

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Comportamento Mecânico de um Solo Mole Orgânico Cimentado  
com Aglomerantes Variados

Lucas Quiocca Zampieri

Porto Alegre  
2015

LUCAS QUIOCCA ZAMPIERI

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO MOLE  
ORGÂNICO CIMENTADO COM AGLOMERANTES VARIADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia. Orientação: Prof. Ph.D. Nilo Cesar Consoli.

Porto Alegre  
2015

Zampieri, Lucas Quiocca  
Comportamento mecânico de um solo mole orgânico  
cimentado com aglomerantes variados / Lucas Quiocca  
Zampieri. -- 2015.  
118 f.

Orientador: Nilo Cesar Consoli.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-  
RS, 2015.

1. Geotecnia. 2. Melhoramento de solos. 3. Solos  
moles orgânicos . I. Consoli, Nilo Cesar, orient. II.  
Título.

LUCAS QUIOCCA ZAMPIERI

## **COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO MOLE ORGÂNICO CIMENTADO COM AGLOMERANTES VARIADOS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 12 de Maio de 2015.

**Prof. Nilo Cesar Consoli**

Ph.D. Concordia University, Canadá

Orientador

**Prof. Armando Miguel Awruch**

Coordenador do PPGEC/UFRGS

### **BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Pedro Domingos Marques Prietto (UPF)**

Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

**Prof. Alexandre Rodrigues Pacheco (UFRGS)**

Ph.D. Pennsylvania State University, USA

**Prof. Fernando Schnaid (UFRGS)**

D.Phil. University of Oxford, United Kingdom

**Prof. Lucas Festugato (UFRGS)**

Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais Renato e Lorena Zampieri por todo o amor que me foi dado, pela força e confiança nos momentos em que mais precisei ser amparado.

A minha namorada Daniela Dolsan Lopes pelo total apoio, a tantas idas até Porto Alegre, ao acolhimento em qualquer momento, estando sempre ao meu lado, me alegrando e auxiliando da melhor maneira possível.

Ao professor e amigo Nilo Consoli, por toda a confiança dedicada, ao conhecimento repassado, incentivo, pelo entusiasmo e total disponibilidade presente durante as conversas. Pela orientação como um todo, desde o início do mestrado me apresentando esta nova fase da vida acadêmica.

A todos os professores da área da Geotecnia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, pelos conhecimentos repassados e pela amizade.

Aos amigos e colegas ingressos no mestrado do ano de 2013, sempre presentes nas conversas e momentos descontraídos, nos momentos tensos, nas tarefas de laboratório, estudos e churrascos, Alejandro Quiñonez, Nestor Kanasawa, Ricardo Born, e Willian Fedrigo. Aos doutorandos Sérgio Marques e Jorge Florez, pelas tantas conversas e conselhos. A todos os amigos que fiz no LEGG sejam eles nacionais ou importados, e todos os bolsistas que me auxiliaram de alguma forma em todo o período do mestrado.

Agradecer ao Professor (lê-se “Proféssor”) Lucas Festugato, a todo o conhecimento que sem titubear nos repassa, estando sempre disponível para conversar, aconselhar, indicar a melhor forma de proceder. Além de professor, o meu grande amigo e xará sempre esteve disponível para tantas idas ao Gigante da Beira-Rio, ou para degustar um saboroso churrasco, dar muitas risadas, conversar sobre os mais variados assuntos, e “transformar líquidos em amizade” me envaideço com a sua amizade, e de sua namorada Marina Bellaver Corte que por inúmeras vezes me receberam sempre tão acolhedores a vossa residência.

Ao Seu João Diniz pela disponibilidade em ajudar a resolver tantos problemas, pela amizade construída nesse período, e pelo mate matinal.

Ao professor Fabiano Alexandre Nienov que me orientou durante a fase de graduação e me deu total apoio a dar continuidade na vida acadêmica, me apresentado o mundo da

pesquisa. E a todos os mestres que passaram pela minha formação durante toda a vida estudantil.

Por fim agradecer a CNPq e a UFRGS pelo suporte financeiro, que proporcionaram a realização deste trabalho.

“Na Natureza nada se cria, nada se perde,  
tudo se transforma”

*Antoine Laurent de Lavoisier*

## RESUMO

ZAMPIERI, L.Q. **Comportamento Mecânico de um Solo Mole Orgânico Cimentado com Aglomerantes Variados**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Num mundo obcecado pelas inovações e sedento pela velocidade, percebe-se a necessidade da constante busca por soluções em todas as áreas do conhecimento. Dentro da Geotecnia isso pode ser obtido com propostas geotécnicas que proporcionem custo reduzido, incluindo preservação dos recursos naturais. Promover o aproveitamento de solos que não apresentam características geotécnicas adequadas é um dos pontos observados nas pesquisas de inovações geotécnicas. Adequar o solo a características de resistência à compressão simples e valores de módulo de cisalhamento inicial, melhorando-o com o uso de cimentos já firmados no mercado nacional, e cimentos alternativos obtidos com a adição de resíduos é a linha que conduz esta pesquisa, que possui como objetivo principal verificar a influência da adição de cimentos em um solo mole orgânico do município de Porto Alegre – RS, Brasil. As misturas eram compostas por um único solo matriz e vários tipos de agente cimentante, sendo eles: cimento Portland CP V-ARI mais escória de alto forno moída (grossa); cimento Portland CP V-ARI mais escória de alto forno moída (fina); cimento Portland CP V-ARI mais fosfogesso (dihidratado); cimento Portland CP V-ARI mais fosfogesso (hemihidratado); cimento Portland CP V-ARI mais cal viva; e cimento Portland CP V-ARI. Os teores de tais agente cimentantes foram fixados em  $75 \text{ kg/m}^3$ ,  $125 \text{ kg/m}^3$ ,  $175 \text{ kg/m}^3$ ,  $225 \text{ kg/m}^3$  e  $275 \text{ kg/m}^3$ , em massa de cimento por volume de solo, e com teor de umidade da mistura final determinado em 120%. Além da variação dos teores e do tipo de agente cimentante, também foram estipulados três tempos de cura 7, 28 e 90 dias. A fim de avaliar qual mistura se comporta de maneira mais adequada, realizaram-se ensaios de resistência à compressão simples e medidas de módulo de cisalhamento inicial. Para que seja possível uma previsão de comportamento dessas misturas é proposta uma equação que leva em consideração a porosidade da mistura ( $\eta$ ) e o teor volumétrico de agente cimentante ( $C_{iv}$ ), e também o fator de água/agente cimentante ( $a/c$ ). Os resultados indicaram que o aumento no teor dos agentes cimentantes leva ao crescimento na resistência à compressão simples e também nos valores do módulo cisalhante inicial, para os três tempos de cura estudados. A tentativa de estabelecer uma metodologia de previsão de comportamento se apresentou de forma consistente através do método que leva em consideração a relação porosidade/teor volumétrico de agente cimentante e também pelo fator água/cimento ( $a/c$ ), sendo que a resistência à compressão simples e os valores do módulo cisalhante inicial aumentam com o decréscimo do valores de “ $\eta/C_{iv}$ ” e “ $a/c$ ”. A técnica de melhoramento do solo mole orgânico estudado se mostrou eficaz e capaz de ser realizada com vários tipos de agentes cimentantes, obtendo-se características distintas em função do tempo de cura, do teor e do tipo de agente cimentante adicionado ao solo.

**Palavras-chave:** *solo mole orgânico; melhoramento de solo; agentes cimentantes variados.*

## ABSTRACT

ZAMPIERI, L.Q. **Mechanical Behavior of an Organic Soft Soil Treated with Distinct Binders**. 2015. M.Sc. Dissertation – Department of Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

In a world obsessed by innovation and thirsty for speed, it can be seen the need for constant search for solutions in all areas of knowledge. Within Geotechnical Engineering, it can be obtained with geotechnical proposals that provide reduced cost, including preservation of natural resources. Promoting the use of soils that do not have adequate geotechnical characteristics is one of the points observed in geotechnical research innovations. Adjusting the soil strength characteristics and initial shear modulus values, improving it with the use of standard cements and alternative cements obtained with the addition of waste is the line that leads this research, which has as main objective the verification of the influence of the addition of distinct binders in an organic soft soil of Porto Alegre - RS, Brazil. The mixtures were composed of a single soil matrix and various types of binders, namely: early strength Portland cement, early strength Portland cement mixed with ground furnace slag (coarse particles), early strength Portland cement mixed with ground furnace slag (fine particles), early strength Portland cement mixed with gypsum (di-hydrate), early strength Portland cement mixed with gypsum (hemi-hydrate) and early strength Portland cement mixed with quicklime. The binder amounts were set at 75 kg/m<sup>3</sup>, 125 kg/m<sup>3</sup>, 175 kg/m<sup>3</sup>, 225 kg/m<sup>3</sup> and 275 kg/m<sup>3</sup> in mass of binder per volume of soil, and moisture content of 120% regarding final mixture. In addition to changes in the amount and type of binders, three cure times were also stipulated 7, 28 and 90 days. In order to assess which mixture behaves more adequately, strength tests and initial shear modulus measures were carried out. In order to foresee the mechanical behavior of the blends, a methodology that takes into account the porosity/volumetric cement content ratio ( $\eta/C_{iv}$ ), as well as the well-known water/cement ratio ( $a/c$ ) are used. Results indicated that the increase in the binder content leads to an increase in compressive strength and also in the initial shear modulus, for all curing times. Both  $\eta/C_{iv}$  and  $a/c$  are capable to predict the unconfined compressive strength and the initial shear modulus. The studied technique of improving organic soft soils with various types of binders was successful, thus obtaining different characteristics in terms of curing time, binder content and type of binder added to the soil.

**Keywords:** *organic soft soil; ground improvement; binders.*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>20</b>
1.1	OBJETIVOS.....	22
1.1.1	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>22</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>22</b>
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	22
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>24</b>
2.1	MELHORAMENTO E ESTABILIZAÇÃO DE SOLO.....	24
2.2	RESÍDUOS SÓLIDOS.....	27
2.2.1	<b>Resíduos Industriais: Aproveitamento na Engenharia Geotécnica</b> .....	<b>29</b>
2.3	FOSFOGESSO .....	30
2.3.1	<b>Formas de disposição</b> .....	<b>33</b>
2.4	ESCÓRIA DE ALTO-FORNO.....	34
2.5	MEDIDAS DE RIGIDEZ INICIAL .....	37
2.6	REAÇÕES DE CIMENTAÇÃO NA ESTABILIZAÇÃO DO SOLO .....	40
2.6.1	<b>Reações com cimento</b> .....	<b>41</b>
2.6.2	<b>Reações com cal</b> .....	<b>44</b>
2.6.3	<b>Reações com Escória de Alto Forno</b> .....	<b>46</b>
2.6.4	<b>Água de reação</b> .....	<b>47</b>
2.6.5	<b>Relação Água/Agente Cimentante</b> .....	<b>47</b>
2.7	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES .....	48
2.7.1	<b>Fatores que influenciam na resistência à compressão de solo cimento</b> .....	<b>49</b>

2.7.2	Efeito da relação volume de vazios por volume de agentes cimentantes .....	50
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>54</b>
3.1	MATERIAIS.....	54
3.1.1	Solo .....	54
3.1.2	Cal .....	58
3.1.3	Cimento .....	59
3.1.4	Escória de alto forno.....	60
3.1.5	Fosfogesso.....	63
3.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	68
3.2.1	Determinação das dosagens.....	68
3.2.2	Homogeneização das misturas .....	70
3.2.3	Moldagem dos corpos de prova.....	71
3.2.4	Processo de cura .....	72
3.2.5	Desmolde.....	73
3.3	ENSAIO DE RUPTURA .....	74
3.4	ENSAIO DE MEDIDAS DE RIGIDEZ INICIAL.....	75
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>77</b>
4.1	INFLUÊNCIA DO TEOR DE AGENTE CIMENTANTE E DO TEMPO DE CURA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES .....	77
4.2	COMPARAÇÃO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES EM DIFERENTES MISTURAS PARA MESMO TEMPO DE CURA.....	82
4.3	INFLUÊNCIA DO TEOR DE AGENTE CIMENTANTE E DO TEMPO DE CURA NAS MEDIDAS DO MÓDULO CISALHANTE INICIAL .....	85

4.4	EFEITO DA RELAÇÃO ENTRE POROSIDADE/TEOR DE AGENTE CIMENTANTE NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E MEDIDAS DE RIGIDEZ INICIAL .....	90
4.4.1	<b>Efeito sobre a resistência à compressão simples .....</b>	<b>90</b>
4.4.2	<b>Efeito sobre as medidas de rigidez inicial.....</b>	<b>94</b>
4.4.3	<b>Resumo das Relações .....</b>	<b>98</b>
4.4.4	<b>Normalização.....</b>	<b>99</b>
4.5	RELAÇÃO ENTRE MEDIDAS DE MÓDULO CISALHANTE INICIAL ( $G_0$ ) E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES ( $Q_u$ ) .....	100
4.6	EFEITO DO FATOR A/C NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	104
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>109</b>
5.1	CONCLUSÕES .....	109
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	112



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Resistência à compressão simples em função da quantidade de material cimentante, turfa de Porvoo, Finlândia (Adaptado de EuroSoilStab, 2002).....	26
Figura 2 - Esquema da obtenção do ácido fosfórico e fosfogesso (Matos, 2011).....	31
Figura 3 - Disposição a úmido do fosfogesso Canut (2006).....	32
Figura 4 - esquema obtenção escória de alto forno (Adaptado de Canto, 1998).....	34
Figura 5 - Produção de resíduo (coproduto) por tonelada de aço bruto (Relatório de Sustentabilidade 2013).....	37
Figura 6 - Deformação da rigidez com o aumento da deformação (Atkinson 2000, <i>apud</i> Johann 2013).....	38
Figura 7 - Níveis de deformações (Fernandes, 2011).....	39
Figura 8 - mecanismos de estabilização do solo cal (Ingles e Metcalf, 1972, 1994).....	46
Figura 9 - Relação a:c para uma argila melhorada com cimento e cimento-cal (Janz e Johansson, 2002). .....	47
Figura 10 - Fatores de influência na resistência a compressão simples do solo-cimento: (a) resistência à compressão simples pelo teor de umidade da mistura; (b) resistência à compressão simples pela .....	50
Figura 11 - Relação entre fator vazios/cimento e resistência à compressão simples (adaptado de Larnach, 1960).....	51
Figura 12 – Relação vazios/cimento expresso em termos de porosidade e teor volumétrico de cimento (Foppa, 2005).....	52
Figura 13 – Relação módulo cisalhante pelo volume de vazios/volume de agente cimentante (CRUZ, 2008) .....	53
Figura 14 - Mapa de localização geográfica do local da retirada do solo (Google Maps, 2014) .....	54
Figura 15 - Perfil típico da região do solo em estudo (Schnaid et al., 2001).....	55

Figura 16 - Hélice Continua (a), Caixa contendo solo extraído (b), (Rilho, 2014).....	56
Figura 17 - curva granulométrica do solo.....	58
Figura 18 - Variação da composição granulométrica .....	58
Figura 19 - Moinho de bolas .....	61
Figura 20 - Granulometria referente a cada tempo de moagem.....	62
Figura 21 - Granulometria Fosfogesso.....	64
Figura 22 - Análise térmica do fosfogesso beneficiado seco a 60°C .....	66
Figura 23 - Difratoograma raio-X do fosfogesso Dihidratado FG(60C).....	67
Figura 24 - Difratoograma raio-X do fosfogesso Hemihidratado FG(180C).....	67
Figura 25 - Esquema do programa experimental .....	70
Figura 26 - Molde PVC bipartido (medidas em cm).....	71
Figura 27 - Mesa vibratória .....	72
Figura 28 - Cura em imersão .....	72
Figura 29 - Aparelho para extrusão dos corpos de prova.....	73
Figura 30 - Corpo de prova desmoldado.....	73
Figura 31 - Posicionamento do corpo de prova na prensa para ensaio de resistência à compressão simples (a), corpo de prova recebendo carga (b).....	74
Figura 32 - Esquema do equipamento Pundit Lab (Adaptado de manual Proceq, 2014) .....	75
Figura 33 - Resistência à compressão simples da mistura de solo com Cimento CP-V ARI, Ci (Adaptado de Rilho, 2014).....	78
Figura 34 – Resistência à compressão simples da mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Escória de alto forno moída (grosseira), Ci-S(1).....	78
Figura 35 - Resistência à compressão simples da mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Escória de alto forno moída (fina), Ci-S(2).....	79

