

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

**Andressa da Silva**

**COMPORTAMENTO À TRACÇÃO NA FLEXÃO DE SOLO  
ARENOSO CIMENTADO REFORÇADO COM FIBRAS**

Porto Alegre  
Dezembro, 2017

**ANDRESSA DA SILVA**

**COMPORTAMENTO À TRAÇÃO NA FLEXÃO DE SOLO  
ARENOSO CIMENTADO REFORÇADO COM FIBRAS**

Trabalho de Diplomação 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  
Dezembro, 2017

**ANDRESSA DA SILVA**

**COMPORTAMENTO À TRAÇÃO NA FLEXÃO DE SOLO  
ARENOSO CIMENTADO REFORÇADO 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.

Porto Alegre, Dezembro de 2017

Prof. Lucas Festugato  
Dr. pela UFRGS  
Orientador

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Lucas Festugato**  
Dr. pela UFRGS

**Prof. Nilo Cesar Consoli**  
Ph. D. pela Concordia University, Canada

**Prof. Sérgio Filipe Veloso Marques**  
Dr. pela UFRGS

Dedico este trabalho a meus pais, Adonis e Andrea, pelo apoio ao longo de toda a Graduação e da vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao professor Lucas Festugato, pela orientação e apoio durante o ano, pela oportunidade de desenvolver um trabalho no LEGG como bolsista de iniciação científica e pelo incentivo em seguir a área de Geotecnia.

À minha família, que esteve sempre presente ao longo de minha graduação, apoiando e incentivando nos momentos bons e ruins.

Ao meu namorado, Magnus, pelo carinho e compreensão ao longo dos últimos anos. Obrigada por aguentar todas as crises e não enlouquecer junto.

A minha colega Alice, que trabalhou junto comigo em todos os ensaios e deu apoio em todo o desenvolvimento do trabalho, sem tua ajuda seria impossível.

Aos colegas do LEGG, que me ajudaram a tornar esta pesquisa possível. Obrigada a todos por todo o conhecimento transmitido ao longo deste ano.

Agradeço, por fim, a todos que tornaram possível este trabalho e contribuíram para minha formação.

Pode-se encontrar a felicidade mesmo nas horas mais  
sombrias, se a pessoa se lembrar de acender a luz.

*J.K. Rowling*

## RESUMO

O melhoramento de solos com adição de agentes cimentantes e fibras vem sendo utilizado como uma alternativa para solucionar problemas em solos que não atendem às solicitações impostas. Neste trabalho, foi estudado o melhoramento das propriedades da areia de Osório através da adição de cimento Portland (CP V) e fibras de polipropileno, visando o aumento da resistência à tração do solo. Estudos prévios realizados por Consoli et al. (2010) mostraram que a metodologia de dosagem baseada na relação porosidade/teor volumétrico de cimento é satisfatória para estimar a resistência à tração de solo arenoso cimentado. O programa experimental foi desenvolvido visando a comparação com outros trabalhos. Foram escolhidos para o estudo teores de cimento de 1, 2, 3, 5, 7 e 9 %, índices de vazios de 0,64, 0,7 e 0,79, teor de fibra de 0,5 % e umidade constante de 10 %. Os resultados indicaram que a resistência à tração cresce linearmente em relação a quantidade de cimento adicionada e que a resistência diminui a medida que a porosidade diminui. A relação porosidade/teor volumétrico de cimento mostrou-se adequada para a estimativa da resistência à tração das misturas solo-cimento e solo-cimento-fibra. Por fim, foi realizada uma análise comparativa entre resultados com e sem adição de fibras.

Palavras-chave: Melhoramento de Solos. Ensaio de Tração na Flexão. Solo-Cimento. Solo-Cimento-Fibra. Razão Porosidade/Teor Volumétrico de Cimento.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Delineamento da pesquisa .....	17
Figura 2 – Variação da resistência à tração em função da adição de cimento .....	21
Figura 3 – Variação da resistência à tração devido à porosidade .....	22
Figura 4 – Influência do teor de umidade sobre a resistência à compressão .....	23
Figura 5 – Influência do teor de umidade sobre a resistência à compressão .....	24
Figura 6 – Resistência à compressão simples em função da relação água/cimento .....	25
Figura 7 – Areia de Osório .....	28
Figura 8 – Curva granulométrica da areia de Osório .....	28
Figura 9 – Cimento Portland CP-V .....	29
Figura 10 – Evolução da resistência à compressão dos diversos tipos de cimento .....	30
Figura 11 – Água destilada .....	30
Figura 12 – Fibra de polipropileno 27 mm .....	31
Figura 13 – Molde prismático .....	33
Figura 14 – a) Corpo de prova de solo-cimento; b) Corpo de prova de solo-cimento-fibra .....	34
Figura 15 – Equipamento para ensaio de tração na flexão .....	35
Figura 16 – Aparato utilizado para ensaio de tração na flexão .....	35
Figura 17 – Ensaio de tração na flexão com carregamento monotônico .....	36
Figura 18 – Variação da resistência à tração devido à variação do teor de cimento .....	38
Figura 19 – Efeito da porosidade na resistência à tração .....	39
Figura 20 – Variação da resistência à tração em função da relação porosidade/teor volumétrico de cimento .....	40
Figura 21 – Ajuste da relação porosidade/teor volumétrico de cimento para ensaios RCD e RTF .....	41
Figura 22 – Variação da resistência à tração devido ao teor de cimento .....	42
Figura 23 – Efeito da porosidade na resistência à tração .....	43
Figura 24 – Variação da resistência à tração em função da relação porosidade/teor volumétrico de cimento .....	44
Figura 25 – Modo de ruptura - Mistura Solo-Cimento .....	45
Figura 26 – Modo de ruptura – Mistura Solo-Cimento-Fibra .....	45
Figura 27 – Resistência à tração em função da relação porosidade/teor volumétrico de cimento .....	46



## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Índices físicos da areia de Osório .....	29
---	----

## **LISTA DE SIGLAS**

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ASTM – American Society for Testing and Materials

CP – Cimento Portland

LEGG – Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental

NBR – Norma Brasileira

RCD – Resistência à tração na compressão diametral

RTF – Resistência à tração na flexão

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\eta$  – porosidade (%)

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

$q_t$  – resistência à tração (kPa)

$q_u$  – resistência à compressão (kPa)

$e$  – índice de vazios

$C_i$  – teor de cimento (%)

$C_{iv}$  – teor volumétrico de cimento

$\gamma_d$  – massa específica aparente seca ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$\eta$  – porosidade (%)

$\eta/C_{iv}$  – relação porosidade/teor volumétrico de cimento

$R^2$  – coeficiente de determinação

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA</b> .....	15
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA .....	15
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	15
2.2.1 Objetivo principal .....	15
2.2.2 Objetivo secundário .....	15
2.3 HIPÓTESES .....	15
2.4 PRESSUPOSTO .....	16
2.5 DELIMITAÇÕES .....	16
2.6 LIMITAÇÕES .....	16
2.7 DELINEAMENTO .....	16
<b>3 REVISÃO DE SOLOS REFORÇADOS</b> .....	19
3.1 MISTURA SOLO-CIMENTO .....	19
3.1.1 Solo .....	20
3.1.2 Cimento .....	20
3.1.3 Água .....	20
3.2 COMPORTAMENTO DE SOLOS REFORÇADOS .....	20
3.2.1 Efeito do cimento .....	21
3.2.2 Efeito da porosidade .....	22
3.2.3 Relação porosidade/teor volumétrico de cimento .....	23
3.2.4 Influência do teor de umidade .....	23
3.2.5 Relação água/cimento .....	24
3.3 MISTURA SOLO-FIBRAS .....	25
3.3.1 Alterações na resistência ao cisalhamento .....	26
<b>4 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	27
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	27
4.2 MATERIAIS COMPONENTES .....	27
4.2.1 Solo .....	28
4.2.2 Cimento .....	29
4.2.3 Água .....	30
4.2.4 Fibras de polipropileno .....	31
4.3 MÉTODOS .....	32
4.3.1 Preparação das amostras .....	32

<b>4.3.2 Aceitação da amostra</b> .....	33
<b>4.3.3 Determinação da resistência de tração na flexão</b> .....	34
4.3.3.1 Carregamento monotônico .....	36
<b>5 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	37
<b>5.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DA MISTURA SOLO-CIMENTO</b> .....	37
<b>5.1.1 Efeito do cimento</b> .....	37
<b>5.1.2 Efeito da porosidade</b> .....	38
<b>5.1.3 Relação porosidade/teor volumétrico de cimento</b> .....	39
<b>5.1.4 Relação entre resistência à tração na flexão e compressão diametral</b> .....	40
<b>5.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DA MISTURA SOLO-CIMENTO-FIBRA</b> .....	41
<b>5.2.1 Efeito do cimento</b> .....	42
<b>5.2.2 Efeito da porosidade</b> .....	42
<b>5.2.3 Relação porosidade/teor volumétrico de cimento</b> .....	43
<b>5.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS COM E SEM INCLUSÃO DE FIBRAS</b> .....	44
<b>5.3.1 Modo de ruptura</b> .....	44
<b>5.3.2 Avaliação da resistência à tração com e sem inclusão de fibras</b> .....	46
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	47
<b>6.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO</b> .....	47
<b>6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	48
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	49



## 1 INTRODUÇÃO

Eventualmente, os solos onde são encontradas as obras de infraestrutura não possuem resistência suficiente para as cargas solicitadas. Por esse motivo, o engenheiro deve adotar soluções que se adequem às solicitações. Diferentes alternativas podem ser escolhidas para satisfazer as exigências do projeto como:

- a) alteração do projeto;
- b) mudança do local de realização da obra;
- c) substituição do solo local;
- d) melhoramento das propriedades do solo.

O melhoramento das propriedades do solo, particularmente, se mostra eficiente quando a alteração do local ou do solo presente possui um elevado custo. O melhoramento pode se dar por numerosas formas, tais como compactação do solo, ocasionando o aumento do peso específico, a adição de agentes cimentantes, onde são empregados, usualmente, cimento ou cal e a adição de fibras.

