

Atualmente vários formatos de fibras poliméricas têm sido empregados como reforço de solos. As chamadas fibriladas, que são as fibras que apresentam um formato trançado quando

esticadas transversalmente, projetadas para que se “abram” durante o processo de mistura com o solo.

As fibras poliméricas podem ser divididas em fibras de polipropileno, de polietileno, de poliéster e fibras de poliamida.

3.2.3.2.1Fibras de polipropileno

As fibras de polipropileno são constituídas de um material polimérico chamado termoplástico, esses materiais adquirem uma consistência plástica com o aumento da temperatura. Os polímeros termoplásticos consistem em uma série de longas cadeias de moléculas polimerizadas. Todas as cadeias são separadas e podem deslizar umas sobre as outras (HOLLAWAY, 2001, tradução nossa).

Esta característica explica a grande flexibilidade e tenacidade das fibras de polipropileno e concede substancial aumento da resistência ao impacto aos materiais a que é utilizada. O módulo de elasticidade é menor do que qualquer outra fibra comumente usada, aproximadamente 8 GPa. Esta propriedade não a recomenda para ser utilizada com a finalidade de aumentar a resistência pré-fissuração ou rigidez dos materiais. Fibras de polipropileno são resistentes a uma variedade de produtos químicos e aos álcalis (TAYLOR, 2000, tradução nossa).

Fibras de PolietilenoAs fibras de polietileno de peso molecular normal têm um módulo de elasticidade baixo, são fracamente aderidas à matriz cimentada e são altamente resistentes aos álcalis. Porém, polietileno com alta densidade tem sido desenvolvido para aumentar o módulo e a aderência com a matriz. Como não sofrem variação volumétrica na presença de água, a durabilidade dos produtos é alta, mas apresentam maiores deformações de fluência, o que significa que, se elas forem utilizadas para suportar tensões altas permanentemente em um compósito fissurado, consideráveis elongações e deflexões podem ocorrer ao longo do tempo. Como as fibras de polipropileno, as de polietileno também são encontradas comercialmente na forma de monofilamentos picados ou malhas contínuas (HANNANT, 2001, tradução nossa).

3.2.3.2.2 Fibras de Poliéster

A aparência das fibras de poliéster é similar às de polipropileno mas são mais densas, mais rígidas e mais resistentes. Elas podem ser usadas para as mesmas aplicações que as de polipropileno. O poliéster mais conhecido atualmente é o polietileno tereftalato, cuja sigla é PET. É o material constituinte das garrafas plásticas de refrigerantes, águas minerais e óleos de cozinha, entre outros (TAYLOR, 2000, tradução nossa).

3.2.3.2.3 Fibras de Poliamida (Kevlar)

Polímero contendo longas cadeias de moléculas geralmente possuem baixa resistência e rigidez, uma vez que suas moléculas são espiraladas e dobradas. No entanto, se estas moléculas forem esticadas e reforçadas durante o processo de manufatura, altas resistências e módulos de elasticidade podem ser alcançados, como é o caso do kevlar (TAYLOR, 2000, tradução nossa). Há dois tipos: Kevlar 29, com resistências mecânica da ordem de 3000 MPa e módulo de elasticidade intermediário de aproximadamente 64 GPa; e Kevlar 49, com um alto módulo de elasticidade, 300 GPa, e a mesma resistência mecânica que a Kevlar 29. Kevlar 49 é preferida pela alta performance conferida aos materiais compósitos fibrosos (HOLLAWAY, 2001, tradução nossa).

3.2.3.3 Fibras Minerais

Apresentadas a seguir, três tipos de fibras minerais.

3.2.3.3.1 Fibras de vidro

As fibras de vidro são geralmente manufaturadas na forma de “cachos”, ou seja, fios compostos de centenas de filamentos individuais. O diâmetro dos filamentos individuais depende das propriedades do vidro, do tamanho do furo por onde são extrusados e da velocidade de extrusão, mas geralmente são da ordem de 10 µm (TAYLOR, 2000). Cerca de 99% das fibras de vidro são produzidas a partir do vidro tipo E, que é susceptível ao ataque dos álcalis.

3.2.3.3.2 Fibras de carbono

São os materiais mais novos e mais promissores no desenvolvimento de materiais compósitos. As fibras têm de 5 µm a 10 µm de diâmetro e são formadas por agrupamentos contendo de 1 ou 2 até 20 mil filamentos. Baseada na resistência das ligações entre os átomos de carbono e na

leveza destas, as fibras de carbono apresentam alta resistência à tração e módulos de elasticidade em torno de 420 GPa. Características que tornam imprescindível uma grande aderência entre a matriz e as fibras (TAYLOR, 2000, tradução nossa).

3.2.3.3.3 Fibras de asbesto (amianto)

Essas fibras apresentam uma resistência à tração média de 1000 MPa e módulo de elasticidade em torno de 160 GPa, e apresentam uma ótima aderência com uma matriz composta por cimento. Seu diâmetro é muito pequeno, da ordem de 1 µm (TAYLOR, 2000, tradução nossa).

3.2.3.4 Fibras Metálicas

As fibras metálicas mais usadas são as de aço. A resistência à tração é da ordem de 1100 MPa e o módulo de elasticidade é de 200 GPa. A ruptura do compósito é normalmente associada ao arranchamento da fibra e não a sua ruptura. Sendo assim, este tipo de fibra possui uma grande variedade de formatos para aumentar a resistência ao arrancamento. Uma técnica utilizada para minimizar tal problema é o banho de níquel (TAYLOR, 2000, tradução nossa).

3.3 EFEITO DO CIMENTO

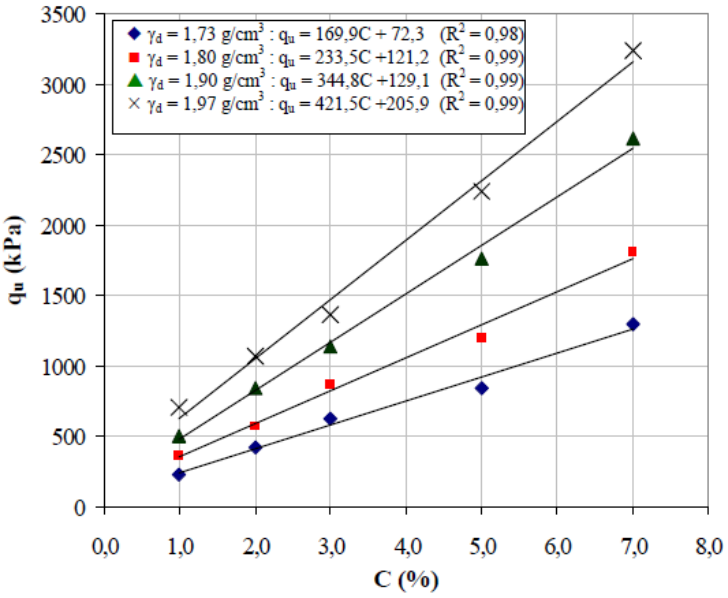
De acordo com Foppa (2005, p. 133), mesmo em pequenas quantidades, a adição de cimento ao solo promove ganhos substanciais de resistência. É possível observar esse efeito na figura 2.

De acordo com o autor:

> Na faixa de teores estudados (1% até 7%), a resistência à compressão simples aumentou linearmente com o aumento do teor de cimento. Além disso, a taxa de ganho de resistência, representada pela inclinação das retas de ajuste, aumentou com o aumento da massa específica aparente seca do solo-cimento compactado, indicando que a efetividade da cimentação é maior nas misturas mais compactadas. A existência de um número maior de contatos e, consequentemente, a maior possibilidade do cimento promover a união das partículas nesses contatos parece ser a causa desse fenômeno.

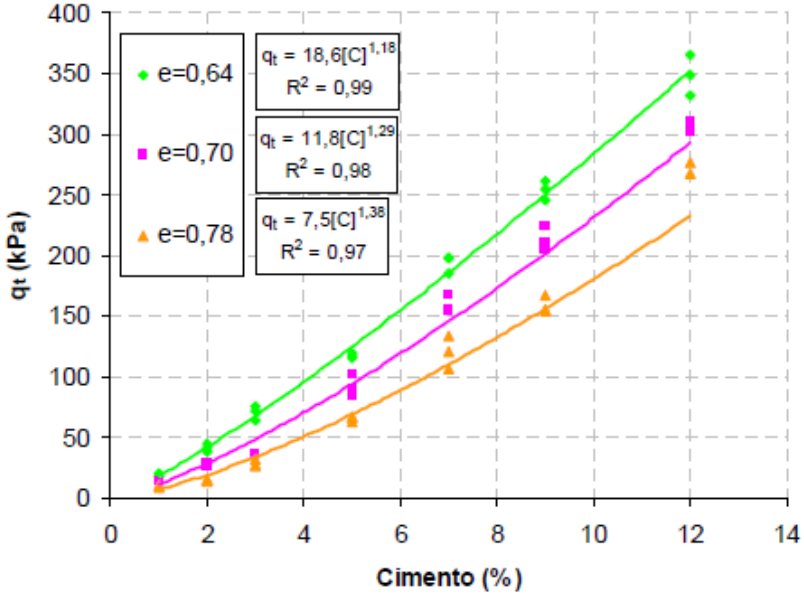
Consoli et al. (2010, tradução nossa) estudaram o efeito do teor de cimento em uma areia através de ensaios de tração por compressão diametral. Os pesquisadores também observaram a mesma tendência de aumento da resistência com o aumento de teor de cimento, como pode ser visto na figura 3.