Figura 36 - Resistência à compressão simples da mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais fosfogesso dihidratado, Ci-FG(60).....	80
Figura 37 - Resistência à compressão simples da mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais fosfogesso hemihidratado, Ci-FG(180).....	80
Figura 38 - Resistência à compressão simples da mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Cal viva, Ci-Ca. (Adaptado de Rilho, 2014).....	81
Figura 39 - Resistência à compressão simples x Teor de agente cimentante, com 7 dias de cura .....	82
Figura 40 - Resistência à compressão simples x Teor de agente cimentante, com 28 dias de cura .....	83
Figura 41 - Resistência à compressão simples x Teor de agente cimentante, com 90 dias de cura .....	84
Figura 42 - Medidas de módulo cisalhante inicial x teor de agente cimentante, da mistura de solo com Cimento CP-V ARI, Ci. (Rilho, 2014) .....	85
Figura 43 – Medidas de módulo cisalhante inicial x teor de agente cimentante, da mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Escória de alto forno moída (grosseira), Ci-S(1) .....	86
Figura 44 - Medidas de módulo cisalhante inicial x teor de agente cimentante, da mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Escória de alto forno moída (fina), Ci-S(2).....	86
Figura 45 - Medidas de módulo cisalhante inicial x teor de agente cimentante, da mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Fosfogesso dihidratado, Ci-FG(60C).....	87
Figura 46 - Medidas de módulo cisalhante inicial x teor de agente cimentante, da mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Fosfogesso hemihidratado, Ci-FG(180C).....	87
Figura 47 – Medidas de módulo cisalhante inicial x teor de agente cimentante, da mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Cal viva, Ci-Ca. (Rilho, 2014).....	88
Figura 48 – Medida de módulo cisalhante inicial $G_0$ x Teor de agente cimentante, com 28 dias de cura .....	89
Figura 49 - Medida de rigidez inicial $G_0$ x Teor de agente cimentante, com 90 dias de cura	89

Figura 50 – Resistência à compressão simples x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Escória de alto forno moída (grosseira), Ci-S(1) .....	91
Figura 51 - Resistência à compressão simples x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Escória de alto forno moída (fina), Ci-S(2) .....	91
Figura 52 - Resistência à compressão simples x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais fosfogesso dihidratado, Ci-FG(60C).....	92
Figura 53 - Resistência à compressão simples x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais fosfogesso hemihidratado, Ci-FG(180C).....	92
Figura 54 - Resistência à compressão simples x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI, Ci.....	93
Figura 55 - Resistência à compressão simples x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais cal viva, Ci-Ca .....	93
Figura 56 – Módulo cisalhante inicial x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Escória de alto forno moída (grosseira), Ci-S(1).....	95
Figura 57 - Módulo cisalhante inicial x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Escória de alto forno moída (fina), Ci-S(2)....	95
Figura 58 - Módulo cisalhante inicial x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais fosfogesso dihidratado, Ci-FG(60C) .....	96
Figura 59 - Módulo cisalhante inicial x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais fosfogesso hemihidratado, Ci-FG(180C) .....	96
Figura 60 - Módulo cisalhante inicial x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI, Ci. (Rilho, 2014).....	97
Figura 61 - Módulo cisalhante inicial x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais cal viva, Ci-Ca. (Rilho, 2014) .....	97

Figura 62 – Normalização da resistência compressão simples para todas as misturas e tempos de cura .....	99
Figura 63 – Relação entre $G_0/q_u$ e $\eta/C_{iv}$ , 28 dias de cura .....	100
Figura 64 - Relação entre $G_0/q_u$ e $\eta/C_{iv}$ , 28 dias de cura. (Rilho, 2014).....	101
Figura 65 - Relação entre $G_0/q_u$ e $\eta/C_{iv}$ , 90 dias de cura .....	102
Figura 66 - Relação entre $G_0/q_u$ e $\eta/C_{iv}$ , 90 dias de cura. (Rilho, 2014).....	102
Figura 67 – relação entre a resistência à compressão simples e o fator de água/agente cimentante, mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Escória de alto forno moída (grosseira), Ci-S(1) .....	105
Figura 68 - relação entre a resistência à compressão simples e o fator de água/agente cimentante, mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Escória de alto forno moída (fina), Ci-S(2) .....	105
Figura 69 - relação entre a resistência à compressão simples e o fator de água/agente cimentante, mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais fosfogesso dihidratado, Ci-FG(60C).....	106
Figura 70 - relação entre a resistência à compressão simples e o fator de água/agente cimentante, mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais fosfogesso hemihidratado, Ci-FG(180C).....	106
Figura 71 - relação entre a resistência à compressão simples e o fator de água/agente cimentante, mistura de solo com Cimento CP-V ARI, Ci. (Rilho, 2014).....	107
Figura 72 - relação entre a resistência à compressão simples e o fator de água/agente cimentante, mistura de solo com Cimento CP-V ARI, mais cal viva, Ci-Ca. (Rilho, 2014)..	107

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aumento de resistência de acordo com o solo e o tipo de agente cimentante (adaptado de EuroSoilStab, 2002).....	26
Tabela 2 - Composição química do Gipso e do Fosfogesso (John e Cincotto, 2010).....	32
Tabela 3 - Análise química do fosfogesso (Chang e Mantell, 1990).....	33
Tabela 4 - Composição química das escórias brasileiras (Cincotto (1992), <i>apud</i> Sant'Ana, 2003) .....	35
Tabela 5 - Índices da escória de alto forno (Cincotto, et. al, 1992).....	36
Tabela 6 - Resistência à compressão simples de escória + cimento CP V-ARI (Marques e Tango, 1994) .....	36
Tabela 7 - Resumo das características geotécnicas do solo.....	57
Tabela 8 - Composição química da Cal Hidratada .....	59
Tabela 9 - Caracterização física da Cal Hidratada .....	59
Tabela 10 - Composição do Cimento (NBR 5733, 1991) .....	60
Tabela 11 - Composição química da escória de alto forno.....	62
Tabela 12 - Classificação da escória de alto forno.....	63
Tabela 13 - Diâmetros das amostras de fosfogesso .....	64
Tabela 14 - Composição química do fosfogesso.....	65
Tabela 15 - Relação de dosagem em volume e porcentagem .....	68
Tabela 16 - Programa experimental da estabilização mecânica do solo mole orgânico .....	69
Tabela 17 - Resumo das equações para determinação de $q_u$ .....	98
Tabela 18 – Resumo das equações da relação $G_0/q_u$ de cada uma das misturas para 28 dias de cura .....	101

Tabela 19 – Resumo das equações da relação $G_0/q_u$ de cada uma das misturas para 90 dias de cura .....	103
--	-----

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

°C: grau Celsius

a: Volume de água

a/c: fator de água/agente cimentante

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ASTM: American Society for Testing and Materials

Ca: Cal hidratada

Ci: Cimento Portland CP V-ARI

c: Massa de cimento (agente cimentante)

cm: Centímetro

FG: Fosfogesso

k: quilo

kg: quilograma

LL: Limite de Liquidez

LP: Limite de Plasticidade

IP: Índice de Plasticidade

M: Mega

m: Metro

mm: Milímetro

N: Newton

NBR: Norma Brasileira

Pa: Pascal

PVC: Policloreto de Polivinila

$q_u$ : Resistência à Compressão Simples

S: Escória de Alto Forno Moída

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

$\omega$ : Teor de Umidade

$\theta$ : Teta



## 1 INTRODUÇÃO

Desde o despontar da revolução industrial, observa-se um crescimento tanto populacional quanto tecnológico, com grandes concentrações de pessoas em áreas urbanas. As áreas de ocupação nem sempre são adequadas tendo em vista às características geotécnicas, exigindo assim, um crescimento nas tecnologias de construção e com conseqüente aumento no consumo de materiais e matérias primas.

O processo que vai de matéria prima ao produto final de comercialização passa por uma transição aonde são utilizadas várias substâncias. Parte da composição do produto original é perdida, gerando resíduos que precisam de uma destinação adequada para não afetar negativamente áreas próximas aos descartes. Os volumes produzidos de resíduos formam enormes pilhas de descartes, estocados em pátios de empresas que ambicionam um destino melhor ao seu rejeito, contribuindo para o desenvolvimento sustentável.

Ao longo de obras de engenharia, principalmente na área geotécnica, os engenheiros se deparam com solos que não apresentam uma resistência adequada, como por exemplo, os solos moles orgânicos, cujos poros são em grande quantidade e de grandes dimensões, normalmente preenchidos por água. Essas condições não propiciam bons resultados, quando solicitados por carregamentos de determinadas magnitudes.

Como citam Consoli, et al. (2012), quando os solos naturais não possuem os requisitos necessários para cumprir adequadamente a função a que estão destinados, uma das soluções possíveis é a alteração das suas características de maneira a melhorar o seu comportamento, tornando-os capazes de responder de forma satisfatória às solicitações previstas.

Frente à faceta ambiental e econômica, são visados os materiais presentes na obra, otimizando-os de forma a se adequar ao projeto e à qualidade exigida, evitando grandes movimentações existentes na prática da substituição. A fim de se obter tal otimização, são incorporadas ao solo adições que podem variar entre cal, cimentos e resíduos industriais.

As empresas siderúrgicas brasileiras produzem em grande escala o ferro gusa. A partir da sua manufatura, gera-se um subproduto chamado de escória de alto forno. Segundo o Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS, 2014), toneladas desse resíduo são produzidas anualmente. As escórias granuladas de alto forno tem um grande potencial de reaproveitamento, empregadas em diversos materiais, sendo as indústrias cimenteiras as principais consumidoras, fazendo da escória uma adição aos cimentos comercializados.

Considerado uma das formas de gesso, outro resíduo abundante no Brasil é o chamado fosfogesso ou gesso químico, que é um resíduo resultante da produção do ácido fosfórico. Existe um grande volume disponível do resíduo nas regiões sul e sudeste do Brasil. A sua obtenção é a partir da solubilização da rocha fosfática por meio do ácido sulfúrico (JOHN e CINCOTTO, 2010).

A fim de se destinar de uma maneira mais sustentável os resíduos gerados, são realizados estudos de aplicação do fosfogesso e das escórias como corretivo de solo na agricultura, material de construção civil e aditivo para cimento (JOHN e CINCOTTO, 2010).

Com a obtenção de bons resultados em pesquisas de adição de fosfogesso, escória de alto forno, mesclados a cimento e cal, tem-se a possibilidade da retirada do material descartado em pilhas de estocagem para a reutilização do resíduo em estabilização de solo de uma maneira ambientalmente sustentável.

A pesquisa aqui descrita visa, na mistura de um solo mole orgânico com um material cimentante comercial (cimento ou cal), mais os resíduos (escória de alto forno moída e fosfogesso), obter um ganho de resistência mecânica. Sabe-se que os solos moles e/ou orgânicos possuem uma complexidade grande quanto ao entendimento de seu comportamento e aplicabilidade em obra. Com essa perspectiva, busca-se desenvolver uma forma de estimar a resistência que o solo apresentará a um determinado tempo de cura, e teor de adição dos materiais cimentantes anteriormente citados. Além disso, correlacionar os fatores  $\eta/C_{iv}$  e  $a/c$  com a resistência e o módulo cisalhante inicial, para que possa ser estabelecida uma metodologia de dosagem, facilitando o entendimento e o emprego da estabilização de solos moles orgânicos com cimento Portland e adições de escória de alto forno moída, fosfogesso e cal.

Sendo assim, a busca pela compreensão do funcionamento e aplicação da estabilização de solos moles orgânicos motivam esta pesquisa.

## 1.1 OBJETIVOS

Serão apresentados a seguir os objetivos da pesquisa.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o ganho de resistência à compressão simples e rigidez inicial de um solo mole orgânico artificialmente cimentado, com agentes cimentantes produzidos a partir de misturas entre cimento ou cal mais escória de alto forno moída e/ou fosfogesso.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar o ganho de resistência à compressão simples e de módulo cisalhante inicial referente a cada dosagem de agente cimentante;
- b) Avaliar a variação da resistência à compressão simples e de módulo cisalhante inicial com tempos de cura distintos.
- c) Estabelecer, quando possível, uma equação para o cálculo da previsão do comportamento da mistura do solo mole orgânico mais agente cimentante;
- d) Correlacionar os parâmetros de resistência à compressão simples e módulo cisalhante inicial com a razão da porosidade/teor volumétrico de agente cimentante;
- e) Correlacionar a resistência à compressão simples com o fator de água/agente cimentante;

## 1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho está estruturado em 5 capítulos. No primeiro capítulo está a introdução apresentando o contexto geral, problema e relevância da pesquisa, e definição dos objetivos gerais e específicos.

O capítulo 2 contém a revisão de literatura, onde os pontos de maior relevância do tema serão explanados, como características dos materiais, aspectos dos solos estabilizados, aplicação e técnicas utilizadas para determinação de parâmetros visados neste trabalho.

No capítulo 3 são apresentados os materiais utilizados e o programa experimental desenvolvido na pesquisa, detalhando as características físicas e químicas do solo e agentes cimentantes utilizados no estudo, ilustrando o processo das técnicas e ensaios realizados.

O capítulo 4 é destinado à discussão, análise e apresentação dos resultados obtidos durante o programa experimental.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões obtidas durante a realização da pesquisa, através da análise e discussão dos resultados, bem como sugestões para trabalhos futuros ligados a essa linha de pesquisa.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Estes capítulos apresentam um embasamento geral na literatura de estabilização mecânica de solo mole orgânico cimentado artificialmente, dos resíduos utilizados, das reações de hidratação que ocorrem com os agentes cimentantes, e de alguns fatores que podem influenciar na estabilização.

### 2.1 MELHORAMENTO E ESTABILIZAÇÃO DE SOLO

A técnica de melhoramento do solo vem sendo estudada por diversos pesquisadores, com o intuito de tornar viável a utilização de agentes cimentantes, aplicados a diferentes tipos de solo.

Para Ingles e Metcalf (1972), as técnicas que proporcionam alteração das propriedades mecânicas do solo, como aumento da resistência a compressão, rigidez, durabilidade e/ou redução da condutividade hidráulica, são processos de estabilização de solo.

A estabilização de solo, de acordo com Vargas (1977), é a capacidade de conferir maior resistência a cargas por meio de compactação, correção granulométrica, plasticidade ou substâncias, que quando adicionadas propiciem uma coesão proveniente da cimentação ou aglomeração das partículas.

Uma diferenciação entre melhoramento e estabilização de solo é apresentada por Nuñez (1991), onde um solo estabilizado tem a mistura de solo com aditivos que tenham benefícios na durabilidade e resistência à compressão não confinada. O solo melhorado tem modificação nas propriedades mecânicas, porém, sem grandes melhorias na resistência à compressão não confinada.

Conforme citado por Åhnberg (2006), muitos locais utilizam a técnica de estabilização de solos, incluindo solos moles e orgânicos, para redução de recalques e ganho de resistência à compressão.

As primeiras utilizações de solo cimento no Brasil segundo Senço (2001), iniciaram-se na década de 1940, no estado de São Paulo, com a primeira experiência no acesso ao aeroporto de Bauru em um trecho de 500 m de extensão.

Os agentes cimentantes tem a função de interagir química e fisicamente com o solo. Essa interação não pode ser simplesmente prevista, devido à diversidade dos locais, do estabilizador e da dosagem, fazendo-se necessário a realização de testes laboratoriais (INGLES e METCALF, 1972).

De acordo com Sales (1998), o termo melhoria se dá a um tratamento de um maciço natural, onde por meio de algum procedimento, pretende-se obter aumento da resistência no solo tratado. Deste modo, o resultado da estabilização é um novo material geotécnico, com propriedades próprias capazes de preencher de maneira adequada as exigências de sua utilização.

Normalmente, faz-se uso das técnicas de estabilização de solos quando, por exemplo, não é possível se obter um material ou a mescla de materiais com características de resistência, deformabilidade, permeabilidade ou durabilidade adequadas ao projeto (INGLES e METCALF, 1972).

As misturas de solo com agentes cimentantes ou agentes estabilizadores podem variar de acordo com o solo. Na Suécia, conforme Axelsson et al. (2002), recomenda-se a utilização de cimento, cal, escória ou diferentes misturas destes em solos moles argilosos ou turfa. Os autores ainda dividem os estabilizadores em alguns grupos:

- a) Aglomerantes: cimento e cal
- b) Escórias: escória de alto forno
- c) Pozolanas: Cinzas volantes.

No entanto, em solos orgânicos, a presença da matéria orgânica, de sulfatos, ou até mesmo um pH ácido são fatores que inibem o melhoramento do solo tratado, retardando ou impedindo a hidratação do cimento. Uma das opções na remediação deste problema é a adição de cal hidratada, a fim de auxiliar na absorção dos íons cálcio pela matéria orgânica (VENDRUSCULO, 1996).

Conforme cita Benson (2011), a estabilização química de solos moles envolve a mistura com um material cimentício, na finalidade de aumentar sua resistência e rigidez através de

reações químicas. Os aglomerantes são geralmente adicionados como sólidos secos. Assim, a adição desses materiais reduz tanto o conteúdo de água do sistema, como cria a ligação entre as partículas do solo.