A técnica de melhoramento através da adição de cimento Portland, segundo Foppa (2005), vem sendo empregada com sucesso na construção de bases de pavimentos, na proteção de taludes em barragens de terra e canais ou ainda, na contenção de plumas de contaminação. A utilização de cimento Portland como agente estabilizador é usado porque, mesmo em pequenas quantidades, apresenta um ganho considerável na resistência. Entretanto, de acordo com Spetch (2000), a sua grande fragilidade e fissuração excessiva devido à tração têm, muitas vezes, desmotivando o uso deste material em pavimentação.

Para a melhoria do comportamento de solos, a utilização de fibras tem sido estudada há algumas décadas. Segundo Festugato (2011), a inclusão de fibras no solo proporciona o desenvolvimento, observado pela melhoria das propriedades mecânicas, de um novo material geotécnico com características próprias, fortemente influenciadas pelas características do reforço.

Nesse contexto, o presente trabalho analisa a resistência de um solo tratado estabilizado com cimento e reforçado com fibras. O capítulo 1 apresenta uma introdução ao assunto a ser estudado. O capítulo 2 apresenta as diretrizes seguidas para a elaboração do programa experimental. Nele são apresentados a questão da pesquisa, os objetivos principal e secundário, hipótese, pressuposto, delimitações, limitações, delineamento da pesquisa e o cronograma previsto. No capítulo 3 é apresentada a revisão bibliográfica referente a solos estabilizados com cimento e reforçados com fibras, com enfoque no comportamento das misturas de solos reforçados e na influência de cada variável. O programa experimental é descrito no capítulo 4, onde são descritos os materiais que serão utilizados, o método de moldagem e os ensaios a serem realizados.



## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

### **2.1 QUESTÃO DA PESQUISA**

A questão da pesquisa do trabalho é: a razão porosidade/agente cimentante é válida para a análise do comportamento à tração de misturas de solo arenoso reforçado com cimento e melhorado com fibras?

### **2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Os objetivos da pesquisa são classificados em principal e secundário e são descritos abaixo:

#### **2.2.1 Objetivo principal**

O objetivo principal do trabalho é a análise do comportamento à tração de solos reforçados com cimento e fibra e a comparação com a resistência à tração de solos reforçados somente com cimento.

#### **2.2.2 Objetivo secundário**

O objetivo secundário do trabalho é observar diferentes metodologias de ensaios para obtenção da resistência à tração de solos reforçados.

### **2.3 HIPÓTESES**

A hipótese do trabalho é que a relação porosidade/agente cimentante é válida para a estimativa da resistência à tração de solos arenosos cimentados artificialmente e reforçado com fibras.

## 2.4 PRESSUPOSTO

É pressuposto que o valor da sucção das amostras é baixo e pode ser desconsiderado.

## 2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao uso de areia de Osório, cimento Portland CP-V e fibras de polipropileno de 27 mm.

## 2.6 LIMITAÇÕES

O trabalho limita-se a estudar misturas com:

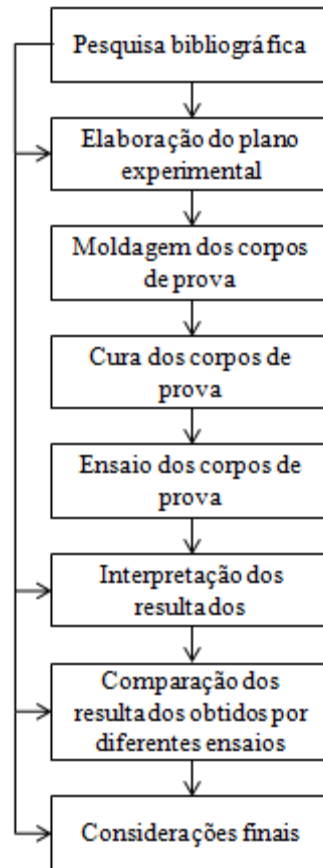
- a) Teor de umidade constante de 10%;
- b) Teores de cimento de 1, 3, 5, 7 e 9%;
- c) Teor de fibra igual a 0,5%;
- d) Tempo de cura de 7 dias;

## 2.7 DELINEAMENTO

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

- a) Pesquisa bibliográfica;
- b) Elaboração do plano experimental;
- c) Moldagem dos corpos de prova;
- d) Cura dos corpos de prova;
- e) Ensaio dos corpos de prova;
- f) Interpretação dos resultados;
- g) Comparação dos resultados obtidos por diferentes ensaios;
- h) Considerações finais.

Figura 1– Delineamento da pesquisa



(fonte: elaborado pela autora)

A **pesquisa bibliográfica** terá como objetivo buscar as informações relativas às misturas solo-cimento e solo-fibra. Buscou-se estudos e publicações que descrevam o comportamento de solos com aglomerantes, seus materiais constituintes e influência das variáveis em estudo.

Na etapa de **elaboração do plano experimental**, serão definidas as seguintes propriedades:

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

Após a definição das propriedades, será iniciada a **moldagem dos corpos de prova**, conforme estabelecido previamente. Após a moldagem, os corpos de prova serão armazenados pelo

período de cura e, no último dia, serão colocados em imersão pelo período de 24 horas, a fim de reduzir o efeito da sucção na amostra.

Após o tempo de cura, ocorrerá o **ensaio dos corpos de prova**. Serão realizados ensaios de tração na flexão com carregamentos monotônico e cíclico. Serão utilizados para os ensaios com carregamento monotônico uma prensa automática de carregamento simples e, para os ensaios cíclicos, um equipamento com sistema pneumático para aplicação de carga.

Após os ensaios, será realizada a **interpretação dos dados** obtidos com o rompimento das amostras e a comparação entre as amostras de solo-cimento e as amostras de solo-cimento-fibra.

### 3 REVISÃO DE SOLOS REFORÇADOS

Entende-se por melhoria ou reforço de solos a utilização de processos físicos e/ou químicos que visem o melhoramento das propriedades mecânicas dos solos. Procura-se o aumento da resistência do solo tratado e a diminuição de sua compressibilidade e de sua permeabilidade. O termo melhoria de solos está associado a processos químicos, enquanto que o termo reforço está associado a utilização de inclusões em aterros ou taludes (CASAGRANDE, 2005).

Segundo Dalla Rosa (2009), na engenharia geotécnica o principal material utilizado, o solo, é um material complexo e muito variável, que nem sempre satisfaz às necessidades da obra a ser realizada. Nestes casos, quando é preciso se adequar às condições locais da obra, uma alternativa é o melhoramento destes solos através de técnicas de estabilização com a utilização de cal ou cimento. O presente trabalho utiliza a técnica de estabilização com cimento e reforço com fibras.

Neste capítulo será apresentada uma breve revisão sobre a composição e o comportamento da mistura de solo-cimento e de solo-cimento reforçado com fibras.

#### 3.1 MISTURA SOLO-CIMENTO

Segundo a NBR 12253/92, solo-cimento é o “produto endurecido de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem, conforme este projeto, e executada conforme a NBR 12254” (ABNT, 1992). Analogamente, o American Concret Institute, define solo cimento como uma mistura proporcional de solo, cimento e água compactada em alta densidade (USACE, 2000).

A utilização de solo-cimento é recomendada quando um material ou uma combinação de materiais em que não há estabilidade mecânica adequada ou quando é necessária maior resistência à ação da água. Das diversas técnicas de estabilização, a técnica de estabilização com cimento é a mais comum (INGLES; METCALF, 1972).

### **3.1.1 Solo**

Qualquer tipo de solo pode ser tratado com cimento. Maior eficiência é observada em solos arenosos pela facilidade de mistura e pelas maiores resistências obtidas (INGLES; METCALF, 1972).

A norma NBR 12253 (ABNT, 2012) limita o uso de cimento para estabilização a solos que se enquadrem nas classificações A1, A2, A3 e A4 presentes na D 3282 (ASTM, 2015) e que contenham 100% do material passante na peneira de 76 mm e no máximo 45% do material retido na peneira de abertura de 4,8 mm.

### **3.1.2 Cimento**

Conforme observado por Ingles e Metcalf (1972), o cimento é o componente de maior custo, por isso, usualmente, são feitos vários testes de laboratório para decidir a quantidade mínima de cimento a ser adicionada que atenda às especificações. Em alguns casos, é também necessário estabelecer um limite máximo de cimento para prevenir o efeito adverso de trincamentos por retração. De acordo com os autores, qualquer tipo de cimento pode ser utilizado para o uso em solo-cimento.

### **3.1.3 Água**

De acordo com Ingles e Metcalf (1972), a água para o uso em solo-cimento deve ser considerada potável. A quantidade de água adicionada no solo-cimento é relacionada ao necessário para a compactação do solo.

## **3.2 COMPORTAMENTO DE SOLOS ESTABILIZADOS COM CIMENTO**

Este capítulo descreve o comportamento de solos reforçados com cimento. Serão abordados os seguintes tópicos:

- a) Influência do cimento no comportamento do solo;
- b) Efeito da porosidade;
- c) Teor de umidade do solo;
- d) Relação água/cimento;

### e) Relação vazios/cimento.

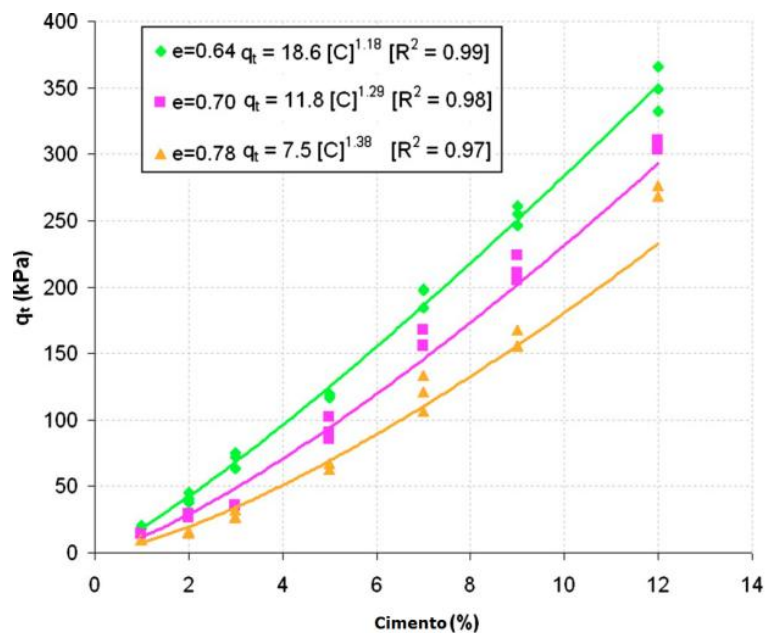
Abaixo, serão detalhados os efeitos dos principais fatores considerados influentes no aumento da resistência à tração de solos cimentados.