Figura 2 – Teor de cimento *versus* resistência à compressão simples



(fonte: adaptado de Foppa, 2005)

Figura 3 – Teor de cimento *versus* resistência por compressão diametral



(fonte: adaptado de Consoli et al., 2010)

3.4 EFEITO DA POROSIDADE

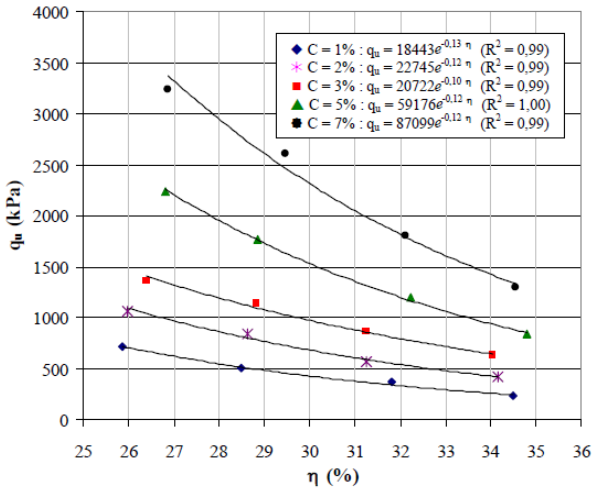
Righetto (2008) estudando a validação do fator vazios/agente cimentante na análise da resistência mecânica de um solo arenoso tratado com cal, cimento e resíduo de britagem de rocha, observou que a porosidade tem grande influência sobre a resistência no solo analisado. Independentemente da quantidade de agente cimentante adicionado e do tempo de cura

estabelecido, a redução da porosidade promoveu ganhos exponenciais de resistência. Esse ganho de resistência com a diminuição da porosidade pode ser atribuído ao maior número de contatos entre as partículas, que implica numa maior capacidade de distribuição de tensões no interior das amostras.

Foppa (2005) observou essa mesma tendência em um solo arenoso, e concluiu que em média a redução de oito pontos percentuais na porosidade do material aumentou 2,6 vezes a resistência à compressão simples do solo-cimento testado. Isso pode ser observado na figura 4. O autor afirma, assim como Righetto (2008), que o mecanismo que influencia na resistência de uma mistura de solo cimentado está relacionado diretamente à existência de um maior número de contatos e ao mesmo tempo, um maior intertravamento das partículas de solo.

Moraes et al. (2010) realizaram um estudo da estimativa da resistência à compressão diametral de um solo cimentado reforçado com fibras de polipropileno e verificaram que, de maneira similar à quantidade de cimento, a porosidade da mistura compactada exerce uma forte influência sobre a resistência à compressão diametral do solo-cimento-fibra. Independentemente da quantidade de cimento utilizado, a redução na porosidade do material promove ganhos significativos de resistência. Em média a redução de cinco pontos percentuais na porosidade do material aumentou em 1,7 vezes a resistência à compressão simples do solo-cimento-fibra testado.

Figura 4 – Variação da resistência à compressão simples em relação a porosidade do solo-cimento



(fonte: adaptado de Foppa, 2005)

3.5 INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA

O tempo de cura influência na relação tensão-deformação, assim como na tensão de pico, geralmente a aumentando. Também, e possivelmente mais importante, as amostras de solo-cimento são mais frágeis com tempo de cura. O valor do módulo de deformação em 28 dias é cerca de 3 vezes aquele obtido em 7 dias. Existe uma variação aguda do módulo de deformação com o tempo de cura, implicando assim que a relação tensão-deformação é praticamente não sensível à quantidade de água.

3.6 TEOR DE UMIDADE

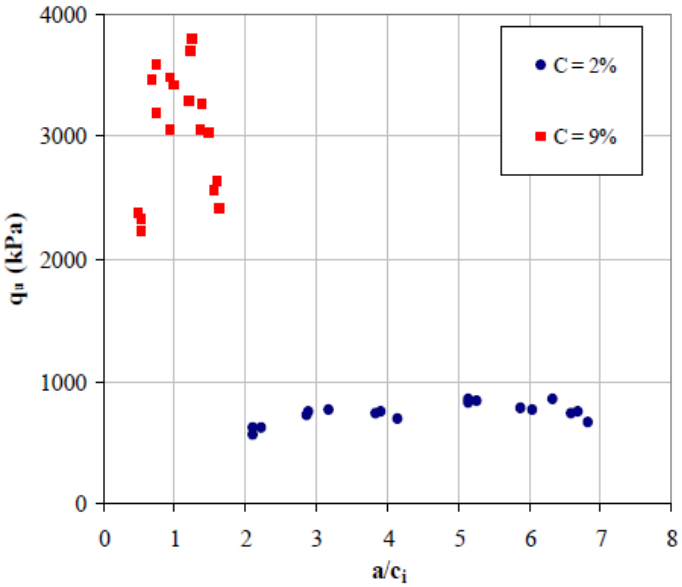
Para Foppa (2005) o efeito do teor de umidade de moldagem, mantendo-se constante a massa específica aparente seca, sobre a resistência à compressão simples do solo-cimento estudado (arenito Botucatu) de maneira geral, ocorreu um aumento da resistência à compressão simples com o teor de umidade até um valor ótimo, a partir do qual a resistência passou a diminuir. Verificou-se que esse teor ótimo de umidade é de aproximadamente 10%, independentemente do teor de cimento.

Casagrande (2005) estudou a influência da variação do teor de umidade em amostras de betonita reforçada com fibras. Constatando que o aumento do teor de umidade das amostras proporciona uma redução de resistência, tanto em comportamento de pico, como em pós-pico, havendo uma melhora no comportamento pós-pico para o menor teor de umidade estudado, devido à diminuição do índice de vazios e consequente aumento do número de contatos solo-fibra.

3.7 RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO

Foppa (2005) em seu estudo, buscou analisar a validade dessa relação água/cimento na estimativa da resistência à compressão simples de um solo arenoso artificialmente cimentado. Nesse sentido, concluiu a inexistência de uma relação bem definida entre a resistência à compressão simples e a relação água/cimento. Isso pode ser visto na figura 5, onde os dados plotados apresentam-se em “patamares” de resistência diferenciados em função da quantidade de cimento utilizada.

Figura 5 – Relação água/cimento *versus* resistência à compressão simples



(fonte: adaptado de Foppa, 2005)

3.8 RELAÇÃO VAZIO/CIMENTO

Foppa (2005) estudou a validade dessa relação vazios/cimento para um solo (solo residual de arenito da formação Botucatu) com 2%, 3%, 5%, 7%, 9% e 12% de cimento. Constatou-se que corpos-de-prova com o mesmo fator vazios/cimento (obtidos através de índice de vazios e teores de cimento diferentes entre si) apresentaram valores de resistência diferentes nos ensaios de compressão simples, sendo que os pontos com menor porosidade e menor quantidade de cimento atingiram resistências maiores.

Cabe ressaltar que o autor definiu o fator vazios/cimento de maneira um pouco diferente, expressou a quantidade de vazios em termos de porosidade da mistura compactada e o teor de cimento é volumétrico (η/C_{iv}). Ajustou, neste fator, a potência 0,28 para diminuir a dispersão.

Outros autores como Consoli et al. (2010, tradução nossa) tem usado a mesma correlação (η/C_{iv}), apresentando resultados similares, corroborando para a adoção desse fator como parâmetro de dosagem.

3.9 INTERAÇÃO SOLO-FIBRA

Festugato (2008) cita que o comportamento das misturas solo-fibra pode ser verificado através dos mesmos parâmetros empregados para solos não reforçados. Segundo o autor, as

características de resistência e de deformabilidade do elemento de reforço tem uma influência fundamental no comportamento tensão-deformação do solo reforçado.

O autor ainda evidencia que, as fibras somente passam a exercer uma ação efetiva dentro da massa de solo quando esta, submetida a esforços externos, sofre deformações. O funcionamento das fibras como elementos de reforço é então comandado pelas características de deformabilidade do solo e pela forma de distribuição destas deformações, que dependem do tipo de solicitação ao qual o material está sendo submetido.

De acordo com o mesmo autor, são muito complexos os fatores que afetam o comportamento do compósito solo-fibra, pois para uma dada combinação de variáveis, o resultado obtido pode ser o desejado para uma dada aplicação do compósito, porém, pode não ser para outra.

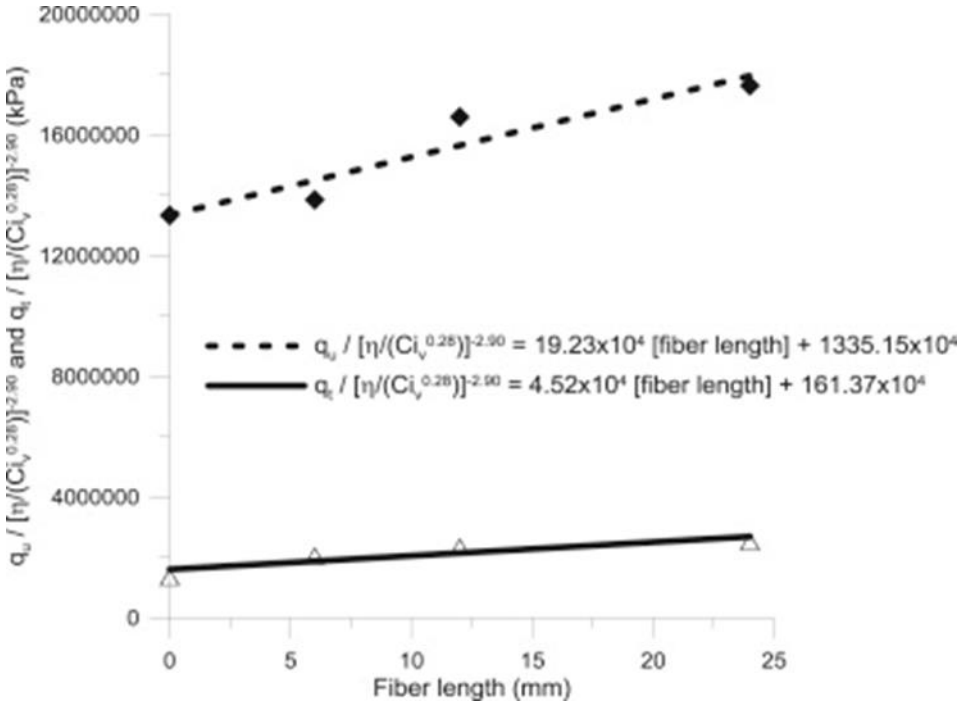
Vendruscolo (2003) verificou a influência da adição de fibras de polipropileno no comportamento de um solo arenoso cimentado e não cimentado através de ensaios triaxiais e concluiu que a influência desta inclusão sobre as propriedades mecânicas do compósito depende fundamentalmente das propriedades da matriz, onde o efeito da adição de fibras é mais evidente para maiores comprimentos e maiores teores de fibras, sendo mais pronunciado para materiais compósitos com maiores pesos específicos.

