

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

**Thaís Martins de Paula**

**MELHORAMENTO DE SOLOS: ADIÇÃO DE CIMENTO,  
MICROSSÍLICA E CINZA DE CASCA DE ARROZ  
EM UM SILTE ORGÂNICO**

Porto Alegre  
julho 2013

**THAÍS MARTINS DE PAULA**

**MELHORAMENTO DE SOLOS: ADIÇÃO DE CIMENTO,  
MICROSSÍLICA E CINZA DE CASCA DE ARROZ  
EM UM SILTE ORGÂNICO**

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: Nilo Cesar Consoli**

Porto Alegre

julho 2013

**THAÍS MARTINS DE PAULA**

**MELHORAMENTO DE SOLOS: ADIÇÃO DE CIMENTO,  
MICROSSÍLICA E CINZA DE CASCA DE ARROZ  
EM UM SILTE ORGÂNICO**

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, julho de 2013

Prof. Nilo Cesar Consoli  
Ph. D. Concordia University  
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Daniel Winter**  
Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**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, Júlio e Mônica, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

Não seria possível concluir este trabalho sem a ajuda e suporte de muitas pessoas, que de diversas maneiras me auxiliaram durante essa caminhada. Portanto, meus agradecimentos vão para as seguintes pessoas:

Ao Prof. Nilo Cesar Consoli, orientador deste trabalho, pela dedicação, pelo apoio e pelos ensinamentos transmitidos durante a realização desta pesquisa.

À Profa. Carin Schmitt, pelo auxílio na elaboração deste trabalho e também pela paciência e disponibilidade.

Aos colegas do LEGG, que foram de vital importância na elaboração deste trabalho, especialmente ao mestrando Daniel Winter, que sempre esteve disponível para solucionar dúvidas quanto ao trabalho e aos ensaios, além de ter ajudado imensamente na realização dos ensaios de laboratório, agradeço pela disponibilidade e dedicação. Ao bolsista Bernardo Consoli pela ajuda na realização dos ensaios.

À minha colega Marcele Bravo que trilhou esse caminho do trabalho de conclusão ao meu lado, dando apoio no desenvolvimento do trabalho, ajudando nos ensaios de laboratório, discutindo dúvidas e análises de resultados, agradeço pelo suporte e incentivo.

Ao Prof. Lucas Festugato e ao doutorando Sérgio Marques, que auxiliaram no esclarecimento de dúvidas e na análise de resultados, obrigada pela disponibilidade e atenção.

Agradeço à minha família e meus amigos que estiveram constantemente ao meu lado durante toda essa caminhada. Faço um agradecimento especial ao meu irmão, Henrique, pelo apoio durante a fase final deste trabalho.

A maior recompensa para o trabalho do homem não é  
o que ele ganha com isso, mas o que ele se torna com isso.

*John Ruskin*

## RESUMO

O melhoramento de solos tem sido foco de diversas pesquisas na área da Geotecnia, porém a utilização de tal técnica em solos orgânicos ainda é tópico pouco difundido no País. O melhoramento do solo é realizado através da adição de materiais aglomerantes, como cal ou cimento, e/ou materiais pozolânicos, como cinza de casca de arroz ou microssílica. A utilização de materiais pozolânicos tem sido muito pesquisada para a utilização em mistura de solos, principalmente pela sua eficiência no aumento de resistência de misturas, proporcionando a redução da quantidade de material aglomerante necessário, que normalmente tem um custo elevado. Este trabalho buscou avaliar os ganhos de resistência, através da realização de ensaios de tração por compressão diametral e cravação de ponta alargada, obtidos em misturas de um silte orgânico com cimento Portland e dois tipos de pozolana (microssílica e cinza de casca de arroz). Assim, pôde-se avaliar para quais combinações o ganho de resistência das misturas solo-pozolana-cimento foi suficiente para a realização de obras de Engenharia, variando-se a umidade (125, 150 e 175%), o tempo de cura (7, 14 e 28 dias) e o teor de material estabilizante (100 e 200 kg/m<sup>3</sup>). Secundariamente visou-se analisar a relação entre o ganho de resistência das pozolanas, a variação de resistência com a variação da relação  $n/C_{iv}$  da mistura, a possibilidade de se obter uma relação entre os ensaios realizados, e a influência do tempo de cura da mistura. Verificou-se que: ensaios de cravação e tração podem ser relacionados através de uma reta, a microssílica apresentou melhores resistências em relação a cinza de casca de arroz, houve um expressivo aumento na resistência do material ao longo do tempo de cura, mesmo utilizando-se cimento de alta resistência inicial, devido aos ácidos húmicos presentes em solos orgânicos. Observou-se que a resistência à tração aumenta com a redução da relação  $n/(C_{iv}^{0,20})$ . Os ajustes destas equações se diferenciaram em relação ao tempo de cura apenas por um escalar. Foram obtidos valores acima de 50 kN/m<sup>2</sup> em todas as combinações com maior teor de material estabilizante (200 kg/m<sup>3</sup>) para todos os tempos de cura e umidades estudados, as combinações com o menor teor de estabilizante (100 kg/m<sup>3</sup>) que apresentavam somente cimento também para todos os tempos de cura e umidades estudados, e para as combinações com o menor teor de estabilizante (100 kg/m<sup>3</sup>) com cimento e microssílica para umidades de 125 e 175% e tempo de cura de 28 dias.

Palavras-chave: Melhoramento de Solo Orgânico. Misturas Solo Orgânico-Pozolana-Cimento. Ensaio de Tração por Compressão Diametral. Ensaio de Cravação de Base Alargada.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa.....	19
Figura 2 – Estabilização em colunas .....	26
Figura 3 – Estabilização em massa .....	26
Figura 4 – Combinação entre as técnicas de estabilização em colunas e em massa .....	27
Figura 5 – Miscrossílica .....	30
Figura 6 – Processo de produção da microssílica .....	32
Figura 7 – Cinza de casca de arroz .....	33
Figura 8 – Disposição do corpo de prova .....	35
Figura 9 – Ruptura do corpo de prova submetido à compressão diametral.....	35
Figura 10 – Relação entre a resistência a tração por compressão diametral e resistência a compressão simples .....	36
Figura 11 – Teor de cimento <i>versus</i> resistência à compressão simples .....	38
Figura 12 – Teor de cimento <i>versus</i> resistência à tração por compressão diametral .....	38
Figura 13 – Dimensão da microssílica comparada a outros materiais .....	39
Figura 14 – Dimensão da cinza de casca de arroz .....	40
Figura 15 – Volume de vazios/cimento <i>versus</i> resistência à compressão simples .....	42
Figura 16 – Volume de vazios/cimento <i>versus</i> resistência à compressão simples ajustada .....	43
Figura 17 – Volume de vazios/cimento expresso em função da porosidade e do teor volumétrico de cimento <i>versus</i> resistência à compressão simples ajustada.....	43
Figura 18 – Volume de vazios/cimento expresso em função da porosidade e do teor volumétrico de cimento <i>versus</i> resistência à tração por compressão diametral .	44
Figura 19 – Porosidade <i>versus</i> resistência à compressão simples .....	45
Figura 20 – Porosidade <i>versus</i> resistência à compressão simples .....	45
Figura 21 – Porosidade <i>versus</i> resistência à tração por compressão diametral .....	46
Figura 22 – Tempo de cura <i>versus</i> resistência à compressão simples pela relação vazios/cimento .....	47
Figura 23 – Granulometria do solo .....	50
Figura 24 – Granulometria do microssílica .....	51
Figura 25 – Granulometria da cinza de casca de arroz .....	52
Figura 26 – Corpo de prova desmoldado .....	53
Figura 27 – Mistura moldada em recipiente para o ensaio de cravação de base alargada	54
Figura 28 – Prensa hidráulica e anel dinamométrico .....	55
Figura 29 – Ruptura do corpo de prova .....	56



Figura 30 – Anéis de <i>nylon</i> .....	57
Figura 31 – Ponteiras com pontas chatas .....	57
Figura 32 – Equipamento completo .....	58
Figura 33 – Leitura do anel <i>versus</i> força de cravação .....	59
Figura 34 – Resistência à tração por compressão diametral <i>versus</i> tempo de cura para uma umidade de 125% .....	60
Figura 35 – Resistência à tração por compressão diametral <i>versus</i> tempo de cura para uma umidade de 150% .....	61
Figura 36 – Resistência à tração por compressão diametral <i>versus</i> tempo de cura para uma umidade de 175% .....	61
Figura 37 – Resistência à cravação de base alargada <i>versus</i> tempo de cura para uma umidade de 125% .....	63
Figura 38 – Resistência à cravação de base alargada <i>versus</i> tempo de cura para uma umidade de 150% .....	64
Figura 39 – Resistência à cravação de base alargada <i>versus</i> tempo de cura para uma umidade de 175% .....	64
Figura 40 – Relação entre os ensaios de tração por compressão diametral e cravação de base alargada .....	66
Figura 41 – Variação da resistência à tração por compressão diametral ( $q_t$ ) e a porosidade e o teor volumétrico de cimento ajustado ( $\eta/c_{iv}^{0,20}$ ) para as misturas com cimento .....	67
Figura 42 – Variação da resistência à tração por compressão diametral ( $q_t$ ) e a porosidade e o teor volumétrico de cimento ajustado ( $\eta/c_{iv}^{0,20}$ ) para as misturas com cimento e cinza de casca de arroz .....	67
Figura 43 – Variação da resistência à tração por compressão diametral ( $q_t$ ) e a porosidade e o teor volumétrico de cimento ajustado ( $\eta/c_{iv}^{0,20}$ ) para as misturas com cimento e microssílica .....	68
Figura 44 – Variação da resistência à cravação de base alargada ( $q_b$ ) e a porosidade e o teor volumétrico de cimento ajustado ( $\eta/c_{iv}^{0,20}$ ) para as misturas com cimento. ....	69
Figura 45 – Variação da resistência à cravação de base alargada ( $q_b$ ) e a porosidade e o teor volumétrico de cimento ajustado ( $\eta/c_{iv}^{0,20}$ ) para as misturas com cimento e cinza de casca de arroz .....	69
Figura 46 – Variação da resistência à cravação de base alargada ( $q_b$ ) e a porosidade e o teor volumétrico de cimento ajustado ( $\eta/c_{iv}^{0,20}$ ) para as misturas com cimento e microssílica.....	70
Figura 47 – Resistência à tração ( $q_t$ ) com a relação $\eta/(C_{iv})^{0,2}$ <i>versus</i> o tempo de cura.....	71
Figura 48 – Resistência à cravação ( $q_t$ ) com a relação $\eta/(C_{iv})^{0,2}$ <i>versus</i> o tempo de cura..	71
Figura 49 – Comparação do ganho de resistência entre pozolanas para 7 dias de cura ...	73
Figura 50 – Comparação do ganho de resistência entre pozolanas para 14 dias de cura .	73
Figura 51 – Comparação do ganho de resistência entre pozolanas para 28 dias de cura .	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixa de validade para a utilização da metodologia .....	24
Tabela 2 – Classificação do solo orgânico quanto ao teor de matéria orgânica .....	29
Tabela 3 – Quantidade de sílica produzida por diferentes tipos de ligantes .....	31
Tabela 4 – Combinações analisadas .....	49
Tabela 5 – Força aplicada em no ensaio de cravação de base alargada .....	59

## **LISTA DE SIGLAS**

ACI – *American Concrete Institute*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CCA – Cinza de Casca de Arroz

CP – Cimento Portland

HC – Hidróxido de cálcio

IP – Índice de Plasticidade

ISO – *International Organization for Standardization*

Lacer – Laboratório de Materiais Cerâmicos

LEGG – Laboratório de Ensaios Geotécnicos e Geoambientais

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

MS – Microssílica

NBR – Norma Brasileira

PVC – Policloreto de Vinila

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

F – fator de parâmetros

$q_u^*$  – tensão de ruptura (kPa)

H – espessura (m)

D – diâmetro (m)

$c'$  – coesão (kPa)

$p_a$  – pressão (MPa)

$\Phi'$  – ângulo de atrito interno ( $^\circ$ )

E – módulo de elasticidade (MPa)

$q_u$  – resistência à compressão simples (kPa)

$\sigma_{\text{tração}}$  – resistência à tração por compressão diametral (MPa)

P – carga máxima obtida no ensaio (kN)

L – altura do corpo de prova (mm)

$q_t$  – resistência à tração por compressão diametral (kPa)

$V_v$  – volume de vazios

$V_{ci}$  – volume de cimento

$\Pi$  – porosidade (%)

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

$\eta/C_{iv}$  – relação vazios/cimento

t – tempo de cura (dias)

$q_b$  – resistência à cravação de ponta alargada (kPa)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA .....</b>	<b>16</b>
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	16
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	16
<b>2.2.1 Objetivo Principal .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.2 Objetivos Secundários .....</b>	<b>16</b>
2.3 PRESSUPOSTO .....	17
2.4 DELIMITAÇÕES .....	17
2.5 LIMITAÇÕES .....	17
2.6 HIPÓTESE .....	18
2.7 DELINEAMENTO .....	18
<b>3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS .....</b>	<b>21</b>
3.1 VISÃO GERAL .....	21
3.2 MISTURAS SOLO ORGÂNICO-POZOLANA-CIMENTO .....	28
<b>3.2.1 Solo .....</b>	<b>28</b>
<b>3.2.2 Pozolana .....</b>	<b>29</b>
3.2.2.1 Microsílica .....	30
3.2.2.2 Cinza de casca de arroz .....	32
<b>3.2.3 Cimento .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2.4 Água .....</b>	<b>34</b>
3.3 ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	34
<b>3.3.1 Características gerais do ensaio .....</b>	<b>34</b>
<b>3.3.2 Relação entre o ensaio de tração por compressão diametral e o ensaio de compressão simples .....</b>	<b>36</b>
3.4 CARACTERÍSTICAS COMPORTAMENTAIS DE MISTURAS SOLO ORGÂNICO-POZOLANA-CIMENTO.....	36
<b>3.4.1 Efeito do cimento .....</b>	<b>37</b>
<b>3.4.2 Efeito da pozolana .....</b>	<b>39</b>
3.4.2.1 Redução de vazios na estrutura .....	39
3.4.2.2 Reações com o cimento .....	40
<b>3.4.3 Efeito da relação vazios/cimento .....</b>	<b>41</b>
<b>3.4.4 Efeito da porosidade .....</b>	<b>44</b>
<b>3.4.5 Efeito do tempo de cura .....</b>	<b>46</b>

<b>4 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>48</b>
4.1 MATERIAIS .....	48
<b>4.1.1 Solo .....</b>	<b>49</b>
<b>4.1.2 Cimento .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1.3 Microssílica .....</b>	<b>51</b>
<b>4.1.4 Cinza de casca de arroz .....</b>	<b>51</b>
4.2 MÉTODOS .....	52
<b>4.2.1 Preparação das misturas e moldagem dos corpos de prova .....</b>	<b>52</b>
<b>4.2.2 Ensaio de tração por compressão diametral .....</b>	<b>55</b>
<b>4.2.3 Ensaio de cravação de base alargada .....</b>	<b>56</b>
4.2.3.1 O ensaio .....	56
4.2.3.2 Equipamentos .....	56
4.2.3.3 Princípio de funcionamento do equipamento .....	58
<b>5 ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>60</b>
5.1 GANHO DE RESISTÊNCIA DA MISTURA NO ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	60
5.2 GANHO DE RESISTÊNCIA DA MISTURA NO ENSAIO DE CRAVAÇÃO DE BASE ALARGADA .....	63
5.3 RELAÇÃO ENTRE O ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL E O ENSAIO DE CRAVAÇÃO DE BASE ALARGADA .....	65
5.4 EFEITO DA RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO .....	66
5.5 COMPARAÇÃO DO GANHO DE RESISTÊNCIA ENTRE POZOLANAS.....	72
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>75</b>
6.1 CONCLUSÕES .....	75
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	76
REFERÊNCIAS .....	77



## 1 INTRODUÇÃO

O material mais utilizado na Engenharia Geotécnica é o solo e este apresenta características muito complexas e variáveis (DALLA ROSA, 2009). Com a grande expansão na última década da construção civil, cada vez mais os empreendimentos devem ser alocados em áreas que possuem um solo com baixa capacidade de suporte.

Algumas soluções vêm sendo adotadas para minimizar esses problemas, entre elas, está a realização de fundações profundas até uma camada competente, ou a substituição do material de baixa qualidade por um de boa qualidade. A primeira solução apresenta um alto custo, já a segunda, depende de jazidas e bota-foras próximos ao local da obra, o que pode representar, além de um alto custo, um grande problema ambiental. Uma terceira solução é o melhoramento deste solo com a adição de materiais estabilizantes, sendo eles, ativadores, como cal ou cimento, e pozolanas, como cinza de casca de arroz ou microssílica. Esse método ainda não é muito utilizado no País, principalmente pela falta de conhecimento na área e domínio da prática por parte das empresas nacionais, porém, esta solução tem apresentado ótimos resultados em diversas obras no exterior.

O solo orgânico é o foco deste trabalho, já que ele se apresenta como um problema cada vez mais recorrente e complexo para a realização de obras de Engenharia. Este tipo de solo tem uma elevada percentagem de matéria orgânica e elevada umidade natural, o que implica no comprometimento da capacidade de suporte do mesmo e na dificuldade de ser estabilizado.

Apesar do o cimento Portland de alta resistência inicial não ter sido muito estudado no melhoramento de solos orgânicos no Brasil, o seu uso em misturas com cinza volante em solo orgânico teve, segundo Oliveira et al. (2013, p. 819, tradução nossa), “[...] uma significativa repercussão nas características de compressão do material estabilizado.”.

Com a necessidade crescente de se encontrar formas de se reutilizar resíduos industriais, a fim de mitigar o impacto ambiental causado pelos mesmos, a utilização de materiais pozolânicos, que seriam descartados pelas indústrias, é um ponto motivador para a realização da pesquisa. Outro ponto seria a utilização desse material para reduzir a quantidade de aglomerante, neste caso sendo cimento, nas misturas de solos para promover o seu melhoramento.



A adição de pozolana é bastante estudada no melhoramento de misturas de concreto, porém, ainda não existem muitos estudos utilizando este material em misturas de solos orgânicos. Os materiais pozolânicos apresentam um diâmetro médio dos grãos muito pequeno, assim, conseguem preencher grande parte dos vazios da mistura ajudando no ganho de resistência da mistura. Outro fator que colabora para este aumento da resistência é a elevada quantidade de sílica amorfa presente no material.

Assim, a relevância deste estudo se deve à crescente necessidade de se realizar obras civis em áreas com solos orgânicos e à falta de pesquisas sobre o comportamento deste solo com a utilização de misturas estabilizantes. Com este trabalho pretende-se, através de ensaios de laboratório, considerando diferentes proporções solo-pozolana-cimento, verificar e analisar a eficiência da mistura na estabilização de solos orgânicos.

Este trabalho está dividido em seis capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução aos assuntos abordados nesta pesquisa. No segundo capítulo, são apresentadas as diretrizes da pesquisa. Já, no terceiro, é feita uma revisão bibliográfica, a fim de situar a pesquisa no cenário atual. O quarto capítulo é detalhado o programa experimental, no qual são apresentados os métodos e materiais utilizados. No capítulo 5, é realizada a análise dos resultados obtidos nos ensaios de laboratório. Por fim, no sexto capítulo, são expostas as conclusões desta pesquisa.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes adotadas para o desenvolvimento deste trabalho estão descritas nos itens a seguir.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa do trabalho é: em uma mistura solo orgânico-pozolana-cimento, considerando-se os tempos de cura e as porosidades analisadas no estudo, para quais proporções dos materiais se obtém um aumento na capacidade de suporte que possibilite a utilização da mistura como uma camada resistente na realização de obras de Engenharia?

### **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 determinação das proporções dos materiais da mistura solo orgânico-pozolana-cimento que, considerando-se os tempos de cura e as porosidades definidas para o estudo, proporcionam um aumento da resistência da mistura, a fim de se obter as características adequadas para a realização de uma camada melhorada para suporte de diversas obras de Engenharia.

#### **2.2.2 Objetivos secundários**

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) análise e comparação do comportamento das duas pozolanas estudadas em misturas com o solo orgânico e aglomerante;
- b) análise da influência do tempo de cura no aumento da resistência das misturas;

- c) análise da relação entre os ensaios de tração por compressão diametral e ensaio de cravação de base alargada;
- d) análise da relação entre o aumento da resistência e a relação porosidade/teor volumétrico de cimento das misturas estudadas.

## 2.3 PRESSUPOSTO

É pressuposto do trabalho que uma resistência à tração por compressão diametral de 50 kN/m<sup>2</sup> é a mínima considerada apropriada para suporte de obras de Engenharia.

## 2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a ensaios de resistência à tração por compressão diametral e cravação de base alargada de corpos de prova com diferentes proporções de solo orgânico, pozolana, cimento e água.

## 2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) as dimensões dos corpos de prova cilíndricos são de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura e as dimensões dos recipientes são 14 x 14 x 6,5 cm;
- b) a prensa utilizada tem capacidade de 100 kN e anéis dinamométricos calibrados com capacidade de 10 kN para o ensaio de tração por compressão diametral, e 0,6 kN para o ensaio de cravação de base alargada;
- c) os corpos de prova foram moldados em laboratório, ou seja, em condições ideais;
- d) os ensaios de tração por compressão diametral seguem o procedimento da NBR 7222 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994);
- e) as pozolanas utilizadas no estudo foram a microssílica (MS) e a cinza de casca de arroz (CCA);
- f) os teores de material estabilizante (pozolana mais cimento (CP)) utilizados nas amostras: 100 e 200 kg/m<sup>3</sup>;
- g) foram moldados corpos de prova com: 100% do teor de material estabilizante sendo cimento e corpos de prova com 50% de cimento e 50% de pozolana;
- h) os tempos de cura avaliados foram 7, 14 e 28 dias;
- i) os teores de umidade utilizados nesta pesquisa foram 125, 150 e 175%.

## 2.6 HIPÓTESE

Esse trabalho tem como hipótese a obtenção de valores de resistência à tração por compressão diametral, compatíveis com valores utilizados em obras de Engenharia, nas misturas sem presença de pozolana, e nas misturas com presença da pozolana, mas com o maior teor de aglomerante (200 kg/m<sup>3</sup>).