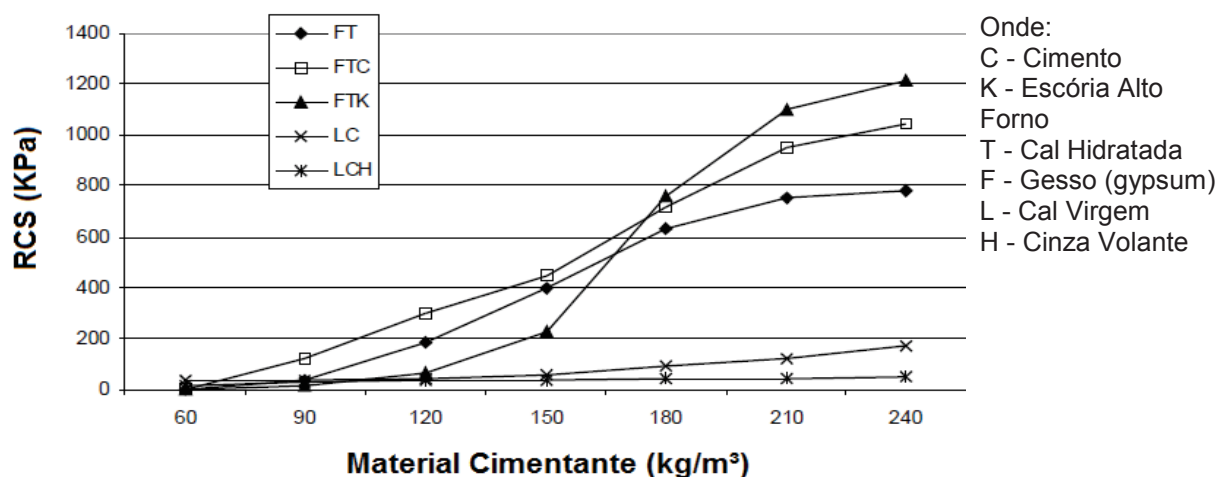
No tratamento de solo a EuroSoilStab (2002) indica alguns tipos de misturas dependendo do tipo de solo, apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1 - Aumento de resistência de acordo com o solo e o tipo de agente cimentante (adaptado de EuroSoilStab, 2002)**

Agente Cimentante	Silte	Argila	Argila Orgânica	Turfa
	Matéria Orgânica 0 - 2 %	Matéria Orgânica 0 - 2 %	Matéria Orgânica 2 - 30 %	Matéria Orgânica 50 - 100%
Cimento	xx	x	x	xx
Cimento + Gesso	x	x	xx	xx
Cimento + Escória AF.	xx	xx	xx	xxx
Cal + Cimento	xx	xx	x	-
Cal + Gesso	xx	xx	xx	-
Cal + Escória	x	x	x	-
Cal + Gesso + Escória A	xx	xx	xx	-
Cal + Gesso + Cimento	xx	xx	xx	-
Cal	-	xx	-	-

Xxx Muito Eficaz  
 Xx Boa Eficácia  
 x Média Eficácia  
 - Não indicado

As quantidades de material cimentante na mistura podem variar o grau do ganho de resistência. A Figura 1 da EuroSoilStab(2002) mostra alguns valores obtidos.



**Figura 1 - Resistência à compressão simples em função da quantidade de material cimentante, turfa de Porvoo, Finlândia (Adaptado de EuroSoilStab, 2002)**

As adições de cimento podem variar. Para Ingles e Metcalf (1972), pequenas quantidades de cimento de até 2% modificam as propriedades do solo, mas quantidades maiores alteram com grande intensidade as suas propriedades.

Conforme EuroSoilStab (2002), existe uma expressiva mudança no efeito da quantidade entre os diferentes ligantes. Por exemplo, a quantidade de escória de alto forno afeta significativamente a estabilização da turfa, sendo indicado consumo de 150 a 250 kg/cm<sup>3</sup>.

Segundo Åhnberg, et al. (2003), existe um potencial para utilização de inúmeros tipos de ligantes, além de cimento e cal, que vem sendo cada vez mais utilizados internacionalmente na estabilização de camadas superficiais de solo e também para a estabilização do solo profundo. Além disso, o benefício ambiental com a reutilização de subprodutos industriais pode trazer razões econômicas e técnicas para a incorporação de um número maior de materiais cimentícios.

Conclui-se que a estabilização pode ocorrer com a adição de alguns tipos de materiais cimentantes, como cimento, cal, escória e gesso. Muitas vezes podem ser adicionados subprodutos oriundos de outros materiais, os resíduos, tendo em vista a reutilização como benefício econômico e ambiental.

## 2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS

Na definição da Norma Brasileira NBR 10004 (2004), os resíduos sólidos são:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Por definição da NBR 10004 (2004), os resíduos podem ser classificados em:

- a) Resíduos classe I – Perigosos – que podem apresentar riscos à saúde pública ou ao meio ambiente, quando manuseados de forma inadequada. Além das características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.



- b) Resíduos classe II – Não perigosos,
- Resíduos classe II A – Não inertes – são os que não se enquadram nos Resíduos Classe I e Classe II B, apresentando propriedades como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
  - Resíduos classe II B – Inertes – Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Uma forma de minimizar os impactos causados pelos resíduos dispostos diretamente ao ambiente é a reutilização destes.

O CONAMA (2002), apresenta enfoques distintos quanto a forma de aplicação dos subprodutos:

- a) Reutilização: é o processo de reaplicação de um resíduo, sem transformação do mesmo;
- b) Reciclagem: é o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação;
- c) Beneficiamento: é o ato de submeter um resíduo à operações e/ou processos que tenham por objetivo dotá-los de condições que permitam que sejam utilizados como matéria-prima ou produto.

Os resíduos são gerados e dispostos, por vezes, em locais inapropriados. Essa disposição final deve ser discutida e prevista. Uma das formas de se obter um melhor destino é a reutilização destes resíduos. Na engenharia civil muitos casos abordam o reaproveitamento com aplicação em novos materiais, adições, produção de novas matérias primas e entre outros.

Nos estudos relacionados à engenharia geotécnica, busca-se uma melhor disposição aos resíduos, incorporando-os ao solo com a finalidade de se obter um ganho de resistência e melhora nas condições do solo artificialmente cimentado.

### 2.2.1 Resíduos Industriais: Aproveitamento na Engenharia Geotécnica

Na engenharia geotécnica, buscam-se formas de melhorar as técnicas e materiais que são utilizados nas obras. Na maior parte dos casos o cimento e a cal são os aglomerantes mais utilizados, mas muitos estudos envolvendo melhoramento de solo e reaproveitamento de resíduo, foram desenvolvidos ao longo dos anos.

O emprego de resíduos na engenharia geotécnica é estudado de várias formas, sejam sozinhos, ou em misturas.

Um dos principais produtos empregados ao melhoramento de solo que possuem características mais ambientalmente amigáveis, segundo Dalla Rosa (2009), são as com características pozolânicas, sendo muito utilizadas para melhorar seu desempenho em diversas aplicações como: construção de barragens, obras rodoviárias, elementos de fundações, etc.

Na década de 60, segundo Nuñez (2007) *apud* Dalla Rosa (2009), eram usadas cinzas volantes estabilizadas nos Estados Unidos, Inglaterra, França, Alemanha, na antiga URSS, na Polônia e nas antigas Tchecoslováquia e Iugoslávia. Na Europa as cinzas foram empregadas na constituição de blocos para a construção. Dalla Rosa (2009) ainda cita a primeira obra no Brasil, que utilizou adição de cinza volante ao concreto, no ano de 1964, na construção da hidrelétrica de Jupia. Desde então, as cinzas volantes têm sido empregadas pela indústria de cimento em obras rodoviárias (trechos experimentais), na fabricação de pré-moldados, na constituição de argamassas pozolânicas, etc.

Outro subproduto largamente utilizado são os resíduos das empresas siderúrgicas, as escórias. Conforme Gumieri (2002), as principais aplicações desse tipo de material estão concentradas em obras de pavimentação, mas com muitas pesquisas vislumbrando o campo de estabilização de solo, incluindo estudos com solos moles. No Brasil as primeiras experiências remontam a década de setenta, com utilização de escórias de alto-forno e aciaria em obras federais, estaduais e municipais.

De acordo com Åhnberg, et al. (2003), na Suécia, assim como em outros tantos países, a escória de alto-forno e as cinzas volantes são largamente utilizadas na estabilização de solos, sejam com misturas a outros aglomerantes tradicionais ou sozinhas. As escórias podem ser aplicadas juntamente com outros materiais cimentícios como cimento Portland, a cal, e o gesso.

A prerrogativa de encontrar novos ligantes “ambientalmente amigáveis”, os quais deverão proporcionar desempenhos comparáveis aos aglomerantes já consolidados, aparece como uma forma de reutilização dos resíduos.

Nessa pesquisa se estudam aplicações de diferentes resíduos (escória de alto forno e fosfogesso), mesclados a agente cimentantes tradicionais, como a cal e o cimento.

### 2.3 FOSFOGESSO

Chafoori e Chang (1993), indicam que na nomenclatura fosfogesso, a parcela (fosfo) está referida ao fósforo proveniente da indústria e o gesso de seu componente principal. Este subproduto apresenta sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ), ou seja, a mesma composição do gesso natural.

De acordo com Silva e Giulietti (2010), o fosfogesso, também chamado de gesso químico, é o nome dado ao sulfato de cálcio gerado na produção de ácido fosfórico, como resultado da reação entre a apatita presente no concentrado fosfático e o ácido sulfúrico em meio aquoso.

Nas regiões sul e sudeste do Brasil, encontram-se elevados volumes disponíveis de gipsita. Em 2006 foi avaliado um volume aproximado de fosfogesso de 6,5 milhões de t/ano produzido pelos estados de São Paulo, Minas Gerais, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (JOHN e CINCOTTO, 2010).

Segundo Bartl e Albulquerque (1992), *apud* Canut (2006), há países como o Japão onde não existem jazidas de gesso, então, a obtenção fica mais difícil. Deste modo, o fosfogesso compete economicamente com o mineral.

Estudos realizados no Japão, mostrados por Ahmed et al. (2012), indicam que o reuso de gesso mesclado com cal, quando aplicado ao solo apresenta melhora nas propriedades de resistência mecânica dos solos testados por eles. O aumento da proporção de cal no teor da mistura tem um efeito positivo na melhoria das propriedades mecânicas e ambientais do solo testado na maioria dos casos.

A associação da matéria prima com o ácido sulfúrico gera o ácido fosfórico, seguido do seu resíduo, o fosfogesso. O ácido fosfórico é condicionado a locais para estocagem e posterior finalidades destinadas a este. Enquanto o fosfogesso, após a filtragem, segue para lagoas

de decantação e posterior estocagem em pilhas (MATOS, 2011). A Figura 2 apresenta a sequência e um esquema da obtenção dos materiais.

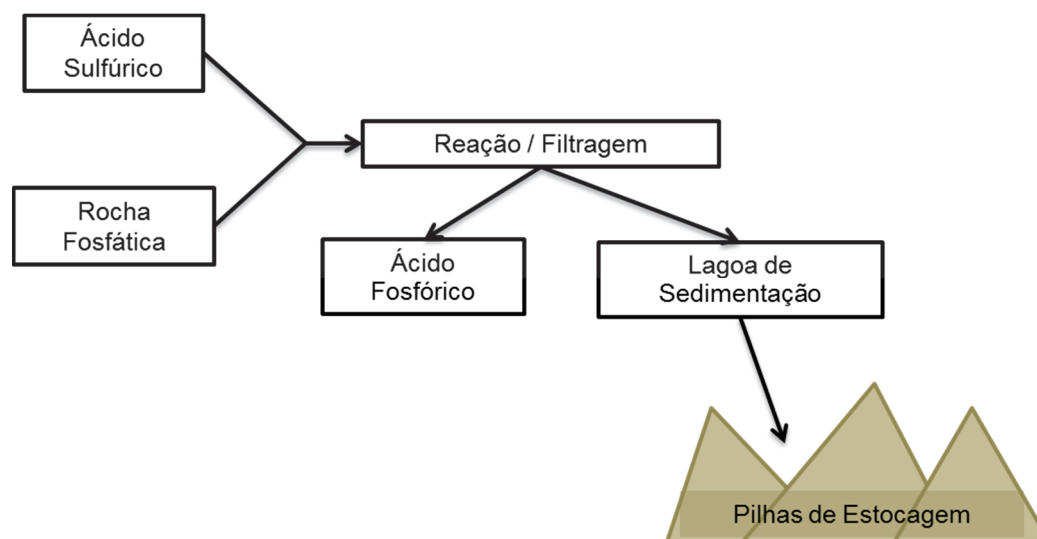


Figura 2 - Esquema da obtenção do ácido fosfórico e fosfogesso (Matos, 2011)

Durante esse processo por via úmida, para obtenção do fosfogesso, é adicionado à rocha fosfática o ácido clorídrico, nítrico ou sulfúrico, que irão dissolver a rocha. Uma parcela da pasta se torna o ácido fosfórico aplicado em solos para agricultura, e a outra parcela é o fosfogesso. Conforme explicam Silva e Giulietti (2010), dependendo das condições operacionais nas quais ocorre a reação entre o ácido sulfúrico e a apatita, o sulfato de cálcio pode ser hidratado na proporção molar de 2:1 (duas moléculas de sulfato de cálcio para uma de água) formando o hemihidrato, ou de 1:2 formando o dihidrato.

As unidades de produção de ácido fosfórico devem, de alguma forma, dispor o fosfogesso gerado no processo. No Brasil são reciclados cerca de 50% do fosfogesso gerado pelas indústrias cimenteiras, na agricultura, na construção civil e entre outros setores, sendo o restante disposto em pilhas. Existem basicamente três maneiras de realizar o descarte do fosfogesso: retornar à mina de extração de fosfato; empilhar em áreas próximas às unidades de produção Figura 3; ou descarregar em rios e oceanos, através de emissários. Como todo resíduo, o custo de disposição não é reembolsado, pois ele não é comercializado, assim, sempre existirá a tendência de se utilizar a solução mais barata, que nem sempre será a melhor, do ponto de vista ambiental, ou de longo prazo (SILVA e GIULIETTI, 2010).



Figura 3 - Disposição a úmido do fosfogesso Canut (2006)

As composições químicas do gesso e do fosfogesso são bem semelhantes (Tabela 2).

Tabela 2 - Composição química do Gipso e do Fosfogesso (John e Cincotto, 2010)

Elementos	Gipso	Fosfogesso
CaO (%)	32,47	32,25
CO <sub>2</sub> (%)	0,92	0,00
SO <sub>3</sub> (%)	45,93	46,00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	-	0,32
F (%)	1,20	0,80
SiO <sub>2</sub> + RI (%)	0,60	1,00
R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,17	0,54
MgO (%)	0,56	0,29
Gipsita Calculada (CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O)	96,68	98,54
H <sub>2</sub> O Cristalizado (%)	18,01	20,39

Segundo apresentado por Silva e Giulietti (2010), a apatita é solubilizada em tanques agitados, liberando seus componentes, dentre eles os íons Ca<sup>+2</sup>, que, pela ação dos íons SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> presentes, precipitam-se na forma de cristais sulfato de cálcio com diferentes níveis de hidratação - CaSO<sub>4</sub>.nH<sub>2</sub>O.

Onde: n = 2 (dihidratado, DH), ½ (hemihidratado ou bassanita, HH), ou 0 (anidrita, AH).

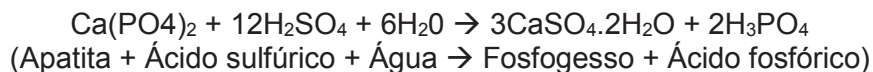
Mesmo com as diferenças quanto ao tipo de hidratação, o fosfogesso possui características semelhantes quimicamente (Tabela 3).

Tabela 3 - Análise química do fosfogesso (Chang e Mantell, 1990)

Elementos	Processo		
	Dihidratado	Hemidratado	Hemi-dihidratado
CaO (%)	32,5	36,9	32,2
SO <sub>3</sub> (%)	44	50,3	46,5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0,6	1,5	0,3
F (%)	1,2	0,8	0,5
SiO <sub>2</sub> (%)	0,5	0,7	0,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,1	0,1	0,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,1	0,3	0,3
H <sub>2</sub> O Cristalizado (%)	19	9	20

Quanto menor a quantidade de moléculas de H<sub>2</sub>O presentes na composição química do fosfogesso, menos estável se torna o composto, que tende a absorver mais água de hidratação durante o processo. Assim, classifica-se o processo dihidratado (DH) como estável, e o hemihidratado (HH) como metaestável, em presença de baixa quantidade de %P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (caso do fosfogesso brasileiro) na composição química do fosfogesso (SILVA E GIULIETTI, 2010).

John e Cincotto (2010), apresentam uma equação da reação no processo de obtenção do fosfogesso dihidratado:



Segundo John e Cincotto (2010), para cada tonelada utilizada de ácido sulfúrico são gerados 2,5 t do subproduto fosfogesso. O Brasil é o 9º país no ranking de produtores de ácido fosfórico mundial.