Consoli et al. (2004, tradução nossa) chegaram a conclusões similares, após vários ensaios feitos para avaliar a influência de vários tipos de fibra numa areia artificialmente cimentada, concluíram que não é possível estabelecer regras gerais para os compósitos fibrosos sem antes estabelecer as propriedades de cada componente do compósito, e confirmaram que a influência da fibra nas propriedades mecânicas do compósito depende fundamentalmente das propriedades mecânicas das fibras e da matriz.

Festugato et al. (2017, tradução nossa) estudaram uma metodologia de dosagem baseada na resistência à tração e a compressão de solos artificialmente cimentados reforçados com fibras, considerando o comprimento do filamento. Os autores concluíram que o comprimento dos filamentos e a relação porosidade/ cimento são parâmetros chave na avaliação da resistência a tração e da resistência à compressão da mistura estudada. Para cada comprimento de fibra, existe uma proporcionalidade linear entre as resistências à tração e à compressão das misturas, sendo independentes da relação porosidade/ cimento. Como consequência, as metodologias de

dosagem racionais podem ser centradas em testes de tração ou compressão em amostras reforçadas ou não reforçadas, uma vez que são independentes (figura 6).

Figura 6 – Relações que contabilizam a variação da resistência à ruptura e resistência à compressão não confinada com η/ Civ e comprimento da fibra



(fonte: adaptado de Festugato et al., 2017)

3.10 ANÁLISE DA RIGIDEZ

Festugato (2008) apresentou, para fibras de 24 mm de comprimento e índice de 100 dtx, que com o acréscimo da tensão confinante há um aumento da rigidez do solo reforçado. O mesmo aconteceu para um solo não reforçado e na comparação dos resultados obtidos com e sem fibras, o autor observou que os valores do módulo de deformação não são sensivelmente afetados pela inclusão de fibras.

3.11 COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO

Festugato (2008) observou um acréscimo de resistência em função da adição de fibras, sem a formação de pico, para uma areia com fibras de 24 mm de comprimento e título de 100 dtex. Com isso, o autor concluiu que houve um aumento da resistência com o aumento da tensão confinante efetiva.

Porém, o autor verificou que as fibras conferem maior expansividade, a partir dos valores de deformação volumétrica, o que foi inesperado. Por isso, foi atribuído esta variabilidade como sendo inerente ao ensaio realizado e por provocar uma mudança da estrutura da mistura devido a inclusão de fibras.

3.12 ENVOLTÓRIA DE RUPTURA E RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Casagrande (2005) constatou uma bi-linearidade na envoltória de ruptura de uma areia siltosa reforçada com fibras. A parte inicial da envoltória possui um intercepto coesivo praticamente inexistente e um ângulo de atrito que supera o dobro do valor correspondente ao solo sem reforço.

Festugato (2008) confirmou o comportamento bi-linear para uma mesma mistura, porém, apenas para tensões confinantes relativamente altas. Com isso, é possível identificar uma tensão confinante crítica, em que ocorre a mudança no comportamento do material. O autor esclareceu que, para tensões maiores que a crítica, a ruptura é governada pela resistência à tração das fibras e, para tensões inferiores, o mecanismo de ruptura se dá pelo deslizamento das fibras.

4 CARREGAMENTO CÍCLICO

O termo carregamento cíclico é frequentemente utilizado para descrever cargas variáveis que, além de seguir padrões repetitivos claramente definidos, também possuem regularidade na sua amplitude e período de duração (ANDERSEN et al., 2013, tradução nossa). Cargas cíclicas podem ser de origem ambiental (estações, ondas, marés, vento, terremotos, camadas de gelo), ou também antropogênicos (trânsito, trabalhos com explosivos, operações de fábricas, máquinas rotativas).

Alguns exemplos de estruturas submetidas a cargas cíclicas de distinta origem identificados por Andersen et al. (2013), são apresentados a seguir:

a) aerogeradores localizados em terra, os quais são submetidos ao vento e às forças de rotação do sistema;
b) estruturas costeiras, incluído portos, quebra-ondas e barreiras para proteção contra o mar;
c) torres de transmissão de eletricidade;
d) prédios de grande altura e chaminés;
e) fundações para vias e pontes em ferrovias para trens de alta velocidade;
f) estruturas sujeitas a vibrações de origem industrial;
g) balsas ancoradas para usinas de energia costeiras, submetidas às variações das marés;
h) grandes reservatórios submetidos a carregamento e descarregamento regular.

Em alguns casos, o carregamento pode ser relativamente uniforme e estar descrito apenas por uma frequência e uma amplitude, como no caso de vibração decorrente da operação de alguns equipamentos. Na natureza, a maioria dos carregamentos cíclicos (tormentas, sismos) estão compostos por sucessões de ondas de amplitude irregular e com frequência relativamente aleatórias. No entanto, na área de estudos cíclicos, os modelos de laboratório e ensaios em amostras que são utilizadas para determinar efeitos decorrentes dos carregamentos cíclicos, os testes são comumente restritos a períodos de tempo e taxas de aplicação das cargas cíclicas que permitam um controle adequado, precisão e aquisição dos dados obtidos (ANDERSEN et al.,

2013, tradução nossa). O mais comum é a aplicação de ciclos uniformes, seja em carga ou em deslocamento, empregando uma frequência e amplitude regular.

No que diz respeito do formato da onda de carga, na prática são utilizados os formatos senoidal, triangular e quadrado. Para o caso dos ensaios triaxiais cíclicos, o formato de onda exigido é o senoidal (ASTM- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS, 2011a; 2011b).

4.1 VIDA DE FADIGA

Segundo Medina e Motta (2005), enquanto cargas monotônicas (caso do ensaio de compressão diametral) produzem um dano (trincas) continuamente crescente nos materiais, cargas cíclicas produzem danos intermitentes, ou seja, na fase de carregamento o dano cresce, enquanto na fase de descarregamento o dano mantém-se constante, desconsiderando o fenômeno de reselagem das trincas.

Assim sendo, cargas cíclicas produzem falhas nos materiais para valores de tensão mais baixos do que aqueles obtidos na ruptura em ensaios estáticos, porém a mesma carga é aplicada diversas vezes.

Esse fenômeno é chamado fadiga e é definido como (AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS[2], 1979 apud VENSON, 2015, tradução nossa, p. 72):

> [...] o processo da mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões de amplitudes variáveis que produzem as fissuras que conduzem para totalizar a falha após um determinado número de ciclos. Vale salientar que esse é um problema não-linear que ocorre em diversos materiais, ou seja, o dano produzido no primeiro ciclo é diferente do dano produzido no segundo ciclo e assim sucessivamente.

A fadiga ocorre por meio de ações mecânicas e/ou térmicas que não parecem críticas por si, se comparadas à resistência sob carregamento monotônico, mas na verdade são decisivas para a vida útil do material. Em uma estrutura sujeita a carregamento cíclico, diversos estágios convencionalmente divididos podem ser diferenciados durante um processo de fadiga, conforme ilustra a figura 7.

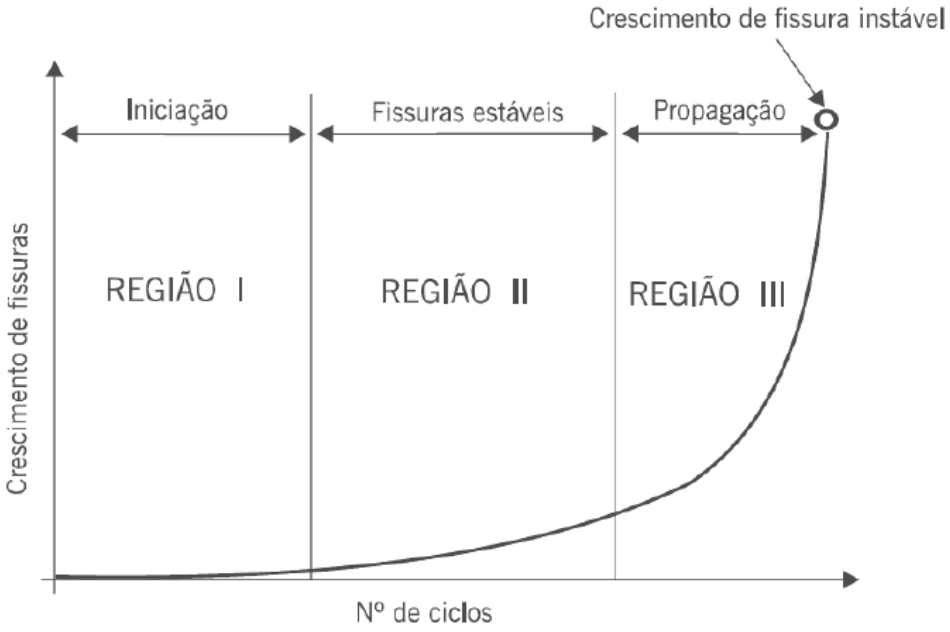
[2] AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **E 206-72**: standard definitions of terms relating to fatigue testing and analysis of fatigue data, Philadelphia, 1979.

a) região I: onde as primeiras mudanças microestruturais ocorrem; formam-se microfissuras; a magnitude dos deslocamentos cresce e as zonas de danos irreversíveis se iniciam.

b) região II: caracterizada pelas macrofissuras originadas da coalescência das microfissuras.

c) região III: crescimento das macrofissuras conduzindo rapidamente ao colapso total.