## 2.7 DELINEAMENTO

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

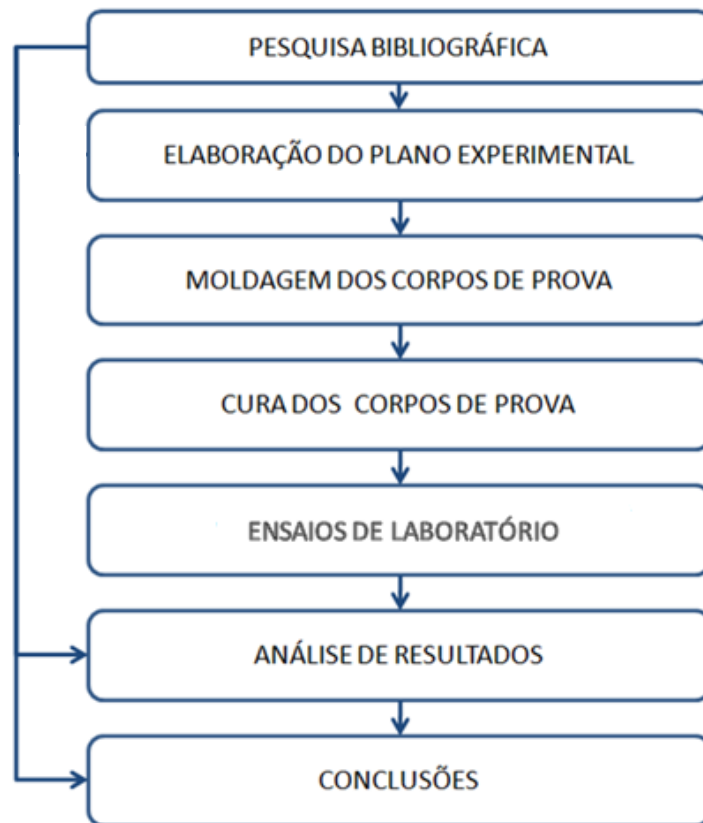
- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definição do plano experimental;
- c) moldagem dos corpos de prova;
- d) cura dos corpos de prova;
- e) ensaios de laboratório;
- f) análise dos resultados;
- g) conclusões.

Durante todo o trabalho, foi realizada uma **pesquisa bibliográfica**, através da leitura de diversos artigos científicos e trabalhos acadêmicos, a fim de embasar conceitos discutidos no trabalho. Também nessa etapa, foi possível caracterizar os materiais e como eles interagem entre si. A pesquisa bibliográfica é de extrema importância para a avaliação da possível aplicação do método de melhoramento de solos e da viabilidade do seu emprego no dia a dia da Engenharia Geotécnica.

Houve a necessidade de se elaborar um **plano experimental** para guiar a realização dos ensaios de laboratório. Nessa etapa foram definidas as seguintes variáveis de estudo:

- a) os teores de pozolanas e cimento;
- b) o teor de umidade da mistura;
- c) o tempo de cura das amostras.

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa



(fonte: elaborado pela autora)

Também foram estudados os recursos e o tempo necessário para a realização dos ensaios laboratoriais do projeto, bem como a quantidade de corpos de prova necessários para que fosse possível analisar satisfatoriamente todos os parâmetros estipulados. Com esses fatores definidos, foi possível dar início a **moldagem dos corpos de prova**. Durante a moldagem, e durante todo o tempo estipulado de cura, foi tomada especial atenção com as **condições de cura**, para que os fatores climáticos e eventuais imprevistos não influenciassem nos resultados. Após o término do tempo de cura, as amostras foram submetidas a **ensaios de tração por compressão diametral e ensaios de cravação de ponta alargada**. Com os resultados observados nos ensaios, foi possível realizar a **análise de resultados**. Estes foram apresentados em forma de gráficos, visando relacionar o aumento da resistência das amostras com a variação dos teores dos materiais, do tempo de cura, e da relação de volume vazios pelo teor volumétrico de cimento utilizado.

Com todo este material em mãos, foi iniciada a fase de **conclusão** da pesquisa, quando foi possível definir qual a porcentagem adequada de cada material para atingir determinado valor

de resistência da mistura. Assim, foi disponibilizada uma gama de possibilidades para se realizar uma obra de Engenharia, através da técnica de melhoramento de solo, levando em conta as necessidades do projeto em questão.

### 3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLO

Neste capítulo são vistos tópicos pertinentes à contextualização e compreensão dos pontos estudados na pesquisa. Primeiramente, apresenta-se uma visão geral sobre as técnicas de estabilização de solos. Em seguida, são apresentados os materiais utilizados na mistura solo orgânico-pozolana-cimento. Enfim, estão expostas as características comportamentais da mistura.

#### 3.1 VISÃO GERAL

Com a grande demanda por novos empreendimentos, o melhoramento de solos torna-se uma opção cada vez mais atrativa, pois proporciona a chance de trabalhar com o solo existente no local, evitando problemas ambientais. A técnica também possibilita obter resultados em um tempo aceitável pelo mercado. A questão do tempo é um fator muito decisivo na escolha da técnica e dos materiais a serem adotados, já que, com o mercado atual extremamente competitivo, investidores não podem arcar com os custos de uma obra muito longa.

Segundo Dalla Rosa (2009, p. 23-25), em muitos casos na Engenharia, é comum deparar-se com situações nas quais o solo disponível para realização de uma obra não é o ideal. Normalmente, quando se tem um solo argiloso mole ou muito orgânico, que apresenta uma resistência baixa, as soluções adotadas pelos engenheiros são muito caras, o que, dependendo do porte do empreendimento, acaba inviabilizando-o. Por isso, um dos grandes desafios da Engenharia Geotécnica atual é encontrar formas mais econômicas de resolver os problemas de estabilização de solos em obras de fundações superficiais, pavimentação e barragens.

A área da Engenharia em que o melhoramento de solos tem um maior destaque é a de infraestrutura de transportes. Segundo Oliveira et al. (2013, p. 810, tradução nossa), o desenvolvimento de empreendimentos como rodovias, ferrovias, portos e aeroportos em grandes cidades ao redor do mundo trouxe a necessidade da construção de aterros em solos moles, que possuem características geotécnicas pobres, ou seja, baixa resistência ao cisalhamento e alta compressibilidade.

Oliveira et al. (2013, p 810, tradução nossa) também afirmam 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 funcionabilidade de tal estrutura.

Quanto à realização de fundações para edificações, vários países têm se deparando com a necessidade de desenvolver projetos, tanto industriais quanto residenciais, em áreas com solos de baixa resistência e altos índices de vazios. O grande problema nessas situações é que, quando as ligações entre as partículas do solo são quebradas, esse solo sofre uma grande redução em seu volume. Normalmente, adotada-se para esse tipo de projeto como solução a realização de fundações profundas. Contudo, em várias situações, como por exemplo, na construção de conjuntos habitacionais, a execução desse tipo de fundações pode não ser uma solução viável tendo em vista o seu custo. Nesses casos, o preço das fundações passa a ter um peso muito significativo no orçamento total da obra, podendo ser alto demais para ser suportado pelo empreendimento (THOMÉ et al., 2005, p. 1569, tradução nossa).

Em seu trabalho, Thomé et al. (2005, p. 1582-1583, tradução nossa) analisaram, através de simulações numéricas (utilizando o Método dos Elementos Finitos) e medições realizadas em campo, o comportamento de um sistema composto por uma sapata circular sobre duas camadas de solo, através do ensaio de carregamento de placas. A camada superior é composta por um solo melhorado com a adição de um agente cimentante, e a camada inferior é composta por um solo residual de baixa resistência não tratado.

Thomé et al. (2005, p. 1582, tradução nossa) concluíram que, para carregamentos leves ou moderados, a utilização de uma camada melhorada, imediatamente abaixo da fundação rasa, é uma alternativa economicamente viável às fundações profundas. Também foi observado que, os parâmetros que influenciam no comportamento tensão-recalque relativo do sistema são:

- a) a coesão da camada superior (cimentada);
- b) a coesão, o módulo de elasticidade e o ângulo de atrito interno da camada inferior (não-cimentada).

A partir destas variáveis, foi possível elaborar uma equação que determina um fator de parâmetros (F) (equação 1). Este fator entra como uma variável nas equações concebidas para o cálculo da tensão de ruptura do material ( $q_u^*$ ) (equações 2, 3 e 4), que também dependem do



fator  $H/D$ , sendo  $H$  a espessura da camada e  $D$  o diâmetro da fundação, e da pressão atmosférica ( $p_a$ ). Isso torna possível que, para um determinado solo, através de um ensaio de carregamento de placa de pequeno diâmetro, possa ser estimada a tensão de ruptura para fundações com diâmetros maiores e diferentes espessuras de camada cimentada (THOMÉ et al., 2005, tradução nossa).

As equações citadas são:

— — — — — (equação 1)

Onde:

$F$  = fator de parâmetros;

$p_a$  = pressão atmosférica (MPa);

$c'_1$  = coesão da camada cimentada (kPa);

$c'_2$  = coesão da camada não-cimentada (kPa);

$\Phi'_2$  = ângulo de atrito interno da camada não-cimentada (°);

$E_2$  = módulo de elasticidade da camada não-cimentada (MPa).

— — — — — (equação 2)

Onde:

$H$  = espessura da camada cimentada (m);

$D$  = diâmetro da fundação (m);

$q_u^*$  = tensão de ruptura (kPa);

$p_a$  = pressão atmosférica (MPa);

$F$  = fator de parâmetros.

(equação 3)

Onde:

H = espessura da camada cimentada (m);

D = diâmetro da fundação (m);

 $q_u^*$  = tensão de ruptura (kPa); $p_a$  = pressão atmosférica (MPa);

F = fator de parâmetros.

(equação 4)

Onde:

H = espessura da camada cimentada (m);

D = diâmetro da fundação (m);

 $q_u^*$  = tensão de ruptura (kPa); $p_a$  = pressão atmosférica (MPa);

F = fator de parâmetros.

O trabalho de Thomé et al. (2005, p. 1578, tradução nossa) ressalta porém, que a metodologia proposta só é válida se os parâmetros do solo estiverem dentro de uma faixa estabelecida. Os valores admitidos encontram-se na tabela 1.

Tabela 1 – Faixa de validade para a utilização da metodologia

MATERIAL CIMENTADO	MATERIAL NÃO-CIMENTADO
$0,19 \leq c'_1/p_a \leq 4,44$	$0,01 \leq c'_2/p_a \leq 0,50$
$0,70 \leq tg\Phi'_1/p_a \leq 1,19$	$0,26 \leq tg\Phi'_2/p_a \leq 0,70$
$2961,0 \leq E_1/p_a \leq 14810,0$	$98,0 \leq E_2/p_a \leq 988,0$

(fonte: THOMÉ et al., 2005, p. 1578, tradução nossa)

Outro método que tem sido utilizado com sucesso na estabilização de solos para muitas finalidades é o da estabilização química *in situ* de solos (neste trabalho, chamada de estabilização profunda ou *deep mixing*). Este consiste essencialmente em estabilizar o solo natural, promovendo a mistura de agentes cimentantes e pozolânicos no material, melhorando assim as suas propriedades mecânicas.

Correia (2011, p. 1) afirma que, devido aos grandes desenvolvimentos na área da Engenharia Geotécnica durante os últimos 40 anos, o *deep mixing* tem-se mostrado uma técnica economicamente viável se comparada a outras técnicas de melhoramento de solo disponíveis no mercado. O autor também ressalta que essa técnica tem a vantagem de causar um menor impacto ao meio ambiente, pois, mantém o solo natural, além de muitas vezes utilizar materiais que são subprodutos da indústria.

Segundo Timoney et al. (2012, p. 3, tradução nossa), este método tem sido muito estudado pela comunidade europeia, já que, em vários países desse continente uma parte significativa de seu território é composto por turfas, solos altamente orgânicos, com uma grande quantidade de água. Hobbs<sup>1</sup> (1986 apud TIMONEY et al., 2012, p. 3, tradução nossa) aponta que, “Por exemplo, 17,2% da Irlanda e 33,5% da Finlândia são cobertos por turfas.”. O Building Research Establishment (2002, p. 9, tradução nossa) define que “Estabilização profunda é um método para estabilizar solos moles através da adição de misturas secas ou úmidas a fim de reduzir recalques e/ou para melhorar a estabilidade.”.

A estabilização profunda de um solo pode ser feita através duas maneiras. A primeira consiste na realização de colunas de solo estabilizado (estabilização em colunas), ilustrada na figura 2, que podem atingir profundidades de aproximadamente 25 metros. Já na segunda, realiza-se a estabilização de todo o volume de solo (estabilização em massa), ilustrada na figura 3. Esta pode atingir profundidades médias de 5 metros. Contudo, também pode se realizar uma combinação entre as duas técnicas (figura 4) (BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, 2002, p. 9, tradução nossa).

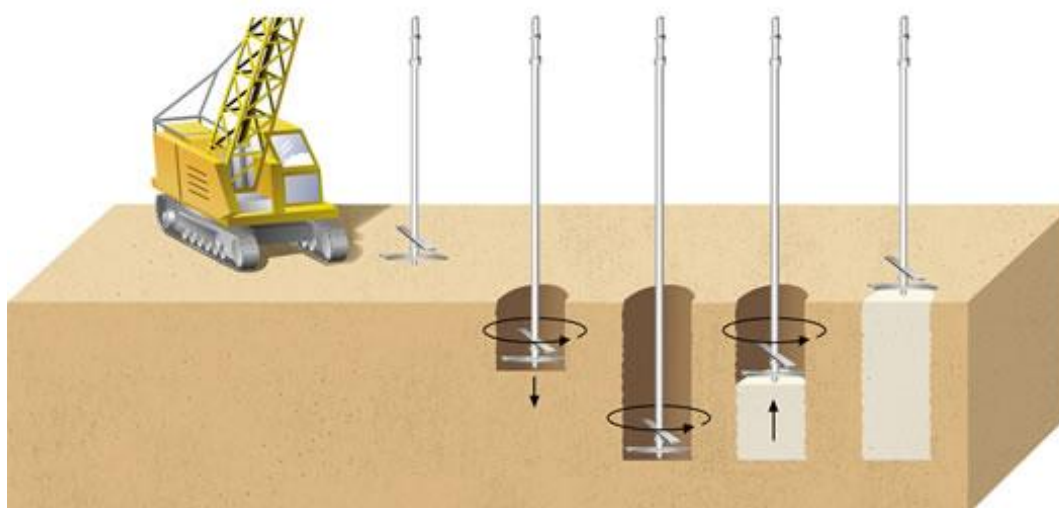
Em solos orgânicos a estabilização é mais complicada do que em solos inorgânicos. Solos com alto teor de matéria orgânica apresentam uma grande quantidade de ácidos húmicos. Estes ácidos podem interferir com as reações de hidratação necessárias para o

---

<sup>1</sup> HOBBS, N. B. Mire morphology and the properties and behaviour of some British and foreign peats. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, London, v. 19, n. 1, p. 7-80, Feb. 1986.

desenvolvimento do processo de aumento de resistência que segue a estabilização (AXELSSON et al.<sup>2</sup>, 2002 apud TIMONEY et al., 2012, p. 3, tradução nossa). Contudo, este método é considerado uma boa alternativa às técnicas de escavação e retirada de material como um processo de melhoramento de solo (TIMONEY et al., 2012, p. 3, tradução nossa).

Figura 2 – Estabilização em colunas



(fonte: CORREIA, 2011, p. 8)

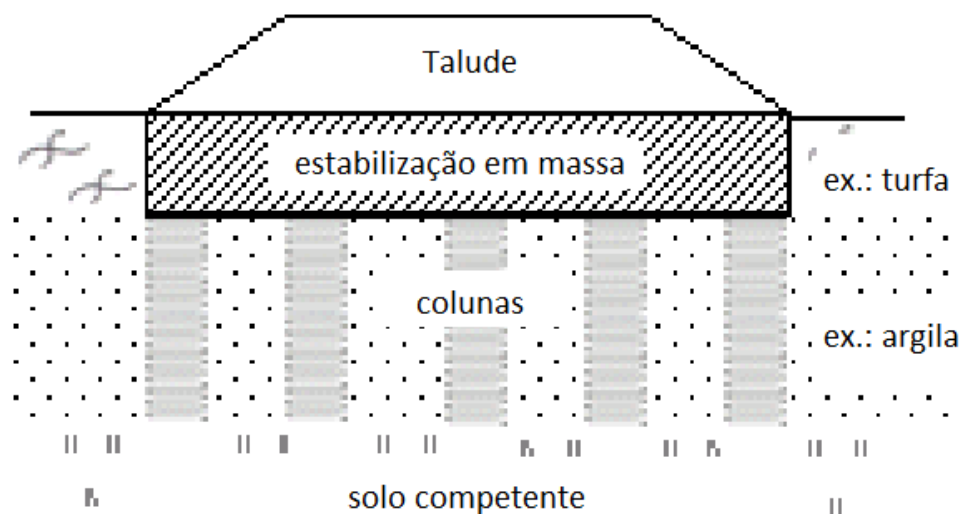
Figura 3 – Estabilização em massa



(fonte: adaptado de GRADEX LTD., 2012, tradução nossa)

<sup>2</sup> AXELSSON, K.; JOHANSSON, S. E.; ANDERSSON, R. **Stabilization of organic soils by cement and pozzolanic reactions: feasibility study.** Linköping: Swedish Geotechnical Institute, 2002. Report n. 3.

Figura 4 – Combinação entre as técnicas de estabilização em colunas e em massa



(fonte: BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, 2002, p. 9, tradução nossa)

O Building Research Establishment (2002, p. 9, tradução nossa) ressalta que os principais objetivos do método são:

- a) aumentar a resistência do solo mole a fim de,
  - aumentar a estabilidade de um talude;
  - aumentar a capacidade de carga;
  - reduzir as cargas ativas em muros de contenção;
  - prevenir a liquefação;
- b) melhorar as propriedades de deformação do solo mole para [...] diminuir os recalques a fim de,
  - reduzir o tempo para os recalques;
  - reduzir os deslocamentos horizontais;
- c) aumentar a rigidez dinâmica do solo mole a fim de,
  - para reduzir as vibrações dos arredores;
  - melhorar a performance dinâmica;
- d) tratar terreno (solo) contaminado,
  - criando uma barreira ambiental (solidificação);
  - estabilização do solo contaminado;
  - criando uma barreira geo-hidrológica.

## 3.2 MISTURAS SOLO ORGÂNICO-POZOLANA-CIMENTO

Existem vários estudos com combinações dos materiais que foram utilizados nesta pesquisa. Foram estudadas algumas destas pesquisas visando a melhor compreensão dos possíveis resultados obtidos com os ensaios realizados nesse trabalho.

Os materiais utilizados nesse estudo são:

- a) solo;
- b) pozolana;
- c) cimento;
- e) água.

A descrição dos materiais e suas características principais seguem abaixo.

### 3.2.1 Solo

Ingles e Metcalf (1972, p. 105, tradução nossa) afirmavam que “Qualquer solo, com a exceção de materiais altamente orgânicos, podem ser tratados com cimento e exibirão uma melhora nas suas propriedades [...]”. Essa teoria foi considerada verdadeira durante décadas. Porém, a partir da década de 1990, diversos estudos têm apresentado grande sucesso na estabilização de solos orgânicos, provando que a estabilização destes solos pode sim ser realizada. Só é necessária a utilização de maiores quantidades do material aglomerante.

Consoli et al. (1997, p. 222, tradução nossa) concluíram que, uma argila orgânica pode ser estabilizada através da adição de teores de cal tais que o pH da mistura aumente a níveis que permitam a ocorrência das reações de ligação entre as partículas do material. O teor de cal necessário para a argila estudada é de no mínimo 11%, sendo necessário um tempo de cura de 90 dias para que as reações ocorressem.

Outro estudo que reforça essa teoria é a pesquisa de Timoney et al. (2012, p. 12, tradução nossa). Os pesquisadores avaliaram o aumento da resistência de um solo altamente orgânico (turfa) em misturas com cimento, cal, escória de alto forno e cinza volante. Após ensaios de laboratório, eles chegaram à conclusão de que seus resultados comprovam que estabilização de solos orgânicos é possível.

Ao término do seu estudo, Timoney et al. (2012, p. 12, tradução nossa) também puderam concluir que, um aumento significativo na resistência (até depois de 28 dias) foi obtido com misturas de cimento e cimento-escória de alto forno. As amostras com cal e cinza volante não mostraram um aumento de resistência tão elevando quanto o das misturas citadas anteriormente.

Hartlén e Wolski (1996, p. 19, tradução nossa) classificam os solos orgânicos quanto ao seu teor de matéria orgânica, em relação ao seu volume total, em três tipos: solos pouco, medianamente e altamente orgânicos. A classificação pode ser observada na tabela 2. Nesta pesquisa utilizou-se um silte medianamente orgânico.

Tabela 2 – Classificação do solo orgânico quanto ao teor de matéria orgânica

GRUPO	TEOR DE MATERIAL ORGÂNICO (<2mm) (%)
Solos pouco orgânicos	2 – 6
Solos medianamente orgânicos	6 – 20
Solos altamente orgânicos	> 20

(fonte: adaptado de HARTLÉN; WOLSKI, 1996, p. 20, tradução nossa)

### 3.2.2 Pozolana

Dalla Rosa (2009, p. 23-25) afirma que a utilização de resíduos na estabilização de solos é um tópico frequente de pesquisa, já que, sua disposição final é um problema ambiental. Nessas pesquisas, foi observado que resíduos industriais com propriedades pozolânicas, misturados com estabilizantes, tem grande efeito na melhora e otimização do desempenho de solos.

Esta pesquisa se focou em dois tipos de pozolana: microssílica e cinza de casaca de arroz, que estão apresentadas a seguir.

### 3.2.2.1 Microsílica

As propriedades pozolânicas da microsílica têm sido bastante estudadas em misturas de concreto, porém, poucos estudos foram feitos para verificar a eficiência do material no melhoramento de solos. Siddique e Khan (2011, p. 67, tradução nossa) descrevem a microsílica como sendo um material de coloração normalmente cinza (figura 5), que lembra o cimento Portland ou algumas cinzas volantes, e pode apresentar tanto características pozolânicas quanto cimentantes.

Figura 5 – Microsílica



(fonte: SIDDIQUE; KHAN, 2011, p. 69)

A microsílica é um subproduto do processo de fundição de ligas de silício metálico ou de ferro-silício. A quantidade de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) presente no subproduto dessas ligas influencia diretamente na quantidade sílica e nas características pozolânicas da microsílica obtida pelo processo. A tabela 4 apresenta as quantidades de  $\text{SiO}_2$  obtidas a partir de cada liga produzida. Isso acontece porque a microsílica é composta basicamente por  $\text{SiO}_2$  (cerca de 90%). O restante da composição do material é formado por pequenas quantidades de ferro, magnésio e óxidos alcalinos (SIDDIQUE; KHAN, 2011, p. 67-69, tradução nossa).