Devido ao problema ambiental causado pela incorreta disposição, buscam-se soluções onde é possível o reaproveitamento do resíduo que seria descartado.

### 2.3.1 Formas de disposição

Se disposto de forma incorreta, o fosfogesso pode causar alguns impactos ambientais não desejados, pois parcelas residuais resultantes da produção dos ácido fosfórico acompanham o fosfogesso até a sua destinação, como metais pesados, fluoretos, sulfatos, e entre outros. Segundo Silva e Giulietti (2010), os impactos ambientais mais conhecidos causados pela disposição do resíduo fosfogesso no solo são: poeira, águas ácidas das lagoas de decantação, infiltração no solo, e presença de impurezas. Além de que as empresas em geral se concentram em regiões próximas aos centros urbanos, impactando visualmente as paisagens. Outra preocupação, segundo Rutherford et. al (1994), é a

possível contaminação dos lençóis subterrâneos de água, a contaminação do ar e os altos níveis de acidez.

## 2.4 ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

A DNER-EM 260 (1994), define a escória de alto forno como um resíduo silicoso formado em alto forno a partir da fabricação de gusa, podendo ser dividido em dois grupos:

- a) Escória de alto forno granulada: obtida do resfriamento rápido da escória de alto forno, com diâmetro máximo de 5 mm, com 95% em peso passando na peneira 4,8 mm de abertura nominal;
- b) Escória de alto forno não granulada: resultante do resfriamento lento da escória de alto forno possui aspecto vítreo e não apresenta distribuição granulométrica definida.

A fabricação do ferro gusa (ferro fundido) se dá nos altos-fornos, onde tem a introdução de calcário ( $\text{CaCO}_3$ ) para o fim de eliminar as impurezas do minério de ferro como: a areia ( $\text{SiO}_3$ ), e a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). A escória apresenta insolubilidade ao ferro gusa, e sua densidade menor possibilita a retirada sobrenadante ao aço líquido, conduzindo-se a escória fundida por calhas até os locais de resfriamento. A Figura 4 mostra um esquema do processo de fabricação (CANTO, 1998).

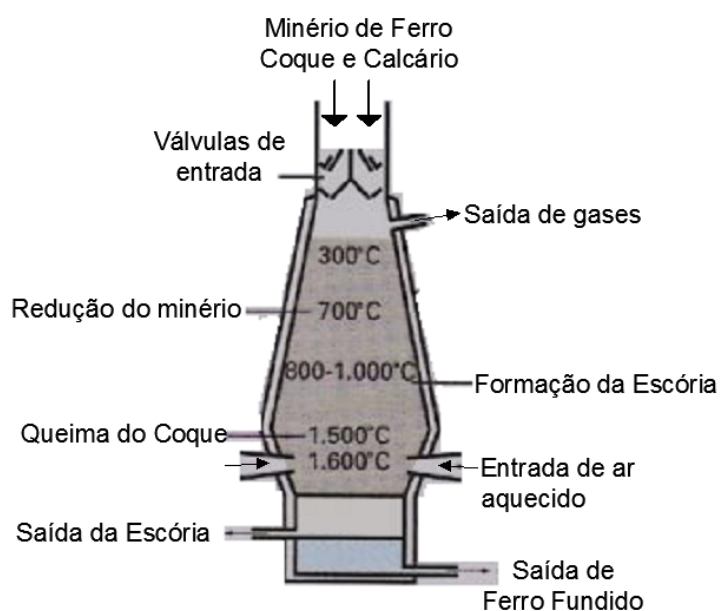


Figura 4 - esquema obtenção escória de alto forno (Adaptado de Canto, 1998)



O tipo do resfriamento é fundamental nas características dos tipos de escória, alterando a micro estrutura, para vítrea ou cristalina, interferindo na aplicação do material. O grau de vitrificação pode ser observado por difratometria de raio-X ou microscopia.

As escórias são formadas e obtidas em alto forno e sua composição química é composta principalmente por óxidos: CaO; SiO<sub>2</sub>; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; MgO<sup>1</sup>. Em sua estrutura apresenta principalmente alumino silicato de cálcio. A quantidade de material vítreo presente na escória é de suma importância para sua reatividade, porém, nenhum valor ainda pode ser definido como mínimo (LI, et al. 2010).

A escória tem a capacidade de hidratação quando em contato com a água assim como o cimento. Esta reação é lenta e pode ocorrer durante um longo período de tempo. No entanto, quando em contato com água de pH elevado, a velocidade de dissolução aumenta formando produtos hidratados estáveis. Compostos químicos variados que são adicionados à água para elevar o pH são chamados de ativadores (JOHN e CINCOTTO, 1995).

A capacidade de hidratação e o grau de qualidade das escórias podem ser estimadas pela sua composição química. A composição química da escória também varia de acordo com a sua procedência. Na Tabela 4 podem ser vistos alguns valores típicos.

**Tabela 4 - Composição química das escórias brasileiras (Cincotto (1992), apud Sant'Ana, 2003)**

Elementos	Procedência				
	Usiminas (MG)	Cosipa (SP)	CSN (RJ)	CST (ES)	Açominas (MG)
SiO <sub>2</sub> (%)	35.15	33.85	32.90	35.47	35.39
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	12.79	13.00	15.44	13.20	13.88
CaO (%)	43.58	42.22	40.97	41.97	40.99
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.37	0.68	0.91	0.83	1.97
FeO (%)	0.29	0.33	0.43	-	-
MgO (%)	5.48	7.08	5.81	5.69	6.31
K <sub>2</sub> O (%)	0.45	0.70	0.73	0.28	0.49
Na <sub>2</sub> O (%)	0.13	0.21	0.19	0.10	0.12
TiO <sub>2</sub> (%)	0.54	0.48	0.49	0.53	-
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.88	0.69	0.86	0.84	-
SO <sub>3</sub> (%)	0.05	0.12	-	0.07	-
S (%)	1.1	0.67	1.03	0.87	0.87

John e Cincotto (1995), apresentam que a reatividade das escórias é a medida potencial do seu desempenho como agente cimentante, porém, a reatividade deve ser apenas uma

<sup>1</sup> Óxidos de: Cálcio (CaO), Silício (SiO<sub>2</sub>), alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), magnésio (MgO).



medida inicial, enquanto o principal ponto a se observar é o desempenho em função do ponto de aplicação do material, tendo uma maior ou menor necessidade de ativação.

Segundo Lea (2004), as escórias de alto-forno possuem propriedades hidráulicas quando devidamente ativadas. Para isso, é necessário conter, no mínimo, dois terços da massa de escória vítrea, ser constituída por, pelo menos, dois terços da massa total pela soma de CaO, MgO e SiO<sub>2</sub>, e ter relação, em massa (CaO + MgO) / (SiO<sub>2</sub>) superior a 1,0. Índices indicados na Tabela 5

**Tabela 5 - índices da escória de alto forno (Cincotto, et. al, 1992)**

Índices	Método	Especificações
Índice de hidráulidade DIN	$H = \frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2}$	H ≥ 1 (satisfatório)
Índice de hidráulidade ASTM	$I = \frac{CaO + MgO + \frac{1}{3} Al_2O_3}{SiO_2 + \frac{2}{3} Al_2O_3}$	I ≥ 1 (bom) I < 1 (ruim)
Índice de basicidade	$P1 = \frac{CaO}{SiO_2}$ $P2 = \frac{CaO + MgO}{SiO_2}$	P1 e P2 > 1 (básica) P1 e P2 < 1 (ácida)

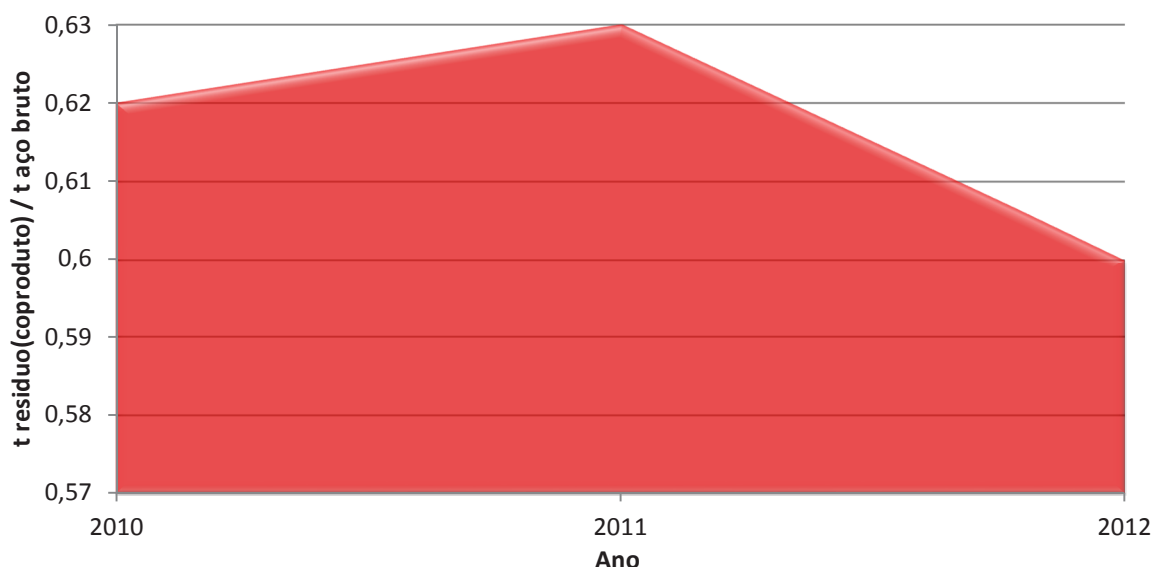
Dentre os ativadores da escória está o cimento. Um estudo realizado por Marques e Tango (1994) apresenta valores de resistência à compressão simples variando proporções de escória/cimento, apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6 - Resistência à compressão simples de escória + cimento CP V-ARI (Marques e Tango, 1994)**

Cimento	Escoria/Cimento	Tensão de Ruptura (Mpa)					
		03 Dias	07 Dias	28 Dias	60 Dias	90 Dias	180 Dias
CP V-ARI	0 : 100	41,8	49,2	54,4	60,4	61,6	63,8
	35 : 65	36,0	49,9	63,8	69,2	72,1	74,9
CP V-ARI	50 : 50	31,3	49,4	66,6	69,0	70,5	73,0
	65 : 35	28,1	48,5	62,6	68,2	71,8	76,3
	80 : 20	23,2	38,0	56,8	60,9	62,5	64,3

A IBS (2013), tem uma preocupação quanto à disposição dos materiais resultantes do processo de fabricação do aço. A instituição subdivide esses materiais em dois grupos, conceituando como “resíduos” apenas os materiais sem qualquer serventia, e como “coprodutos” os resíduos de processos industriais que tiverem aplicação técnica e economicamente viável.

Conforme o relatório de sustentabilidade 2013 do Instituto de Aço Brasil, a geração de resíduos e coprodutos se manteve em torno de 600 kg por tonelada de aço bruto produzido. Acrescenta IBS (2013), que do total, cerca de 70% desse valor é representado pelas escórias. Crescentes pesquisas buscam incluir esse material na reutilização e alguns usos se encontram amplamente disseminados, como a produção de cimento e pavimentação. Porém, as escórias ainda se definem como resíduos, apesar das inúmeras aplicações.



**Figura 5 - Produção de resíduo (coproduto) por tonelada de aço bruto (Relatório de Sustentabilidade 2013)**

Segundo o IAB (2013), 88,5% dos resíduos e coprodutos gerados são reaproveitados. Desse montante, 70% foram utilizadas na produção de cimento, tendo em 2012 o reaproveitamento para bases de estradas no montante de 18%, o que representou um ligeiro decréscimo em relação a 2011, que foi de 19%.

## 2.5 MEDIDAS DE RIGIDEZ INICIAL

De acordo com Fernandes (2011), o termo rigidez (*stiffness*, em inglês), está relacionado diretamente com a deformabilidade do solo. Quanto maior o valor da rigidez maiores são os parâmetros relacionados a ela.

O comportamento não linear do solo, para pequenas deformações, pode trazer consequências práticas fundamentais (BURLAND, 1989). Acrescenta Fernandes (2011), que os solos são materiais altamente inelásticos. Burland (1989), diz que não é considerada a não linearidade do comportamento do solo quando em pequenas deformações, trazendo equívocos nas interpretações.

Tatsouka (2006), apresenta três superfícies de plastificação: a primeira onde se encontra um limite das deformações elásticas; a segunda onde não ocorreram deformações plásticas de grande magnitude (marcada pela quebra da cimentação de ligações entre as partículas); e por fim, a terceira, onde ocorrem as deformações maiores com consequente desestruturação das estruturas cimentantes. Em Tatsouka e Kohata (1995), apresenta-se que as deformações em cerca de 0,001% são essencialmente elásticas.

Sobre a cimentação, Sharma e Fahey (2003) complementam que o aumento de rigidez, comparando um solo natural com um artificialmente cimentado, ocorre devido à cimentação entre as partículas.

De acordo com Johann (2013), para pequenas deformações, os solos têm módulos elásticos maiores, ao passo que próximos à ruptura estes valores caem acentuadamente. Na Figura 6, podem-se observar as faixas de deformações para diferentes estruturas geotécnicas e as diferentes maneiras de medir a rigidez dependendo da magnitude da deformação. Ao passo que com o aumento da deformação, tem-se uma degradação da rigidez (G).

Para Fernandes (2011), nos problemas que envolvem deformações, a rigidez tem de se relacionar com a curva de tensão x deformação. A Figura 7 apresenta outros valores de deformações para dados problemas geotécnicos.

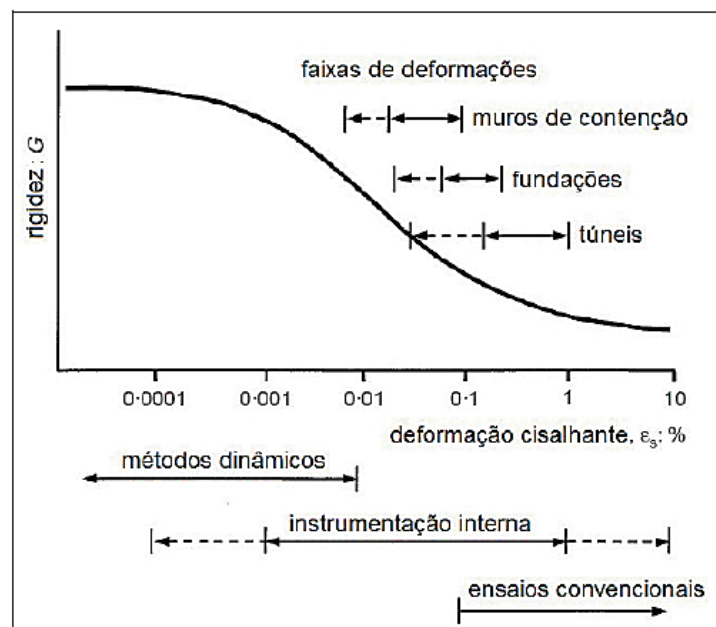


Figura 6 - Deformação da rigidez com o aumento da deformação (Atkinson 2000, *apud* Johann 2013)

Deformações por corte	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>
	PEQUENAS DEFORMAÇÕES		MÉDIAS DEFORMAÇÕES		GRANDES DEFORMAÇÕES	ROTURA
Correspondência	CROSS HOLE		PEQUENOS SISMOS	SISMOS FORTES	EXPLOSÕES NUCLEARES	ATERROS SOBRE SOLOS MOLES
	FUNDAÇÕES DE MÁQUINAS			FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS		

Figura 7 - Níveis de deformações (Fernandes, 2011)

Sharma e Fahey (2003), afirmam que o conhecimento da rigidez do solo é primordial quando se pretende calcular o movimento das estruturas relacionando a interação solo-estrutura. Estudos comprovam a não linearidade do comportamento tensão deformação do solo, e a rigidez do solo pode decair com o aumento de tensão.

Segundo Yessiller, et al. (2001), a resistência do solo é afetada por outros fatores alheios à rigidez como vazios, defeitos e imperfeições, os quais não são correlacionados com a velocidade da onda.

Rotta, et al. (1998) e Consoli, et al. (2000), estudaram a rigidez de solos cimentados fixando-se na influência da aplicação de tensões confinantes antes e após a cimentação. Verificaram em seus estudos que em amostras curadas sem confinamento, apresentaram queda na rigidez inicial, quando ocorrida a degradação da cimentação, enquanto as amostras curadas sob tensão apresentaram aumento ao submetê-las ao acréscimo de tensão confinante.

Tatsouka e Kohata (1995) complementam que a avaliação da rigidez inicial de solos cimentados para utilização na previsão de deformações e deslocamentos deve considerar vários fatores como:

- a) Dependente da rigidez em relação ao estado de tensões e deformações;
- b) Anisotropia e heterogeneidade do solo;
- c) Histórico de tensões;
- d) Trajetória de tensões, carga cíclica, condições de drenagem;
- e) Precisão nas medidas de deformação em laboratório;
- f) Perturbação da amostra.