Figura 7 – Estágios existentes num processo de fadiga



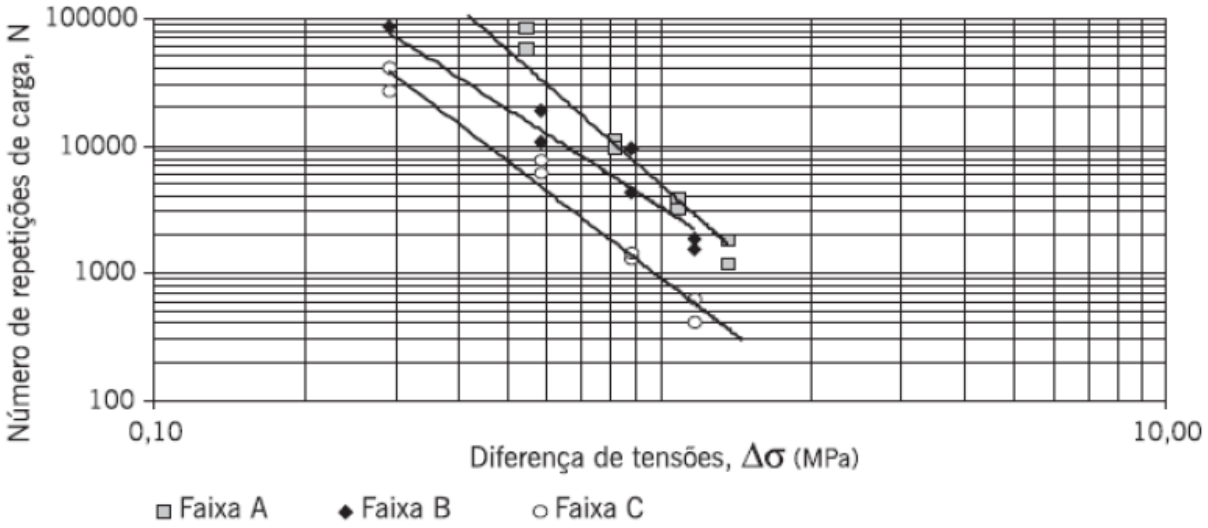
(fonte: adaptado de Medina; Motta, 2005)

A vida de fadiga de um solo cimentado é definida em termos de vida de fratura (Nf) ou vida de serviço (NS). A primeira se refere ao número total de aplicações de uma certa carga necessária à fratura completa da amostra e a segunda ao número total de aplicações dessa mesma carga que reduza o desempenho ou a rigidez inicial da amostra a um nível preestabelecido.

Embora ainda não normatizado no Brasil, o ensaio de fadiga tem sido largamente realizado no país, geralmente à compressão diametral sob tensão controlada e temperatura (caso de utilização de ligante asfáltico) controlada. Utiliza-se uma frequência de 60 a 120 aplicações por minuto com 0,10 segundo de duração do carregamento repetido.

Para cada mistura ensaiada determinam-se as relações entre o número de repetições à ruptura e o nível de tensões atuantes (conforme ilustrado na figura 8 para três misturas com distintas faixas granulométricas).

Figura 8 – Vida de fadiga considerando diferentes faixas granulométricas



(fonte: adaptado de Medina; Motta, 2005)

Observa-se que no ensaio de fadiga a tensão controlada considera a tensão solicitante no corpo-de-prova como constante, o que é apenas uma aproximação, uma vez que o carregamento constante ao longo do ensaio não é traduzido em uma tensão solicitante constante. As tensões no corpo-de-prova admitem que ele seja constituído de material elástico, isotrópico e sem danos. Isto é uma aproximação durante o ensaio de fadiga, uma vez que à medida que o carregamento é repetido, há dano progressivo no corpo-de-prova. O modelo usado quando se faz o ensaio de fadiga a deformação controlada leva em conta a deformação de tração (radial) medida no centro do corpo-de-prova (εt) (MEDINA; MOTTA, 2005).

No método mecanístico de dimensionamento de pavimentos usado no Brasil, a diferença entre tensão máxima de compressão e de tração na fibra inferior do revestimento ($\Delta\sigma$) é considerada o principal fator desencadeador do trincamento por fadiga do revestimento em campo, quando se trata de utilizar como critério resultados de laboratório obtidos com ensaios à TC em compressão diametral. As tensões calculadas servem de entrada de dados nas curvas de fadiga geradas a partir do número de golpes de carga até a ruptura para diversos níveis de $\Delta\sigma$.

Relaciona-se então o número *N* determinado a partir do tráfego previsto com o número de golpes em laboratório por um fator laboratório-campo (FLC) (MEDINA; MOTTA, 2005).

Independente do ensaio ou modelo adotado é comum o uso de FLCs devido à dificuldade de se considerar determinados fatores nos ensaios e no cálculo das tensões geradas nos corpos-de-prova.

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentados os materiais e dosagem utilizados na moldagem dos corpos de prova e o ensaio de vida de fadiga.

O programa experimental teve como objetivo avaliar a influência da adição de fibras no comportamento de um solo cimentado e em seguida verificar a relação porosidade teor de cimento na previsão da vida de fadiga. Além disso, o estudo busca uma comparação do efeito proporcionado pela inclusão das fibras com misturas sem este reforço.

5.1 COMPONENTES DA MISTURA

A seguir, são detalhados os materiais constituintes do solo estudado.

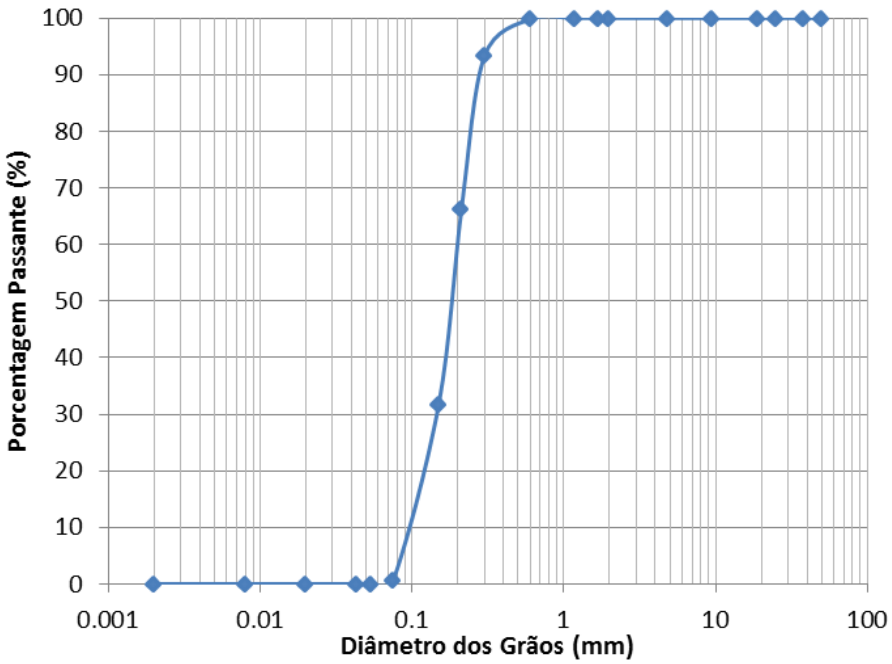
5.1.1 Areia de Osório

O solo usado no estudo foi uma areia pertencente ao município de Osório/RS. Cruz (2008) realizou ensaios de caracterização deste solo, obtendo parâmetros como o peso específico real dos grãos 26,5 kN/m³. Além disso, esta areia foi caracterizada por ter uma granulometria fina e uniforme ausente de impurezas ou matéria orgânica. A figura 9 mostra a areia utilizada na pesquisa e na figura 10 é apresentada sua curva granulométrica.

Figura 9 – Areia de Osório

(fonte: foto do autor)

Figura 10 – Curva granulométrica



(fonte: elaborado pelo autor)

5.1.2 Cimento

O cimento utilizado nessa pesquisa foi o cimento Portland de alta resistência inicial. Escolheu-se esse tipo de cimento, pois atinge aproximadamente 80% da sua resistência ao sétimo dia de cura. Tornando-se possível a realização dos ensaios de vida de fadiga nos corpos de prova com 7 dias.

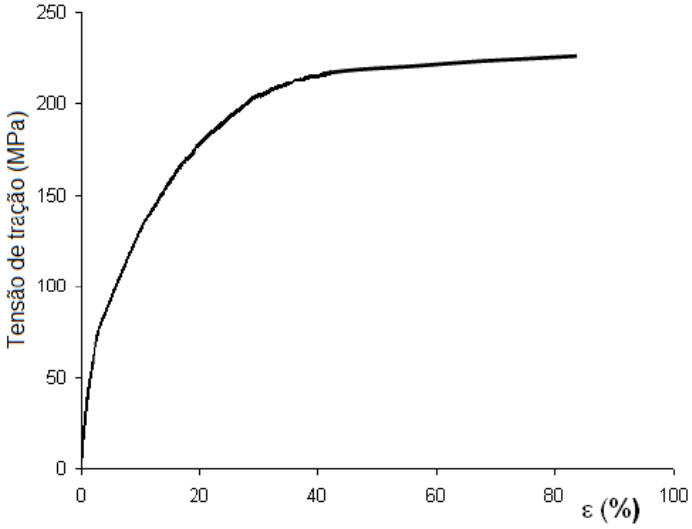
5.1.3 Fibras

As fibras utilizadas na pesquisa, foram fibras poliméricas de polipropileno, sendo disponibilizadas pelo Laboratório de Ensaios Geotécnicos e Geoambientais (legg). Estas fibras por apresentarem características uniformes, serem inertes quimicamente e empregadas em outros estudos, foi a escolha adequada para o estudo.