Em misturas de concreto com microsílica, se utilizadas junto com aditivos superplastificantes, é relativamente fácil se obter em ensaios de laboratório resistências à compressão da ordem de 100-150 MPa. A adição de microsílica melhora a durabilidade do concreto através da redução da condutividade hidráulica e da quantidade de hidróxido de cálcio, que resulta numa maior resistência ao ataque e sulfetos. Essa melhora também contribui com a habilidade do concreto em proteger a armadura contra a corrosão (SIDDIQUE; KHAN, 2011, p. 67, tração nossa).



Tabela 3 – Quantidade de sílica produzida por diferentes tipos de ligantes

TIPO DE LIGANTE	QUANTIDADE DE SILÍCIO (SiO <sub>2</sub> ) PRESENTE NA MICROSSÍLICA (%)
50% de ferro-silício	61 – 84
75% de ferro-silício	84 – 91
Silício metálico	87 – 98

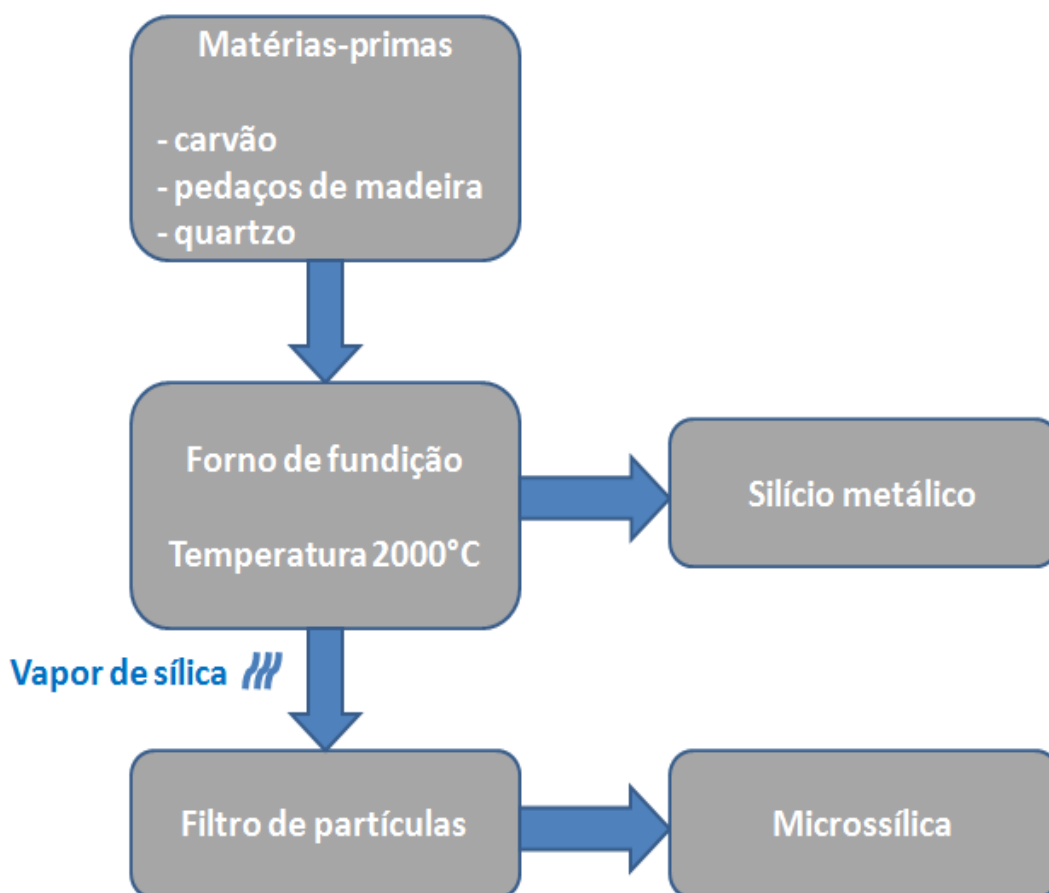
(fonte: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE<sup>3</sup>, 1996  
apud SIDDIQUE; KHAN, 2011, p. 68, tradução nossa)

O processo de obtenção da microssílica consiste na redução de quartzo de alta pureza em silício a temperaturas de aproximadamente 2000°C. Durante esse processo são produzidos vapores de óxido de silício que, em temperaturas mais baixas, oxidam e condensam criando minúsculas partículas de dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) não-cristalina. Assim, a microssílica é captada na filtração dos gases de exaustão por filtros manga. Esse procedimento pode ser observado na figura 6 (METHA; MONTEIRO, 1994, p. 299-300).

Devido à preocupação com o impacto ambiental que a dispersão dos vapores de silício na atmosfera causa, a utilização de filtros de partículas, que tem como objetivo reduzir a quantidade de partículas poluentes liberadas para o meio ambiente, foram incorporados pela indústria. Isso viabilizou economicamente a utilização de microssílica como um componente em diversas misturas (SILICA FIUME CONCRETE INDUSTRY CO. LTD., 2010, tradução nossa).

<sup>3</sup> AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 234R-96**: guide for the use of silica fume in concrete. Farmington Hills, 1996.

Figura 6 – Processo de produção da microsilica



(fonte: adaptado de SIDDIQUE; KHAN, 2011, p. 68, tradução nossa)

### 3.2.2.2 Cinza de casca de arroz

A cinza de casca de arroz apresenta propriedades pozolânicas e é utilizada, principalmente, em misturas de concreto de alta resistência, assim como a microsilica. Segundo NK Enterprises (2008, tradução nossa), a cinza é obtida através da queima da casca de arroz, proveniente da moagem do arroz. A casca de arroz é utilizada como combustível nas usinas de arroz para gerar vapor na produção de arroz parbolizado. A cinza proveniente deste processo contém altos valores de sílica amorfa (cerca de 85 a 90%).

Com o objetivo de estudar um procedimento para obter e caracterizar a sílica ativa com uma grande área superficial efetiva da cinza de casca de arroz, Della et al. (2002, tradução nossa) concluíram que é possível produzir 95% de pó de sílica se a cinza de casca de arroz natural for exposta a temperatura de 700 °C por 6 horas. Este procedimento aumentou a área superficial efetiva de 54 para 81 m<sup>2</sup>/g, além de aumentar o teor de dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>),

também conhecida como sílica ativa, de 72,1 para 94,95%. A figura 7 retrata a aparência da cinza de casca de arroz após o tratamento.

Figura 7 – Cinza de casca de arroz



(fonte: DELLA et al., 2002, p. 820)

### 3.2.3 Cimento

O Building Research Establishment (2002, p. 42, tradução nossa) salienta:

Ligantes podem ser hidráulicos, isto é, se autoativam em contato com a água, ou podem ser não-hidráulicos, isto é, necessitam de um material que reaja com ele a fim de se ativar. Ligantes não-hidráulicos podem ser usados para ativar materiais hidráulicos latentes para produzir produtos de misturas reativas. Um ligante hidráulico irá estabilizar quase qualquer solo, mas para não produzir um produto final heterogêneo, a mistura mecânica do ligante no solo deve ser muito boa. Ligantes não-hidráulicos geralmente reagem com minerais de argila no solo, o que resultará em um material estabilizado com propriedades geotécnicas melhoradas.

O cimento é um ligante hidráulico, portanto, a ativação do material se dá somente pelo contato do material com água. Essa ativação faz com que o cimento una o solo como uma cola. Porém, ele não altera a estrutura do solo com a mesma intensidade e proporção que a cal faz. O solo pode apresentar algum ressecamento devido a necessidade de utilizar a água presente no solo. A sua característica de estabilizar praticamente qualquer tipo de solo se dá pelo fato do material não depender das reações com os minerais do solo (BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, 2002, p. 43, tradução nossa).

Segundo Oliveira et al., (2013, p. 811, tradução nossa):

[...]a quantidade de cimento Portland presente na mistura tem um papel importante, uma vez que ele origina reações hidráulicas (primeiramente) em um tempo curto com a produção de  $\text{Ca(OH)}_2$ , 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 do solo não-estabilizado.

A título de ilustração, a NBR 12553 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992, p. 2) determina que o teor ideal de cimento utilizado na dosagem de solo-cimento para emprego como camada de pavimento é aquele que atinge valor igual ou maior que 2,1 MPa aos sete dias de idade.

### **3.2.4 Água**

Para estabilização de solos é considerado que a utilização de água potável é satisfatória para obterem-se os resultados desejados (INGLES; METCALF, 1972, p. 106, tradução nossa).

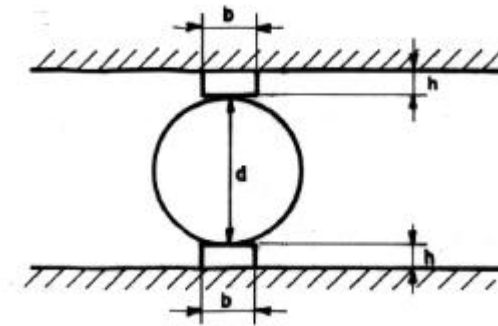
## **3.3 ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL**

### **3.3.1 Características gerais do ensaio**

O ensaio de tração por compressão diametral foi desenvolvido em 1943 pelo Prof. Luiz Lobo Carneiro. A NBR 7222 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994, p. 1) descreve o procedimento de ensaio, e determina que, a relação ideal entre diâmetro e altura para corpos de prova de concreto e argamassa, está entre 1 e 2. A norma também estabelece que o corpo de prova deve ser colocado entre fibras de madeira ao longo de sua geratriz quando for colocado na prensa conforme ilustrado na figura 8.

Com os valores obtidos ao fim do ensaio, a NBR 7222 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994, p. 2) fornece a equação 5, que relaciona a carga obtida no ensaio com as propriedades geométricas do corpo de prova para obter a resistência à tração por compressão diametral.

Figura 8 – Disposição do corpo de prova



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994, p. 2)

(equação 5)

Onde:

$\sigma_{\text{tração}}$  = resistência à tração por compressão diametral (MPa);

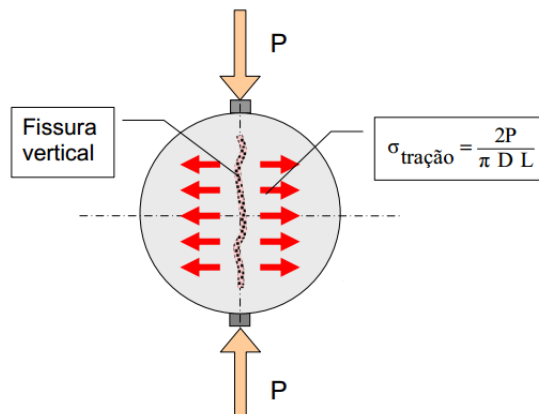
P = carga máxima obtida no ensaio (kN);

D = diâmetro do corpo de prova (mm);

L = altura do corpo de prova (mm).

A figura 9 ilustra o que acontece durante a compressão da geratriz de um corpo de prova cilíndrico.

Figura 9 – Ruptura do corpo de prova submetido à compressão diametral

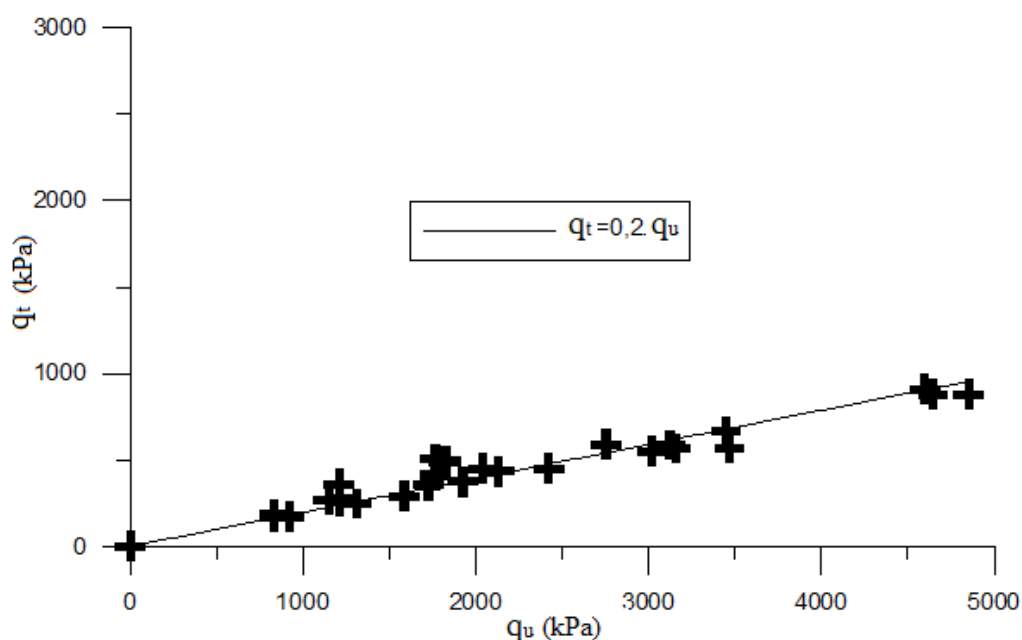


(fonte: THOMAZ, 2013, p. 4)

### 3.3.2 Relação entre o ensaio de tração por compressão diametral e o ensaio de compressão simples

Estudando a influência do tempo de cura no comportamento mecânico de misturas areia – cinza volante – cal, Silvani (2013, p. 92), observou que os valores de resistência à tração por compressão diametral são muito menores que os obtidos em ensaios de compressão simples, porém, que era possível estabelecer uma relação linear entre os dois ensaios. Pode-se observar na figura 10 que os valores das duas resistências puderam ser relacionados por uma constante.

Figura 10 – Relação entre a resistência a tração por compressão diametral e resistência a compressão simples.



(fonte: adaptado de SILVANI, 2013, p. 96)

### 3.4 CARACTERÍSTICAS COMPORTAMENTAIS DE MISTURAS SOLO ORGÂNICO-POZOLANA-CIMENTO

Foram analisados os efeitos dos seguintes materiais:

- a) cimento;
- b) pozolana;
- c) relação vazios/cimento;
- d) porosidade;
- e) tempo de cura.

### 3.4.1 Efeito do cimento

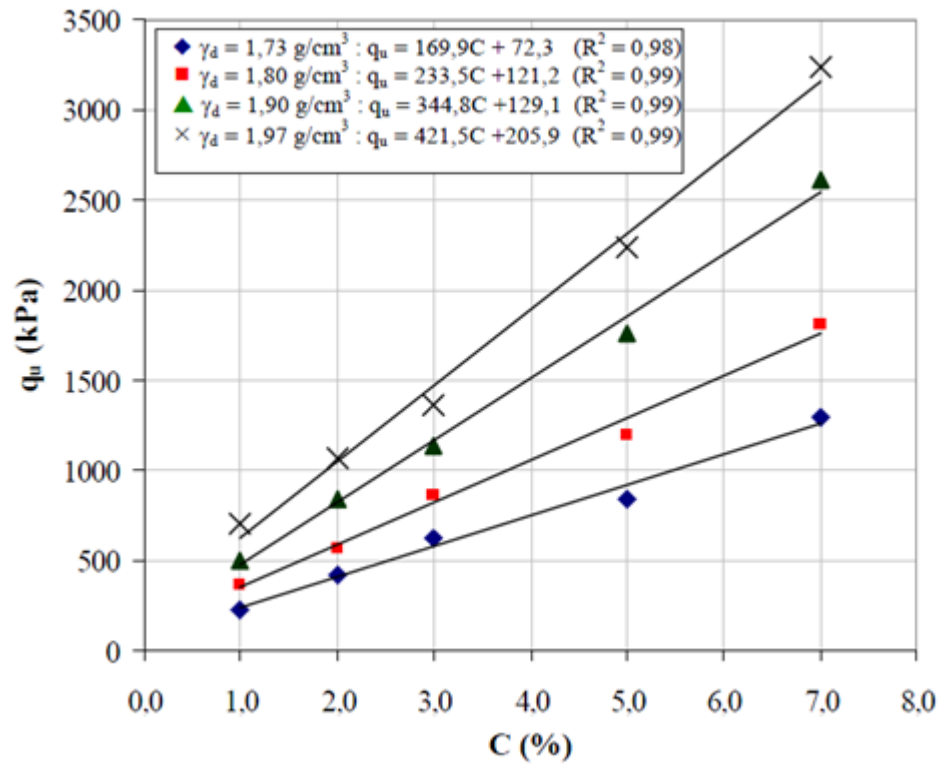
Ingles e Metcalf (1972, p. 103, tradução nossa) afirmam que, quando ocorre a hidratação do cimento, o solo estabilizado será mais resistente às intempéries. Também salientam que esse efeito é generalizado e proporcional à quantidade de cimento utilizada. Chamando a atenção para o fato de que a adição de pequenos teores de cimento (a partir de 2%) já são o suficiente para alterar as propriedades do solo, enquanto, grandes quantidades do aglomerante alteram radicalmente a essas propriedades.

Estudando as variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos cimentados, Foppa (2005, p. 133) também chegou à conclusão de que mesmo pequenas quantidades de cimento promovem aumentos consideráveis da resistência da mistura. Segundo ele:

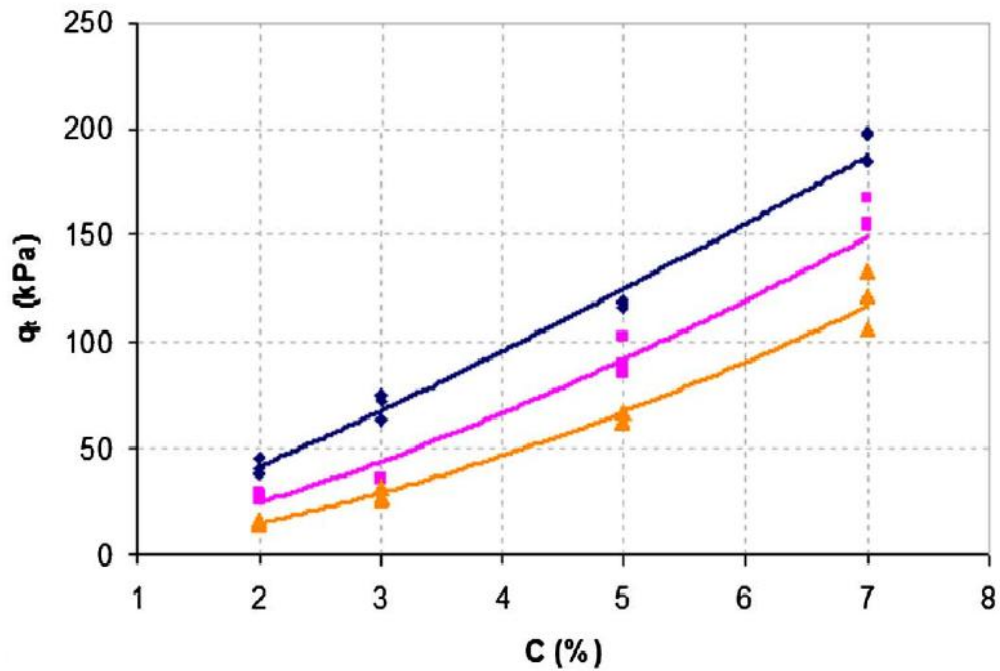
Na faixa de teores estudados (1% até 7%), a resistência à compressão simples aumentou linearmente com o aumento do teor de cimento. Além disso, a taxa de ganho de resistência, representada pela inclinação das retas de ajuste, aumentou com o aumento da massa específica aparente seca do solo-cimento compactado,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

É possível visualizar esse comportamento com o gráfico apresentado na figura 11. Outros pesquisadores, como Consoli et al. (2007) e Lopes Junior (2007), chegaram às mesmas tendências.

Consoli et al. (2011b, p. 1128, tradução nossa) analisaram o efeito do aumento do teor de cimento em três diferentes tipos de solo 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 observado na figura 12.

Figura 11 – Teor de cimento *versus* resistência à compressão simples

(fonte: FOPPA, 2005, p. 82)

Figura 12 – Teor de cimento *versus* resistência à tração por compressão diametral

(fonte: adaptado de CONSOLI et al., 2011b, p. 1128)



### 3.4.2 Efeito da pozolana

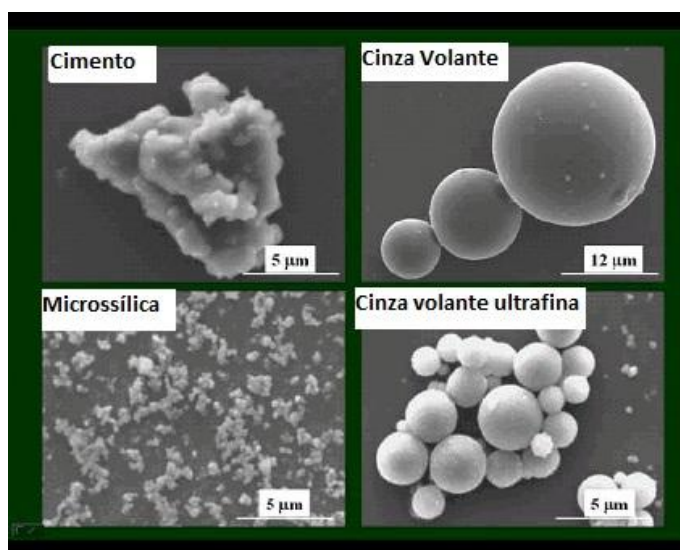
Apesar da microssílica e da cinza de casca de arroz serem provenientes de fontes distintas, os dois materiais apresentam uma elevada quantidade de sílica ativa ( $\text{SiO}_2$ ), o que as caracteriza como pozolanas. Os efeitos da adição de pozolana em misturas de concreto podem ser avaliados através dos itens que seguem.

#### 3.4.2.1 Redução de vazios na estrutura

A microssílica funciona como um elemento de preenchimento de estruturas devido à sua granulometria finíssima. Assim, a adição desse material em concreto de cimento Portland diminui consideravelmente o volume de grandes poros na mistura. Esse fenômeno pode ser observado em todos os tempos de cura do concreto (SIDDIQUE; KHAN, 2011, p. 70, tradução nossa). A figura 13 ilustra o tamanho da microssílica comparada a outros materiais como o cimento e a cinza volante (pozolana muito utilizada no melhoramento de solos).

Mehta e Monteiro (1994, p. 300) observam que as partículas de microssílica apresentam uma granulometria de aproximadamente duas ordens de grandeza menores que a do cimento Portland e das cinzas volantes típicas. Eles atribuem a esse fato a microssílica ser um material altamente pozolânico. Ao mesmo tempo, fazem a ressalva de que essa característica do material também gera uma dificuldade no seu manuseio e aumenta consideravelmente o consumo de água na mistura.