#### 3.2.1 Efeito do cimento

Conforme Ingles e Metcalf (1972), a adição de pequenas quantidades de cimento (até 2%) modifica moderadamente as propriedades do solo, enquanto que maiores quantidades alteram radicalmente suas propriedades. De acordo com os mesmos autores, as propriedades do solo mudam com o aumento da quantidade de cimento: a capacidade de carga aumenta; durabilidade a ciclos de molhagem e secagem aumenta; em geral a permeabilidade diminui, porém, aumenta em solos argilosos; a tendência à retração aumenta em solos granulares; e a tendência à expansão de solos argilosos será reduzida.

De acordo com Consoli et al. (2010), a adição de cimento possui um grande efeito na resistência à tração de uma mistura de solo-cimento, onde uma pequena adição de cimento é suficiente para um significativo ganho de resistência. O efeito do cimento na resistência à tração pode ser observado na figura 2, através de resistências obtidas por ensaio de compressão diametral.

Figura 2 – Variação da resistência à tração em função da adição de cimento



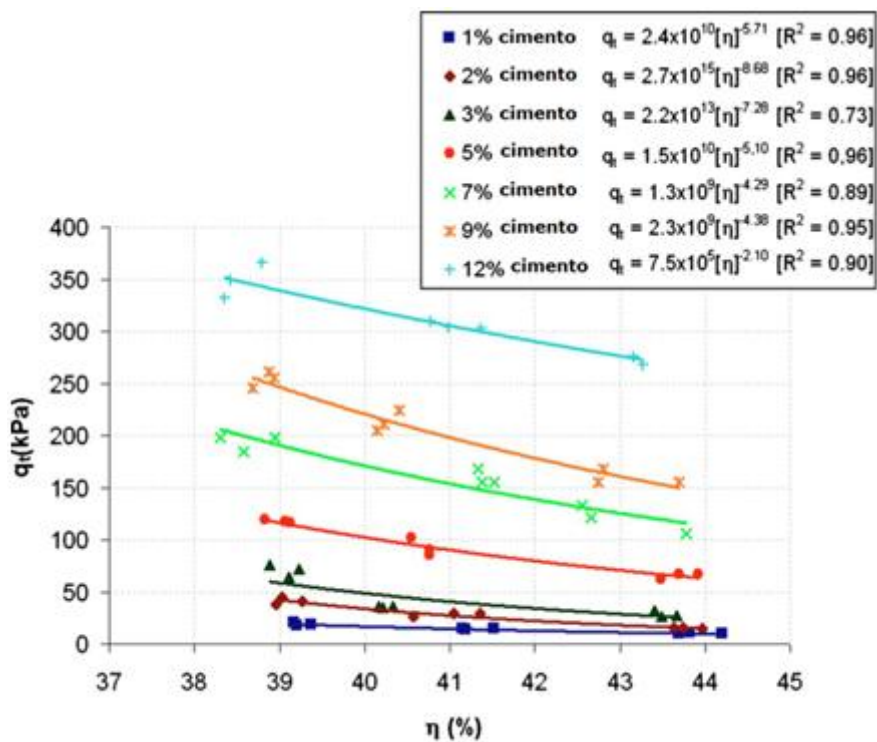
(fonte: adaptado de Consoli et al., 2010)

### 3.2.2 Efeito da porosidade

De similar importância à quantidade de cimento é a densidade na qual a mistura é compactada. Com o aumento da densidade, a resistência aumenta, a permeabilidade diminui até um valor mínimo, próximo da umidade ótima, depois começa a aumentar novamente (INGLES & METCALF, 1972).

Segundo Consoli et al. (2010), a porosidade afeta a resistência à tração da mistura de solo-cimento. A resistência à tração aumenta com a redução da porosidade da mistura compactada. Na figura 3 pode-se observar esse comportamento, observado a partir de ensaios de compressão diametral.

Figura 3 – Variação da resistência à tração devido à porosidade



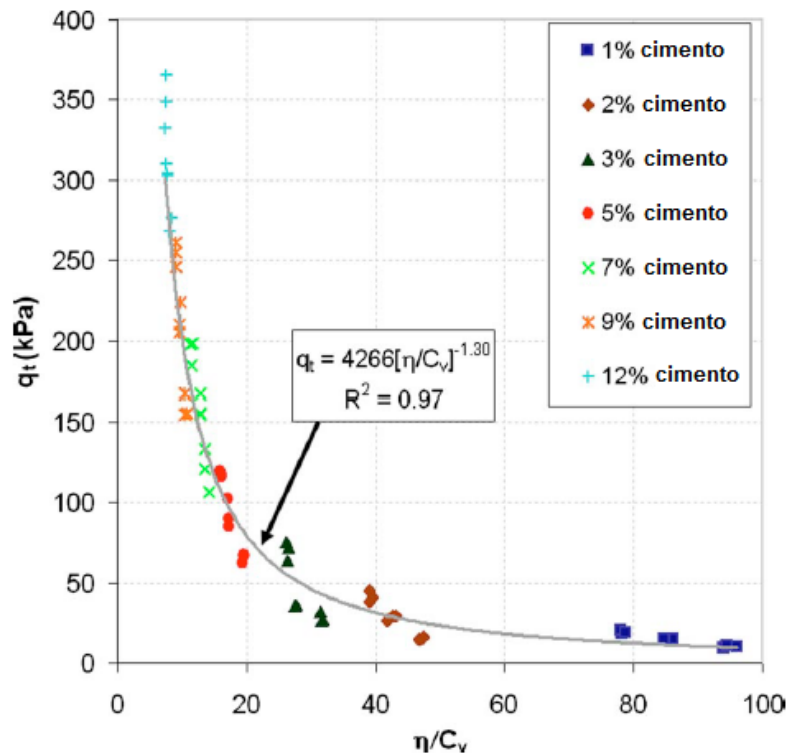
(fonte: adaptado de Consoli et al., 2010)



### 3.2.3 Relação porosidade/teor volumétrico de cimento

Consoli et al (2010) apresentou uma análise considerando a relação porosidade/teor volumétrico de cimento como um parâmetro chave para a obtenção da resistência à tração do solo. A resistência à tração diminui com o aumento da razão  $\eta/C_{iv}$  e aumenta com a diminuição da mesma. O comportamento para a mistura de areia de Osório e cimento Portland, submetidos ao ensaio de compressão diametral, pode ser observado na figura 4.

Figura 4 – Variação da resistência à tração em função da relação porosidade/teor de cimento

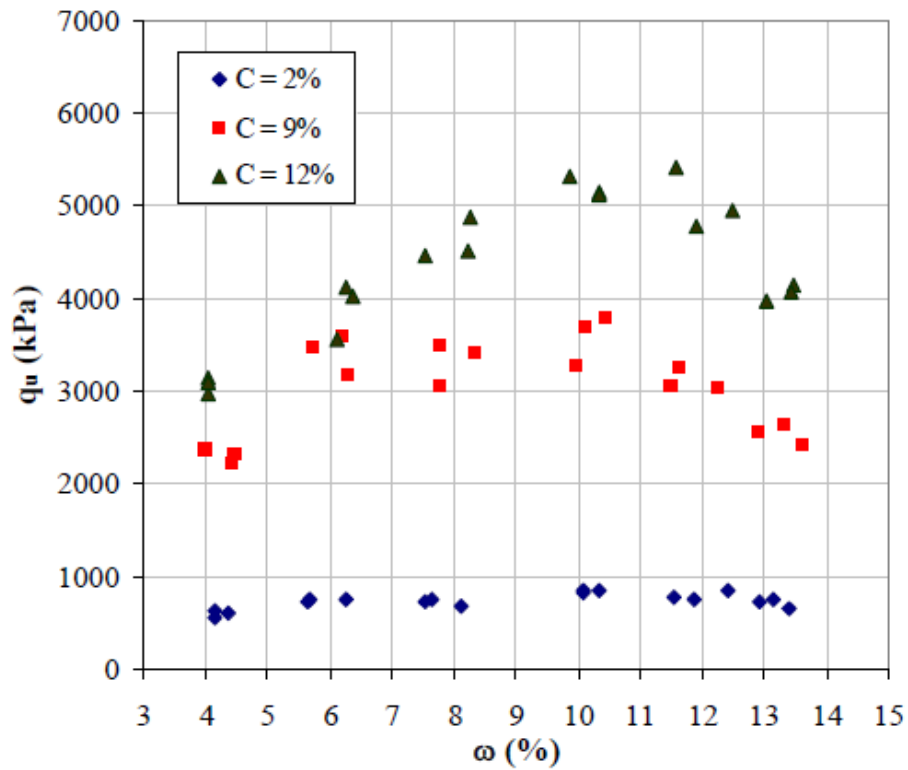


(fonte: adaptado de Consoli et. al., 2010)

### 3.2.4 Influência do teor de umidade

De acordo com Foppa (2005), em ensaios de compressão simples, ocorre aumento de resistência com um teor de umidade até um valor ótimo, a partir do qual a resistência passa a diminuir. Os resultados obtidos podem ser observados na figura 5. Conforme o mesmo autor verificou-se que o teor ótimo de umidade é de aproximadamente 10%, independente do teor de cimento.