Além disso, Fonini (2012) e Lopes Junior (2011), destacam que ao aumentar o tempo de cura das amostras ensaiadas, obtém-se um aumento das medidas de rigidez inicial.

Uma forma de determinação dos valores das constantes de rigidez para Yessiller (2000), é por meio de ondas de ultrassom um procedimento de teste não destrutivo com análise simples e rápida. A técnica também tem a vantagem de permitir a repetição de medidas e pode ser testada na mesma amostra em diferentes tempos de cura, ou ser adaptada ao uso em campo, determinando as características dos solos.

A transmissão de ondas em um material é geralmente quantificada utilizando dois parâmetros: velocidade e atenuação. A velocidade das ondas de ultrassom pode ser correlacionada com constantes elásticas e as propriedades mecânicas de um material. Enquanto a atenuação das ondas de ultrassom pode ser correlacionada com suas propriedades microestruturais (MCLINTIRE, 1991 *apud* YESSILLER, 2000).

Segundo Yessiller, et al. (2001), com o ensaio de ultrassom pode-se determinar em um material sólido as ondas longitudinais primárias (ondas P) e as ondas transversais, geralmente referidas as ondas de cisalhamento (ondas S). A partir dos valores das ondas P e S e equações desenvolvidas para determinar propriedades do solo, é possível determinar: (E) Modulo de Elasticidade (*Young's modulus*), (G) Módulo de Cisalhamento (*shear modulus*), e (K) Módulo Volumétrico (*bulk modulus*).

## 2.6 REAÇÕES DE CIMENTAÇÃO NA ESTABILIZAÇÃO DO SOLO

Na estabilização química de um solo há a adição de algum tipo de agente cimentante, assim, ocorrendo as reações de hidratação. Dependendo do tipo do agente cimentante inserido, essas reações se alteram, sendo mais lenta, ou mais rápida, com maior ou menor ganho de resistência mecânica.

Os agentes cimentantes, também chamados de aglomerantes ou ligantes, tem sua capacidade de se combinar com a água de formas diferentes entre si, em geral dependente da razão entre cal:silica ( $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ ). Se for maior a razão, mais reativo é o ligante. Aos materiais cimentícios, que em contato com água reagem, denomina-se como ligante hidráulico (cimento e cal), desenvolvendo-se em alguns dias. Para aqueles que precisam de um ativador para reagir, nomeia-se hidráulico latente (escória de alto forno). Esse ativador pode ser a  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  produzida nas reações do cimento Portland ou da cal, levando longos períodos para sua reação (CORREIA, 2011).

### 2.6.1 Reações com cimento

Um solo cimentado tem uma definição na NBR 12253/92, como sendo produto endurecido resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem. O *American Concrete Institute*, define o solo cimento como uma mistura adequada de solo, cimento e água, compactada em uma alta densidade.

Para Foppa (2005), o solo-cimento difere do concreto em muitos aspectos. Uma diferença essencial é que no concreto existe uma quantidade de nata (cimento + água) suficiente para recobrir a superfície dos agregados e preencher os vazios existentes entre os mesmos. Já nas misturas de solo-cimento, a quantidade de pasta é insuficiente para recobrir a superfície de todas as partículas de solo e preencher os vazios existentes, resultando em uma matriz cimentícia que une nódulos de agregados não cimentados.

Axelsson, et al. (2002) citaram que o acréscimo de agente cimentantes tende a aumentar a densidade do solo. Com o aumento da densidade, há um aumento na resistência do solo.

As ligações químicas que se desenvolvem entre o cimento e as superfícies minerais são mais importantes nas misturas de granulação mais fina, como as do solo cimento, diferente das misturas com agregados graúdos, como o concreto (HANDY, 1958). Durante o processo de hidratação dos cimentos nas misturas com solo, ocorrem algumas reações que dão origem a cimentação dos solos.

Quando a água no solo encontra com o cimento, ocorre a hidratação do cimento rapidamente e a subsequente formação dos produtos principais, quais sejam, os silicatos de cálcio hidratados<sup>2</sup>, aluminatos de cálcio hidratados<sup>3</sup> e cal hidratada (LORENZO & BERGADO, 2006).

Segundo Vendrusculo (1996), as reações que ocorrem no sistema solo-cimento podem ser divididas em reações primárias e secundárias. Em solos muito granulares e sem argila, a ação cimentante ocorre por meio dos produtos das reações primárias (a), já em solos predominantemente argilosos, a ação cimentante ocorre por meio das reações secundárias (b).

---

<sup>2</sup> C-S-H, Silicato Hidratado de Cálcio.

<sup>3</sup> C-S-A, Aluminatos Hidratados de Cálcio.

As reações do cimento misturado ao solo podem ser descritas, conforme Moh (1965), desta forma:

a) Reações primárias:



b) Reações secundárias:



Na primeira fase das reações primárias é produzida o hidróxido de cálcio e o C-S-H. Na segunda fase das reações, as substâncias cimentantes são formadas sobre as superfícies das partículas de argila ou em sua vizinhança, causando a floclulação dos grãos de argila cimentados nos pontos de contato (VENDRUSCULO, 1996). Acrescenta Janz e Johansson (2002), que cerca de 50% do cimento já deve ter reagido após 3 dias, 60% aos 7 dias, e aproximadamente 90% após 90 dias. O produto gerado nas reações é o gel C-S-H.

De acordo com Lorenzo e Bergado (2006), a hidratação do cimento aumenta o pH da água dos poros. A sílica e alumina do solo, que são ácidas, são dissolvidas por bases fortes de compostos do cimento a partir dos argilo-minerais e materiais amorfos na superfície da partícula da argila, sendo esta reação similar à que ocorre entre um ácido fraco e uma base forte.

De acordo com Lea (2004), o cimento consiste de diferentes substâncias, sendo que as principais responsáveis pelo ganho de resistência são os silicatos: Silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ )<sup>4</sup> e Silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ )<sup>5</sup>.

Sugerem Ingles e Metcalf (1972), que nos solos orgânicos, o cimento Portland de alta resistência inicial (ARI) é o mais adequado, pois este tipo de cimento apresenta maiores teores de silicatos de cálcio, permitindo uma reação de hidratação mais rápida, não sendo afetado em demasia pela presença de substâncias inibitórias à hidratação, normalmente encontradas na matéria orgânica.

---

<sup>4</sup>  $(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$

<sup>5</sup>  $(\text{CaO})_2\text{SiO}_2$

Para Mindness et al. (2003), a adição de gipsita ao cimento irá proporcionar um retardamento no início do enrijecimento durante a cimentação. Acrescenta Lea (2004), que quando se utilizam os sub-produtos da gipsita, como o Fosfogesso, esse tempo pode se alongar ainda mais.

Quando se trata de um solo argiloso, pode-se assimilar a reação mais lenta com o cimento. As massas específicas naturais da argila mole e da turfa são muito baixas. Os vazios são muito grandes e preenchidos, em sua maioria, com água. Para estabilização, esta água deve ser substituída por um agente cimentante, que é normalmente o cimento Portland. Quando o número de vazios diminui, há um aumento de resistência à compressão não confinada do solo. A eficácia da estabilização com cimento Portland pode ainda depender de como ocorre à compactação do material (DIAS, 2012).

A água é essencial ao se misturar solo mole com cimento. O teor de água total da mistura é a soma do teor de água natural do solo, mais a água injetada no solo para amolgá-lo e a água da nata cimentante (BERGADO e LORENZO, 2005).

Conforme Benson (2011), em solos com presença de material orgânico, as reações devem ser inibida ou retardada. Mecanismos de interferência da matéria orgânica com o ganho de resistência na estabilização química são sugeridos por Hampton (1998); Axelsson et al, (2002); Johansson (2002), *apud* Benson (2011):

- a) A matéria orgânica pode alterar a composição e estrutura dos géis de C-S-H, e também o tipo e a quantidade de outros produtos de hidratação, por exemplo, etringita;
- b) Materiais orgânicos frequentemente contêm materiais, tais como húmus ou ácidos orgânicos, que retardam reações de enrijecimento;
- c) A matéria orgânica forma complexos com alumínio e íons metálicos, interferindo na hidratação.

Acrescenta Benson (2011), que as reações pozolânicas podem ser interferidas ainda quando o pH da mistura for inferior a 9.

Se o solo possuir matéria orgânica, o desenvolvimento das reações químicas pode ser fortemente condicionado. A matéria orgânica é fundamentalmente constituída por húmus e ácidos húmicos, contribuindo decisivamente para elevar o teor em água de um solo, aumentar a sua porosidade e reduzir o seu pH. A sua presença traduz-se, em geral, por



significativos impactos negativos em termos de estabilização do solo (AXELSSON, et al., 2002).

Solos com elevada plasticidade, exigem altas dosagens de material cimentício e equipamentos adequados para realizar a mistura, variando em torno de 15 dias para que sejam completadas as interações entre solo-cimento. O processo de cura também pode interferir no ganho de resistência à compressão simples. Nos corpos de provas curados em imersão, o  $q_u$  tende a ser inferior (VENDRUSCULO, 1996).

Os produtos das reações que se desenvolvem com a escória granulada de alto forno são em tudo semelhantes aos acima descritos, com a diferença de que não se produz hidróxido de cálcio -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - na reação de hidratação da escória. A reação de hidratação da escória é ativada pela presença do cimento Portland (da reação de hidratação do cimento produz-se hidróxido de cálcio que origina o elevar do pH, com a consequente ativação da escória) (CORREIA, 2011).

### **2.6.2 Reações com cal**

De acordo com Ingles e Metcalf (1972) a estabilização com a cal tem pouco efeito em solos altamente orgânicos ou sem finos, podendo ser mais eficiente que o cimento em pedregulhos argilosos.

A cal reage rapidamente em contato com a água do solo, formando  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , e gerando uma grande quantidade de calor. O ganho de resistência ocorre por reações pozolânicas secundárias entre compostos de alumino-silicatos presentes no solo e o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  formado pela hidratação da cal (JANZ E JOHASSON, 2002).

A floculação e aglomeração causam mudanças na textura da argila, pois sua estrutura é alterada de plana e paralela para uma orientação aleatória de partículas (Prusinski e Bhattacharja, 1999). As reações pozolânicas são responsáveis pelo contínuo aumento da resistência mecânica de misturas solo-cal. Esse aumento ocorre porque as fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo reagem com cal e água, formando diversos produtos cimentantes.

De acordo com Johann (2013), alguns fenômenos que originam a etapa rápida no processo da interação da cal com um solo fino são: troca catiônica, floculação-aglomeração, compressão de dupla camada elétrica, adsorção de cal e reações químicas. A fase lenta é caracterizada pelas reações pozolânicas, que proporcionam um aumento da resistência devido à formação de produtos cimentantes, e pela carbonatação.

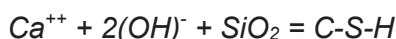
Conforme Prusinski e Bhattacharja (1999) a superfície do argilo–mineral é deficiente em carga e, para neutralizar essa deficiência, cátions e moléculas de água são atraídos para a superfície carregada negativamente. Isso resultará em uma separação de duas camadas, chamadas de dupla camada difusa.

Bergado, et al. (1996), mostram as reações pozolânicas que ocorrem quando misturados cal e solo:

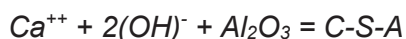
- a) Dissociação dos íons da Cal.



- b) Formação do C-S-H, Silicato Hidratado de Cálcio.



- c) Formação do C-A-H, Aluminatos Hidratados de Cálcio.



Conforme Rogers e Glendinning (2000), os íons hidroxilas liberados da cal elevam o pH da mistura de modo que a sílica e a alumina sejam dissolvidas do solo. Estas reações não irão se extinguir até enquanto houver  $\text{Ca(OH)}_2$  reagindo e sílica disponível no solo.

Conforme cita Chew (2004), a ausência de reação de hidratação primária no tratamento de solo com cal pode levar a uma microestrutura diferente da que é produzida por meio do tratamento com cimento. Em regiões onde a cal não está disponível a um preço baixo, o cimento pode ser a alternativa como aditivo preferido devido ao desenvolvimento mais rápido do ganho de resistência resultante da reação de hidratação.

Ingles e Metcalf (1972) afirmam que as reações químicas só ocorrem em presença de água. Os géis de silicato provenientes das reações cobrem e ligam as partículas de argila, tomando o espaço dos vazios. Os géis são cristalizados e transformados em silicatos hidratados de cálcio. A água por sua vez tem a função de carregar os íons de cálcio e hidroxila para a superfície da argila. Na Figura 8 pode observar-se esse mecanismo.

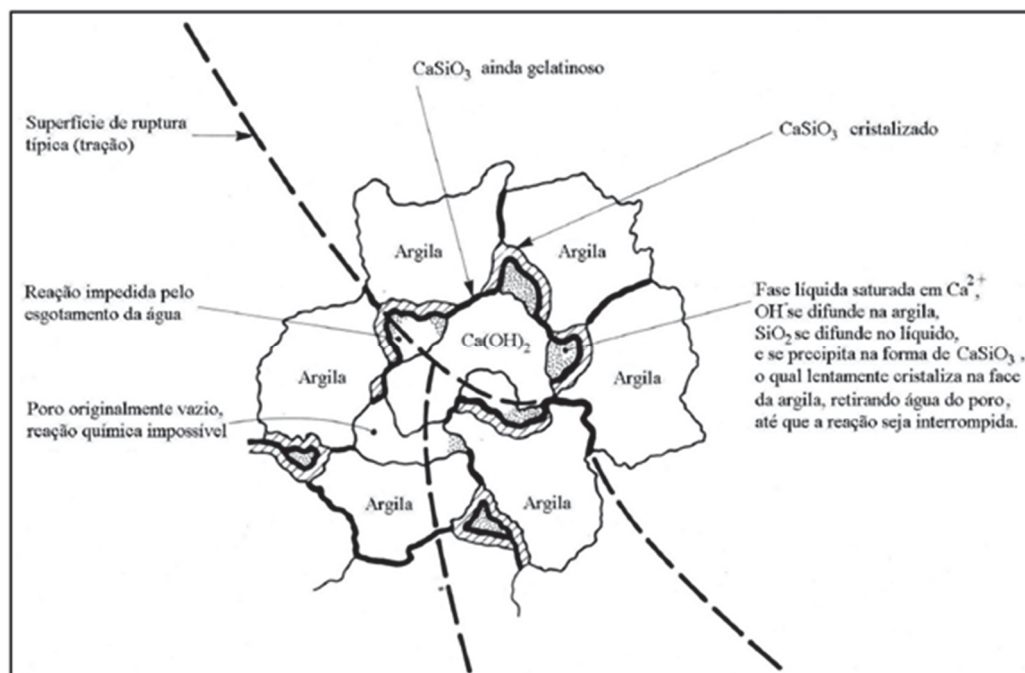


Figura 8 - mecanismos de estabilização do solo cal (Ingles e Metcalf, 1972, 1994)

Segundo Janz e Johansson (2002), a estabilização de solo orgânico com cal é mais sensível do que a estabilização de cimento.

### 2.6.3 Reações com Escória de Alto Forno

Conforme já citado anteriormente, os materiais cimentícios latentes necessitam de um ativador para que iniciem as reações de hidratação. Segundo Janz e Johansson (2002), o material cimentício mais conhecido dentre eles é a Escoria de Alto Forno. Para que esse material seja reativo é necessário ter uma grande quantidade amorfa em sua composição, a qual é conseguida pelo rápido resfriamento do resíduo do ferro fundido. Cerca de 85% de todo o material deve ser formado por estruturas amorfas, para que se obtenha uma boa reatividade. A finura da escoria também pode interferir na sua reatividade.

As reações das escórias são muito parecidas com as do cimento, porém, ocorrem de forma mais lenta e com menor liberação de calor. No entanto, a resistência em longo prazo a partir das misturas com escória pode ser maior.

As reações em solos orgânicos podem ser potencializadas com o uso de aditivos, causando um efeito positivo na estabilização. Solos orgânicos muitas vezes não contêm partículas pozolânicas suficientes para consumir todo o Ca(OH)<sub>2</sub>, que é formado quando o cimento é hidratado, encontrando na escória de alto forno esse suprimento. Desta forma, Axelsson, et

al. (2002), mostrou que as misturas com escória tiveram resultados com resistência superior as misturas apenas estabilizadas com cimento.

Indica Correia (2011), que a utilização de escória como adição ou substituto parcial do cimento Portland, corresponde não só à utilização de um subproduto industrial, mas também às vantagens em termos ambientais.

Como as escórias são distintas entre si, deve ser realizado anteriormente um estudo para verificação da sua reatividade e aplicabilidade em cada solo, além da verificação do melhor ativador.

#### 2.6.4 Água de reação

A quantidade de água utilizada na mistura deve ser de tal modo que satisfaça a hidratação do material cimentício utilizado, sendo adequado o uso de água potável (INGLÊS e METCALF, 1972).