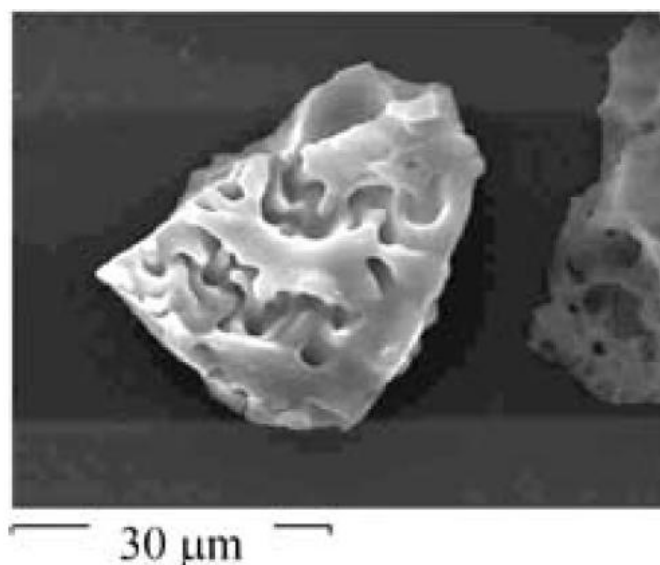
Figura 13 – Dimensão da microssílica comparada a outros materiais



(fonte: FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2006, tradução nossa)

Prasanphan et al. (2010, tradução nossa), estudando os efeitos da quantidade e do tempo de cura na resistência a compressão simples de pasta de cimento com casca de cinza de arroz, observaram que a casca de cinza de arroz também apresenta uma granulometria muito fina, como pode ser observado na figura 14.

Figura 14 – Dimensão da cinza de casca de arroz



(fonte: adaptado de PRASANPHAN et al., 2010, p. 296)

#### 3.4.2.2 Reações com o cimento

A adição de microssílica em concretos com cimento Portland gera uma reação pozolânica, que pode ser descrita como a reação dos componentes silicosos e aluminatos presentes na microssílica com os cristais de hidróxido de cálcio (HC), provenientes da hidratação do cimento Portland, presentes na pasta de cimento. Como o HC é um material que torna a estrutura frágil, possibilitando a propagação de rachaduras, além de a microssílica melhorar a resistência devido às reações pozolânicas, também gera uma redução na quantidade de HC na mistura (SIDDIQUE; KHAN, 2011, p. 70, tradução nossa).

Em seu estudo com a utilização de cinza volante, microssílica e pó de calcário como aditivos na produção de blocos de concreto, Turgut (2012, p. 366, tradução nossa) concluiu que a resistência tanto à compressão quanto à flexão simples das amostras aumenta significativamente com o aumento do teor de microssílica. Ele também concluiu que o aumento deste material eliminou as fissuras que apareciam nas amostras de controle.

A cinza de casca de arroz também apresenta as mesmas reações com o cimento, porém, se a casca de arroz for queimada em temperaturas muito altas (cerca de 1000 °C) durante um tempo prolongado, uma grande porção da sílica amorfa do material se transforma em cristobalita, uma forma menos reativa da SiO<sub>2</sub> (PRASANPHAN et al., 2010, p. 293-302, tradução nossa).

Como a utilização de pozolana em misturas de concreto mostrou-se uma alternativa eficiente para a obtenção de um aumento de resistência, imagina-se que a utilização deste material em misturas com solo apresentará um comportamento similar.

### 3.4.3 Efeito da relação vazios/cimento

O ar de sistemas solo-cimento-água-ar nunca é completamente expulso, mesmo após a sua compactação. Como a relação água-cimento para a determinação da resistência do material só é válida se não houver ar na mistura, é necessário estabelecer uma nova correlação desse sistema. A relação obtida para a determinação da resistência da mistura é a vazios/cimento, que pode ser expressa através da razão entre o volume de vazios ( $V_v$ ) e o volume de cimento ( $V_{ci}$ ) (LARNACH<sup>4</sup>, 1960 apud LOPES JUNIOR, 2007, p. 36). A figura 15 ilustra os resultados obtidos pelo pesquisador.

Segundo Foppa (2005), ainda que a relação vazios/cimento seja uma correlação razoável, ela leva em conta uma variação no volume de vazios. Conforme o autor, somente a variação proporcional do volume de cimento já é suficiente para observar essa relação. A fim de melhor compatibilizar as taxas de variação das variáveis, o autor notou que uma potência de valor 0,28 sobre o  $V_{ci}$  resulta em um melhor ajuste da relação vazios/cimento (figura 16). O pesquisador acredita que o expoente 0,28 é função dos materiais utilizados no ensaio.

Foppa (2005, p. 126) afirma:

[...] a resistência à compressão simples do material em estudo pode ser avaliada, com um excelente grau de precisão, através da relação vazios/cimento ajustada pelo expoente 0,28. Entretanto, uma forma mais elegante de expressar a relação vazios/cimento pode ser feita utilizando, ao invés do volume de vazios, a porosidade do material ( $n$ ) expressa em porcentagem e, ao invés do volume de cimento, o teor volumétrico de cimento expresso em porcentagem do volume total ( $C_{iv}$ ). [...] o novo

---

<sup>4</sup> LARNACH, W. J. Relationship between dry density, voids/cement ratio and strength of soil-cement mixtures. **Civil Engineering and Public Works Reviews**, London, v. 55, n. 648, p. 903-905, 1960.

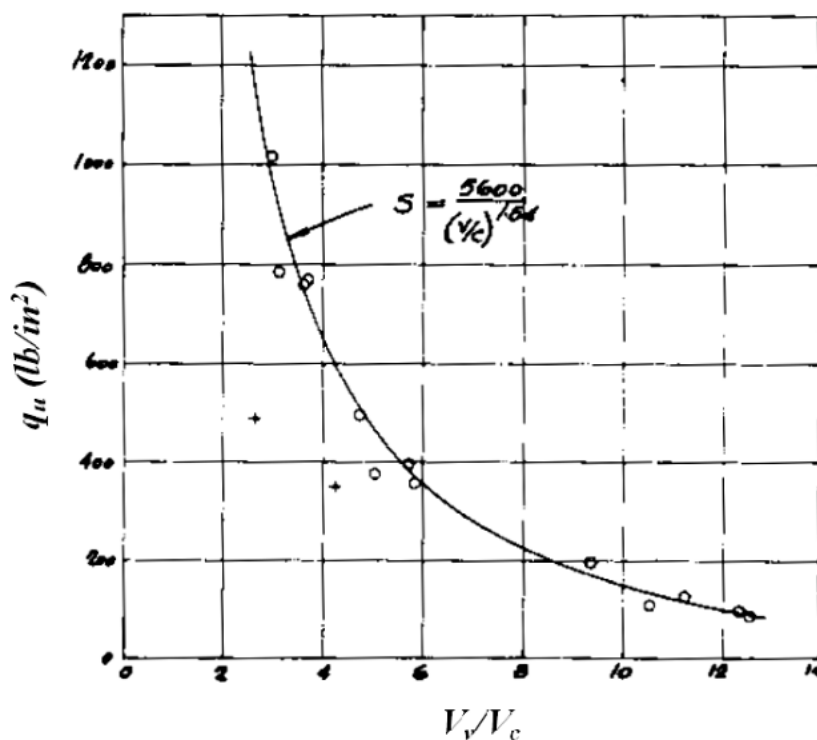
ajuste utilizando essa relação  $[n/(Civ)^{0.28}]$ . Percebe-se que não ocorre alteração na qualidade do ajuste dos dados, uma vez que as novas variáveis são proporcionais às utilizadas anteriormente.

A relação porosidade/teor volumétrico de cimento citada acima pode ser observada na figura 17.

Estudando a influência da relação porosidade/teor volumétrico de cimento em misturas solo-cimento em três solos diferentes, através de ensaios de tração por compressão diametral, Consoli et al. (2011b, p. 1130, tradução nossa) chegaram à mesma tendência obtida nos ensaios à compressão simples citados anteriormente. Esta tendência pode ser observada na figura 18.

O mesmo comportamento é esperado em misturas com solo orgânico.

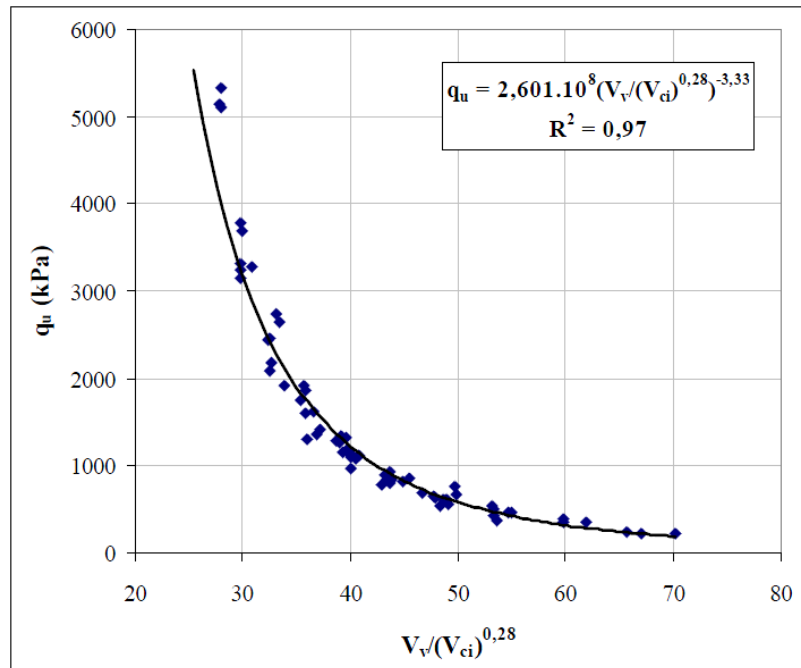
Figura 15 – Volume de vazios/cimento *versus* resistência à compressão simples



(fonte: LARNACH<sup>5</sup>, 1960 apud LOPES JUNIOR, 2007, p. 37)

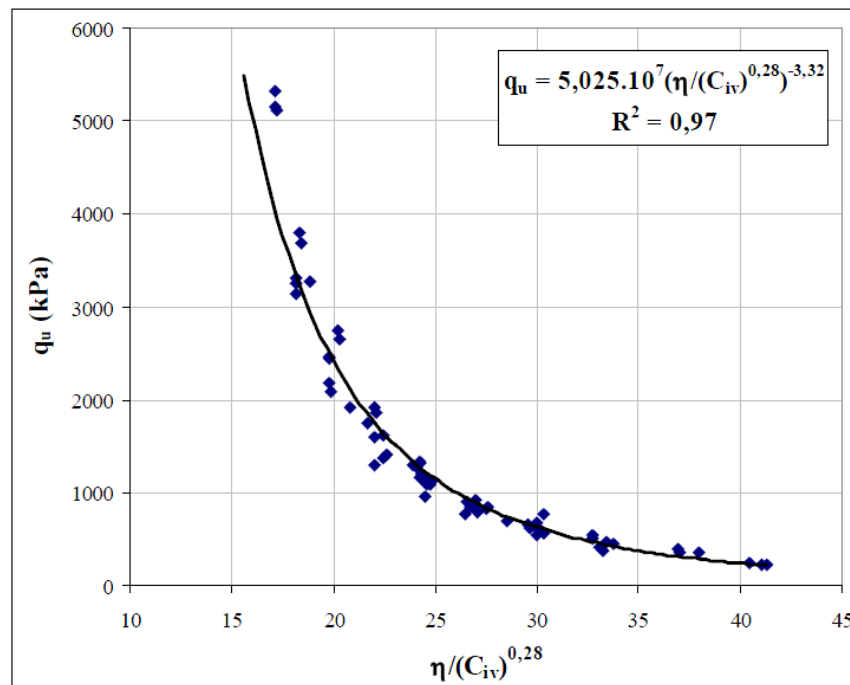
<sup>5</sup> LARNACH, W. J. Relationship between dry density, voids/cement ratio and strength of soil-cement mixtures. **Civil Engineering and Public Works Reviews**, London, v. 55, n. 648, p. 903-905, 1960.

Figura 16 – Volume de vazios/cimento *versus* resistência à compressão simples ajustada



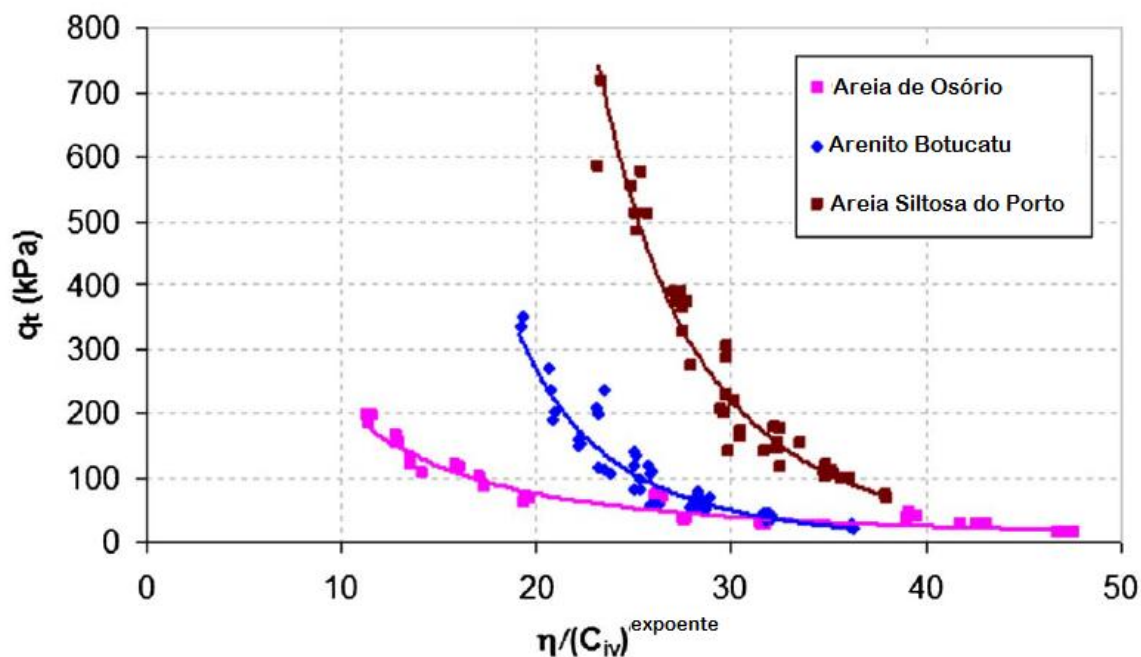
(fonte: FOPPA, 2005, p. 125)

Figura 17 – Volume de vazios/cimento expresso em função da porosidade e do teor volumétrico de cimento *versus* resistência à compressão simples ajustada



(fonte: FOPPA, 2005, p. 126)

Figura 18 – Volume de vazios/cimento expresso em função da porosidade e do teor volumétrico de cimento *versus* resistência à tração por compressão diametral



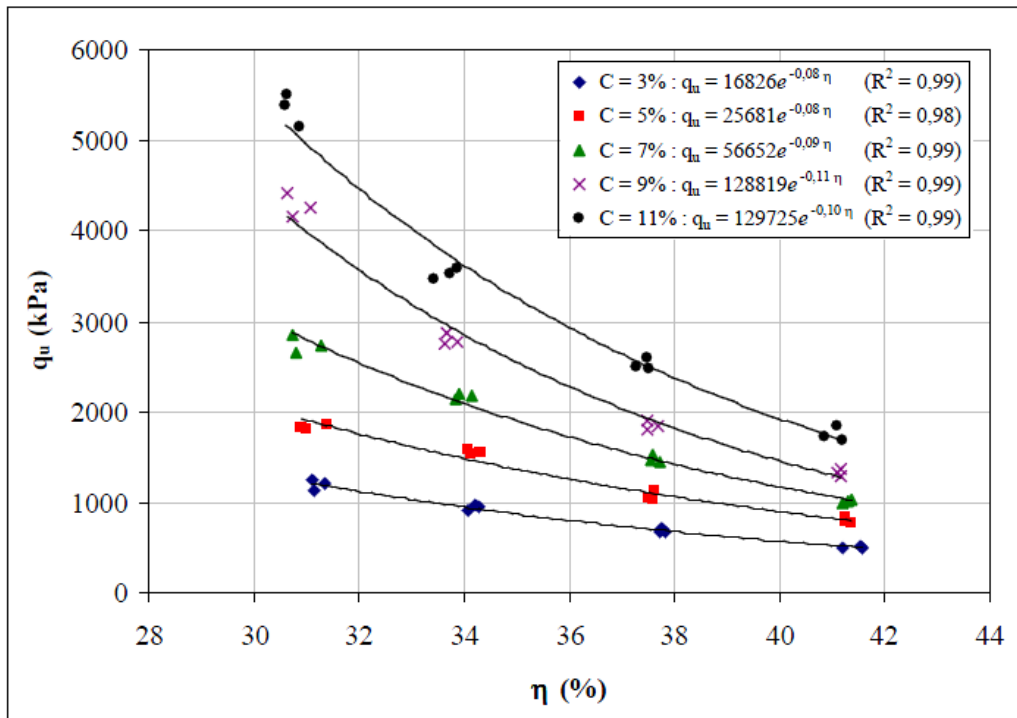
(fonte: adaptado de CONSOLI et al., 2011b, p. 1130, tradução nossa)

### 3.4.4 Efeito da porosidade

Lopes Junior (2007, 119-120) verificou que a resistência à compressão simples da mistura solo-cimento aumenta consideravelmente com a redução da porosidade do material, independentemente da quantidade de cimento adicionada. Ele também notou que, esse aumento acontece em uma escala exponencial. Tal relação pode ser atribuída ao maior número de contato entre as partículas e ao seu intertravamento com a diminuição da porosidade. Esses resultados podem ser observados na figura 19. Essa mesma relação foi observada por Foppa (2005), apresentada na figura 20.

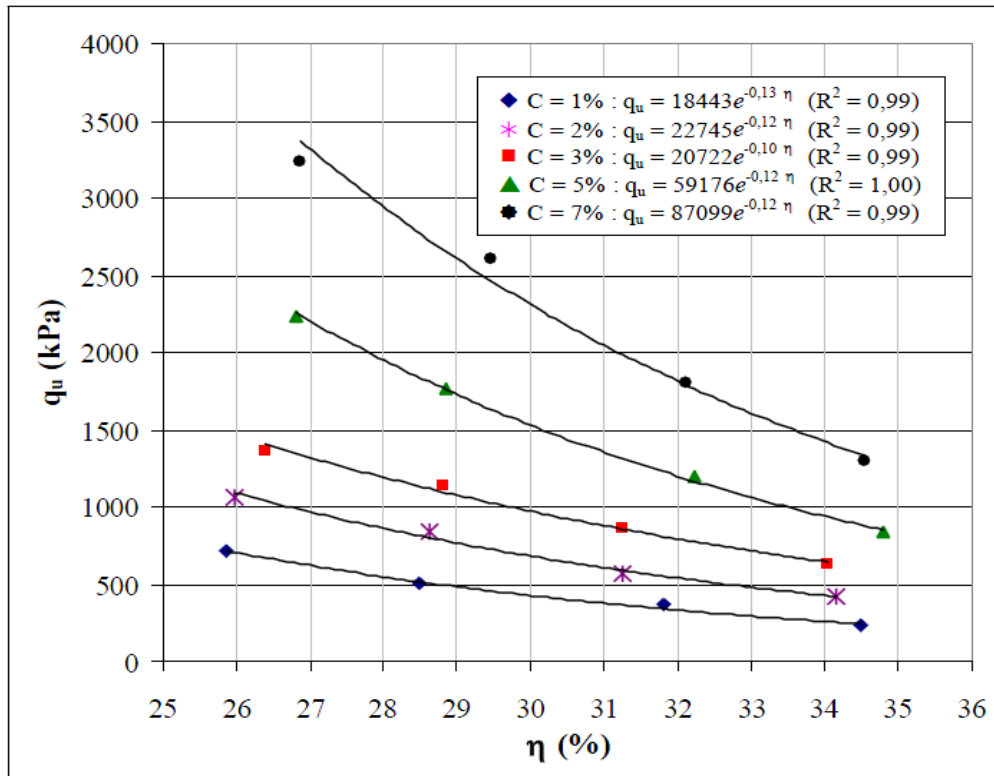
A mesma relação foi observada por Consoli et al. (2011b, p. 1129, tradução nossa) em seus ensaios de tração por compressão diametral realizados quando estudavam o comportamento da relação porosidade/teor volumétrico de cimento em misturas solo-cimento (figura 21).

Figura 19 – Porosidade *versus* resistência à compressão simples

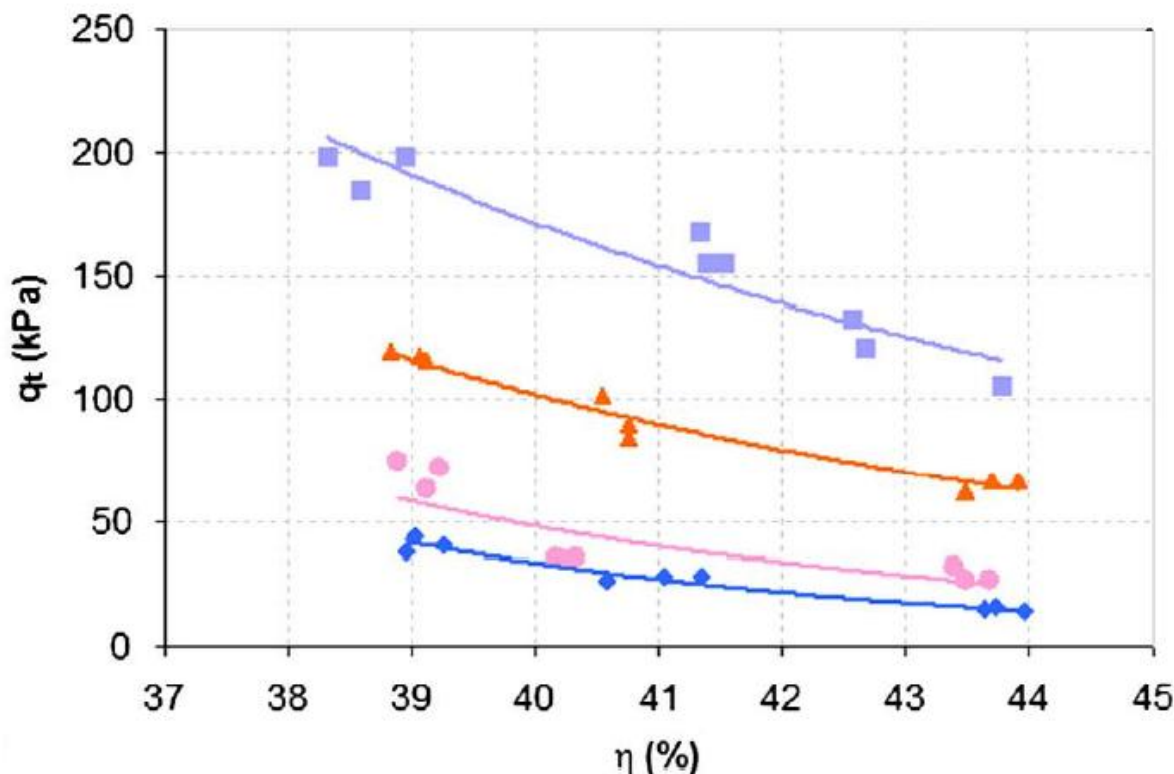


(fonte: LOPES JUNIOR, 2007, p. 78)

Figura 20 – Porosidade *versus* resistência à compressão simples



(fonte: FOPPA, 2005, p. 83)

Figura 21 – Porosidade *versus* resistência à tração por compressão diametral

(fonte: adaptado de CONSOLI et al., 2011b, p. 1129)

### 3.4.5 Efeito do tempo de cura

Conforme foi salientado anteriormente na pesquisa, o tempo é um fator crucial na tomada de decisão para a escolha das técnicas adotadas em um projeto. Como também já foi visto, em misturas de solo orgânico, a presença de ácidos húmicos pode interferir nas reações com os materiais. Então, mesmo que em misturas de cimento as reações aconteçam com mais rapidez do que nas que utilizam outros aglomerantes, analisar como o material se comporta ao longo da sua cura também é um ponto importante.