Figura 5 – Influência do teor de umidade sobre a resistência à compressão de solo-cimento

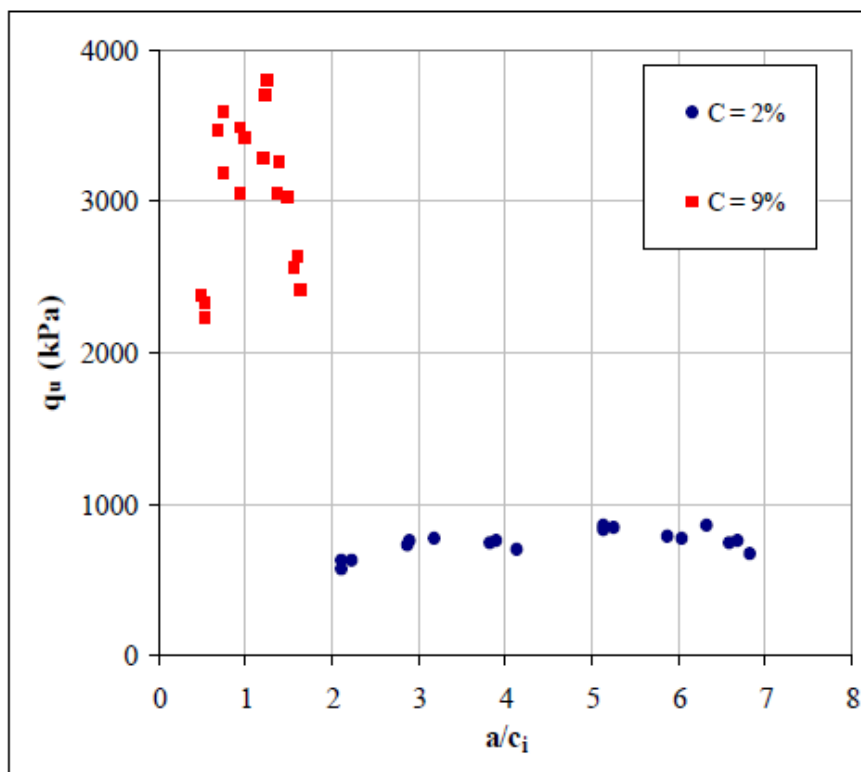


(fonte: Foppa, 2005)

### 3.2.5 Relação água/cimento

Foppa (2005) buscou validar a relação água/cimento proposta em trabalhos anteriores (Horpibulsuk, 2003; Azambuja, 2004), porém obteve resultados contrários aos já presentes na literatura, conforme figura 6. O autor verificou que não é possível estabelecer uma relação entre a relação água/cimento e a resistência à compressão simples, uma vez que os dados apresentam “patamares” de resistência diferenciados em função da quantidade de cimento utilizada.

Figura 6 – Resistência à compressão simples em função da relação água/cimento



(fonte: Foppa, 2005)

### 3.3 MISTURA SOLO-FIBRAS

O reforço de solos com fibras é uma técnica há muito tempo conhecida e empregada pela humanidade. Indícios do emprego desta técnica também são encontrados em partes da Grande Muralha da China e em estradas construídas pelos Incas, no Peru, empregando lã de lhama como reforço. (PALMEIRA, 1992 apud FESTUGATO, 2008)

Segundo Johnston (1994), as fibras em uma matriz cimentada podem, em geral, ter dois efeitos importantes. Primeiro, elas tendem a reforçar o compósito sobre todos os modos de carregamento que induzem tensões de tração, isto é, tração indireta, flexão, e cisalhamento, e, secundariamente, melhoram a ductilidade e a tenacidade de uma matriz com características frágeis.

As fibras não impedem a formação de fissuras no compósito, mas são capazes de aumentar a resistência à tração pelo controle da propagação das fissuras (TAYLOR, 1994). Hannant (1994) acredita que as fibras mantêm as interfaces das fissuras juntas, beneficiando as

propriedades mecânicas no estado pós-fissuração, ou seja, aumentando a ductilidade. As fibras que “atravessam” as fissuras contribuem para os aumentos da resistência, da deformação de ruptura e da tenacidade dos compósitos (CASAGRANDE, 2001).

### **3.3.1 Alterações na resistência ao cisalhamento**

Conforme Festugato (2008), as fibras inibem a amplitude das fissuras associadas à ruptura do compósito, levando a um aumento nas áreas sob as curvas tensão-deformação. Essa propriedade é comumente referida como tenacidade e representa o trabalho da fatura ou a capacidade de absorção da energia do compósito.

Diversos autores relataram acréscimo na resistência devido à adição de fibras ao solo. Alguns relataram aumento de forma linear com o aumento da quantidade de reforço (Gray & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1986) e, outros, um aumento não linear (Shewbridge & Sitar, 1989; Jewell & Wroth, 1987; Teodoro, 1999) (CASAGRANDE, 2005).

Montardo (1999) observou o aumento do ângulo de atrito interno de uma areia uniforme com e sem cimentação artificial, reforçada com diferentes tipos de fibras. Com relação ao intercepto coesivo, o autor somente encontrou um aumento para a areia não cimentada reforçada com fibras de polipropileno.

Segundo Vendruscolo (2003), as fibras possuem a característica de conferir um intercepto coesivo ao solo arenoso, além de proporcionarem um aumento no ângulo de atrito. Já para solo cimentado, as fibras têm uma influência maior sobre a coesão última e o ângulo de atrito último. Conforme observado pelo mesmo autor, a resistência do solo cimentado reforçado com fibras depende basicamente das condições da matriz, como teor de cimento, densidade, tamanho médio das partículas e distribuição granulométrica.

Consoli et al. (1999) observou que o acréscimo de resistência devido à inclusão de fibras em solo cimentado artificialmente se mostrou mais pronunciada para menores teores de cimento.

Conforme observado por Casagrande (2005), a adição de fibras ao solo aumenta tanto os parâmetros de resistência de pico, como a resistência pós-pico do mesmo, após grandes deslocamentos.

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é desenvolvido o programa experimental da pesquisa em questão. Serão analisados os materiais e métodos utilizados e o cronograma subsequente.

### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa experimental foi desenvolvido para a avaliação da influência na resistência à tração por motivo da adição de diferentes teores de cimento e índices de vazios a um solo arenoso. Foi analisada também a influência da adição de fibras de polipropileno na resistência, em comparação às amostras sem adição de fibras.

Para a obtenção dos parâmetros desejados para a análise, foram estabelecidos, a partir da prática internacional e nacional e a partir de pesquisas anteriores (Consoli et al., 2010), os seguintes pontos para a moldagem:

- a) Teor de umidade constante de 10%;
- b) Teores de cimento de 1, 2, 3, 5, 7 e 9%;
- c) Índices de vazios de 0,64, 0,7 e 0,79;
- d) Teor de fibra igual a 0,5%;
- e) Tempo de cura de 7 dias.

Foram definidos para o plano experimental a moldagem de 3 corpos de prova para cada ponto de moldagem. Foram preparadas 108 amostras para o ensaio monotônico.

### 4.2 MATERIAIS COMPONENTES

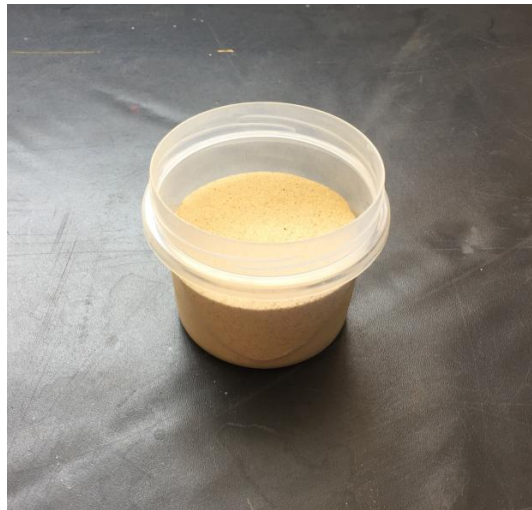
A seguir serão detalhados os materiais que serão utilizados no plano experimental, sendo eles:

- a) Solo;
- b) Cimento;
- c) Água;
- d) Fibras de polipropileno;

### 4.2.1 Solo

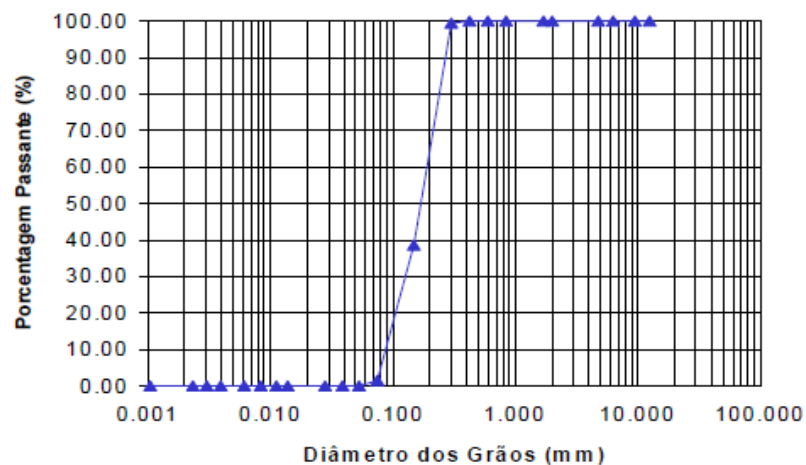
O solo empregado neste trabalho, indicado na figura 7, é conhecido como areia de Osório, um solo proveniente do município de Osório, no estado do Rio Grande do Sul. Esta areia caracteriza-se por ter uma granulometria fina e uniforme, ausente de impurezas ou matéria orgânica (VENSON, 2016). A curva granulométrica do solo, obtida por peneiramento conforme a NBR 7181/94, encontra-se na figura 8, e os índices físicos na tabela 1, características obtidas por Cruz (2008).