A indústria têxtil utiliza o título como grandeza para representar a espessura dos filamentos, cuja a unidade é o dtex (1dtex = 1g/100000m). As fibras utilizadas neste estudo possuem título de 100dtx, correspondente ao diâmetro de 0,100mm, com um comprimento de 50mm.

Os resultados característicos de um ensaio de tração, a deformação controlada, da fibra de polipropileno adotada está representada na figura 11. Pode-se notar um comportamento não-linear até a plastificação, a partir de onde as deformações continuam até o máximo deslocamento possível no equipamento.

Figura 11 – ensaio de tração das fibras de polipropileno



(fonte: adaptado de Festugato, 2011)

A seguir, as fibras são apresentadas na figura 12 e a figura 13 um resumo das propriedades mecânicas destas fibras.

Figura 12 – Fibras de polipropileno

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 13 – Propriedades mecânicas das fibras

Propriedades mecânicas	Fibras 100dtex
Espessura	0,100mm
Densidade	0,91
Módulo de Elasticidade	3GPa
Resistência à tração última	120MPa
Deformação na rotura	80%

(fonte: adaptado de Caldeira, I. M. G., 2012)

5.1.4 Água

A água utilizada para moldagem dos corpos de prova foi destilada usando um equipamento destilador. Este processo teve o objetivo de prover água sem que esta influenciasse na composição da mistura.

6.1 DOSAGEM

Na dosagem dos corpos de prova, a metodologia utilizada foi proposta por Cruz (2008). O autor comprovou que quanto maior for a relação da porosidade pelo teor de cimento em volume (η/C_{iv}), menor será a resistência do material. Cruz (2008) mostrou ainda que, a partir de um determinado valor de porosidade, quantidade de cimento e tensão de confinamento, é possível determinar a resistência do material, comprovando a veracidade do uso da relação porosidade pelo teor de cimento em volume, na dosagem de areia-cimento.

Para fim de comparação com o estudo realizado por Venson (2015), seguiram-se os mesmos parâmetros usados pelo autor, sendo eles:

a) teor de umidade fixado a 10%
b) teores de cimento de 1%, 2%, 3%, 5%, 7% e 9%
c) índices de vazios de 0,64, 0,70 e 0,78
d) ensaios realizados após um tempo de cura de 7 dias

Sendo que, para esta pesquisa foi incluído as fibras com um teor de 0,5% em relação a massa de areia mais cimento.

6.2 MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA

Para a moldagem dos corpos de prova foi utilizado um molde tripartido, e moldados com dimensões de 100mm de diâmetro e 50 mm de altura.

Primeiramente misturou-se o cimento a areia em condição seca até atingir uma mistura bem homogênea. Em seguida, colocou-se a água, misturando até que toda a massa seca fique úmida e por fim foram adicionadas as fibras. Após a finalização da mistura, pesou-se uma única camada para compactação e coletadas amostras para determinação do teor de umidade.

Depois de feita a compactação, fez-se o desmolde do corpo de prova e em seguida pesado juntamente com a base para preservar a integridade do mesmo. Por fim, o corpo de prova foi ensacado para diminuir a perda de água durante a cura, sendo que estas etapas foram repetidas para moldagem de todas as amostras.

Alguns critérios de aceitação foram seguidos para realização dos ensaios, mantendo-se os seguintes parâmetros dentro de um limite máximo e mínimo, em relação aos parâmetros calculados para a dosagem:

a) diâmetro: ± 1,0 mm;
b) altura: ± 1,0 mm;
c) teor de umidade: ± 1,0 %;
d) peso específico: 1,0 %.

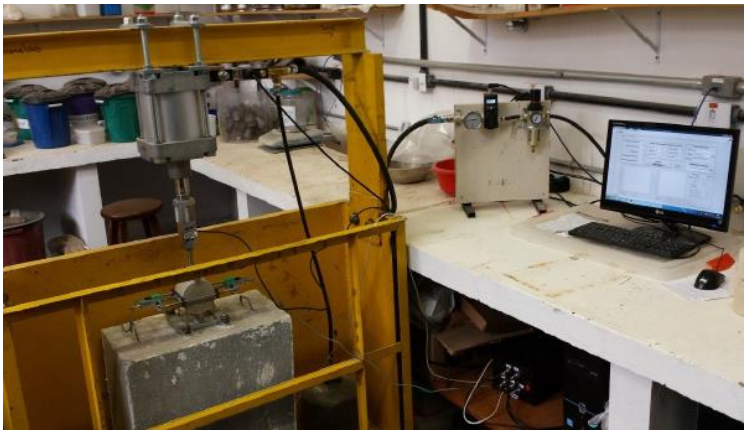
6.3 ENSAIO DE VIDA DE FADIGA

Nos próximos itens, serão apresentados o equipamento utilizado em ensaios de vida de fadiga, a calibração do equipamento e os procedimentos de ensaio.

6.3.1 Equipamento

Para os ensaios, foi usado um equipamento projetado por Venson (2015), de carregamentos cíclicos na compressão diametral, seguindo as recomendações da norma britânica BS EM 12697-24:2004. O mesmo, utiliza um sistema de aplicação de carga constituído de um pistão pneumático e um solenoide eletrônico controlado por computador através de um rele de estado sólido, além disso o sistema possui uma célula de carga, dois medidores de deslocamento linear, uma controladora de pressão eletrônica, um botijão de gás para capacitância do sistema a ar e uma caixa de aquisição de dados. Na figura 14 pode-se observar o equipamento usado.

Figura 14 – Equipamento para ensaio de vida de fadiga



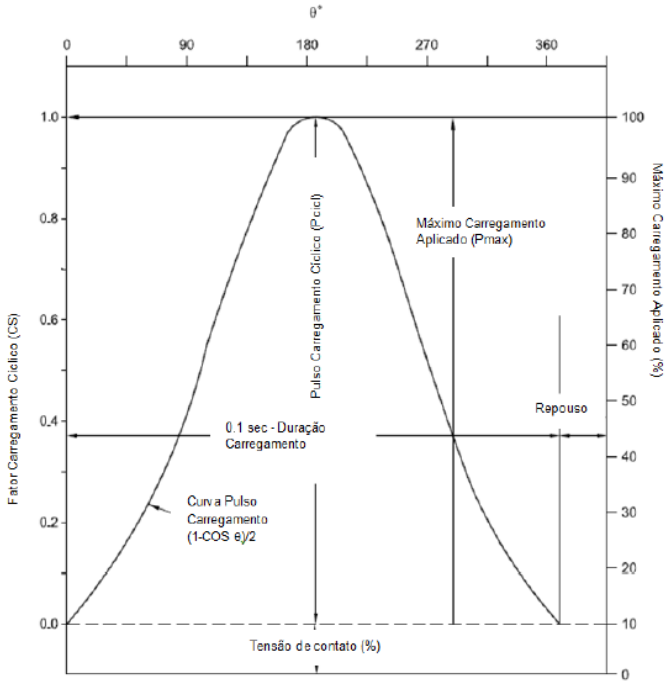
(fonte: foto do autor)

6.3.2 Calibração do equipamento

Para o ensaio de vida de fadiga foi necessário fazer a calibração do equipamento para obter o pulso de cargas cíclicas com frequência de 2 Hz (2 ciclos por segundo), com uma duração de carregamento de 0,1 segundo, com forma, amplitude e duração especificados pela norma BS EM 12697-24:2004. O pulso está representado na figura 15.

Para se obter a tensão de tração de cada amostra, foi necessário obter a relação porosidade teor de cimento das mesmas e calculada através da equação obtida pelo ensaio de tração por compressão diametral do estudo realizado por Girardello (2014).

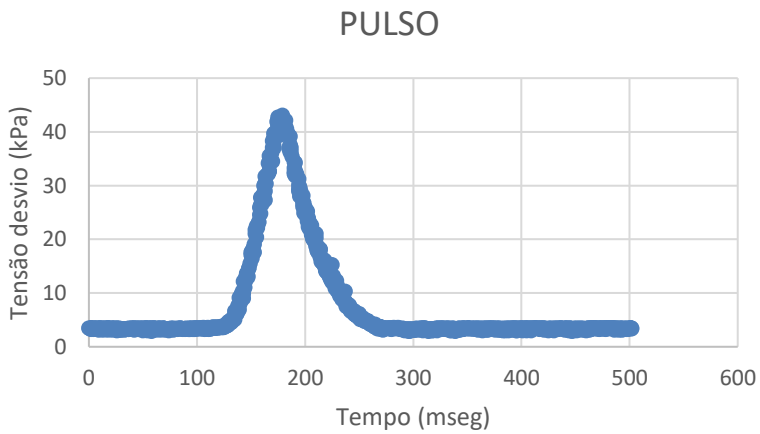
Figura 15 – Curva de carregamento do ensaio de vida de fadiga



(fonte: Adaptado de AASHTO-307, 1999)

Na figura 16 exemplifica um dos pulsos de calibração de um dos ensaios. O corpo de prova tinha 3% de cimento e um índice de vazios de 0,64.