#### 2.6.5 Relação Água/Agente Cimentante

Conforme descrito por Janz e Johansson (2002), a relação entre a água e os materiais cimentantes presentes na mistura do solo-cimento é dada pela razão água:agente cimentante, um dos parâmetros de qualidade do cimento quando usado como ligante. A razão  $a/c$  é dada pela água ( $a$ ) e o agente cimentante ( $c$ ). Quanto maior for a razão existente, maior é o afastamento entre as partículas do cimento, tendo como consequência uma maior porosidade e menor resistência mecânica da mistura Figura 9.

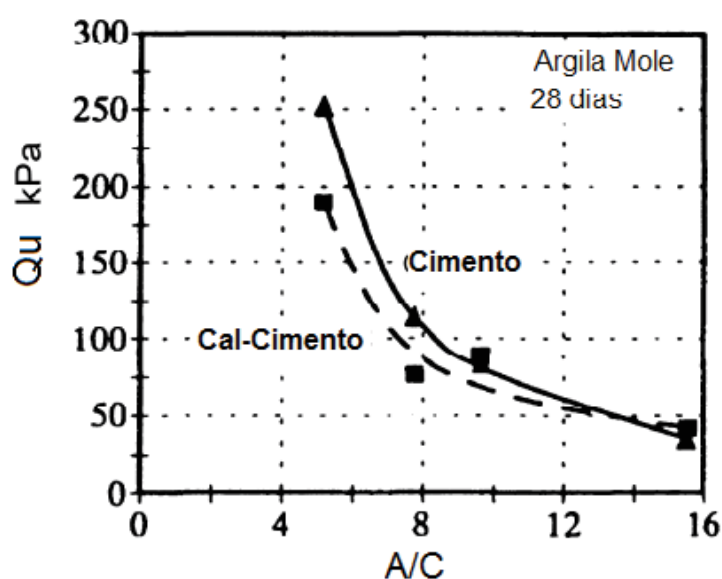


Figura 9 - Relação  $a:c$  para uma argila melhorada com cimento e cimento-cal (Janz e Johansson, 2002).

A mesma relação pode ser feita quando utilizados outros aditivos ao cimento, apenas somando as massas dos materiais cimentantes utilizados na mistura.

Acrescenta Lea (2004), que a relação também pode ser chamada de relação água/sólidos. Essa relação tem influência nas reações da mistura, no processo de hidratação e no material finalmente hidratado.

Para Horpibulsuk, et al. (2005), em argilas moles com teores de umidade variando entre 106% a 185%, verifica-se que a relação de água/agente cimentante é um parâmetro apropriado para a análise do desenvolvimento da resistência deste material, por levar em consideração a interação físico-química entre a água, a argila e o cimento.

Afirma Azambuja (2004), que quanto menor o fator obtido de água:cimento, maior a resistência à compressão simples para solos com elevados teores de umidade. Assim como, havendo um aumento na relação da água:cimento, o valor da rigidez inicial medida sofre uma conseqüente queda.

## 2.7 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A resistência à compressão simples e a resistência aos ciclos de molhagem e secagem são as medidas mais comuns da efetiva estabilização com cimento (INGLES e METCALF, 1972). Geralmente a resistência aumenta linearmente com a quantidade de cimento, porém esse crescimento pode ser alterado de acordo com o tipo de solo.

De acordo com Pinto (2006), o ensaio de resistência à compressão não confinada consiste na compressão axial de um corpo de prova cilíndrico de solo, moldado ou compactado, com tensão confinante igual a zero ( $\sigma_c = 0$ ). Pode-se dizer que este ensaio é um esforço axial, que tende a provocar a ruptura do corpo de prova submetido a este esforço.

A resistência à compressão simples é, segundo a NBR 12770 (1992), uma tensão de compressão pela qual um corpo de prova cilíndrico se rompe ao atingir a tensão máxima axial, ou deformação axial máxima de 15%<sup>6</sup>. Os valores resultantes da aplicação deste ensaio correspondem à resistência de solos coesivos em termos de tensões totais. Sendo aplicável a solos como argilas e solos cimentados saturados. O carregamento é efetuado com deformação controlada. O anel dinamométrico é utilizado para determinar os esforços

---

<sup>6</sup> Estabelecimento do critério de ruptura pela NBR 12770 (1992).

aplicados. O carregamento deve prosseguir até que os valores de carga aplicada diminuam com a evolução dos deslocamentos.

### **2.7.1 Fatores que influenciam na resistência à compressão de solo cimento**

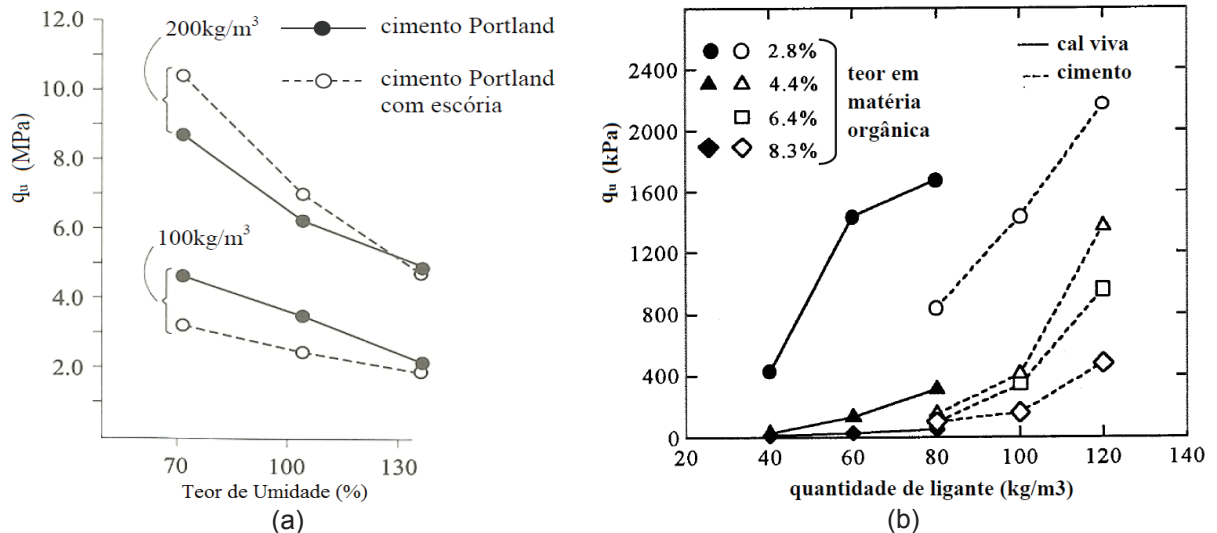
Entre tantos fatores que podem contribuir para o parâmetro de resistência do solo, alguns tem um maior impacto quando relacionados a estabilização, quais sejam, teor de umidade, quantidade de matéria orgânica, a acidez (pH), e a composição granulométrica.

Conforme citado por Correia (2011), cada uma delas tem a sua devida especificidade:

- a) O teor de umidade da mistura solo mais material cimentante tem uma relação de decréscimo nos valores de resistência à compressão simples com o aumento na quantidade de água incorporada, indiferente da quantidade e do tipo de agente cimentante. O que justifica o fato é o aumento do volume de vazios, medida que aumenta com elevação do teor em água, originando uma matriz mais aberta, logo, menos resistente. Figura 10 (a);
- b) O teor de matéria orgânica tem direta influência na resistência, sendo que, quanto maior a quantidade de material orgânico, menor será o valor obtido de resistência à compressão simples. Uma forma de se contornar essa deficiência é pela escolha do agente cimentante. Acima de 8% no teor de matéria orgânica, aconselha-se optar pelo cimento Portland. Figura 10 (b);
- c) Quanto ao pH do solo, quando relacionado a valores de resistência, tem-se uma redução na capacidade de suporte do solo-cimento. Quanto mais ácido o solo é, ou seja, quanto menor for valor do pH, menor o valor da resistência mecânica, devido a reatividade das reações pozolânicas;
- d) Solos com uma granulação mais bem graduada, com valores consideráveis de finos, e sem muitas frações de areia, devem apresentar um melhor comportamento quando relacionados à resistência à compressão simples.

Citam Mitchell e Soga (2005), que a matéria orgânica no solo pode ser responsável pela alta plasticidade, alta compressão, baixa condutividade hidráulica, e baixa resistência. Muitas reações e interações entre o solo e a matéria orgânica são possíveis.

Para Janz e Johansson (2002), as substâncias orgânicas têm um efeito negativo sobre a eficácia da estabilização. Os ácidos húmicos e outros grupos de ácido reagem com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  formando produtos insolúveis, além de diminuir o pH, fazendo com que o ganho de resistência seja mais lento



**Figura 10 - Fatores de influência na resistência a compressão simples do solo-cimento: (a) resistência à compressão simples pelo teor de umidade da mistura; (b) resistência à compressão simples pela quantidade de ligante incorporada; (Correia, 2011)**

Portanto, quando se compara valores de resistência à compressão simples de solos artificialmente cimentados, tem-se um valor de  $q_u$  maior quanto: menor for o valor do teor de umidade; menor for o teor de matéria orgânica; e maior for o pH.

### 2.7.2 Efeito da relação volume de vazios por volume de agentes cimentantes

A relação existente entre os vazios presentes nas misturas dos solos pelos teores agentes cimentantes aplicados, tem influência na capacidade de resistência à compressão simples, assim como em outros parâmetros obtidos. A partir dessa relação é possível se estabelecer um método de cálculo para a estimativa da capacidade de carga dos solos melhorados.

Larnach (1960), realizou um estudo utilizando uma areia fina misturada com uma argila pulverizada na proporção de nove partes da areia para uma de argila. As porcentagens de cimento utilizadas, em relação ao peso do solo seco, foram de 5,3%, 11,1% e 17,7%. Para cada porcentagem de cimento foi feita uma série de ensaios de compressão simples e de flexão em vigotas, moldadas a diferentes teores de umidade e massas específicas aparente secas. Para determinar a relação volume de vazios/volume de agentes cimentantes Larnach (1960), utilizou a equação (1):

$$\frac{V_v}{V_{ci}} = \frac{\text{Volume absoluto de vazios (ar + \acute{a}gua)}}{\text{Volume absoluto de cimento}} \quad (1)$$

Conforme apresentado na Figura 11, Larnach (1960) conclui que o uso deste tipo de rela\c{c}\~ao, pode ser de extrema utilidade para dosagem e controle de execu\c{c}\~ao de misturas de solo-cimento em campo.

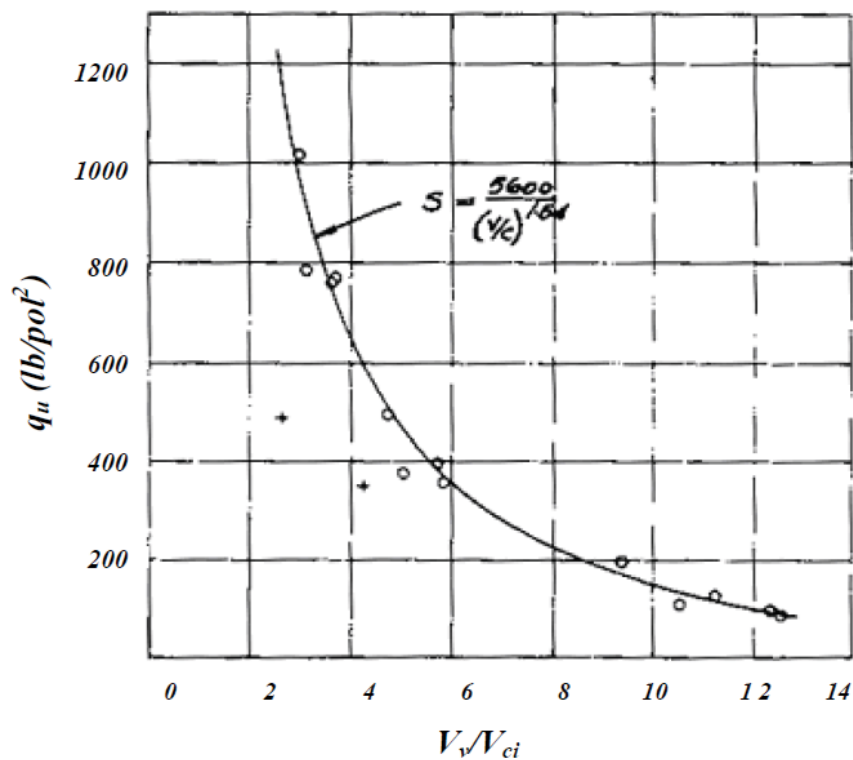


Figura 11 - Relação entre fator vazios/cimento e resistência à compressão simples (adaptado de Larnach, 1960)

Em outros estudos como o de Foppa (2005), e Cruz (2008), onde areia é tratada com cimento em diferentes teores, com variadas massas específicas aparente secas, e teores de umidade diversificados. Verificam-se bons ajustes dos dados obtidos com a relação de volume de vazios/volume de agentes cimentantes.

Consoli, et al (2007), com o objetivo de verificar o comportamento tensão-deformação de corpos de prova com mesma relação vazios/volume de agente cimentante, realizaram seis ensaios triaxiais não-drenados. Os autores concluíram que a relação volume de vazios/volume de agentes cimentantes também fornece bons resultados para a previsão da tensão desvio dos ensaios triaxiais não-drenados.



Vários trabalhos recentes vêm dando ênfase na previsão do comportamento mecânico de solos artificialmente cimentados através da relação entre o volume de vazios/volume de agentes cimentantes (FOPPA, 2005; LOPES JUNIOR, 2007; CONSOLI, 2007; CRUZ, 2008; DALLA ROSA, 2009).

Contudo Foppa (2005) cita que uma forma mais elegante de expressar o fator vazios/cal pode ser feita utilizando ao invés do volume de vazios, a porosidade do material ( $\eta$ ) expressa em porcentagem e, ao invés do volume de agente cimentante, o teor volumétrico de agente cimentante expresso em porcentagem do volume total ( $C_{iv}$ ). Sendo assim, a expressão que defini melhor a correlação dos vazios/agente cimentante fica apresentada como  $(\eta/C_{iv})$ . Exemplo apresentado na Figura 12.

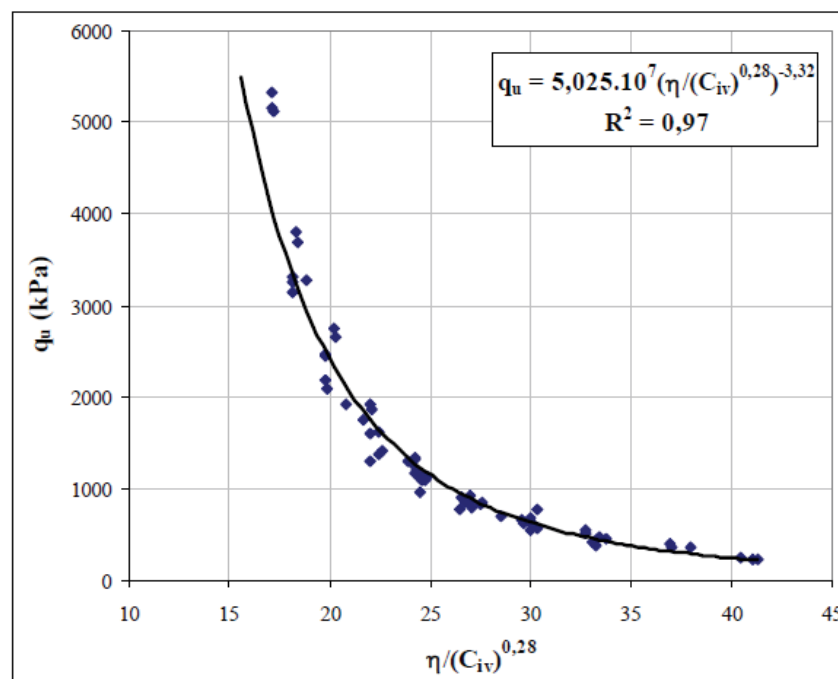


Figura 12 – Relação vazios/cimento expresso em termos de porosidade e teor volumétrico de cimento (Foppa, 2005)

O expoente de ajuste que melhor se adequa nas relações entre porosidade e teor volumétrico de cimento (como na Figura 12 o expoente 0,28), é obtido por meio de tentativas, buscando um refinamento da curva entre capacidade de resistência a compressão ou medidas de rigidez inicial, pelo  $(\eta/C_{iv})^{exp}$ , esse expoente (exp), varia em função do tipo de solo e do cimento utilizado, que irá alterar o tipo de matriz e consequentemente o ajuste da curva (CRUZ, 2008).

Além da correlação com a resistência à compressão simples Cruz (2008) também encontrou uma relação para as medidas de rigidez inicial  $G_0$ , apresentadas na Figura 13.