Figura 7 – Areia de Osório



(fonte: foto da autora)

Figura 8 – Curva granulométrica da areia de Osório



(fonte: Cruz, 2008)

Tabela 1 – Índices físicos da areia de Osório

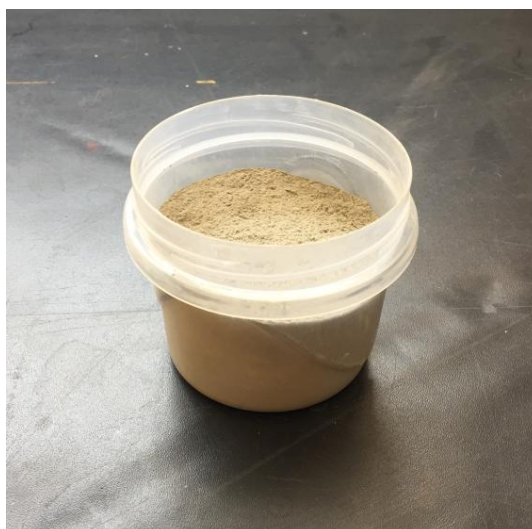
Índices Físicos	Areia de Osório
Massa específica real dos grãos	2,65 kN/m <sup>3</sup>
Coefficiente de uniformidade, C <sub>u</sub>	2,11
Coefficiente de curvatura, C <sub>c</sub>	1,15
Diâmetro médio, D <sub>10</sub>	0,09 mm
Diâmetro médio, D <sub>50</sub>	0,17 mm
Índice de vazios mínimo, e <sub>mín</sub>	0,6
Índice de vazios máximo, e <sub>máx</sub>	0,85

(fonte: Cruz, 2008)

### 4.2.2 Cimento

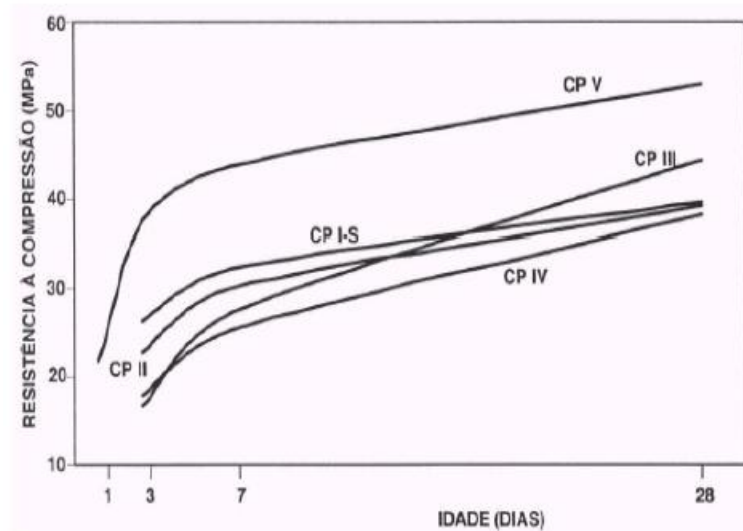
Para o presente trabalho, foi escolhido o cimento Portland CP-V (ARI), representado na figura 9. Este material foi escolhido devido ao acelerado ganho de resistência, atingindo aos 7 dias de idade cerca de 80% da resistência obtida aos 28 dias, conforme pode ser observado na figura 10.

Figura 9 – Cimento Portland CP-V



(fonte: foto da autora)

Figura 10 – Evolução da resistência à compressão dos diversos tipos de cimento



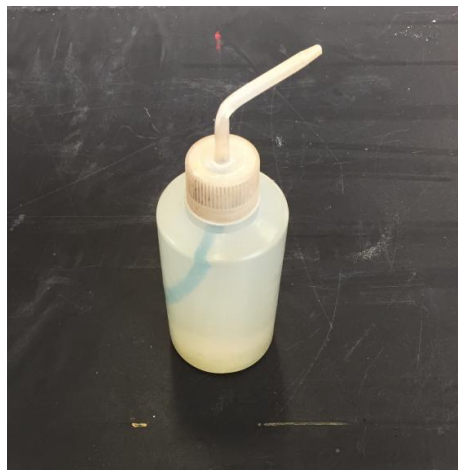
(fonte: ABCP, 2002)

O ensaio de massa específica do cimento, realizado por Foppa (2005), indicou o valor médio de  $3,15 \text{ g/cm}^3$ .

### 4.2.3 Água

A água fornecida para moldagem, representada na figura 11, foi destilada utilizando um equipamento destilador. A água destilada foi empregada para que não houvesse a presença de minerais que pudessem causar influência no corpo de prova.

Figura 11 - Água destilada



(fonte: foto da autora)



#### 4.2.4 Fibras de polipropileno

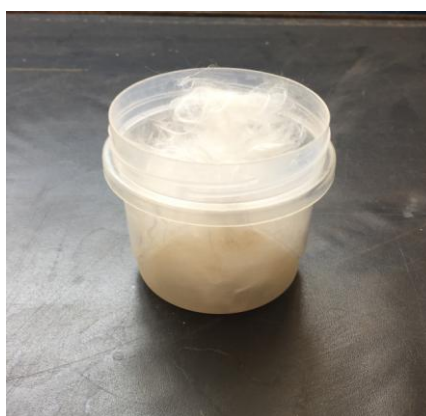
Para o presente trabalho, visando reforçar o solo, foram escolhidas fibras de polipropileno. Este tipo de fibra, disponibilizada pelo Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental (LEGG), tem sido estudada frequentemente nos últimos anos. Segundo Festugato (2008), as fibras de polipropileno apresentam características uniformes e bem definidas, são inertes quimicamente e estão disponíveis em grande quantidade no comércio.

As fibras de polipropileno são constituídas de um tipo de material que adquire uma consistência plástica com o aumento da temperatura, denominado termoplástico. Os polímeros termoplásticos são constituídos por séries de longas cadeias de moléculas polimerizadas, separadas entre si de forma que possam deslizar umas sobre as outras (Hollaway, 1994).

Essas fibras possuem uma grande flexibilidade e tenacidade em função de sua constituição; seu módulo de elasticidade gira em torno de 8 GPa (menor que qualquer outra fibra) e sua resistência à tração é de aproximadamente 400 MPa. Além disso, possuem elevada resistência ao ataque de várias substâncias químicas e aos álcalis (Taylor, 1994). Tais características conferem aos materiais a que estas fibras são incorporadas uma substancial resistência ao impacto (Festugato, 2008).

Foi escolhido para a moldagem das amostras fibras com comprimento de 27 mm, conforme figura 12.

Figura 12 – Fibra de polipropileno 27 mm



(fonte: foto da autora)

## 4.3 MÉTODOS

Os métodos utilizados para a determinação da resistência à tração são apresentados neste item.

### 4.3.1 Preparação das amostras

A mistura foi disposta em um molde prismático de dimensões 17 cm de comprimento, 4 cm de lado e 4 cm de altura, conforme a figura 13, com base na norma D1635/D1635M – 12 (ASTM).

A pesagem dos componentes da mistura foi realizada com precisão de 0,01 g. Após a pesagem dos materiais, foi iniciado o procedimento de moldagem.

A quantidade necessária de cimento da mistura foi calculada em relação à massa de solo seco. A quantidade de água foi obtida em relação à soma da massa de solo e cimento. Para as misturas com teor de fibra, foi obtido o teor de fibra a partir da soma da massa de solo e cimento.

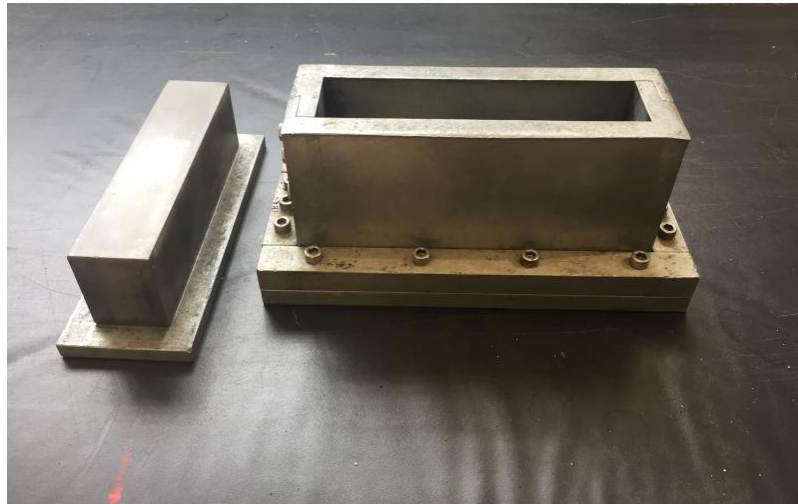
O procedimento foi iniciado com a mistura de areia e cimento, até a obtenção da homogeneidade. Após essa etapa, foi adicionada a água destilada. O processo de mistura foi feito manualmente, com o auxílio de uma espátula, até a obtenção de um material homogêneo. Após, para os corpos de prova com teor de fibra, as fibras foram adicionadas. A quantidade de material obtida na mistura foi suficiente para a elaboração do corpo de prova e de cápsulas para a medição do teor de umidade.

Ao final dessa etapa, três pequenas amostras da mistura foram pesadas e levadas à estufa a 100 graus Celsius pelo período de 24 horas. Depois desse período, as cápsulas foram pesadas novamente para a obtenção do peso do material seco. A média dos teores de umidades obtidos foi adotada como a umidade do corpo de prova.

Os corpos de prova foram moldados e compactados estaticamente em uma camada. Terminada a compactação, a amostra foi extraída do molde. Após essa etapa, foram registrados o peso, a medida do comprimento, a medida do lado e a medida da altura da amostra, com resolução de 0,01 g e 0,01 mm. Após, a amostra foi armazenada em saco plástico e vedada. Os corpos de prova foram armazenados pelo período de 7 dias em

temperatura controlada ( $23 \pm 2$  °C). No sexto dia, as amostras que foram submetidas ao ensaio de carregamento monotônico foram colocadas em imersão pelo período de 24 horas, visando a redução da sucção no corpo de prova.

Figura 13 – Molde prismático



(fonte: foto da autora)

### 4.3.2 Aceitação da amostra

Foram consideradas adequadas para ensaiar os corpos de prova que seguiam os seguintes critérios:

- a) massa específica aparente seca ( $\gamma_d$ ): grau de compactação de 99 a 101% do especificado;
- b) teor de umidade ( $\omega$ ):  $\pm 0,5\%$  da umidade especificada;
- c) comprimento:  $170 \pm 1$  mm;
- d) altura:  $40 \pm 1$  mm;
- e) lado:  $40 \pm 0,5$  mm.

As amostras que não atenderam ao padrão especificado foram descartadas e refeitas. De acordo com a NBR 12253 (ABNT, 1992), devem ser ensaiados no mínimo três corpos de

prova idênticos, sendo a resistência calculada a partir da média das resistências obtidas nos ensaios. Foram desconsiderados os valores de resistência que se afastaram 10% da média, para mais ou para menos. O valor de resistência adotado foi o da carga máxima atingida pelo corpo de prova. Pode-se observar na figura 14 as amostras sem e com inclusão de fibras.