Figura 16 – Calibração do pulso



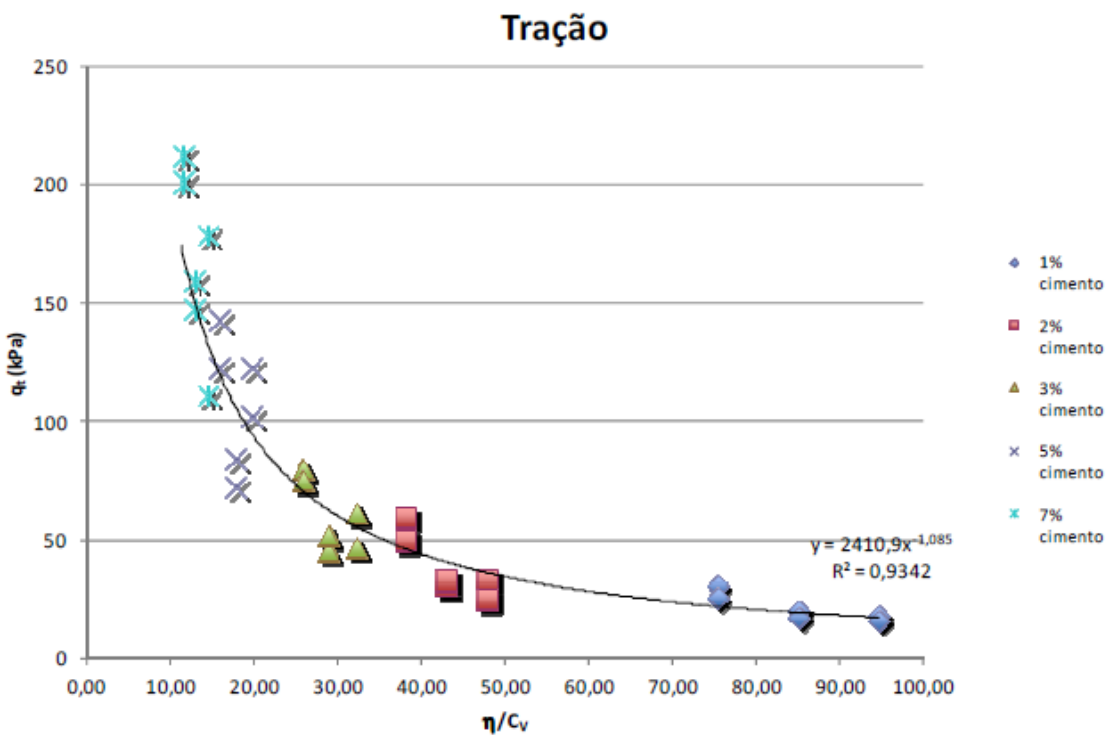
(fonte: elaborado pelo autor)

6.3.3 Procedimentos de ensaio

Feita a calibração, inicia-se o ensaio medindo-se o número de ciclos e a deformação radial ao longo do tempo, até sua ruptura, ou por critério adotado por Venson (2015), até atingir 50.000 (cinquenta mil) ciclos.

A norma BS EM 12697-24:2004 recomenda um esforço de tração de 250kPa ou outro valor julgado adequado pelo operador. Como o valor de 250 kPa é muito alto para o solo estudado, Venson (2015) estipulou uma tensão de ensaio em 90% da tensão de ruptura a tração, sendo que para este estudo a tensão de ruptura a tração por compressão diametral foi obtida pelo modelo de Girardello (2014), mostrado na figura 17.

Figura 17 – Resultados dos ensaios de tração diametral



(fonte: adaptado de Girardello, 2014)

7 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS COM E SEM A INCLUSÃO DE FIBRAS

O programa experimental deste trabalho, conforme mencionando anteriormente, foi desenvolvido para que os resultados dessa pesquisa pudessem ser comparados com os resultados do estudo realizado por Venson (2015), que investigou a vida de fadiga de um solo artificialmente cimentado sem adição de fibras.

Neste item é apresentada a mudança provocada pela adição de fibras na mistura solo-cimento. A análise é baseada na comparação do modo de ruptura dos corpos de prova, da vida de fadiga e da deformação radial sofrida pelas amostras.

7.1 MODO DE RUPTURA DAS AMOSTRAS SEM A INCLUSÃO DE FIBRAS

Segundo Venson (2015), o tipo de ruptura que ocorre nesse tipo de material é a ruptura frágil, que se caracteriza por uma queda brusca de resistência após alcançada a tensão desvio máxima, com formação de planos de rupturas bem definidos. Na figura 18 pode ser vista esse tipo de ruptura ocasiona pelo ensaio de fadiga em material sem fibras.

Figura 18 – Ruptura típica por tração no ensaio de fadiga

(fonte: adaptado de Venson, 2015)

A forma da ruptura é um aspecto importante a se analisar quando se introduz fibras em misturas de solo. O aumento da ductilidade devido a adição de fibras já foi evidenciado por vários

autores, entre eles Festugato (2008), sendo este aumento mais pronunciado quanto maior for a quantidade de fibras.

Essa ductilidade foi observada nos ensaios de fadiga, mesmo com a formação de uma ruptura típica por tração, semelhante aos de amostras sem fibras (ruptura frágil), é perceptível a ductilidade adquirida pelo material. As amostras, mesmo com a visível formação de uma trinca no sentido de aplicação da carga, resistiam a vários ciclos até o rompimento efetivo. Na figura 19 pode-se ver a ruptura.

Figura 19 – Ruptura típica por tração do ensaio de fadiga

(fonte: elaborado pelo autor)

7.2 AVALIAÇÃO DA VIDA DE FADIGA E DEFORMAÇÃO RADIAL FINAL SEM A INCLUSÃO DE FIBRAS

A seguir, é apresentado na tabela 1, um resumo dos resultados dos ensaios de vida de fadiga sem inclusão de fibras realizado por Venson (2015).

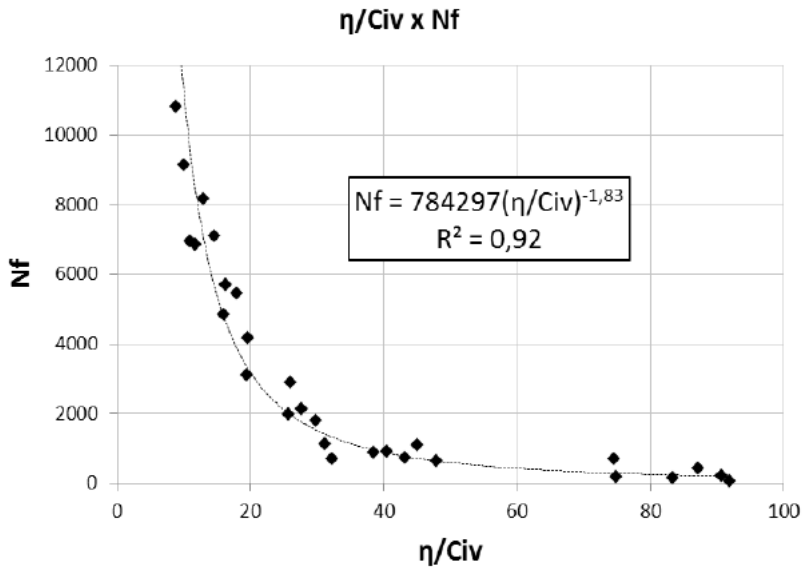
Tabela 1 – Resumo dos resultados de ensaios de fadiga obtidos por Venson (2015)

Código CP	η/Civ	Nf	$\varepsilon_{r\,(\%)}$
CP_1%_0,78 A	91,95	63	0,57
CP_1%_0,78 B	90,75	217	0,69
CP_1%_0,70 A	83,43	150	0,55
CP_1%_0,70 B	87,25	414	0,53
CP_1%_0,64 A	74,95	195	0,44
CP_1%_0,64 B	74,62	689	0,61
CP_2%_0,78 A	47,93	644	0,42
CP_2%_0,70 A	43,21	723	0,32
CP_2%_0,70 B	45,14	1092	0,35
CP_2%_0,64 A	38,52	872	0,31
CP_2%_0,64 B	40,49	902	0,36
CP_3%_0,78 A	31,21	1117	0,37
CP_3%_0,78 B	32,32	689	0,32
CP_3%_0,70 A	27,78	2123	0,35
CP_3%_0,70 B	29,91	1784	0,29
CP_3%_0,64 A	26,13	2895	0,34
CP_3%_0,64 B	25,81	1987	0,38
CP_5%_0,78 A	19,70	4163	0,33
CP_5%_0,78 B	19,47	3115	0,3
CP_5%_0,70 A	18,09	5450	0,35
CP_5%_0,64 A	16,35	5700	0,31
CP_5%_0,64 B	15,99	4850	0,28
CP_7%_0,78 A	14,70	7100	0,31
CP_7%_0,70 A	13,01	8650	0,28
CP_7%_0,64 A	11,81	6850	0,26
CP_9%_0,78 A	10,99	6950	0,22
CP_9%_0,70 A	10,07	9150	0,24
CP_9%_0,64 A	8,87	10800	0,19

(fonte: adaptado de Venson, 2015)

Venson (2015) obteve correlações razoáveis entre η/ C_{iv} e a vida de fadiga, como pode ser visto na figura 20. Isso, comprovou a possibilidade de estimativa de parâmetro cíclico do solo estudado usando a razão porosidade e teor de cimento. O autor conclui também, que a vida de fadiga é inversamente proporcional ao η/ C_{iv}.