Consoil et al. (2011a, tradução nossa) realizaram um estudo com o objetivo avaliar se há uma relação direta entre vazios/cimento  $n/C_{iv}$  (porosidade do solo pelo teor volumétrico de cimento) e a resistência à compressão simples de uma mistura areia-cimento para diferentes períodos de cura. Como resultado deste estudo, foi possível determinar uma equação que relaciona estes parâmetros (equação 6). Isto proporciona várias possibilidades de combinações das variáveis para atingir uma resistência estabelecida para o solo estudado, dando uma flexibilidade ao projeto:



(equação 6)

Onde:

$q_u$  = resistência à compressão simples (kPa);

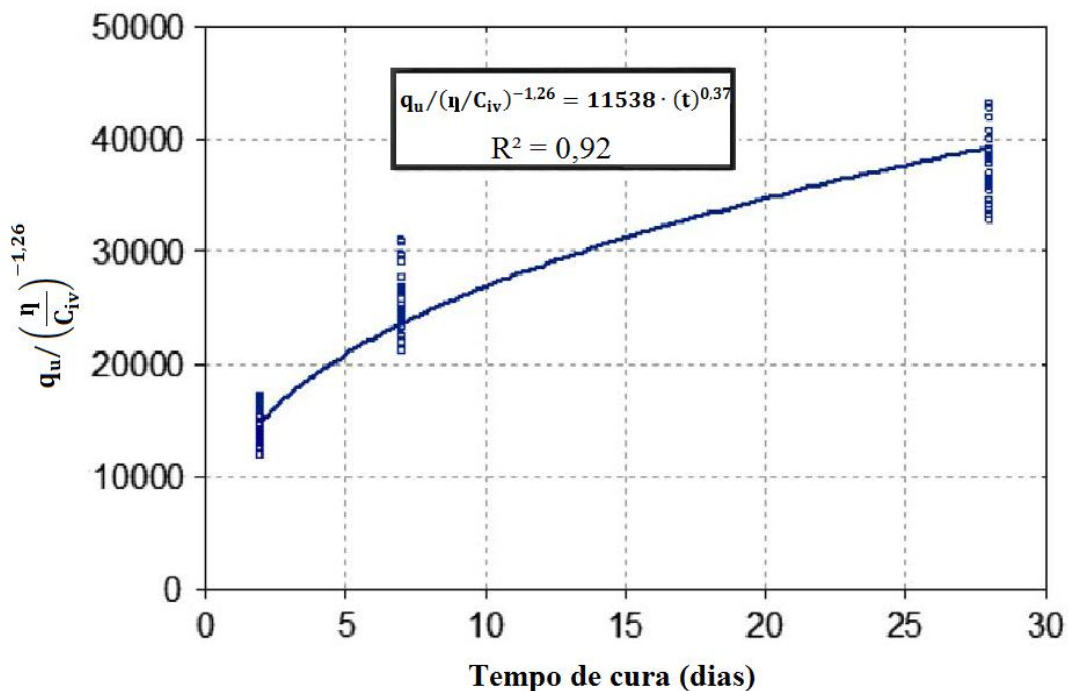
$t$  = tempo de cura (dias);

$n$  = porosidade (%);

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

A resistência à compressão simples apresenta uma relação direta com  $n/C_{iv}$  para todos os tempos de cura. Já o efeito do tempo de cura na resistência se difere por um escalar. (CONSOLI et al., 2011a, p. 695, tradução nossa). Essas relações podem ser observadas na figura 22.

Figura 22 – Tempo de cura *versus* resistência à compressão simples pela relação vazios/cimento



(fonte: adaptado de CONSOLI et al., 2011a, p. 695)

## 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental tem por objetivo determinar para quais proporções dos materiais da mistura solo orgânico-pozolana-cimento é possível obter um aumento significativo na capacidade de suporte da mistura. Isto foi realizado através de dois ensaios: de tração por compressão diametral e de cravação de base alargada, sendo o último realizado como um ensaio de controle. Além desse resultado, também visa-se determinar o comportamento das misturas de pozolanas utilizadas na pesquisa em misturas com solo orgânico, o comportamento do material com a variação de umidade e do seu tempo de cura. As combinações de misturas realizadas estão indicadas na tabela 4.

Para que a realização desse trabalho fosse possível, dividiu-se o trabalho em duas etapas. A primeira trata-se da seleção e caracterização dos materiais. Já a segunda, consiste na determinação da forma de execução dos ensaios de laboratório.

### 4.1 MATERIAIS

Os ensaios de granulometria dos materiais que foram utilizados nesta pesquisa foram realizados no Laboratório de Materiais Cerâmicos (Lacer) da UFRGS, utilizando o equipamento Cilas 1180, que segue as especificações da ISO<sup>6</sup> 13320/09. Para a realização dos ensaios para se obter a massa específica real dos grãos, seguiu-se as indicações descritas da NBR 6508 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984a).

---

<sup>6</sup> INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13320**: particle size analysis – laser diffraction methods. Geneva, 2009.

Tabela 4 – Combinações analisadas

Teor de material estabilizante igual a 100kg/m <sup>3</sup>				Teor de material estabilizante igual a 200kg/m <sup>3</sup>			
% aglomerante	% pozolana	% umidade	Tempo de cura (dias)	% aglomerante	% pozolana	% umidade	Tempo de cura (dias)
100	0	125	7	100	0	125	7
			14				14
			28				28
		150	7			150	7
			14				14
			28				28
		175	7			175	7
			14				14
			28				28
50	50	125	7	50	50	125	7
			14				14
			28				28
		150	7			150	7
			14				14
			28				28
		175	7			175	7
			14				14
			28				28

(fonte: elaborado pela autora)

#### 4.1.1 Solo

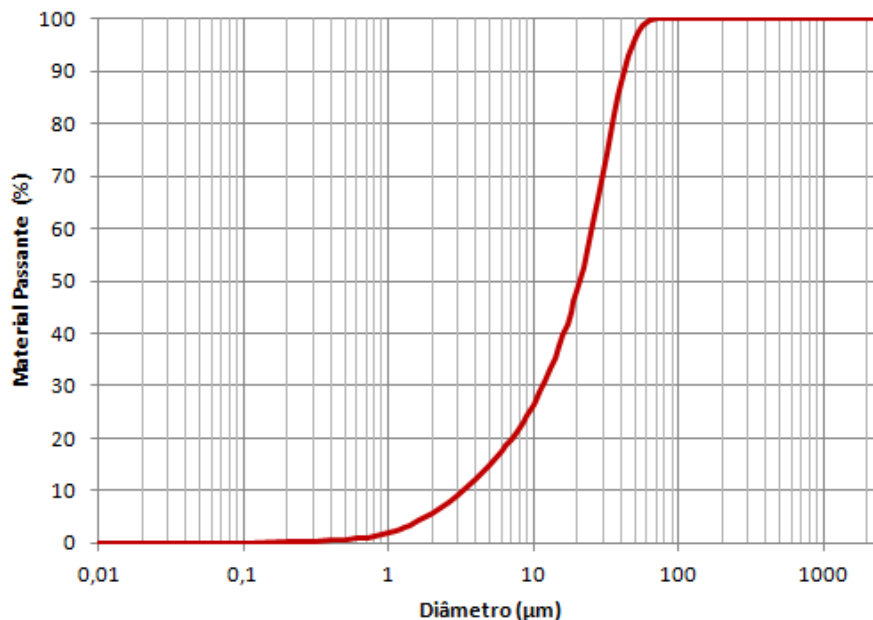
Para a realização dos ensaios desta pesquisa, foi utilizado um solo proveniente da cidade de Nova Santa Rita no estado do Rio Grande do Sul. Foi realizado o ensaio de perda ao fogo pelo Lacer, que mede a quantidade de matéria orgânica de um material, através da queima do solo a temperaturas que aumentam progressivamente até atingir 900 °C. Após esse processo, a diferença de peso do material, em porcentagem, é considerada a quantidade de matéria

orgânica do solo. Com esse ensaio, constatou-se que o teor de matéria orgânica deste solo é de 11,29%, o que, conforme visto na bibliografia, caracteriza um solo medianamente orgânico.

Também foram realizados outros ensaios para caracterização do solo no Laboratório de Ensaio Geotécnicos e Geoambientais (LEGG). Seguindo as orientações da NBR 6459 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984b), obteve-se o limite de liquidez (LL) do solo de 58%. E, seguindo as orientações da NBR 7180 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984c), chegou-se a o limite de plasticidade (LP) de 35%. Isso resulta em um índice de plasticidade (IP) do solo de 23%. Com essas informações mais a granulometria, foi possível caracterizar o solo segundo a ASTM D 2487 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2006) como um silte orgânico de alta plasticidade.

O ensaio de massa específica real dos grãos resultou em 2,55 g/cm<sup>3</sup>. O diâmetro médio dos grãos é de aproximadamente 21,93 µm. Pode-se observar esse resultado na figura 23.

Figura 23 – Granulometria do solo



(fonte: elaborado pela autora)

#### 4.1.2 Cimento

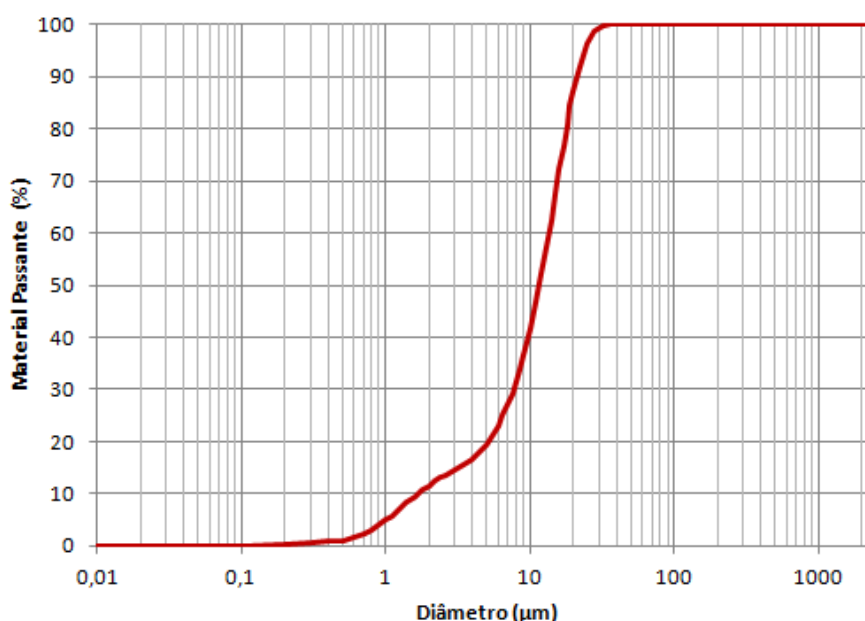
Foi utilizado nessa pesquisa o cimento Portland (CP) de alta resistência inicial. Escolheu-se esse cimento pois atinge aproximadamente 80% da sua resistência ao 7 dias de cura. Isto torna

possível a realização do ensaio de tração por compressão diametral nos corpos de prova com 7 dias. A massa específica real dos grãos utilizada foi de  $3,15 \text{ g/cm}^3$  (LOPES JUNIOR, 2007).

### 4.1.3 Microssílica

Esta foi uma das pozolanas escolhidas para realizar os ensaios desta pesquisa. A microssílica (MS) possui uma granulometria bastante fina, como foi observado no ensaio de granulometria que foi realizado (figura 24). Obteve-se um valor médio de  $11,78 \mu\text{m}$ . A curva granulométrica do material encontra-se na figura 24. No ensaio de massa específica real dos grãos, foi obtido um valor de  $2,38 \text{ g/cm}^3$ .

Figura 24 – Granulometria da microssílica

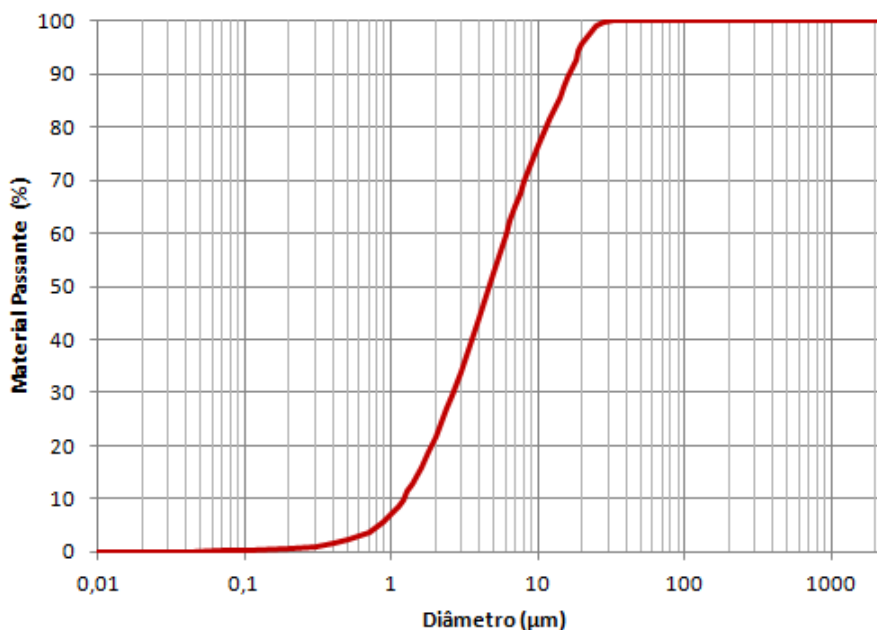


(fonte: elaborado pela autora)

### 4.1.4 Cinza de casca de arroz

A cinza de casca de arroz (CCA) foi a segunda pozolana escolhida para ser ensaiada nesta pesquisa. A cinza também apresenta grãos com diâmetros muito pequenos. Nos ensaios realizados, obteve-se um valor médio de  $6,77 \mu\text{m}$ . A curva granulométrica do material pode ser observada na figura 25. O valor da massa específica real dos grãos obtida para esse material foi de  $2,29 \text{ g/cm}^3$ .

Figura 25 – Granulometria da cinza de casca de arroz



(fonte: elaborado pela autora)

## 4.2 MÉTODOS

### 4.2.1 Preparação das misturas e moldagem dos corpos de prova

O processo de preparação e moldagem dos corpos de prova, para a realização do ensaio de tração por compressão diametral, foi dividido em quatro etapas. Ao final do processo se obteve corpos de prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Os processos citados anteriormente são:

- a) determinação e alteração da umidade do solo natural;
- b) mistura dos materiais;
- c) moldagem dos corpos de prova;
- d) acondicionamento dos corpos de prova durante os respectivos tempos de cura.

Estes processos são descritos a seguir. A obtenção da umidade natural do solo natural foi realizada no dia anterior à moldagem, para tanto, foram retiradas cinco amostras do solo natural, que foram colocadas em cápsulas, pesadas, secas em uma estufa a 60°C e repesadas 48 horas depois. Então, a umidade do solo foi calculada através da variação de peso das amostras. Foi constatado que o solo possui uma umidade natural de 123%. Com o valor da

umidade natural solo, foram calculadas as quantidades de água necessária para se obter os valores de umidade estipulados (125, 150 e 175%), que são valores usualmente adotados na estabilização de solos.

Foram então pesadas as quantidades dos outros materiais, cimento, microssílica e cinza de casca de arroz, com precisão de 0,01g, a fim de se obter as misturas pré-definidas anteriormente. Com os materiais pesados e o solo na umidade correta, o solo foi misturado utilizando uma batedeira, de forma que a mistura ficasse a mais homogênea possível.

Para a moldagem dos corpos de prova, foram utilizados moldes de Policloreto de Vinila (PVC). Como a moldagem mistura se mostrou muito complicada através do método usual (molde tripartido), a moldagem foi realizada em aproximadamente 6 camadas. Cada camada foi acomodada com 12 golpes em média. A fim de minimizar os vazios, foram realizadas 15 cravações com um palito.

Com os corpos de prova moldados, iniciou-se o processo de cura da mistura. Foi realizada a cura submersa do material, a fim de evitar a evaporação da água e manter o teor de umidade da amostra. Ao fim dos tempos de cura de cada combinação, foi realizado o desmolde do material. Logo após, os corpos de prova foram pesados e medidos, para então serem rompidos. Pode-se observar a forma final dos corpos de prova desmoldados na figura 26.

Figura 26 – Corpo de prova desmoldado



(fonte: foto da autora)

O processo de preparação da mistura para o ensaio de cravação de base alargada foi o mesmo que o descrito para o de ensaio à tração por compressão diametral. Porém, o material foi moldado em recipientes plásticos de dimensões 14x14x6,5 cm.

O processo de moldagem dos recipientes foi bem mais simples do que o realizado no processo anterior. Uma vez realizada a mistura, ela era despejada no pote até atingir a altura de 5 cm. Foram aplicados alguns golpes, em média 5, para acomodar o material e retirar eventuais grandes vazios.

Com os recipientes preenchidos, foram inseridas divisórias de plástico com o intuito de separar a mistura em quatro partes iguais. Assim, foi possível ensaiar a mistura para cada um dos três tempos de cura, sem propagar as fissuras de um lado para o outro da divisória, além, de se ter um quarto a mais para eventuais problemas durante os ensaios. Também, para se manter o teor de umidade, os recipientes foram curados com uma lâmina de aproximadamente 1cm acima da mistura. Os recipientes foram tampados durante os tempos de cura para evitar a evaporação da água. Como o ensaio foi realizado diretamente nos recipientes, não houve processo de desmoldagem. A figura 27 ilustra como foram realizadas as moldagens para o ensaio de cravação.

Figura 27 – Mistura moldada em recipiente para o ensaio de cravação de base alargada



(fonte: foto da autora)

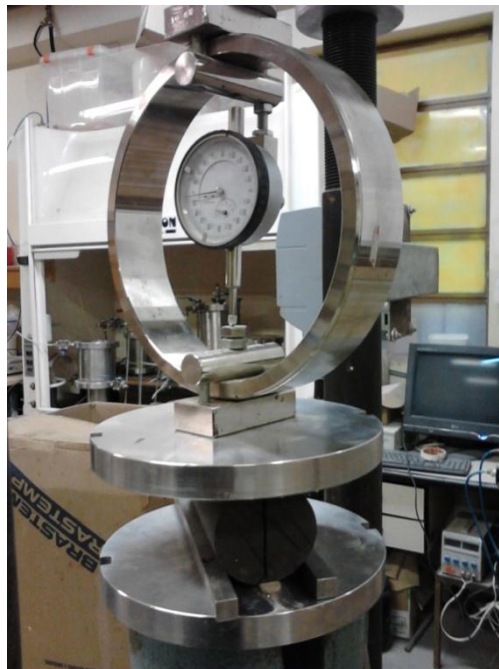


#### 4.2.2 Ensaio de tração por compressão diametral

Os ensaios de tração por compressão diametral seguiram o procedimento descrito pela norma NBR 7222 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994). Foi utilizado uma prensa automática com capacidade máxima de 100 kN, e um anel dinamométrico com capacidade de 10 kN com resolução de 0,005 kN. A velocidade utilizada nos ensaios foi de 1,14 mm/s.

A figura 28 mostra o ensaio sendo realizado. Já na figura 29 pode-se observar o padrão de ruptura das amostras.

Figura 28 – Prensa hidráulica e anel dinamométrico



(fonte: foto da autora)

Figura 29 – Ruptura do corpo de prova



(fonte: foto da autora)

### 4.2.3 Ensaio de cravação de base alargada

Como uma medida de controle, foram realizados ensaios de ponta simultâneos aos ensaios de tração por compressão diametral.

#### 4.2.3.1 O ensaio

O ensaio de cravação de base alargada foi desenvolvido na UFRGS pelo professor Nilo Cesar Consoli junto a dois alunos de mestrado, Daniel Winter e Andry Soares Rilho<sup>7</sup>. Seu objetivo é avaliar o ganho de resistência de solos extremamente moles. Como estes solos apresentam uma grande quantidade de finos e um teor umidade natural altíssimo, a moldagem de corpos de prova para realização de ensaios tradicionais, como ensaio de compressão ou de tração por compressão diametral, se torna complexa.

#### 4.2.3.2 Equipamentos

Utilizaram-se anéis de *nylon* com diferentes espessuras, conforme apresentado na figura 30. Para a medição das deformações, em cada anel foi utilizado um relógio comparador. Foram conectados ao equipamento ponteiros de ponta chata com diferentes áreas de ponta (0,5, 1, 2 e 4 cm<sup>2</sup>). Com isso, é possível aplicar-se diferentes tensões no solo empregando-se a mesma

---

<sup>7</sup> O ensaio citado está sendo desenvolvido sob orientação do professor Nilo Cesar Consoli pelos mestrandos Daniel Winter e Andry Rilho que participam atualmente do PPGEC, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

força. Cada ponteira possui marcações de centímetro em centímetro (1, 2, 3 e 4 cm) para que seja possível acompanhar a cravação desta no solo. Pode-se observar as ponteiras utilizadas na figura 31.