Figura 14 – a) Corpo de prova de solo-cimento; b) Corpo de prova de solo-cimento-fibra



(fonte: foto da autora)

### 4.3.3 Determinação da resistência à tração na flexão

O procedimento de ensaio de tração na flexão é normatizado pela ASTM D1635 – Resistência à tração na flexão de solo-cimento. O aparato, segundo a norma, é esquematizado conforme a figura 15. Na figura 16 pode-se visualizar o aparato utilizado no ensaio. O ensaio de tração na flexão foi utilizado para a obtenção da resistência à tração dos corpos de prova ( $q_t$ ).

No presente trabalho serão apresentados ensaios para determinação da resistência à tração com carregamento monotônico.



#### 4.3.3.1 Carregamento monotônico

O ensaio de resistência à tração na flexão (RTF) consiste na aplicação de um carregamento estático sob deformação controlada, a uma taxa constante, nas vigotas (CASTAÑEDA, 2016). O carregamento monotônico permitirá o conhecimento dos níveis máximos de resistência à tração na flexão para as amostras.

Para a realização dos ensaios, será utilizada uma prensa automática com capacidade para 100 kN, com uma resolução de 0,005 kN. A velocidade de deformação da prensa será de 1,14 mm por minuto. A prensa pode ser visualizada na figura 17.

Figura 17 – Ensaio de tração na flexão com carregamento monotônico



(fonte: foto da autora)

## **5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através do programa experimental elaborado. Primeiramente são expostos os resultados referentes ao solo arenoso estabilizado com cimento e, posteriormente, o resultado obtido com a inclusão das fibras.

### **5.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DA MISTURA SOLO-CIMENTO**

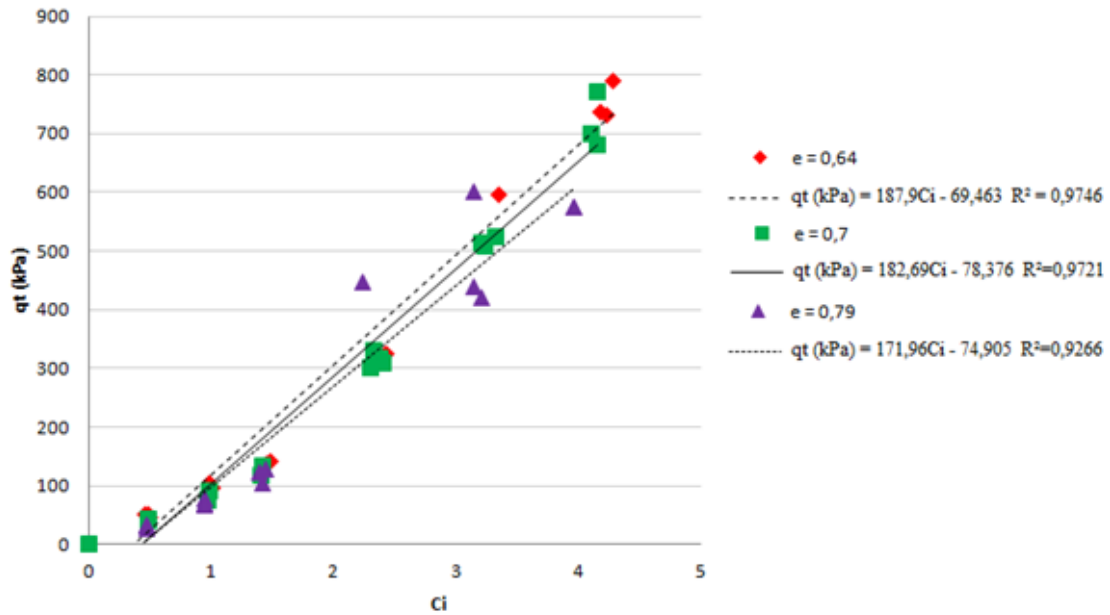
O ensaio de tração na flexão foi utilizado para a obtenção da resistência à tração das amostras. Os corpos de prova foram analisados a fim de verificar a influência da porosidade e do teor de cimento na resistência à tração das misturas. A relação porosidade/teor volumétrico de cimento também é apresentado neste item, assim como a comparação entre resultados obtidos para resistência à tração na compressão diametral e para resistência à tração na flexão.

#### **5.1.1 Efeito do cimento**

Na figura 18 podem ser observadas as curvas, cada uma expressando um índice de vazios, mostrando a resistência à tração ( $q_t$ ) em função da quantidade de cimento ( $C_i$ ). Cada curva representa amostras com o mesmo índice de vazios.

É possível observar que a quantidade de cimento influencia na resistência à tração das amostras. Verificou-se, também, que a resistência à tração variou linearmente com o aumento do teor de cimento.

Figura 18 - Variação da resistência à tração devido à variação do teor de cimento



(fonte: elaborado pela autora)

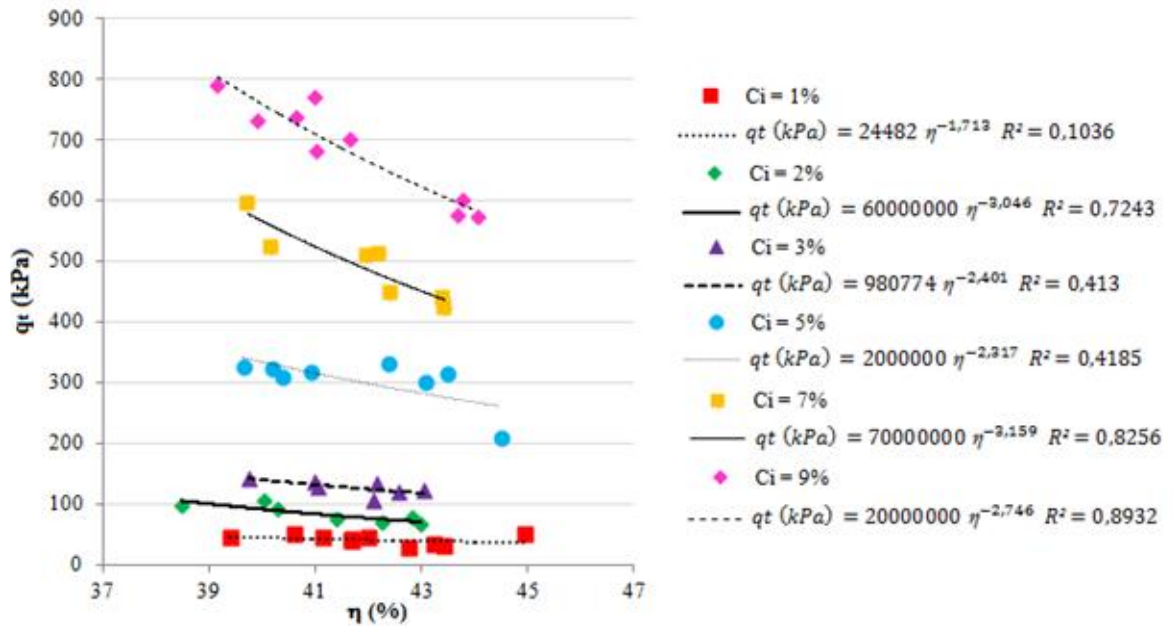
### 5.1.2 Efeito da porosidade

O efeito da porosidade pode ser verificado nas curvas representadas na figura 19. Cada curva do ajuste representa o mesmo teor de cimento.

Pode-se observar que a resistência à tração aumenta com a redução da porosidade de cada mistura. Também pode-se notar que para teores mais elevados de cimento a porosidade possui maior representatividade.



Figura 19 – Efeito da porosidade na resistência à tração

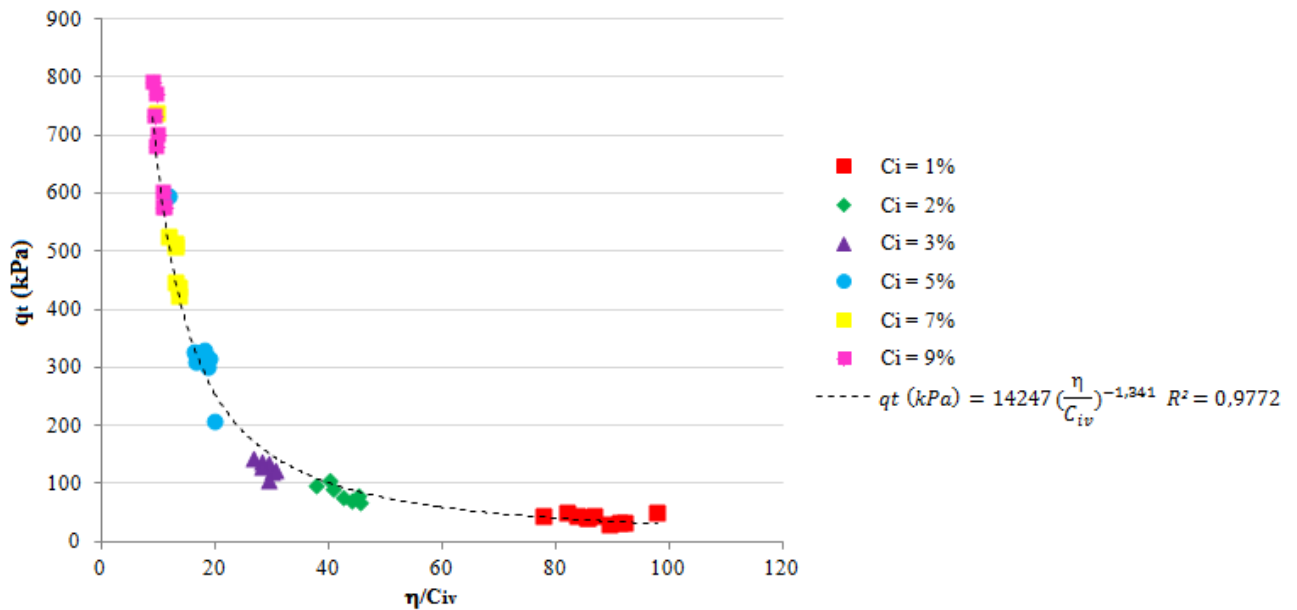


(fonte: elaborado pela autora)

### 5.1.3 Relação porosidade/teor volumétrico de cimento

Como pode ser visto, os parâmetros porosidade e teor de cimento contribuem para o aumento de resistência da amostra. Para a análise simultânea dos dois parâmetros, foi utilizada a metodologia proposta por Consoli et al. (2010) onde é analisada a resistência à tração ( $q_t$ ) em função da relação porosidade/teor de cimento ( $\eta/Civ$ ). Com a diminuição da relação  $\eta/Civ$  há acréscimo da resistência à tração nas misturas. A curva obtida pode ser verificada na figura 20.