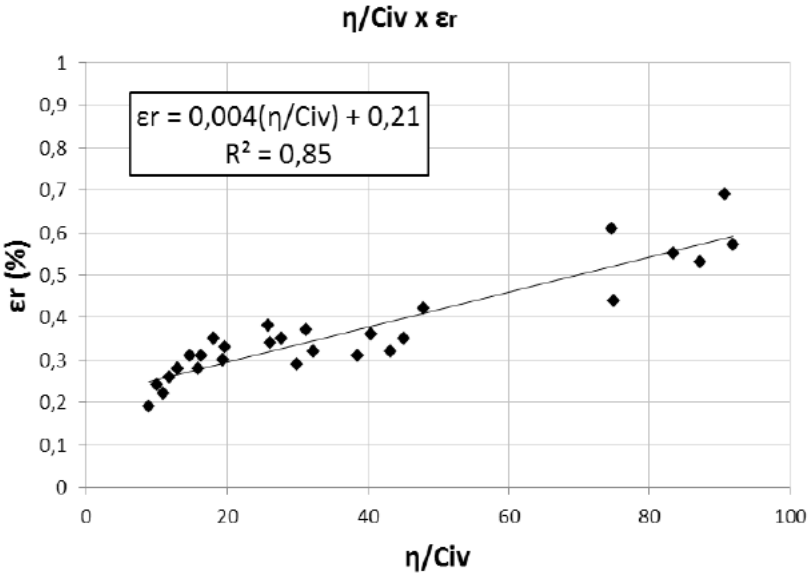
Figura 20 – Correlação de vida de fadiga por η/ Civ obtida por Venson (2015)



(fonte: adaptado de Venson, 2015)

O mesmo autor correlacionou η/ C_{iv} com a deformação radial final sofrida pelas amostras e percebeu que a deformação radial diminui quando o η/ C_{iv} diminui (figura 21).

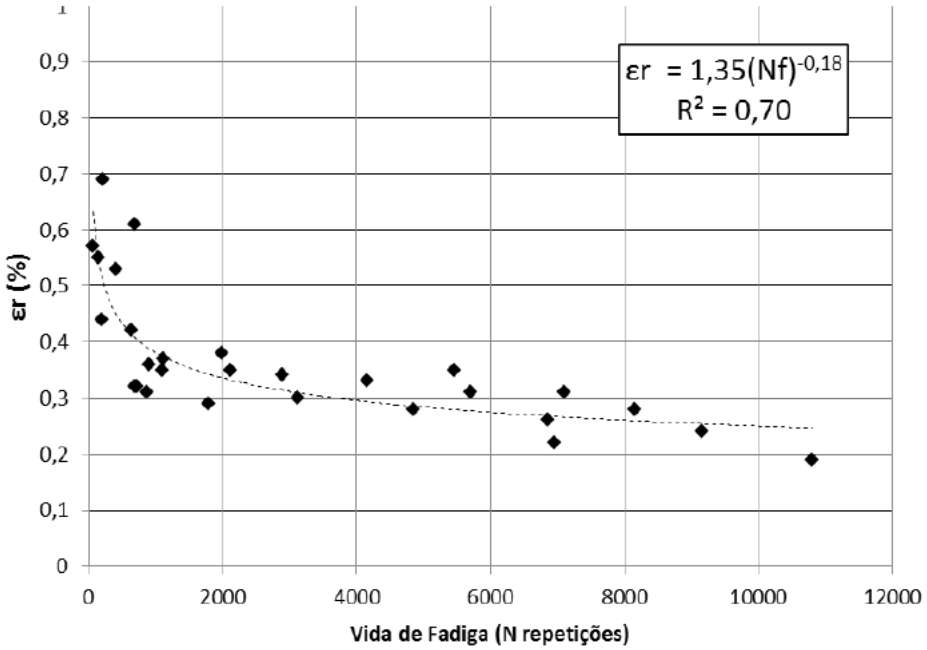
Figura 21 – Deformação radial final por η/ Civ obtida por venson (2015)



(fonte: adaptado de Venson, 2015)

Ainda de acordo com Venson (2015), a vida de fadiga apresenta uma tendência inicial de ser maior para amostras com menor deformação radial, como pode ser visto na figura 22.

Figura 22 – Correlação de vida de fadiga por deformação radial final obtida por Venson (2015)



(fonte: adaptado de Venson, 2015)

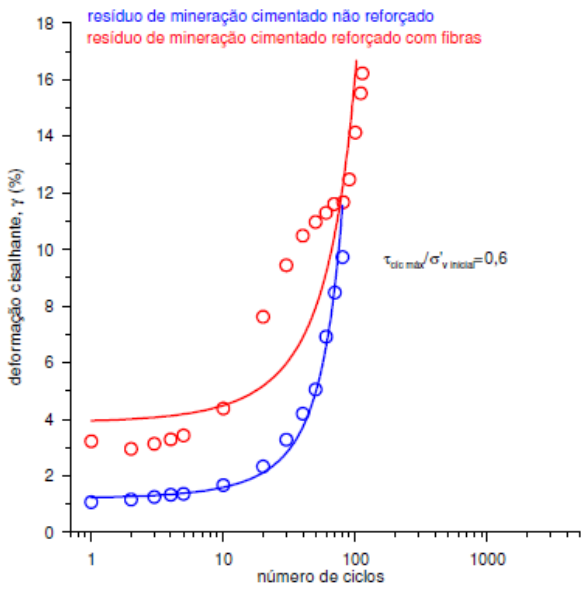
Através de ensaios cíclicos com tensão cisalhante controlada, Festugato (2011) investigou o comportamento de um resíduo de mineração cimentado e reforçado com fibras.

De acordo com o autor:

> [...] a atuação dos reforços fibrosos é mais efetiva para maiores deformações cíclicas. Sob condições cíclicas de tensão cisalhante controlada, até o alcance desse maior nível de deformações, sucessivos ciclos de esforços são impostos e a estrutura cimentada do compósito é danificada. A partir do ciclo em que o material reforçado já alcançou suficiente nível de deformações, a atuação das fibras passa a ser verificada e ambos os materiais tendem a apresentar comportamento semelhante.

A figura 23 exemplifica este comportamento.

Figura 23 – Comparação da deformação cisalhante do material não reforçado e do material reforçado com fibras.



(fonte: adaptado de Festugato, 2011)

Specht (2000) analisou os efeitos da adição de fibras de diferentes propriedades mecânicas, sob condições de carregamentos estático e dinâmico, sobre as propriedades de resistência e deformabilidade de um solo residual artificialmente cimentado. Dentre as fibras estudadas, as em forma de filamentos, além de aumentarem a ductilidade e a tenacidade do compósito, foram mais eficientes na melhoria das características de pós-ruptura do compósito, aumentando de forma significativa a tenacidade, ductilidade e a **vida de fadiga** do material.

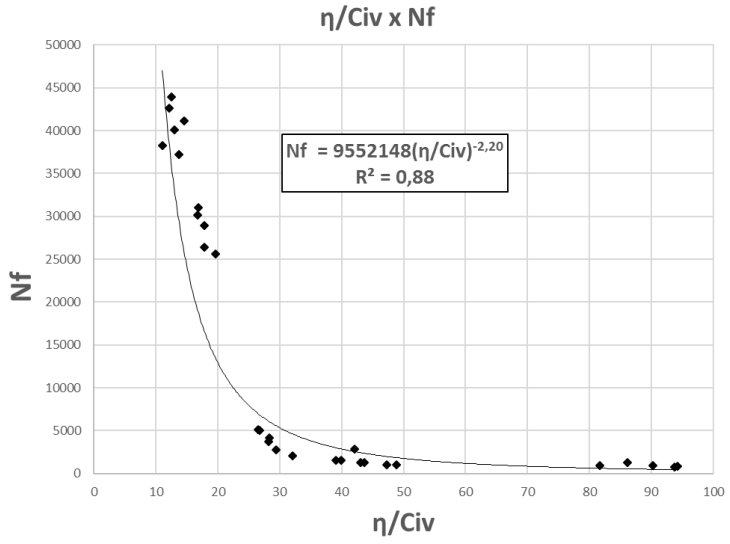
Similarmente, até o momento, é notória a mudança na vida de fadiga do solo estudado com a adição das fibras. E igualmente ao estudo realizado por Venson (2015), o aumento da quantidade de cimento ocasionou um aumento na vida de fadiga, assim como a redução da porosidade proporcionou o mesmo comportamento. A seguir, são apresentados uma tabela resumo (tabela 2) dos resultados obtidos no ensaio de vida de fadiga.

Tabela 2 – Resumo dos resultados de ensaios de fadiga com adição de fibras

CP	η/Civ	Nf	εr (%)
cp11,1-1-0,64	81,63	899	0,2
cp11,3-1-0,64	86,16	1280	0,052
cp12,2-1-0,70	90,21	888	-
cp13,1-1-0,78	94,21	869	0,062
cp13,2-1-0,78	93,77	776	0,059
cp6,1-2-0,64	39,92	1500	0,067
cp6,2-2-0,64	39,1	1500	0,067
cp6,3-2-0,64	42,07	2844	-
cp5,1-2-0,70	43,68	1300	0,04
cp5,2-2-0,70	43	1300	0,095
cp4,1-2-0,78	48,9	1000	0,038
cp4,2-2-0,78	47,29	1000	0,054
cp3,1-3-0,64	26,73	5000	0,03
cp3,2-3-0,64	26,48	5100	0,033
cp3,3-3-0,64	28,27	4175	0,038
cp2,1-3-0,70	29,44	2800	0,039
cp2,2-3-0,70	28,17	3700	0,049
cp1,1-3-0,78	32,04	2050	0,062
cp7,1-5-0,64	16,77	30182	0,06
cp7,2-5-0,64	16,86	31055	0,069
cp8,1-5-0,70	17,86	28893	0,058
cp8,2-5-0,70	17,83	26380	0,076
cp10,1-5-0,78	19,63	25577	0,047
cp14,1-7-0,64	12,48	43933	0,064
cp14,2-7-0,64	12,15	42600	0,05
cp15,1-7-0,70	14,55	41119	0,055
cp15,1-7-0,70	13,05	40112	0,058
cp16,1-7-0,78	13,76	37206	0,088
cp16,2-7-0,78			
cp18,1-9-0,78	11,06	38266	0,047

(fonte: elaborado pelo autor)