Os equipamentos descritos anteriormente devem ser conectados a uma prensa simples. Deve-se tomar cuidado para realizar a moldagem da mistura em recipientes suficientemente profundos para que se possa realizar o ensaio, aproximadamente 6 cm. Caso o ensaio seja realizado em campo, pode-se acoplar os equipamentos em uma prensa manual. O equipamento completo está apresentado na figura 32.

Figura 30 – Anéis de *nylon*



(fonte: foto da autora)

Figura 31 – Ponteiras com pontas chatas



(fonte: foto da autora)

Figura 32 – Equipamento completo

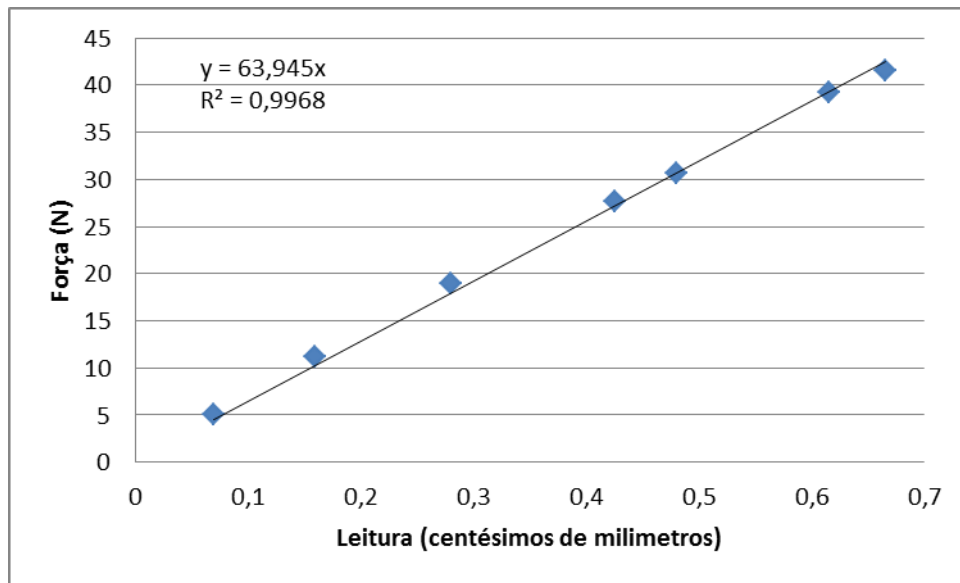


(fonte: foto da autora)

#### 4.2.3.3 Princípio de funcionamento do equipamento

Como todo anel dinamométrico ou anel de Newton, este anel, quando submetido a uma determinada carga de compressão ou tração, sofre uma deformação. Com esta deformação medida, pode-se correlacioná-la à força aplicada. A fim de obter-se esta correlação, foi executada a calibração de cada anel com a utilização de uma célula de carga previamente calibrada.

Com a aplicação de cada carga conhecida, foi gerada uma leitura correspondente. Nos ensaios realizados nesta pesquisa foi utilizado o anel de maior espessura (1,08 cm), que apresenta uma capacidade de 0,6 kN. O gráfico com a equação do anel utilizado encontra-se na figura 33.

Figura 33 – Leitura do anel *versus* força de cravação

(fonte: elaborado pela autora)

Com as equações de calibração de todos os anéis, e com uma ponteira selecionada, deve se medir a força máxima medida durante a cravação da haste até 3 cm da mistura. Com estes fatores conhecidos, se obtém a máxima tensão aplicada durante a cravação. Esta tensão pode ser comparada diretamente com a resistência a compressão simples (compressão) ou compressão diametral (tração) através da correlação obtida. A tabela 5 apresenta, para cada anel, as forças máximas e as tensões máximas e mínimas.

Tabela 5 – Força aplicada em no ensaio de cravação de base alargada

ANEL	ESPESSURA DA PAREDE DO ANEL (cm)	FORÇA MÁXIMA (N)	PRECISÃO (N)
1	1,08	639,450	0,639
2	0,61	121,100	0,121
3	0,43	35,165	0,035

(fonte: elaborado pela autora)

## 5. ANÁLISE DE RESULTADOS

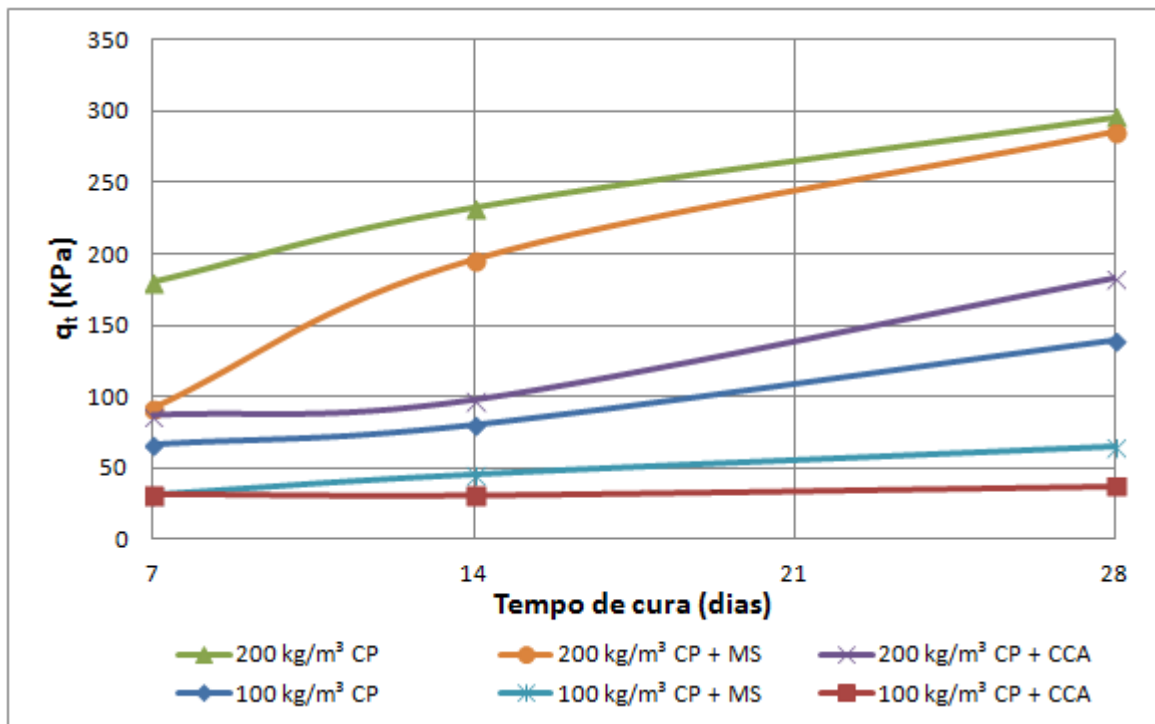
Os resultados da pesquisa realizada estão descritos a seguir.

### 5.1 GANHO DE RESISTÊNCIA DA MISTURA NO ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Foram analisados os dados obtidos através do ensaio de tração por compressão diametral, das diversas combinações de misturas realizadas em função do seu ganho de resistência, durante três tempos de cura pré-definidos (7, 14, 28 dias).

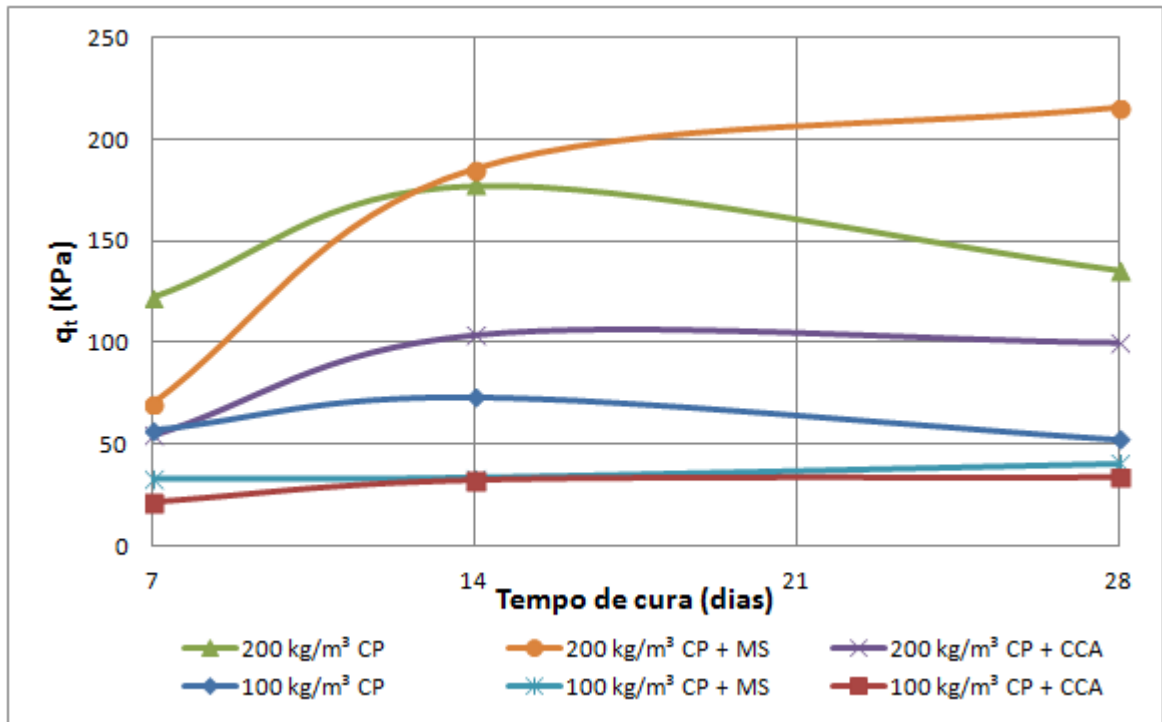
As figuras 34 a 36 apresentam os valores de resistência obtidos pelas misturas com os teores de umidade de 125, 150 e 175% respectivamente.

Figura 34 – Resistência à tração por compressão diametral *versus* tempo de cura para uma umidade de 125%



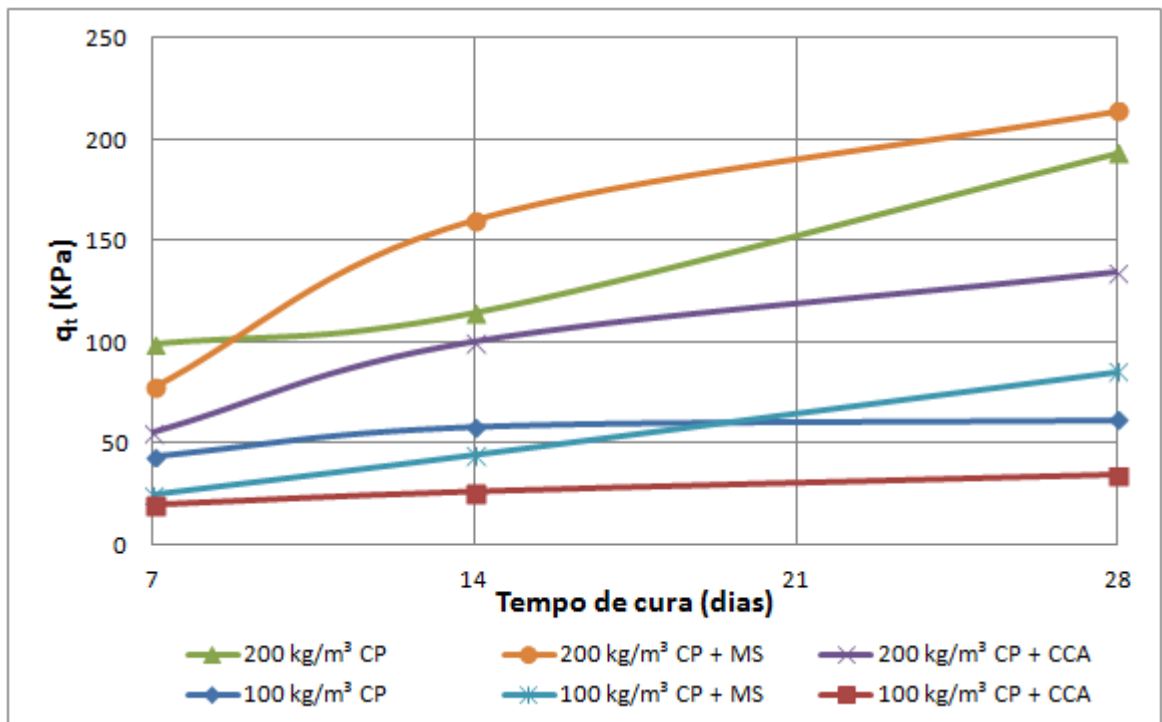
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 35 – Resistência à tração por compressão diametral *versus* tempo de cura para uma umidade de 150%



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 36 – Resistência à tração por compressão diametral *versus* tempo de cura para uma umidade de 175%



(fonte: elaborado pela autora)

Pode-se observar um aumento na resistência das misturas ao longo do tempo em todos os casos, com a exceção das misturas com 200 e 100 kg/m<sup>3</sup> de cimento com teor de umidade de 150%. Tal fato pode ser explicado por problemas na mistura dos materiais, ou na moldagem desses corpos de prova.

Observou-se na grande maioria das amostras, o ganho de resistência aos 28 dias de cura em relação aos 7 dias foi bastante superior a 20%. Conforme visto na bibliografia, este aumento de resistência do material ao longo do tempo, mesmo sendo utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial, pode ser explicado pela presença de ácidos húmicos em solos orgânicos, que retardam as reações de hidratação do cimento. Assim, mesmo utilizando-se um cimento de alta resistência inicial, o valor atingido aos 7 dias de cura não representa 80% da resistência da mistura.

As misturas com maior teor de material estabilizante obtiveram maiores resistências em seus respectivos teores de umidade. Pôde-se notar também que, a mistura com 200 kg/m<sup>3</sup> de CP e MS aos 28 dias de tempo de cura chega a valores próximos, ou até mesmo superiores, aos valores obtidos com a mesma quantidade de material estabilizante de cimento, demonstrando a eficiência das reações pozolânicas da microssílica.

Já as misturas com 200 kg/m<sup>3</sup> de CP com CCA, pode ser observado um aumento em relação às misturas que possuíam a mesma quantidade de cimento (100 kg/m<sup>3</sup> de CP), porém, o aumento de resistência do material não foi tão expressivo quanto ao 200 kg/m<sup>3</sup> de CP com MS.

Nas misturas com 100 kg/m<sup>3</sup> de CP com CCA para todas as umidade estudadas, não foi possível se obter a resistência de 50 kN/m<sup>2</sup> definida como mínima neste estudo. Já nas misturas com 100 kg/m<sup>3</sup> de CP com MS esse valor só foi alcançado aos 28 dias de cura pelas amostras com 125 e 175% de umidade. Isto pode indicar que, nas combinações que não atingiram o valor estipulado, o teor de material estabilizante é insuficiente para o volume de solo usado no ensaio.

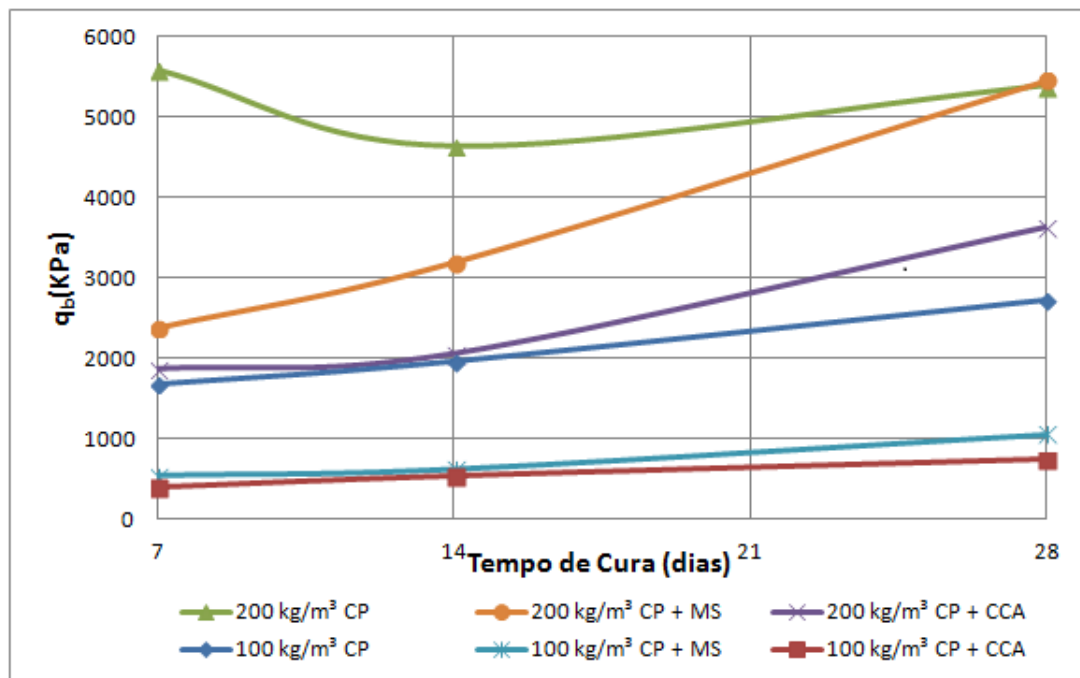


## 5.2 GANHO DE RESISTÊNCIA DA MISTURA NO ENSAIO DE CRAVAÇÃO DE BASE ALARGADA

Foram analisados os dados obtidos através do ensaio de cravação de base alargada das diversas combinações de misturas realizadas em função do seu ganho de resistência, durante três tempos de cura pré-definidos (7, 14, 28 dias).

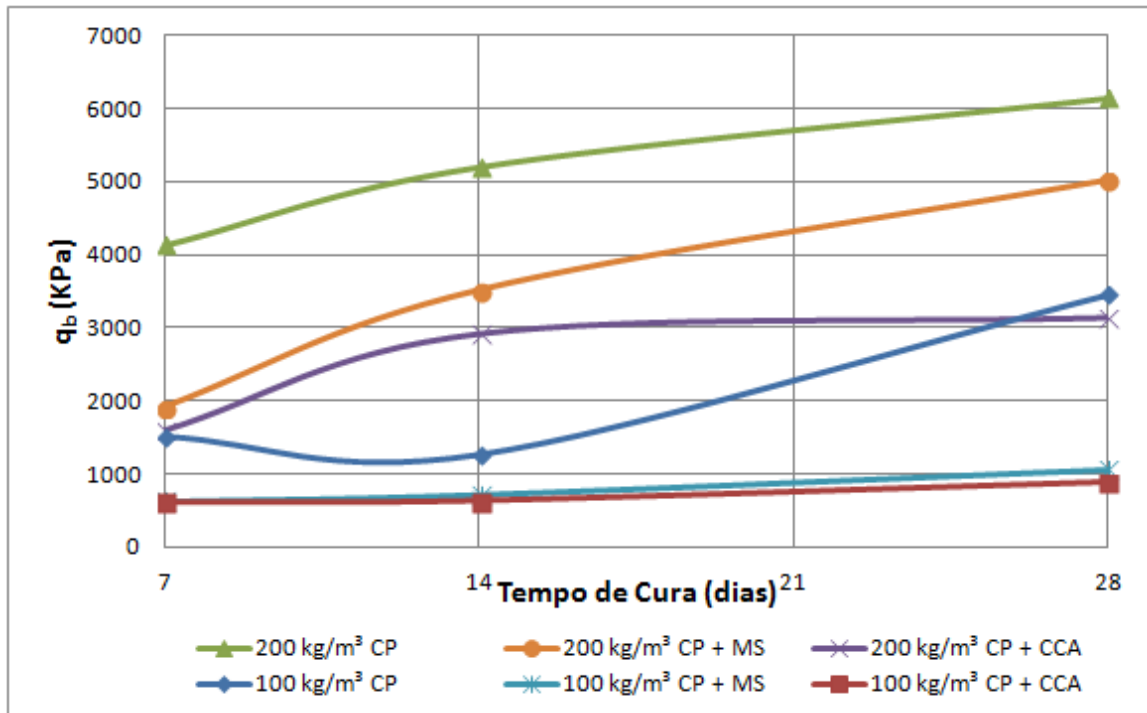
As figuras 37 a 39 apresentam o ganho de resistência obtido pelas misturas com os teores de umidade iguais a 125, 150 e 175% respectivamente.

Figura 37 – Resistência à cravação de base alargada *versus* tempo de cura para uma umidade de 125%



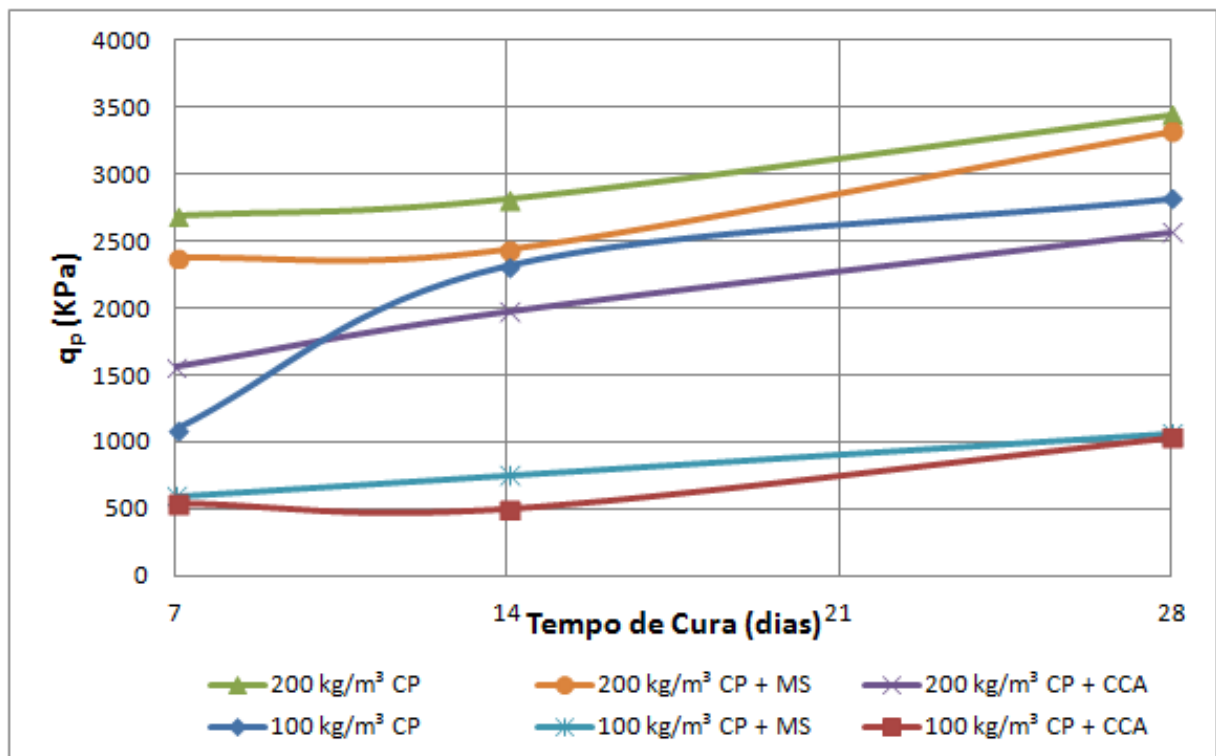
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 38 – Resistência à cravação de base alargada *versus* tempo de cura para uma umidade de 150%



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 39 – Resistência à cravação de base alargada *versus* tempo de cura para uma umidade de 175%



(fonte: elaborado pela autora)

Analogamente ao constatado no ensaio de tração por compressão diametral, observou-se um aumento na resistência das misturas ao longo do tempo. O pico de resistência visto no ensaio da mistura com 200 kg/m<sup>3</sup> de cimento, com teor de umidade de 125% aos 7 dias de cura, pode ser explicado por falhas na realização da mistura dos materiais ou no processo de moldagem do pote.