Figura 20 – Variação da resistência à tração em função da relação porosidade/teor volumétrico de cimento

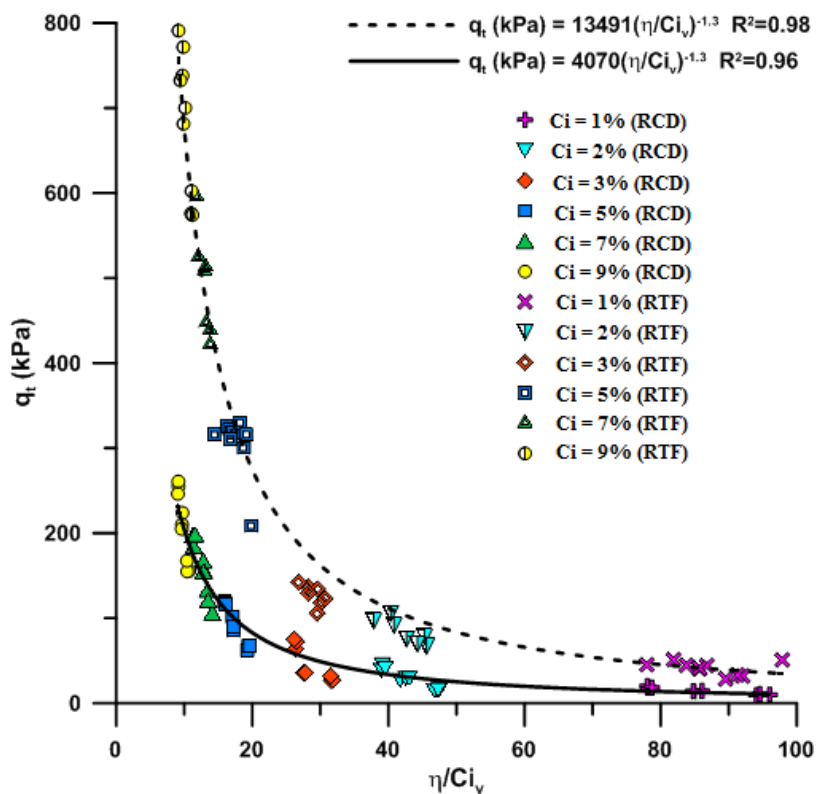


(fonte: elaborado pela autora)

#### 5.1.4 Relação entre resistência à tração na flexão e compressão diametral

Resultados de resistência à tração foram anteriormente estudados por Consoli et al. (2010), por meio de ensaios de compressão diametral. Na figura 21 podem ser observados os resultados obtidos por Consoli et al. juntamente com os resultados obtidos no presente trabalho. Pode-se observar que as curvas mostram a mesma tendência e que os resultados obtidos através dos ensaios de tração na flexão são superiores aos obtidos através do ensaio de compressão diametral.

Figura 21 - Ajuste da relação porosidade/teor volumétrico de cimento para ensaios RCD e RTF



(fonte: elaborado pela autora e adaptado de Consoli et al., 2010)

## 5.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DA MISTURA SOLO-CIMENTO-FIBRA

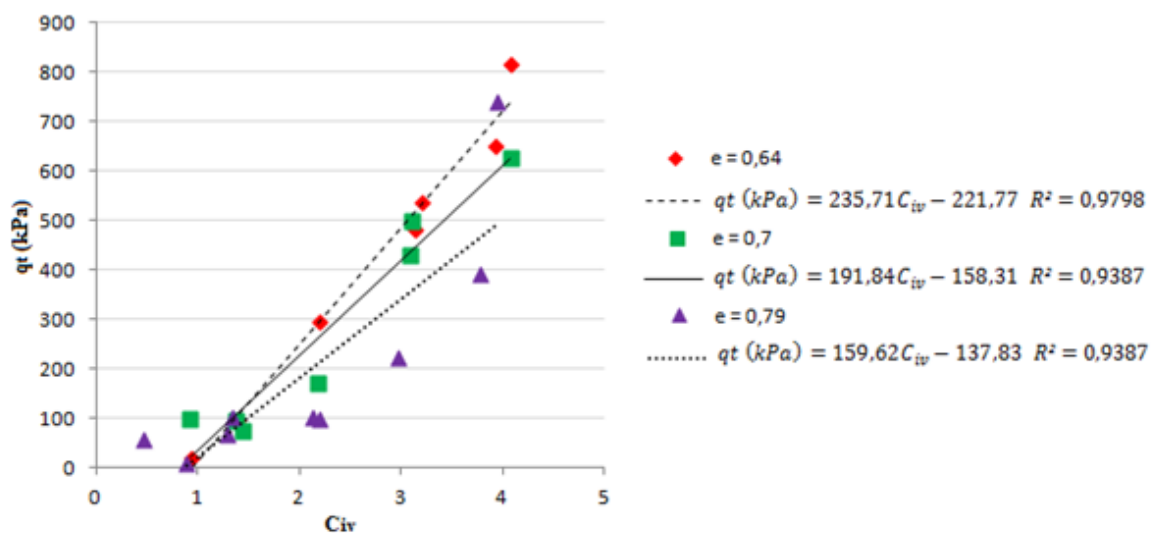
O ensaio de tração na flexão foi utilizado para a obtenção da resistência à tração das amostras. Os corpos de prova foram analisados a fim de verificar a influência da porosidade e do teor de cimento na resistência à tração das misturas. A relação porosidade/teor volumétrico de cimento também é apresentado neste item.

### 5.2.1 Efeito do cimento

Na figura 22 podem ser observadas as curvas, cada uma expressando um índice de vazios, mostrando a resistência à tração ( $q_t$ ) em função da quantidade de cimento ( $C_{iv}$ ). Cada curva representa amostras com o mesmo índice de vazios.

É possível observar que a quantidade de cimento influencia na resistência à tração das amostras e a resistência cresce linearmente com o aumento da quantidade de cimento.

Figura 22 –Variação da resistência à tração devido à variação do teor de cimento



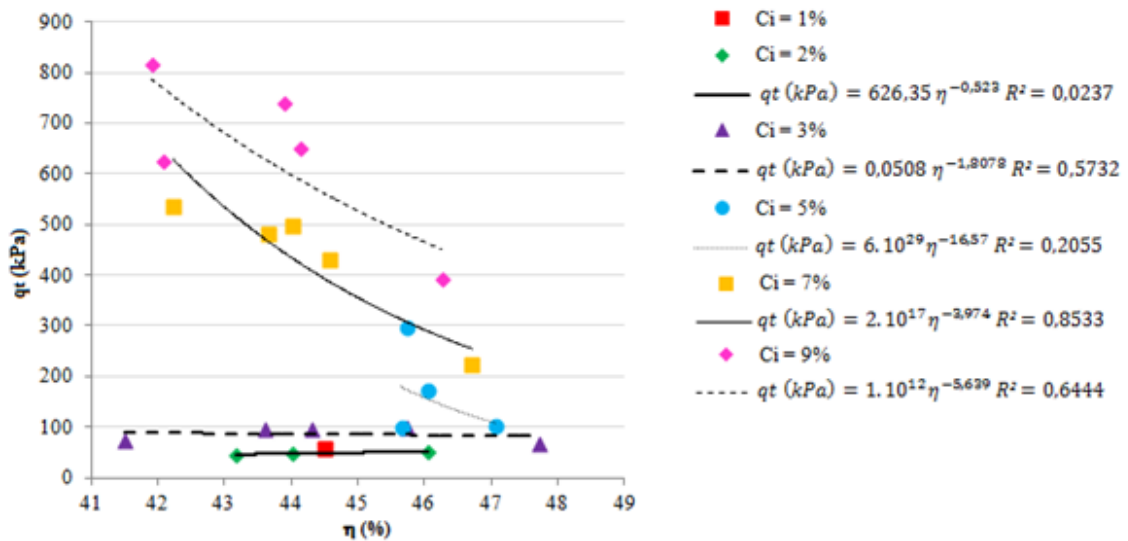
(fonte: elaborado pela autora)

### 5.2.2 Efeito da porosidade

O efeito da porosidade pode ser verificado nas curvas representadas na figura 23. Cada curva do ajuste representa o mesmo teor de cimento.

Pode-se observar que a resistência à tração aumenta com a redução da porosidade de cada mistura. Pode-se ver também que, para teores muito baixos de cimento, não são apresentados valores suficientes para a representação das curvas de tendência. Diversos corpos de prova com baixo teor de cimento apresentaram ruptura com o peso do aparato do ensaio e, por isso, não foram representados. Pode-se notar que para teores elevados de cimento a influência da porosidade é mais representativa.