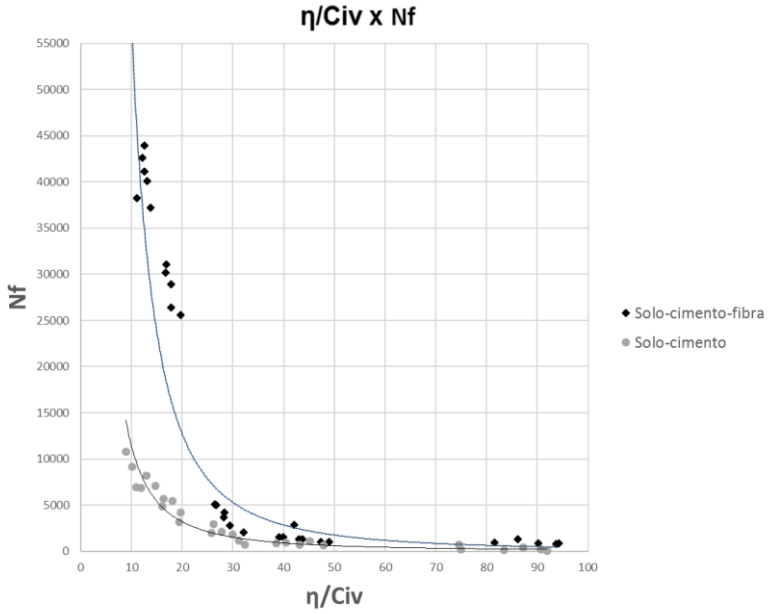
Figura 24 – Correlação de vida de fadiga por η/ Civ



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 25 mostra uma comparação direta entre as correlações da figura 20 e figura 24. Analisando o gráfico da figura 25, pode ser visto o aumento substancial na vida de fadiga com a inclusão das fibras e da mesma forma que Venson (2015), a correlação obtida entre η/ C_{iv} e a vida de fadiga foram razoáveis. Isso, comprova a possibilidade de estimar a vida de fadiga do solo estudado usando a razão η/ C_{iv}.

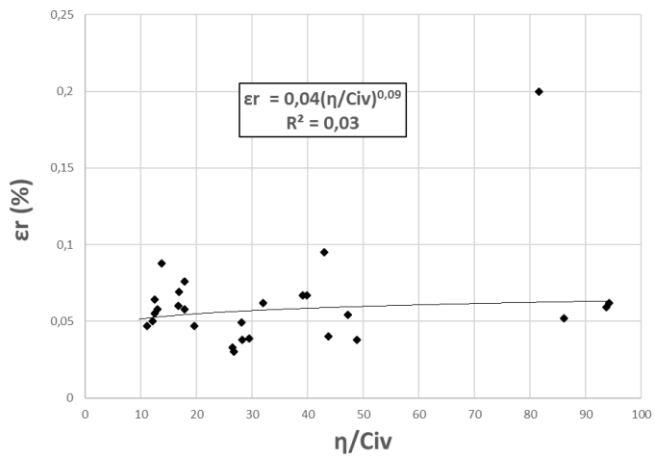
Figura 25 – Comparação direta entre as correlações de solo-cimento com solo-cimento-fibra



(fonte: elaborado pelo autor)

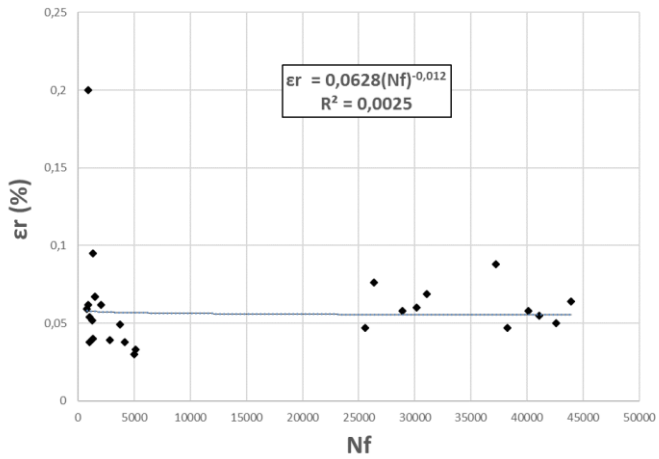
Dos dados obtidos em relação a deformação radial final, não foi possível estabelecer uma relação com a vida de fadiga e com a porosidade/ teor de cimento. É possível que a incoerência dos resultados tenha sido devido a interferência do carregamento aplicado, o que ocasionava vibrações nos LVDT's, já que os mesmos não estavam fixados em um sistema separado ao sistema que recebia a aplicação da carga. As figuras 26 e 27 mostram a tentativa de correlacionar a deformação radial final com a vida de fadiga e com a relação porosidade/ cimento.

Figura 26 – Deformação radial final por η/ Civ



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 27 – Vida de fadiga por deformação radial final



(fonte: elaborado pelo autor)

8 CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos até o momento, pode-se concluir que a inclusão aleatória de fibras de polipropileno aumentou de forma expressiva a vida de fadiga dos compósitos. Comparativamente ao estudo realizado por Venson (2015), houve um aumento no número de ciclos (da ordem de 5 vezes), sendo este aumento mais pronunciado para amostras com teor de cimento acima de 3%.

Isto evidencia que a inclusão de fibras exerce uma grande influência na vida de fadiga de uma areia artificialmente cimentada, absorvendo parte da energia de carregamento, aumentando o número de ciclos de carga e descarga após a fissuração da matriz.

Em relação as correlações entre o η/C_{iv} e a vida de fadiga, o coeficiente de correlação encontrado R^2 foi de 0,88, valor este considerado aceitável e condizente com a pesquisa de Venson (2015).

Em relação a deformação radial final, devido a incoerências dos dados obtidos não foi possível fazer correlações com a vida de fadiga e o η/C_{iv}.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T307-99. **Determining the resilient modulus of soil and aggregate materials**. Washington, D.C., 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-D3999. **Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus**. American Society for Testing and Materials, 2011.

_____. ASTM-D5311. **Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strehgth of Soil**. American Society for Testing and Materials, 2011.

ANDERSEN, K. H.; PUECH, A. A.; JARDINE, R. J. **Cyclic resistant geotechnical design and parameter selection for offshore engineering and other applications.** In: TC 209 WORKSHOP 18TH ICSMGE: DESING FOR CYCLIC LOADING: PILES AND OTHER FOUNDATIONS, 2013, Paris, Anais. Paris, 2013. p. 9–44.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12024**: solo-cimento – moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1992a.

_____. **NBR 12253**: solo-cimento – dosagem para o emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro, 1992b.

BRITISH STANDARD METHODS OF TEST. BS EN 12697-24: **Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 24: Resistance to fatigue**. 2004.

CASAGRANDE, M. D. T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. 2005. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CONSOLI, N. C.; CRUZ, R. C.; FLOSS, M. F.; FESTUGATO, L. **Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Reston, American Society of Civil Engineers, v. 136, n. 5, p. 759-763, may 2010.

_____. Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, n. 4, p. 344–351, feb. 2010.

_____. Effect of material properties on the behavior of sand-cement-fiber. **Ground Improvement**, v. 8, n. 2, p. 77-90, apr. 2004.

CRUZ, R. C. **Influência de Parâmetros Fundamentais na Rigidez, Resistência e Dilatância de uma Areia Artificialmente Cimentada**. 2008. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

DALLA ROSA, F. **Comportamento Mecânico de um Solo Cimentado Curado Sob Tensão a partir de Ensaios Triaxiais**. 2006. 216 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

FESTUGATO, L. **Análise do comportamento mecânico de um solo micro-reforçado com fibras de distintos índices aspectos**. 2008. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

FESTUGATO, L. **Comportamento de hidratação e resposta cisalhante cíclica de resíduo de mineração cimentado reforçado com fibras.** 2011. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

FESTUGATO, L.; MENGER, E.; BENEZRA, F.; KIPPER, E. A.; CONSOLI, N. C. **Geotextiles and Geomembranes.** v. 45, n. 1, p. 77- 82, feb. 2017.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. 2005. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GIRARDELLO, V. **Comportamento de ensaios de arrancamento de placas embutidas em camadas de solo-cimento-fibra.** 2014. 195 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

HANNANT, L. Fibre-reinforced cements and concrete. In: J.M. ILLSTON. **Construction materials:** their nature and behavior. 3rd ed., London and New York: Spon Press, 2001. p. 347 - 422.

HOLLAWAY, Polymers and polymers composities. In: J.M. ILLSTON. **Construction materials:** their nature and behavior. 3rd ed., London and New York: Spon Press, 2001. p. 333 - 346.

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2005. 574 p.

MORAES, R. R., FESTUGATO, L., CONSOLI, N. C. Estimativa da resistência à compressão diametral de um solo cimentado reforçado com fibras de polipropileno. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica** - COMBRAMSEG 2010, 2010, Gramado. Anais do COBRAMSEG 2010, 2010.

PAULA, T. M. de. **Melhoramento de solos: adição de cimento, microssílica e cinza de casaca de arroz em um silte orgânica**. 2013. 79 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RIGHETTO, G. L. **Validação do Fator Vazios/Agente Cimentante na Análise da Resistência Mecânica de um Solo Tratado com Cal, Cimento e Resíduo de Britagem de Rocha**. 2008. 91 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

ROSA, D. A. **Validação da Relação Vazios/Cimento na Estimativa da Resistência à Compressão Simples do Caulim Artificialmente Cimentado**. 2010. 81 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SENÇO, W. Manual de Técnicas de Pavimentação. v .2. 1ed. São Paulo: PINI, 2001. p. 70-131.

SPECHT, L.P. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação**. 2000. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Univerdade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

TAYLOR, G. D. Materials in Construction. London: **Longman Scientific e Technical**, 3rd ed, 2000. 344 p.

VENDRUSCOLO, M. A. **Comportamento de ensaios de placa em camadas de solo melhoradas com cimento e fibras de polipropileno**. Porto Alegre, 2003. 224 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

VENSON, G. I. **Módulo de resiliência e vida de fadiga de areia artificialmente cimentada**. 2015. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.