Pode-se notar também que, a mistura com 200 kg/m<sup>3</sup> de cimento e microssílica aos 28 dias de tempo de cura atinge valores próximos aos obtidos com a mesma quantidade de material estabilizante de cimento.

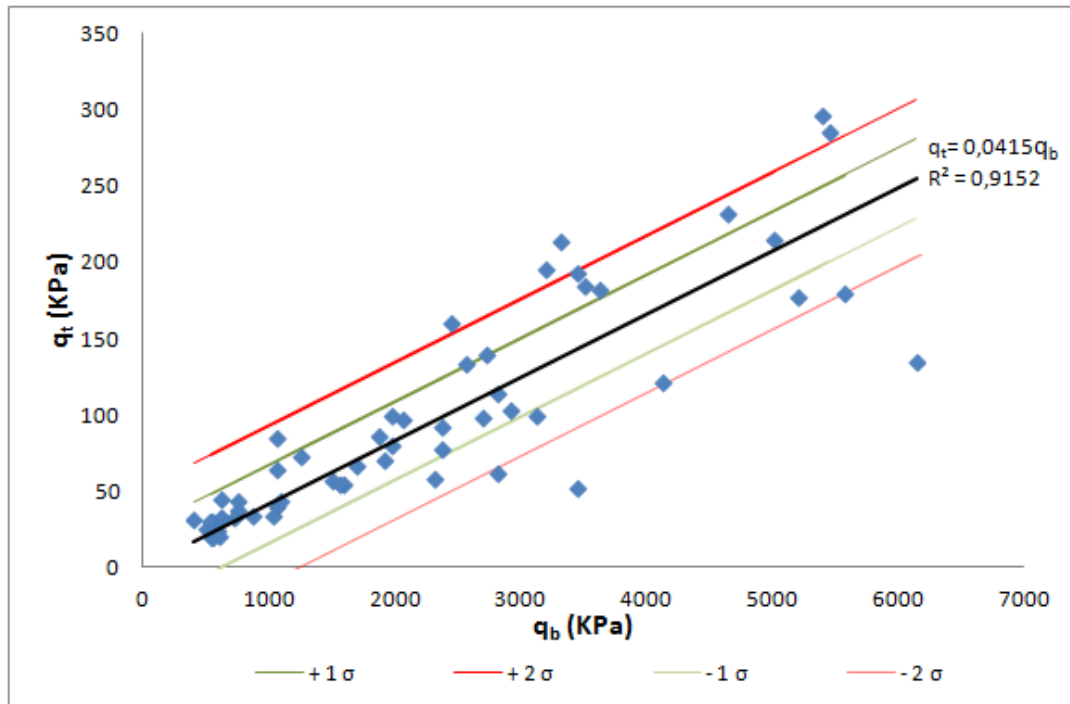
### 5.3 RELAÇÃO ENTRE O ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL E O ENSAIO DE CRAVAÇÃO DE BASE ALARGADA

Conforme apresentado na bibliografia, é possível estabelecer uma relação entre diferentes ensaios para a obtenção da resistência de um material. Como este trabalho é o primeiro estudo a utilizar o método de cravação de base alargada para avaliação da resistência de solos moles desenvolvido no LEGG/UFRGS, a correlação entre os ensaios é crucial para demonstrar a sua viabilidade.

Confrontando os valores obtidos nos ensaios de tração por compressão diametral com os obtidos nos ensaios de cravação de base alargada, foi obtida uma relação linear entre os dois ensaios. Pode-se observar essa relação na figura 40.

Observou-se que com o aumento da resistência há um aumento da variabilidade dos resultados, porém, a maioria dos valores encontra-se dentro da faixa de duas vezes o desvio padrão da nuvem de pontos, indicando que a tendência pode ser considerada válida.

Figura 40 – Relação entre os ensaios de tração por compressão diametral e cravação de base alargada

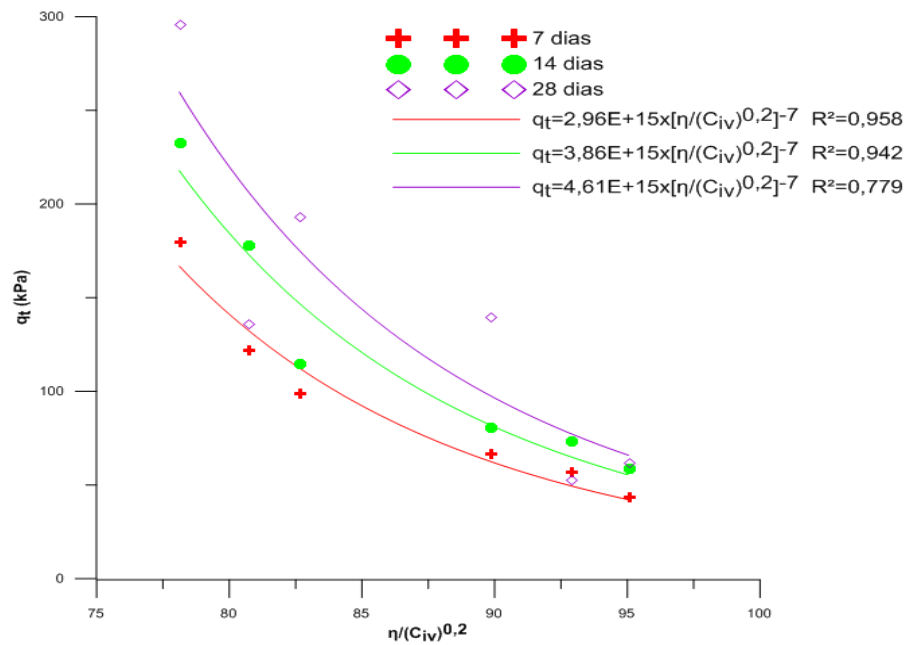


(fonte: elaborado pela autora)

#### 5.4 EFEITO DA RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO

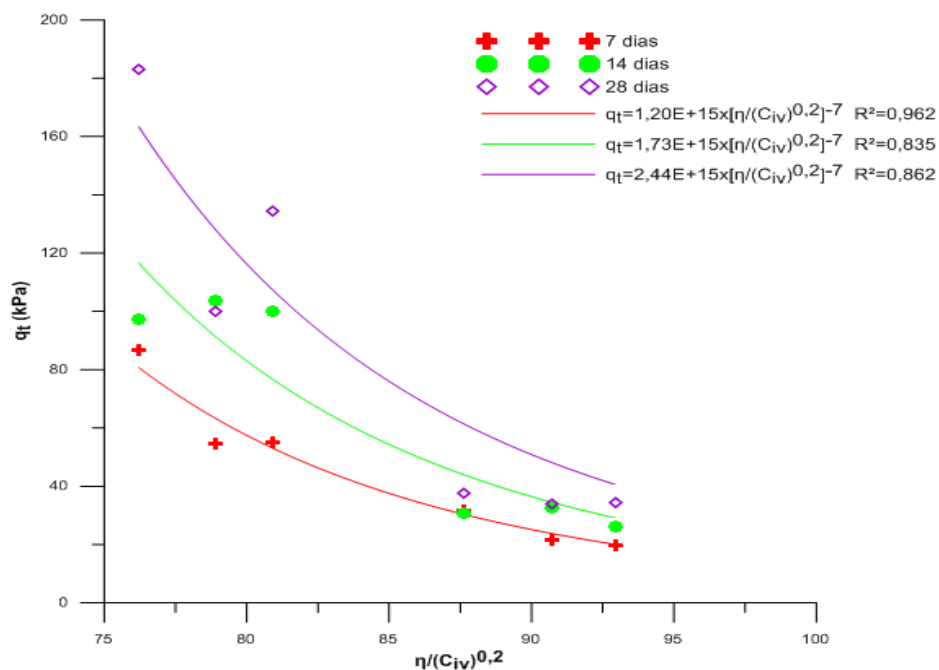
A influência da relação entre a porosidade e o teor volumétrico de cimento [ $\eta/(c_{iv}^{0,20})$ ] no aumento da resistência à tração por compressão diametral da mistura pode ser observada nas figuras 41 a 43. A figura 41 apresenta as curvas obtidas para os diferentes tempos de cura das misturas, onde foi somente utilizado cimento como material estabilizante. Na figura 42, estão ilustradas as curvas para as misturas onde foram utilizados cimento e cinza de casca de arroz como material estabilizante, e por fim, na figura 43, encontram-se as curvas para as misturas em que foi utilizado cimento e microssílica.

Figura 41 – Variação da resistência à tração por compressão diametral ( $q_t$ ) e a porosidade e o teor volumétrico de cimento ajustado ( $\eta/c_{iv}^{0,20}$ ) para as misturas com cimento



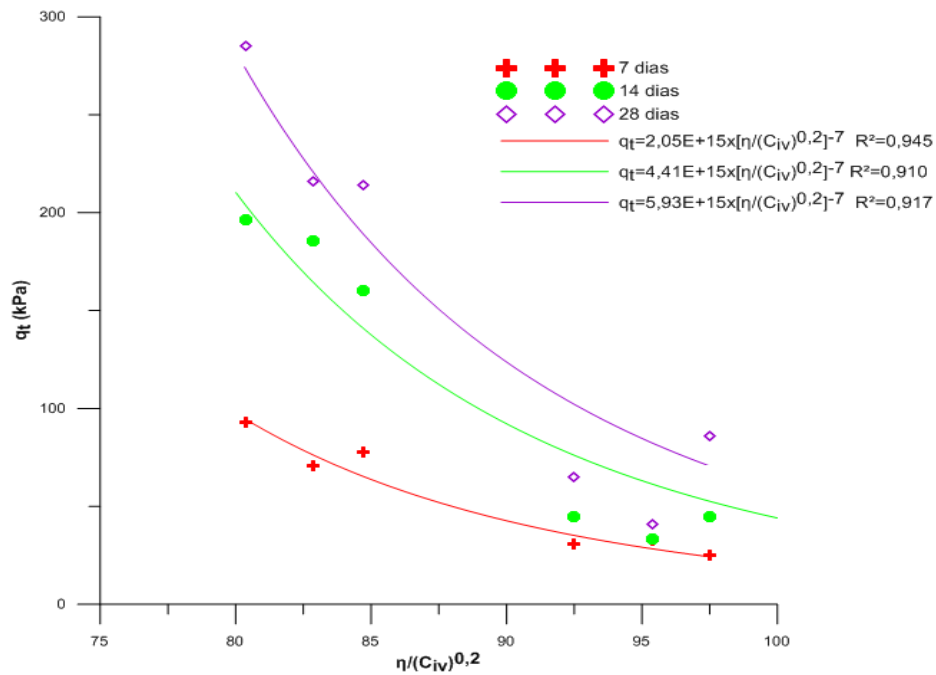
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 42 – Variação da resistência à tração por compressão diametral ( $q_t$ ) e a porosidade e o teor volumétrico de cimento ajustado ( $\eta/c_{iv}^{0,20}$ ) para as misturas com cimento e cinza de casca de arroz



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 43 – Variação da resistência à tração por compressão diametral ( $q_t$ ) e a porosidade e o teor volumétrico de cimento ajustado ( $\eta/c_{iv}^{0,20}$ ) para as misturas com cimento e microsilica



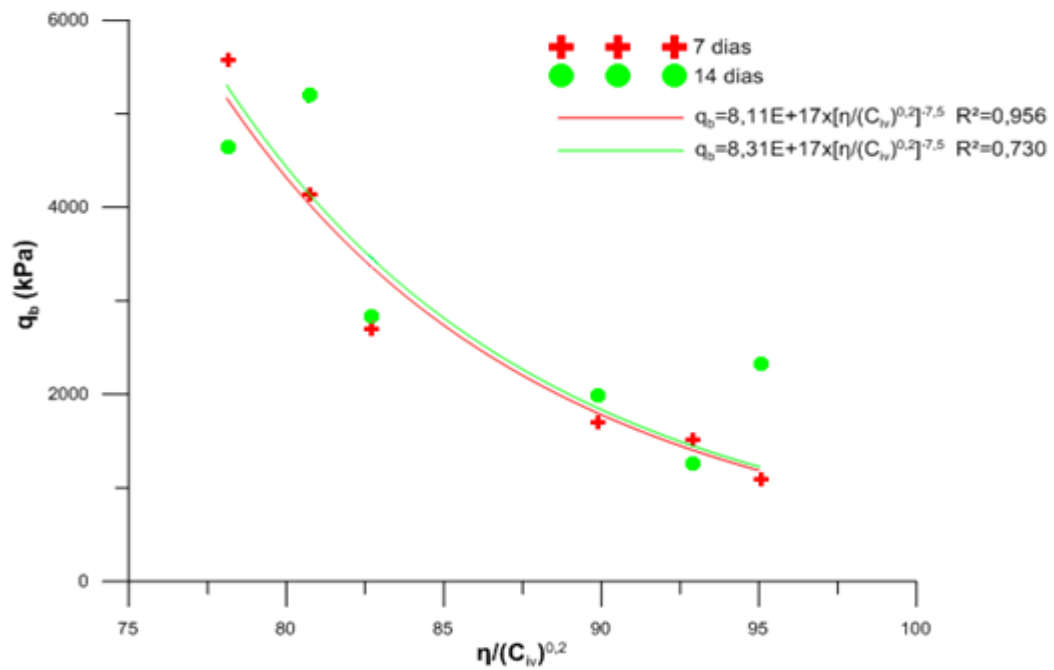
(fonte: elaborado pela autora)

É possível observar, através da análise dos gráficos, que há um aumento exponencial da resistência à tração das misturas com a diminuição da relação  $\eta/c_{iv}$ . Essa relação é coerente com as vistas na bibliografia.

Também de acordo com o que foi visto na bibliografia, constatou-se que a utilização de um expoente no valor de 0,20 sobre o teor volumétrico de cimento das misturas ajuda a compatibilizar a taxa de variação dos termos.

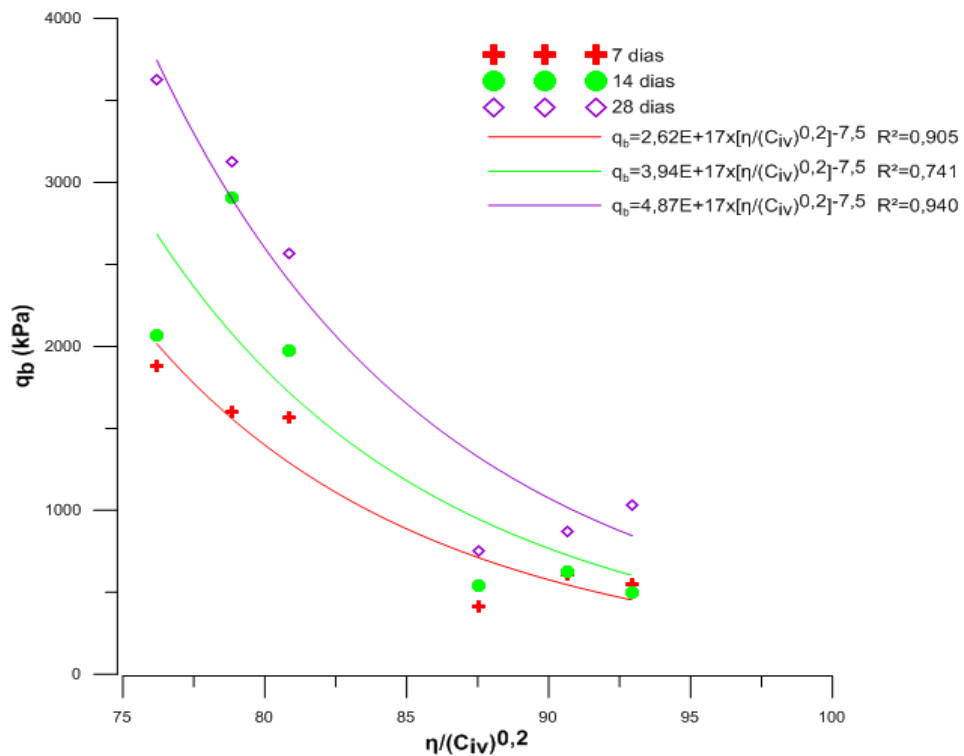
Utilizando-se o mesmo expoente de ajuste sobre o teor volumétrico de cimento, o ensaio de cravação de base alargada mostrou a mesma tendência observada no ensaio de tração. Houve um aumento exponencial da resistência da mistura com a redução da razão entre a porosidade e o teor volumétrico de cimento ajustado por um expoente ( $\eta/c_{iv}^{0,20}$ ), conforme ilustrado nas figuras 44 a 46. A primeira apresenta a relação para misturas somente com cimento, a segunda, para misturas com cimento e cinza de casca de arroz, e por fim, a figura 46 mostra a relação para misturas com cimento e microsilica.

Figura 44 – Variação da resistência à cravação de base alargada ( $q_b$ ) e a porosidade e o teor volumétrico de cimento ajustado ( $\eta/c_{iv}^{0,20}$ ) para as misturas com cimento



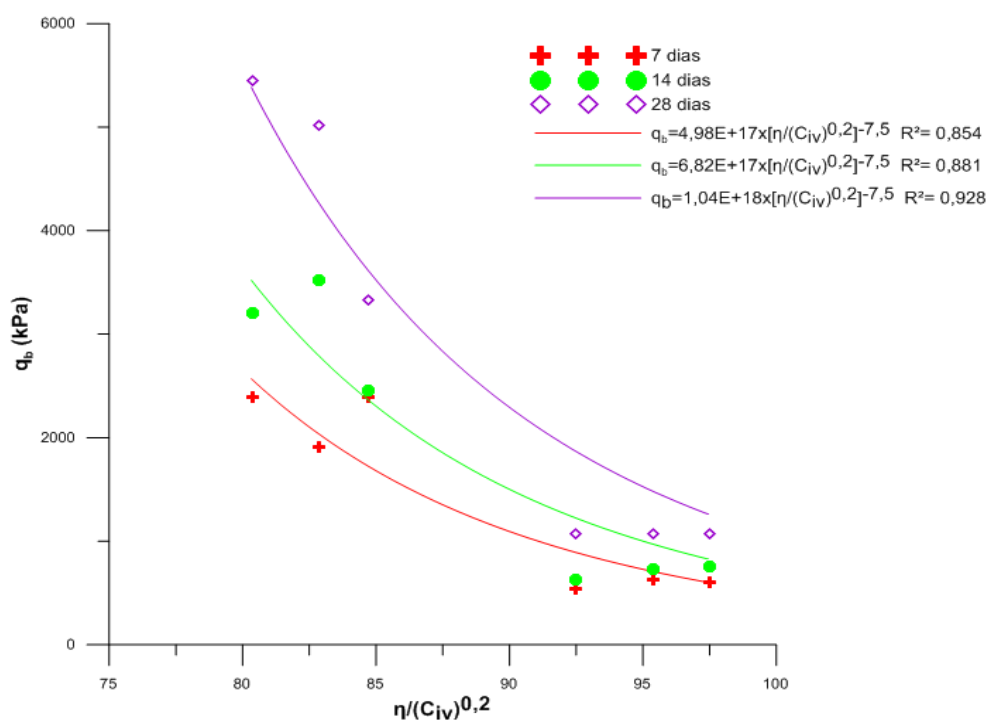
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 45 – Variação da resistência à cravação de base alargada ( $q_b$ ) e a porosidade e o teor volumétrico de cimento ajustado ( $\eta/c_{iv}^{0,20}$ ) para as misturas com cimento e cinza de casca de arroz



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 46 – Variação da resistência à cravação de base alargada ( $q_b$ ) e a porosidade e o teor volumétrico de cimento ajustado ( $\eta/c_{iv}^{0,20}$ ) para as misturas com cimento e microsílica



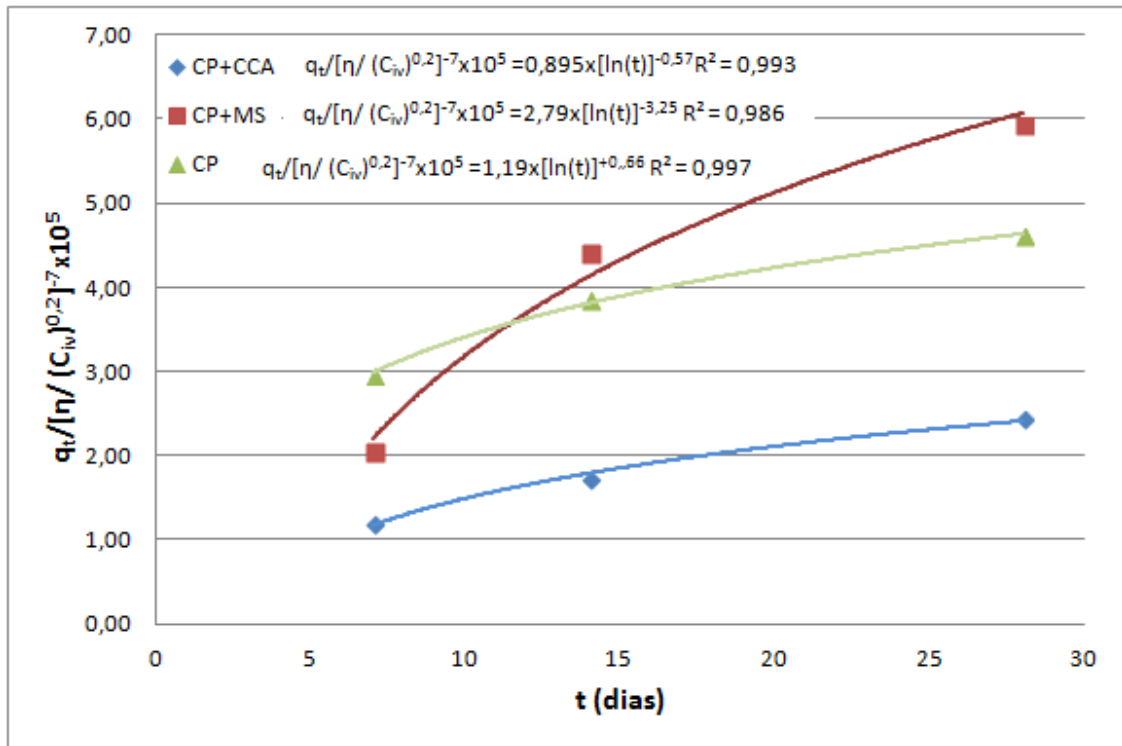
(fonte: elaborado pela autora)

Os gráficos mostram um bom ajuste das curvas aos dados obtidos experimentalmente, apresentando um aumento da resistência com o tempo de cura, portanto, a relação  $\eta/c_{iv}$  pode ser considerada válida.