Figura 23 - Efeito da porosidade na resistência à tração

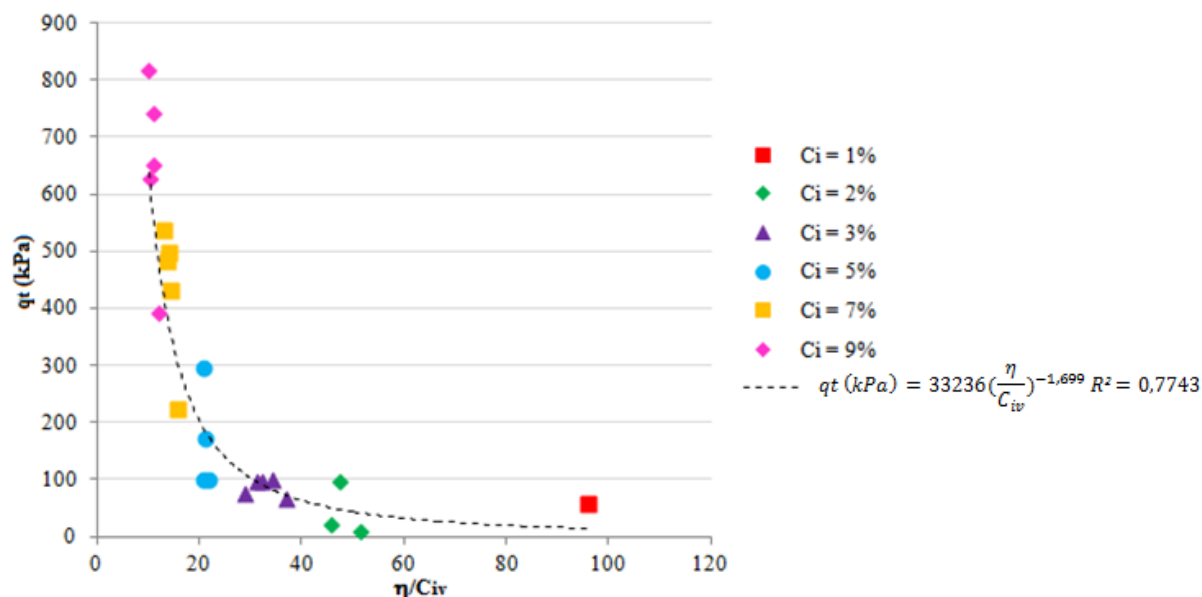


(fonte: elaborado pela autora)

### 5.2.3 Relação porosidade/teor de cimento

Como pode ser visto, os parâmetros porosidade e teor de cimento contribuem para o aumento de resistência da amostra. Para a análise simultânea dos dois parâmetros, foi utilizada a metodologia proposta por Consoli et al. (2010), utilizada anteriormente para a análise dos resultados de solo-cimento. Com a diminuição da relação  $\eta/Civ$  há acréscimo da resistência à tração nas misturas. A curva obtida pode ser verificada na figura 24.

Figura 24 - Variação da resistência à tração em função da relação porosidade/teor volumétrico de cimento



(fonte: elaborado pela autora)

### 5.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS COM E SEM INCLUSÃO DE FIBRAS

Neste item é descrita a alteração causada pela inclusão de fibras nas misturas solo-cimento. A análise se deu a partir da ruptura e da resistência à tração obtida nos ensaios de tração na flexão.

#### 5.3.1 Modo de ruptura

Segundo Montardo (1999), a inclusão de fibras de polipropileno no compósito de matriz cimentada altera significativamente o seu modo de ruptura. Com a inclusão das fibras o comportamento do material na ruptura, que era frágil, torna-se dúctil.

Pode-se observar no trabalho uma mudança significativa na ruptura. Nas misturas de solo-cimento, a ruptura se deu de forma catastrófica, conforme a figura 25.

Figura 25 - Modo de ruptura- Mistura Solo-Cimento



(fonte: foto da autora)

Nas misturas de solo-cimento-fibra, foi observado que ao aumentar a carga, o corpo de prova fissurou e deformou, porém não apresentou ruptura catastrófica. A amostra também não apresentou um padrão para a fissuração. A ruptura da amostra com inclusão de fibras pode ser observada na figura 26.

Figura 26 - Modo de ruptura - Mistura Solo-Cimento-Fibra



(fonte: foto da autora)

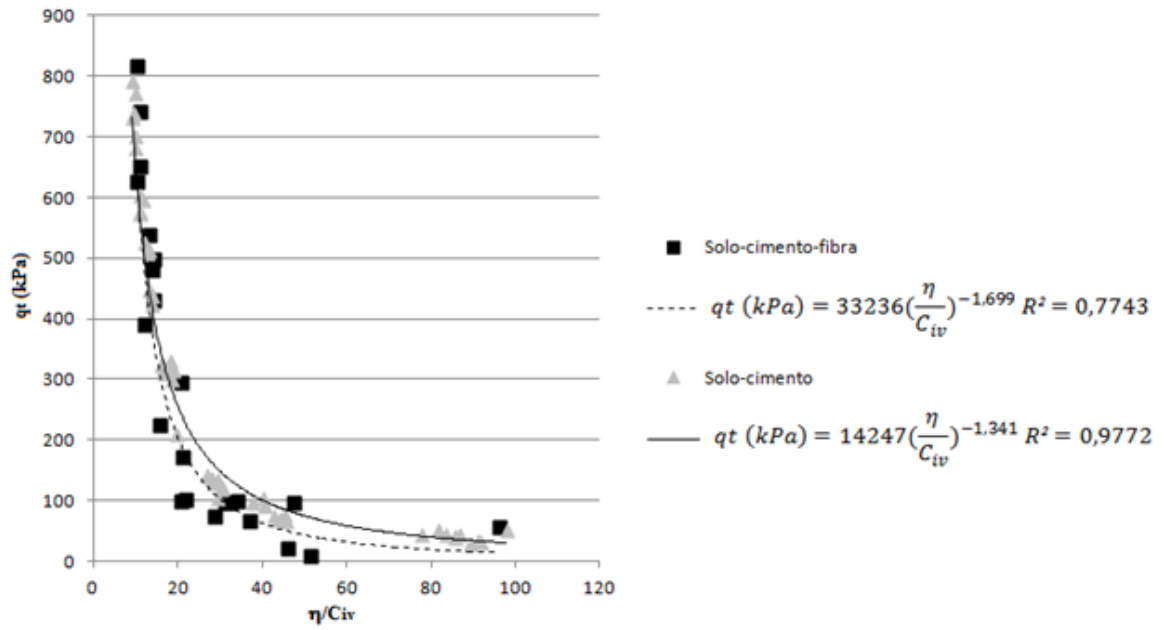
### **5.3.2 Avaliação da resistência à tração com e sem inclusão de fibras**

Conforme Hannant (1994), as fibras mantêm as interfaces das fissuras juntas, beneficiando as propriedades mecânicas no estado pós-fissuração, aumentando a ductilidade. O autor ainda diz que as fibras que cruzam as fissuras contribuem para o aumento da resistência, da deformação de ruptura e da tenacidade dos compósitos.

A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que as análises para as duas misturas se encontram muito próximas. As curvas representando a resistência à tração em função da porosidade/teor volumétrico de cimento, com e sem inclusão de fibras, podem ser observadas na figura 27.



Figura 27 - Resistência à tração em função da porosidade/teor de cimento



(fonte: elaborado pela autora)

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do programa experimental e da análise dos resultados, são apresentadas as conclusões do trabalho. Também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

### 6.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

A partir das análises realizadas no trabalho, a relação porosidade/teor volumétrico de cimento ( $\eta/C_{iv}$ ) mostrou-se adequada para a análise da resistência à tração na flexão de solo arenoso artificialmente cimentado e melhorado com fibras. Pode-se analisar que com o aumento da relação  $\eta/C_{iv}$  há diminuição da resistência à tração da mistura.

Pode-se observar que a adição de cimento no solo, mesmo em pequenas quantidades, apresenta melhoria na resistência à tração da mistura. Para as misturas analisadas, pode-se observar uma relação linear entre a resistência à tração e o teor de cimento.

O aumento da porosidade nas misturas provocou diminuição da resistência à tração. Observou-se também que em misturas com inclusão de fibras, foram apresentadas maiores dificuldades em relação à compactação e, por esse motivo, o controle da compactação não foi possível em todos os corpos de prova.

Em comparação com os resultados obtidos para a mistura de solo-cimento, a inclusão de fibras se mostrou benéfica em relação à deformabilidade do material, alterando o modo de ruptura do material, que teve comportamento dútil. Entretanto, a resistência à tração se mostrou próxima à obtida na mistura sem inclusão de fibras.

### 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões, para complementação do trabalho, são dadas a seguir:

- a) Comparação dos resultados obtidos no ensaio de tração na flexão para a mistura solo-cimento-fibra em relação à resultados obtidos através do ensaio de compressão diametral;
- b) Comparação do comportamento da mistura utilizando diferentes teores de fibras;
- c) Análise do comportamento do material solo-cimento e solo-cimento-fibra em ensaios cíclicos de tração na flexão, para avaliação da vida de fadiga das amostras;
- d) Realização de ensaios de tração na flexão com outros tipos de solo e agentes cimentantes.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12024:2012: Solocimento — Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2012. 6 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253:2012: Solocimento — Dosagem para emprego como camada de pavimento — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2012. 3 p.
- CASAGRANDE, M. D. T. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais**. 2001. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- 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.
- CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P.D.M.; ULBRICH, L.A. **The behavior of a fiber-reinforced cemented soil**. Ground Improvement, ISSMGE, v.3 n.3, p.21-30, 1999.
- 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, A. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal**. 2009. 198 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. P.23
- FESTUGATO, Lucas. **Análise do comportamento mecânico de um solo micro-reforçado com fibras de distintos índices aspecto**. 2008. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008
- FESTUGATO, Lucas. **Comportamento de hidratação e resposta cisalhante cíclica de resíduo de mineração cimentado reforçado com fibras**. 2011. 221 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011
- FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. 2005. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HANNANT, L. **Fiber-reinforced cements and concretes**. In: J. M. ILLSTON. Construction Materials; their nature and behavior. 2ed. London: J. M. Illston/E & FN Spon, 1994. p.359-403.

HANNANT, L. **Polymers and polymers composites**. In: J.M. ILLSTON. Construction materials: their nature and behavior. 2ed., London: J.M. Illston/E & FN Spon, p.359-403, 1994.

HOLLAWAY, L. **Polymers and polymer composites**. In: J. M. ILLSTON. Construction Materials; their nature and behavior. London: J. M. Illston/E & FN Spon, 2ed., 1994. p.321-358

INGLES, O. G.; METCALF, J. B.. **Soil Stabilization: Principles and Practice**. Sydney: Butterworths, 1972. 374 p.

MEDINA, J; MOTTA, L M G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Ufrj, 2005. 574 p.

MONTARDO, J.P. **Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes**. Porto Alegre, 1999. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

SPETCH, L. P. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação**. 2000. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

TAYLOR, G. D. **Materials in Construction**. London: Longman Scientific & Technical, 2ed, 1994. 284p.

USACE – U. S. Army Corps of Engineers. **Design and Construction Levees. Engineer Manual N° 1110-2-1913, Appendix G: Use of Soil cement for Levee Protection**. Washington D. C., 2000. P.146-162

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. 2003. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

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