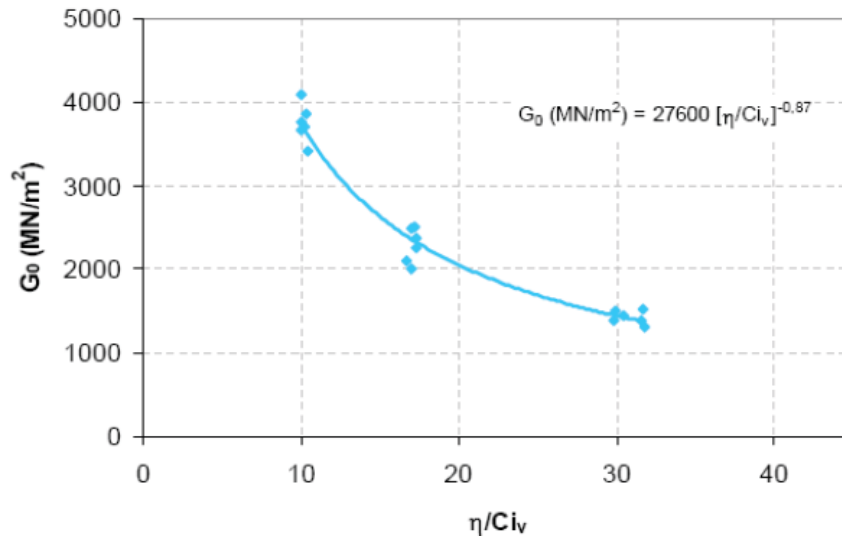


Figura 13 – Relação módulo cisalhante pelo volume de vazios/volume de agente cimentante (CRUZ, 2008)

Desta forma o fator porosidade/teor volumétrico de agente cimentante ( $\eta/C_{iv}$ ), mostra-se um parâmetro muito eficaz quando aplicado à previsão de comportamento do material para dosagem de solo-cimento, sendo uma estimativa precisa e confiável.

Tendo como base essas e tantas outras pesquisas bibliográficas, foram definidos os materiais e o programa experimental, que tornaram possíveis resultados e conclusões, acerca da caracterização mecânica do solo mole orgânico artificialmente cimentado, apresentados nos próximos capítulos desta dissertação.

### 3 MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo é destinado à delimitação do programa experimental que norteia a pesquisa desta dissertação de mestrado, focada na estabilização mecânica de solo mole orgânico.

#### 3.1 MATERIAIS

O tópico dos materiais se inicia explanando sobre caracterização do solo utilizado, seguido dos materiais cimentícios aplicados na estabilização.

##### 3.1.1 Solo

A matriz experimental do trabalho tem por base um solo mole orgânico, extraído da obra de ampliação do terminal de passageiros e pátio de aeronaves do aeroporto internacional Salgado Filho, localizado no município de Porto Alegre estado do Rio Grande do Sul – Brasil, cuja localização está ilustrada na Figura 14.

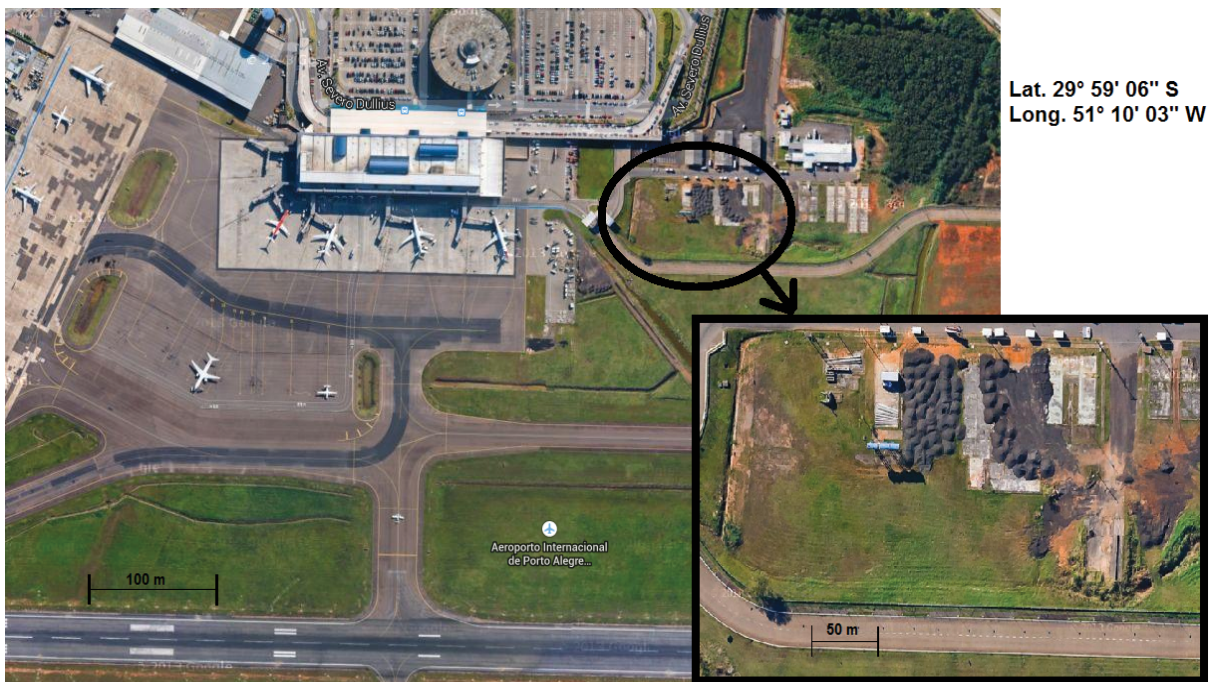


Figura 14 - Mapa de localização geográfica do local da retirada do solo (Google Maps, 2014)

O aeroporto Salgado Filho do município de Porto Alegre tem data de inauguração no ano de 1940, possuindo uma área de aproximadamente 3.600.000 m<sup>2</sup>, sendo o maior da região sul do Brasil.

Sobre a formação do solo da região em estudo, Schnaid et al. (2001), apontam que a planície do sistema lagunar, Guaíba-Gravataí, teve seu desenvolvimento resultante da escavação de um páleo-vale, por processos fluviais, durante fases de baixo nível do mar.

O perfil de subsolo é constituído essencialmente de uma crosta de argila pré-adensada na superfície, seguindo-se de uma camada de argila mole e uma camada de areia subjacente. O valor médio da espessura da camada de argila para a área de estacionamento de aeronaves é aproximadamente 8 m, incluindo a crosta pré-adensada. A camada de argila de natureza orgânica de alta plasticidade, de cores cinza escura e preta, de consistência muito mole, encontra-se sobre camada arenosa de compactidade crescente com a profundidade. O nível do lençol freático apresenta-se próximo à superfície (SCHNAID et al., 2001). Na Figura 15, é apresentado um perfil típico das sondagens realizadas na região do local do solo em estudo.

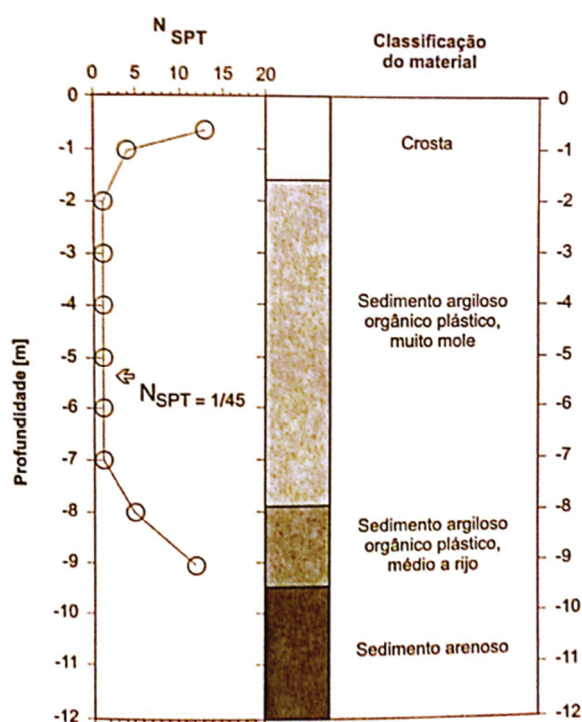


Figura 15 - Perfil típico da região do solo em estudo (Schnaid et al., 2001).

### 3.1.1.1 Coleta da amostra de solo

A coleta da amostra de solo ocorreu durante a execução de uma estaca do tipo hélice contínua (Figura 16(a)). Durante o processo de extração do solo pela haste helicoidal, a



aproximadamente 4m de profundidade, foi retirada a amostra. Imediatamente após a coleta as porções de solo foram acondicionadas em caixas plásticas (Figura 16 (b)), e transportadas até o laboratório onde os estudos se desenvolveram.

No laboratório, foi realizada uma verificação a fim de atestar uma não contaminação do solo com outros materiais como: solo de aterro, materiais da superfície e outros possíveis contaminantes. Além de ser realizada uma homogeneização mecânica.

Todo o solo necessário para a pesquisa foi acondicionado em um recipiente, capaz de manter a amostra protegida de agentes externos.

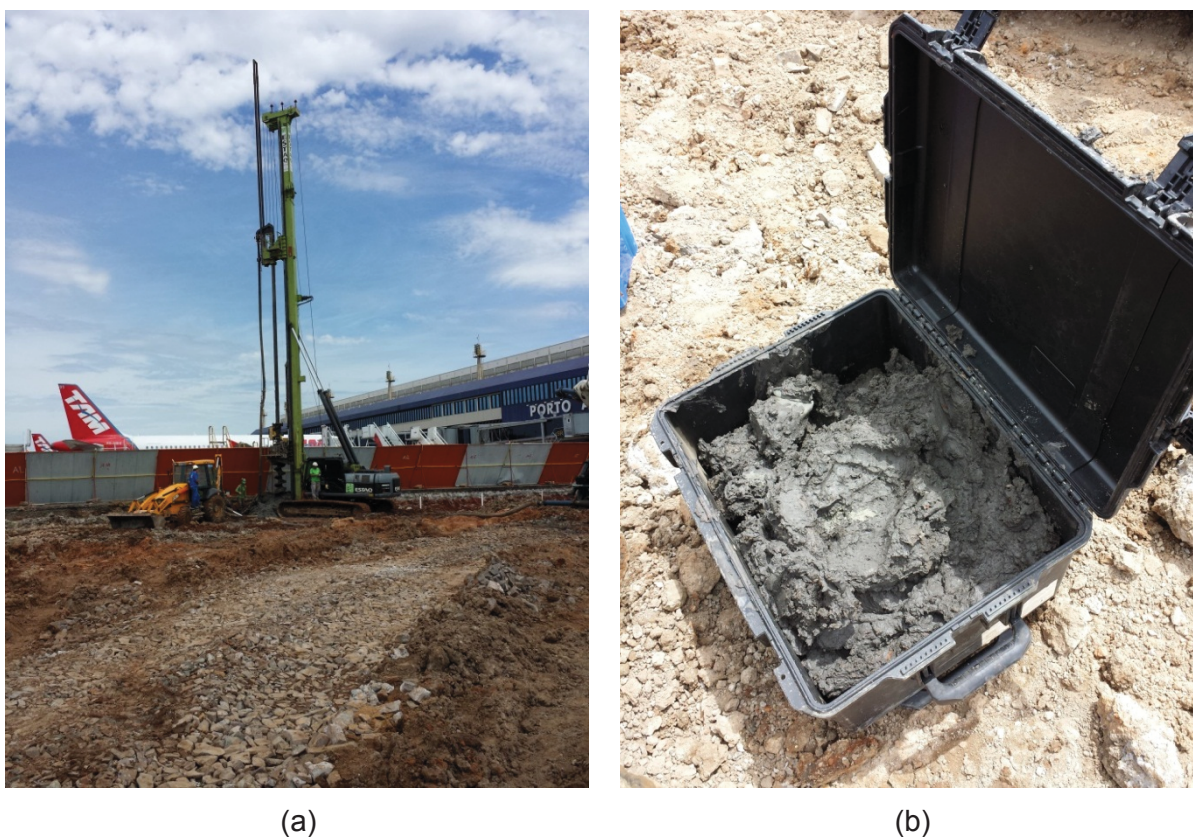


Figura 16 - Hélice Contínua (a), Caixa contendo solo extraído (b), (Rilho, 2014)

### 3.1.1.2 Caracterização das amostras de solo

A determinação do teor de umidade natural do solo seguiu as recomendações da NBR 6457 (1986). Realizou-se secagem em estufa com temperatura variando entre 60°C e 65°C. Esta temperatura foi definida pelo fato de se tratar de um solo com presença de material orgânico. A média de 4 amostras do teor de umidade do solo natural foi o valor de 91,3%.

Submetendo amostras de solo aos ensaios recomendados pela NBR 6508 (1984) norma que norteia a determinação do peso específico real dos grãos, obteve-se na média de 4 amostras o valor de 25,6 kN/m<sup>3</sup>.

A determinação do teor de matéria orgânica seguiu as recomendações da NBR 13600 (1996), que descreve o ensaio de perda ao fogo. O teor de matéria orgânica do solo em estudo foi de 10,43%, estando na faixa de 4 a 20%, conforme a classificação citada por Pinto (2006) de solos orgânicos brasileiros.

O Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade foram obtidos por meio dos ensaios padronizados pela NBR 6459 (1984) e NBR 7180 (1984), respectivamente. O Limite de Liquidez obtido foi de 76%, enquanto o Limite de Plasticidade de 36%, com Índice de Plasticidade consequente de 40%, solo considerado orgânico altamente plástico (OH) de acordo com a classificação unificada de Casagrande.

O solo foi classificado conforme SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos), como um Silte Orgânico de Alta Compressibilidade. Já pelo sistema AASHTO, classificou-se como um A 7-5.

Na Tabela 7 é apresentado um resumo das características geotécnicas do solo mole orgânico em estudo.

**Tabela 7 - Resumo das características geotécnicas do solo**

Amostra	Análise Granulométrica			Limites de Atterberg			Peso Específico Real dos Grãos kN/m <sup>3</sup>	Teor de Umidade Natural %
	Argila %	Silte %	Areia %	LL %	LP %	IP %		
Solo	12,7	87,3	0	76	36	40	25,6	91,3

Conforme apresentado por Correia (2011), a granulometria é uma característica muito influente no tratamento de solo com agentes cimentantes e deve ser bem observada. Segundo Correia (2011), a melhor forma de se obtê-la é com o solo em seu estado natural e sem nenhum tipo de pré-tratamento.

O ensaio de granulometria laser foi realizado em equipamento CILAS 1180, nas dependências do laboratório de materiais cerâmicos (LACER), no Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Na Figura 17 pode ser observada a curva granulométrica do solo.

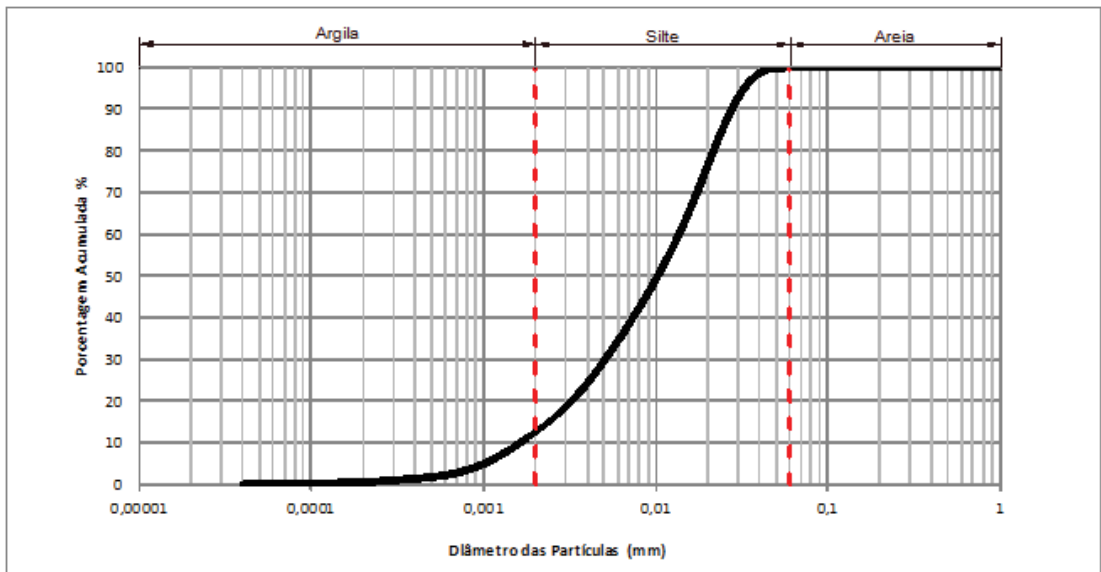


Figura 17 - curva granulométrica do solo

O solo mole orgânico em estudo, em resumo, apresenta uma curva granulométrica bem definida, sendo composta predominantemente por fração siltosa de aproximadamente 87%, e complementar a isso, a fração argila com cerca de 13% (Figura 18).