É possível observar nos gráficos dos ensaios de resistência à tração (figuras 41 a 43) uma relação direta entre  $q_t$  e  $[\eta/(C_{iv})^{0,2}]^{-7}$ , e nos gráficos dos ensaios de resistência à cravação (figuras 44 a 46) uma relação direta entre  $q_b$  e  $[\eta/(C_{iv})^{0,2}]^{-7,5}$ . Por tanto, as equações se diferem somente por um escalar dependente do tempo de cura da mistura. As figuras 47 e 48 apresentam as curvas da relação entre a  $q/[\eta/C_{iv}]$  em função do tempo de cura para as diferentes misturas, sendo o primeiro gráfico realizados com os dados obtidos pelo ensaio de tração e o segundo com os dados do ensaio do cravação

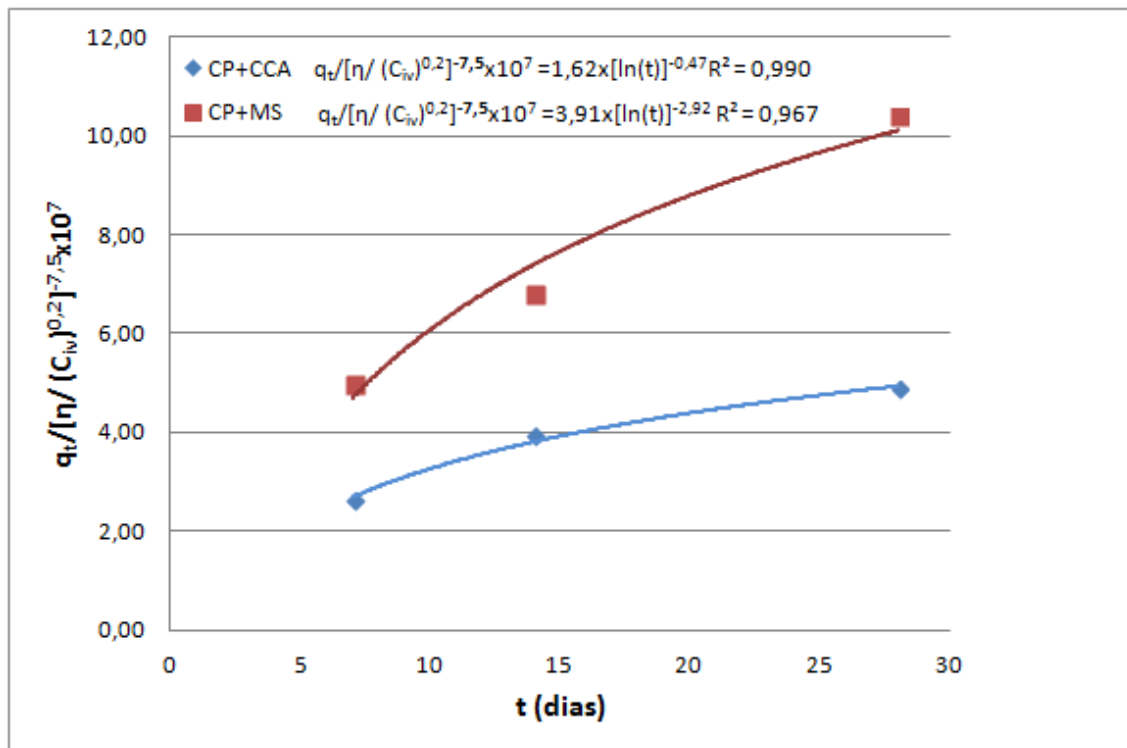


Figura 47 – Resistência à tração ( $q_t$ ) com a relação  $\eta/(C_{iv})^{0,2}$  versus o tempo de cura



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 48 – Resistência à cravação ( $q_b$ ) com a relação  $\eta/(C_{iv})^{0,2}$  versus o tempo de cura



(fonte: elaborado pela autora)

Com as equações apresentadas nos gráficos, é possível realizar uma estimativa da resistência deste solo, à tração ou à cravação, a partir da escolha da porosidade e do teor de cimento adequados para a umidade natural do solo utilizado. Esses resultados também apontam a possibilidade de avaliar o tempo necessário para que se obtenha a resistência desejada. Assim, método proporciona a possibilidade de adequação da mistura não só em função do solo, mas também em função da disponibilidade de material e do tempo, que são pontos cruciais em obras de Engenharia.

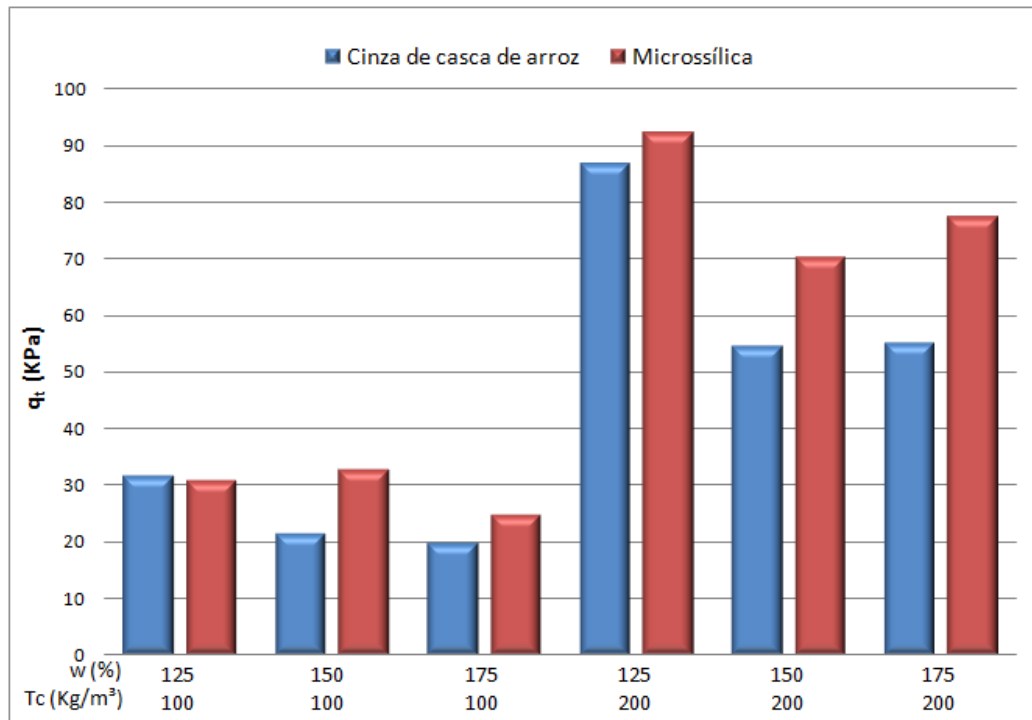
Pode-se observar que as misturas de CP+MS obtiveram um aumento mais acentuado ao longo do tempo estudado. Isso pode se dar pelo fato das reações pozolânicas, que ocorrem devido ao alto teor de sílica amorfa presente no material, só ocorrerem após as reações de hidratação do cimento. E, como as reações de hidratação do cimento acontecem de forma mais lenta, devido aos ácidos húmicos presentes no solo orgânico, é necessário um maior tempo de cura para que as reações pozolânicas ocorram. A cinza de casca de arroz utilizada nesse estudo provavelmente não possui teores tão altos de sílica amorfa, assim, esse efeito não se torna tão significativo.

Na mistura onde somente foi adicionado cimento aos 28 dias de tempo de cura, não foi possível se obter um bom ajuste. Esse fato pode ser atribuído a problemas na fase de moldagem dos recipientes. Por esse motivo, não foi possível realizar a análise desses dados.

## 5.5 COMPARAÇÃO DO GANHO DE RESISTÊNCIA ENTRE POZOLANAS

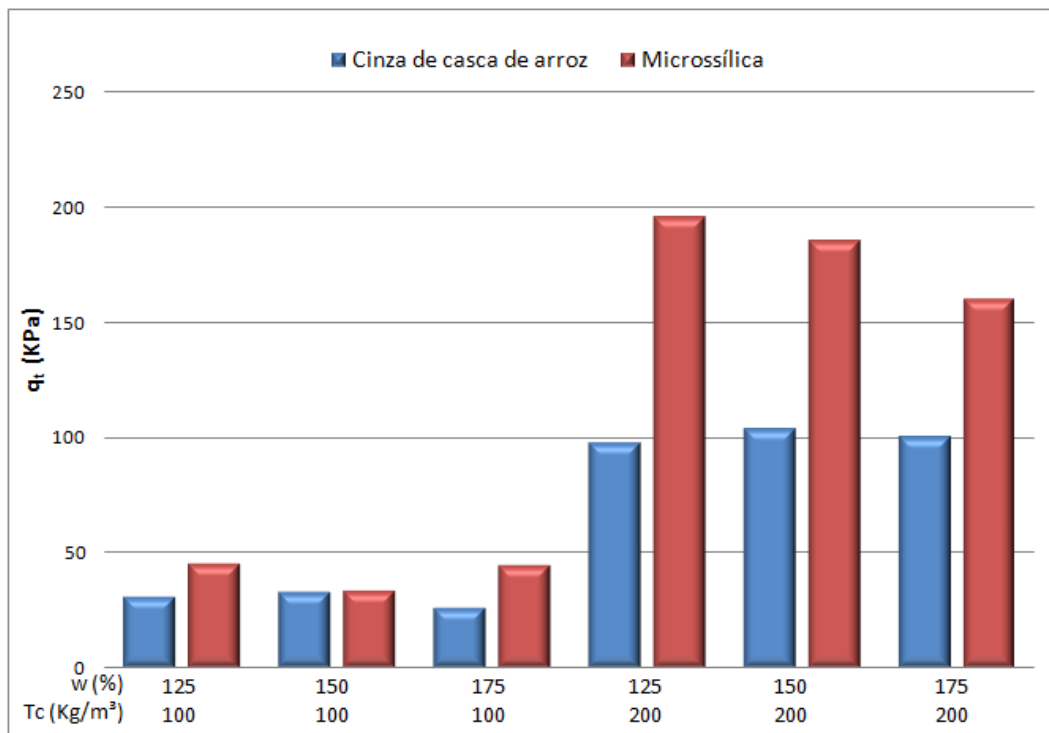
Os gráficos apresentados nas figuras 49 a 51 confrontam os valores de resistências obtidos pelas duas pozolanas utilizadas nas pesquisas, cinza de casca de arroz e microsílica, durante os três tempos de cura estudados.

Figura 49 – Comparação do ganho de resistência entre pozolanas para 7 dias de cura



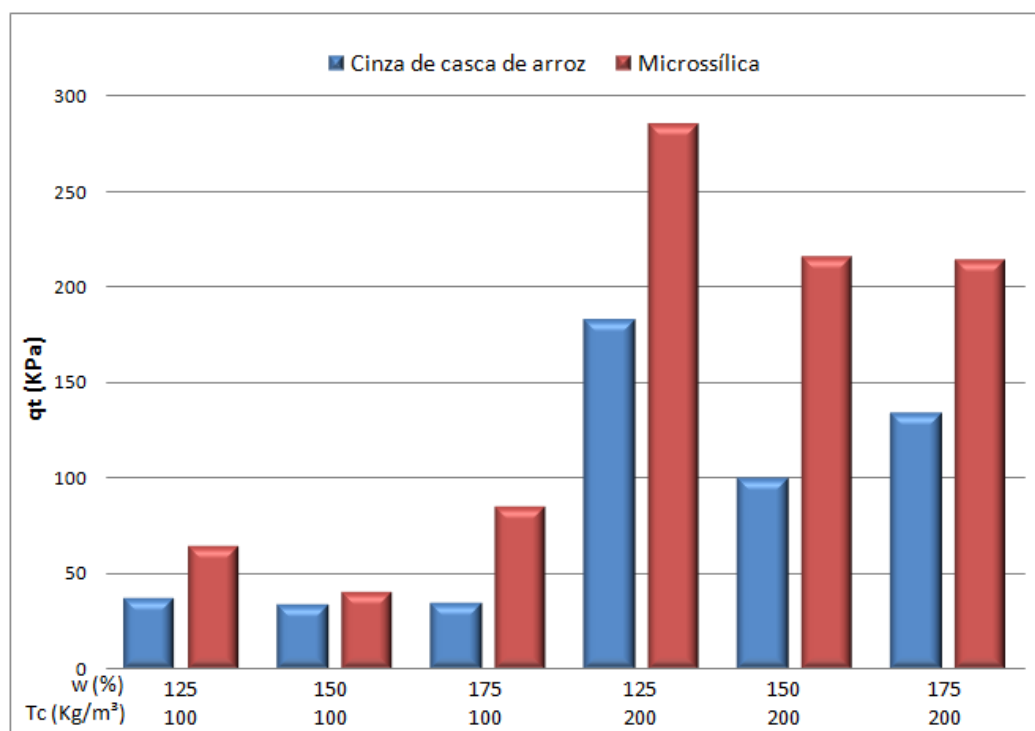
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 50 – Comparação do ganho de resistência entre pozolanas para 14 dias de cura



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 51 – Comparação do ganho de resistência entre pozolanas para 28 dias de cura



(fonte: elaborado pela autora)

Através desta comparação, é possível observar que os valores de resistência à tração por compressão diametral foram maiores para as misturas em que foi utilizada a microsílica como pozolana, apesar de o diâmetro médio da cinza de arroz ser menor do que a da microsílica. Este fenômeno pode ocorrer devido a menor quantidade de sílica amorfa presente na cinza de casca de arroz. Conforme visto na bibliografia, o processo de queima da casca de arroz é um fator que influencia diretamente os valores de sílica amorfa presentes no material final se tornam menores.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos através do programa experimental e a análise de resultados foi possível estabelecer as seguintes conclusões.

Há um aumento no valor da resistência do material com o aumento do teor de material estabilizante e do tempo de cura da mistura.

Se utiliza 200 kg/m<sup>3</sup> de teor de material estabilizante, sendo 50% deste valor microssílica, apresentaram valores próximos, e até superiores aos valores obtidos pelas misturas com o mesmo teor de material estabilizante, porém, sem presença de alguma pozolana. Isso aponta que a utilização de misturas com microssílica para a estabilização de solos orgânicos é bastante eficiente, e proporciona a redução da quantidade de cimento da mistura sem que haja grandes perdas de resistência.

O tempo de cura mostrou-se um fator importante no ganho de resistência das misturas estudadas, mesmo sendo utilizado um cimento de alta resistência inicial.

É possível estabelecer uma relação linear entre os ensaios de tração por compressão diametral e cravação de base alargada através das resistências  $q_t$  e  $q_b$ .

A resistência da mistura, tanto à tração ( $q_t$ ) quanto à cravação ( $q_b$ ), aumenta exponencialmente com a redução da relação vazios/cimento ajustado ( $\eta/c_{iv}^{0,20}$ ). O valor do ajuste exponencial para o teor volumétrico de cimento que foi considerado adequado para este tipo de solo foi de 0,20 para ambos ensaios.

A microssílica utilizada apresentou-se como uma pozolana mais eficiente que a cinza de casca de arroz para esta mistura de solo orgânico. Acredita-se que esse fenômeno se deve ao fato da microssílica utilizada neste estudo apresentar um maior teor de sílica amorfa.

A hipótese da pesquisa de que se obteriam valores de resistência à tração por compressão diametral, compatíveis com valores utilizados em obras de Engenharia (50 kN/m<sup>2</sup>), nas

misturas sem presença de pozolana, e nas misturas com presença da pozolana, mas com o maior teor de aglomerante ( $200 \text{ kg/m}^3$ ) foi confirmada. Porém, também se obtiveram valores aceitáveis nas misturas com  $100 \text{ kg/m}^3$  de cimento com microssílica e teores de 125 e 150% de umidade aos 28 dias de cura. Portanto, todas as misturas e combinações citadas anteriormente apresentaram proporções de materiais válidas para a realização de uma camada de suporte para diversas obras de Engenharia.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como proposta para estudos futuros que deem continuidade a este trabalho sugere-se:

- a) a realização de ensaios com mais dois teores de cimento, 50 e  $150 \text{ kg/m}^3$ , para que seja possível a análise da influência do teor de cimento no aumento de resistência do material e para complementar os gráficos  $f/C_{iv}$  realizados nesse trabalho;
- b) a realização de ensaios com maior tempo de cura, a fim complementar a avaliação da evolução do ganho de resistência das amostras, principalmente das misturas com microssílica;
- c) realização de ensaios de compressão simples para as combinações estudadas, a fim de complementar a validade das correlações obtidas entre os ensaios realizados neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2487**: standard practice for classification of soils for Engineering purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: massa específica real dos sólidos. Rio de Janeiro, 1984a.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6459**: solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984b.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7180**: solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984c.
- \_\_\_\_\_. **NBR 12.533**: solo-cimento – dosagem para emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro, 1992.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7222**: argamassa e concreto – determinação da resistência à tração por compressão diametral com corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. **Design Guide**: soft soil stabilization – development of design and construction methods to stabilize soft organic soils – soft soil stabilization. 1st ed. Watford: IHS BRE Press, 2002.
- CONSOLI, N. C.; THOMÉ, A.; CERATTI, J. A. P. Engineering properties of organic soft soil-lime mixtures. In: SYMPOSIUM ON RECENT DEVELOPMENTS IN SOIL AND PAVEMENT MECHANICS, 1997, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rotterdam: Balkema, 1997, p 217-222.
- CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. Key parameters for strength control of artificially cemented soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Reston, v. 133, n. 2, p. 197-205, Feb. 2007.
- CONSOLI, N. C.; CRUZ, R. C.; FLOSS, M. F. Variables controlling strength of artificially cemented sand: influence of curing time. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Reston, v. 23, n. 5, p. 629-696, May 2011a.
- CONSOLI, N. C.; FONSECA, A. V.; CRUZ, R. C.; SILVA, S. R. Voids/cement ratio controlling strength of cement-treated soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Reston, v. 137, n. 11, p. 1126-1131, Nov. 2011b.
- CORREIA, A. A. S. **Aplicabilidade da técnica de deep mixing aos solos do Baixo Mondego**. 2011. 445 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil na Especialidade de Geotecnia e Fundações) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2011.
- DALLA ROSA, A. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal**. 2009. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Rice husk ash as an alternative source for silica production. **Material Letters**, Elsevier, v. 57, n. 4, p. 818-821, Dec. 2002.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Petrographic methods of examining hardened concrete**: a petrographic manual. Washington D.C., July 2006. Disponível em: <<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/04150/chapt11.cfm>>. Acesso em: 7 out. 2012.

FOPPA, D. **Análise da 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.

GRADEX LTD. **Mass stabilization**. Budapest, Hungary, 2012. Disponível em: <[http://www.gradex.hu/en/mass\\_stabilization/](http://www.gradex.hu/en/mass_stabilization/)>. Acesso em: 30 nov. 2012.

HARTLÉN, J.; WOLSKI, W. **Embankments on Organic Soils**. Amsterdam: Elsevier, 1996.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization**: principles and practice. Sydney: Butterworths, 1972.

LOPES JUNIOR, L. S. **Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada**. 2007. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. 1. ed. São Paulo: Pini, 1994.

NK ENTERPRISES. **Rice Husk Ash**. Orissa, Índia, 2008. Disponível em: <<http://www.ricehuskash.com/index.htm>>. Acesso em: 18 mar. 2013.

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

PRASANPHAN, S.; SANGUANPAK, S.; WANSOM, S.; PANYATHANMAPORN, T. Effect of ash content and curing time on compressive strength of cement paste with rice husk ash. **Suranaree Journal of Science and Technology**, Muang, v. 17, n. 3, p. 293-302, Jul. 2010.

SIDDIQUE, R.; KHAN, M. I. **Supplementary Cementing Materials**: engineering materials. 1st ed. Berlin: Springer, 2011.

SILICA FIUME CONCRETE INDUSTRY CO. LTD. **Silica-fume-concrete**. Xiamen, China, 2010. Disponível em: <<http://www.silica-fume-concrete.com/>>. Acesso em: 24 nov. 2012.

SILVANI, C. **Influência da temperatura de cura no comportamento mecânico de misturas areia-cinza volante-cal**. 2013. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) –



Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

THOMAZ, E. C. S. **Ensaio de Compressão Diametral – Notas de Aula**. Rio de Janeiro, Brasil, 2013. Disponível em: <[http://netulio.weebly.com/uploads/9/0/6/6/9066781/compresso\\_diametral.pdf](http://netulio.weebly.com/uploads/9/0/6/6/9066781/compresso_diametral.pdf)>. Acesso em: 15 maio 2013.

THOMÉ, A.; DONATO, M.; CONSOLI, N. C.; GRAHAM, J. Circular footings on a cemented layer above weak foundation soil. **Canadian Geotechnical Journal**, Ottawa, v. 42, p. 1569-1584, 2005.

TIMONEY, M. J.; MC CABE, B. A.; BELL, A. L. Experiences of dry soil mixing in highly organic soils. **Ground Improvement**, London, v. 165, n. 1, p. 3-14, Feb. 2012.

TURGUT, P. Manufacturing of building bricks without Portland cement. **Journal of Cleaner Production**, St Louis, v. 37, p. 361-367, 2012.