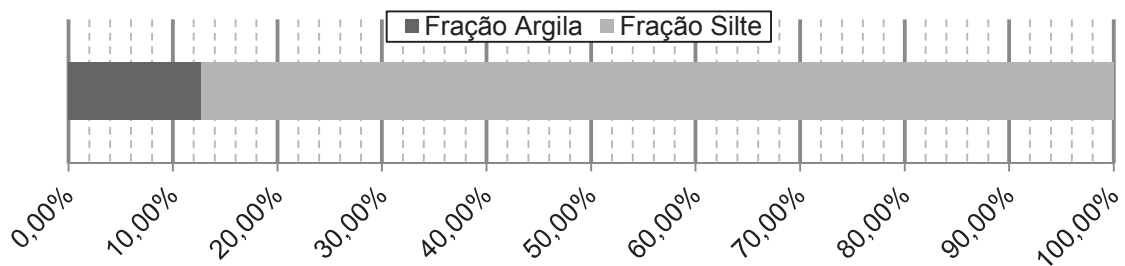


Figura 18 - Variação da composição granulométrica

O solo mole orgânico estudado possui características bem definidas comuns para este tipo de formação, em acordo com outros estudos como o de Correia (2011), Axelsson (2002), Ahnberg (2006). Tendo esse solo como base para o estudo, adicionaram-se materiais cimentícios a fim de se obter a estabilização mecânica do mesmo, que em seu estado natural, possui pouca ou nenhuma resistência à compressão simples.

### 3.1.2 Cal

A cal utilizada na pesquisa foi adquirida no comércio do município de Porto Alegre – RS. Trata-se de uma cal hidratada Primor Extra, da empresa Dagoberto F. de Barcellos e Cia. Ltda. Esta era contida em embalagens lacradas de plástico, para fins de proteção.

A análise química da cal foi realizada de acordo com a normativa (NBR 6473, 2003), o ensaio consiste na determinação dos teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , perda ao fogo e resíduo insolúvel. Como pode ser visto na Tabela 8, foi determinada uma percentagem de óxido de magnésio elevada no valor de 28%, o que torna capaz de classificar como dolomítica.

**Tabela 8 - Composição química da Cal Hidratada**

Elementos	Quantidades
$\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	0,20
$\text{CaO}$ (%)	40,00
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	0,23
$\text{MgO}$ (%)	28,00
$\text{CO}_2$ (%)	1,80
Resíduo Insolúvel	12,70
Perda ao Fogo	17,10

Além desses ensaios também foram realizados os de caracterização física, como massa específica real dos grãos (NBR 6508, 1984), superfície específica Blaine (NBR NM 76, 1998), finura em porcentagem com partículas menores que 0,075mm. Na Tabela 9 podem ser verificados tais valores.

**Tabela 9 - Caracterização física da Cal Hidratada**

Ensaio	Quantidades
Finura (<0,075mm) %	17,2
Massa específica real dos grãos ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,6
Superfície específica Blaine ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	10.000 - 15.000

A cal hidratada foi escolhida, por apresentar uma melhor eficácia quando submetida à estabilização de solo orgânico, conforme apresentado no início deste texto na Figura 1. As misturas eram feitas com cal adicionada de escória de alto forno para verificação da estabilização mecânica de solo mole orgânico.

### 3.1.3 Cimento

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), o cimento Portland é formado basicamente por calcário, argila e gesso. O processo de obtenção se dá moendo o calcário e a argila finamente, realizando uma mistura de aproximadamente 1:4 de argila: calcário. Em seguida, a mistura é cozida até a temperatura de  $1450^\circ\text{C}$ , obtendo-se um material granulado chamado clínquer Portland. O clínquer é então moído com pequena porção de gesso ( $\pm 5\%$ ), sendo o pó fino resultante, de cor cinza, o Cimento Portland.



O cimento utilizado na pesquisa para estabilização química do solo, foi um Cimento Portland CP V-ARI (Alta Resistência Inicial), da marca InterCement, comprado no comércio do município de Canoas-RS no mês de julho de 2014.

Esse tipo de cimento é comumente utilizado em todas as aplicações que necessitem de resistência inicial elevada e desforma rápida. Segundo a ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002) o desenvolvimento dessa propriedade é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, e pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com água, ele adquira elevadas resistências, com maior velocidade.

A Tabela 10 mostra a composição do cimento CP V-ARI, com uma porcentagem elevada de clínquer, tornando-o mais puro.

**Tabela 10 - Composição do Cimento (NBR 5733, 1991)**

Tipo	Componentes (% em massa)		Limites (% massa)
	Clínquer + Sulfatos de Cálcio	Material Carbonático	Perda ao Fogo
CP V ARI	100 - 95	0 - 5	4,5

O ensaio de massa específica real dos grãos seguiu as orientações da NBR-NM 23 (2000), que faz uso do frasco volumétrico de Le Chatelier, com líquido que não propicie reações de hidratação no cimento. O valor obtido no ensaio foi de 3,17 g/cm<sup>3</sup>.

A escolha pelo cimento CP V – ARI foi definida por se tratar de um cimento mais puro, sendo assim, as adições dos demais materiais usados como agentes cimentantes seriam realizadas no próprio laboratório de pesquisa.

#### **3.1.4 Escória de alto forno**

A escória de alto forno utilizada neste estudo foi fornecida pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN cimentos S/A). O material tem origem na linha de galvanização da empresa localizada no município de Volta Redonda – RJ.

Sem que haja nenhum tipo de beneficiamento, a empresa nomeia-o como: matéria-prima para produção de cimento. Em seu estado natural, a sua classificação é: de cor amarelo areia, peso aparente (seco) de 12,40 kN/m<sup>3</sup>, porosidade de 51,81%, e teor de umidade natural de 13%. Valores fornecidos pela CSN cimentos S/A.

Para esta pesquisa, é utilizada escória de alto forno em duas granulometrias distintas, sendo a amostra de escória de alto forno moída mais grossa aqui chamada de S(1), e outra com

granulometria mais fina S(2), os detalhes de cada uma delas serão expostos no decorrer desse tópico.

#### 3.1.4.1 Beneficiamento

Após o recebimento do material nas dependências do laboratório (LEGG), a primeira etapa foi uma secagem previa em estufa a 60°C para possibilitar o beneficiamento, realizando a moagem em um moinho de bolas, apresentado na Figura 19.



**Figura 19 - Moinho de bolas**

Para definir o tempo de moagem de cada granulometria (fina e grossa), foram realizados testes com a amostra moída em moinho de bolas.

No decorrer de um período contemplado entre 4h e 9h de moagem, foram retiradas amostras em intervalos de 1h, destinados aos ensaios de granulometria.

Os ensaios de granulometria tinham como finalidade verificar o comportamento da composição granulométrica ao longo do tempo de moagem. Os ensaios de granulometria a laser foram realizados no equipamento CILAS 1180, nas dependências do laboratório LACER - UFRGS.

Na Figura 20 temos as granulometrias referentes a cada tempo de moagem, sendo que, quanto mais tempo o material é moído menor será a granulometria apresentado pela escória de alto forno.

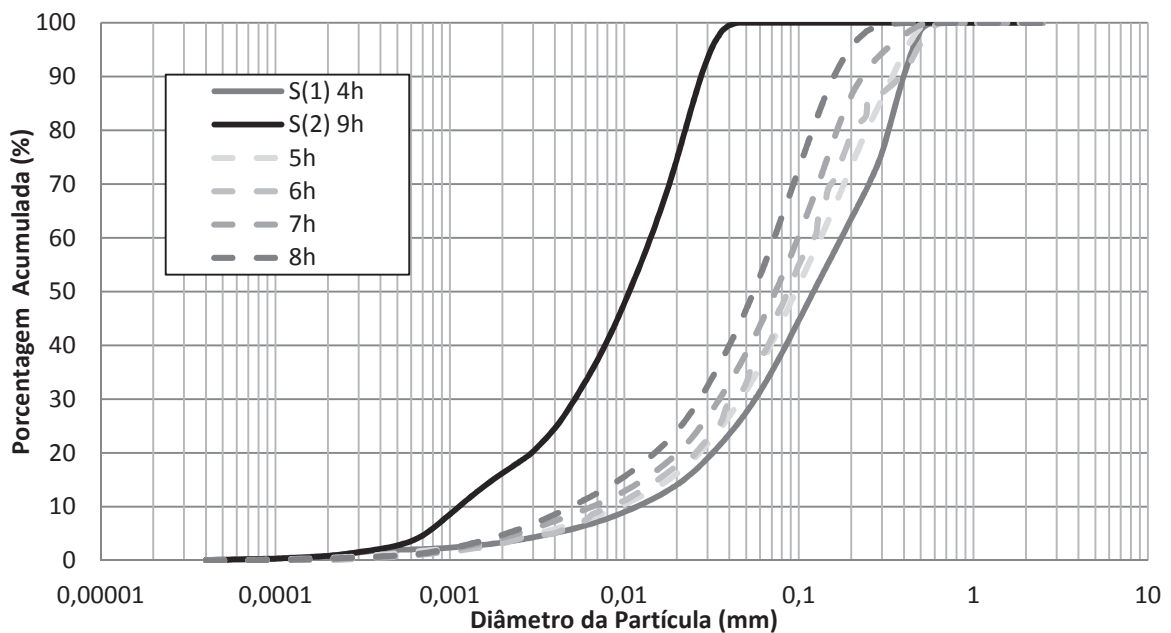


Figura 20 - Granulometria referente a cada tempo de moagem

Para cada uma das granulometrias, foram estipulados tempos distintos de moagem. Para a escória de alto forno moída com granulometria mais grosseira “S(1)”, o tempo foi determinado com 4h. O tempo para que se atingisse a granulometria mais fina “S(2)” foi fixado em 9h.

Segundo Janz e Johansson (2002), Correia (2011), John e Cincotto (1995), Axelsson, et. al. (2002) e Lea (2004), quanto mais fina a granulometria das adições incorporadas ao cimento, mais reativa está se apresentará.

#### 3.1.4.2 Análise química e massa específica real dos grãos

Como citam John e Cincotto (1995) e Lea (2004), a composição química da escória de alto forno tem grande influência em como a mesma irá se comportar durante a hidratação. Na Tabela 11 é apresentada a composição química da escória de alto forno moída estudada, valores condizentes com os já apresentados por Cincotto, et al (1992).

Tabela 11 - Composição química da escória de alto forno

Elementos	Quantidade
SiO <sub>2</sub> (%)	34,83
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	12,87
CaO (%)	38,54
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,98
MgO (%)	10,37
K <sub>2</sub> O (%)	0,34

Através de correlações com a composição química da escória de alto forno moída, foram determinados índices da atividade hidráulica e a basicidade da escória conforme já apresentados anteriormente na Tabela 12.

**Tabela 12 - Classificação da escória de alto forno**

Índices	Valores	Classificação
Índice de hidráulica DIN	1,8	Satisfatório
Índice de hidráulica ASTM	1,2	Bom
Índice de basicidade	P1 1,1	Básica
	P2 1,4	

Com os valores apresentados na Tabela 12, conclui-se que a escória é do tipo básica, apresentando índices de hidráulica segundo DIN e ASTM satisfatórias. De acordo com o que apresenta Lea (2004), e Li, et al. (2010), todos os valores são aceitáveis para boa utilização da escória de alto forno.

A massa específica real dos grãos foi determinada utilizando o mesmo método aplicado para cimentos Portland ou materiais em pó, através do frasco volumétrico de Le Chatelier, normatizado pela NBR-NM23 (2000). A massa específica real dos grãos da escória de alto forno estudada é 2,87 g/cm<sup>3</sup>.

Conforme citado por John e Cincotto (1995); Lea (2004), e Li, et al. (2010), a escória está de acordo com os índices satisfatórios, mas precisa de um ativador para que reações de hidratação sejam iniciadas (neste caso optou-se pelo cimento Portland CP V).

Com a granulometria variando entre uma grosseira e uma mais fina, é possível verificar as diferenças ocorridas causadas por este fator, nas adições de escória de alto forno moída ao cimento, com a finalidade da estabilização do solo mole orgânico.

### 3.1.5 Fosfogesso

O fosfogesso utilizado na pesquisa foi fornecido pela empresa Fosfértil, localizada no município de Uberaba – MG.

Originalmente, em seu estado natural, o fosfogesso se encontra na forma de grumos e com uma umidade elevada.

O teor de água livre, ou seja, a quantidade de água presente no fosfogesso em seu estado natural foi caracterizada em 21%. Para a determinação deste valor, no ensaio, o material foi

seco em estufa com temperatura variando em torno de 60°C até estabilização da massa. Posteriormente a secagem a amostra foi moída em moinho de bolas.

Nos experimentos foi utilizado o fosfogesso de duas maneiras diferentes. Em uma delas com o material seco em estufa a 60°C chamado neste trabalho de FG(60C) no formato dihidratado, e outra a 180°C chamado de FG(180C) sendo este hemihidratado. As razões das temperaturas e pormenores do material serão explicadas no decorrer do documento.

### 3.1.5.1 Beneficiamento do fosfogesso

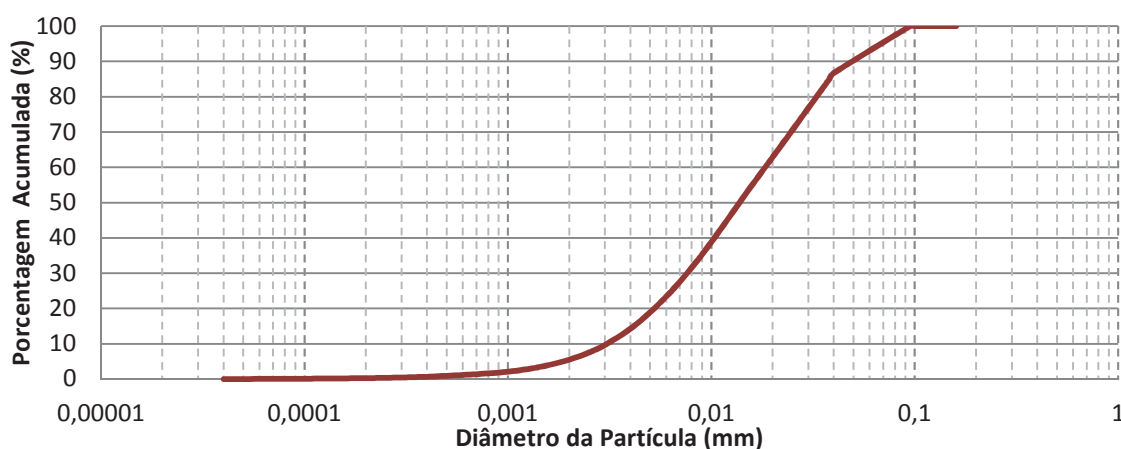
Após secagem do material recebido nas características anteriormente descritas, prosseguiu-se com o beneficiamento do mesmo moendo em moinhos de bolas.

O período de moagem se deu por cerca de 2h, até que o material apresentasse um aspecto fino, de pó. Conforme relata Janz e Johansson (2002), as adições incorporadas ao cimento devem possuir granulometria semelhante à dele. Para que fosse comprovada tal finura, realizam-se ensaios de granulometria a laser utilizando um equipamento CILAS 1180. Através deste ensaio são possíveis de se obter os valores dos diâmetros  $D_{10}^7$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$  e o Diâmetro médio das amostras, estes valores são apresentados na Tabela 13.

**Tabela 13 - Diâmetros das amostras de fosfogesso**

Amostra	$D_{10}$ (mm)	$D_{50}$ (mm)	$D_{90}$ (mm)	Diâmetro Mediano (mm)
Fosfogesso	0,003	0,013	0,044	0,019

Na curva granulométrica Figura 21, pode ser observada as porcentagens acumuladas das partículas em relação ao diâmetro.



**Figura 21 - Granulometria Fosfogesso.**

<sup>7</sup> 10% do total da massa do material analisado apresentam grãos com diâmetro abaixo do valor referenciado.

Após o procedimento de moagem o material foi acondicionado em recipientes de vidro vedados sem sofrer contato com umidade e demais agentes externos.

### 3.1.5.2 Análise química, pH, e massa específica real dos grãos

A composição química do fosfogesso é apresentada na Tabela 14, os dados são fornecidos pela empresa que disponibilizou o fosfogesso para a pesquisa.

**Tabela 14 - Composição química do fosfogesso**

Elementos	Fosfogesso
CaO (%)	30,1
CO <sub>2</sub> (%)	-
SO <sub>3</sub> (%)	42,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,07
SrO	0,54
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	3,03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,43
F (%)	0,21
K <sub>2</sub> O (%)	0,03
Na <sub>2</sub> O (%)	0,05
HCl	4,04
MgO (%)	0,02
H <sub>2</sub> O Cristalizado (%)	18,84

A composição química do fosfogesso se mostra coerente com a apresentada anteriormente na revisão bibliográfica (John e Cincotto, 2010 e Chang e Mantell, 1990), com predominância do óxido de cálcio (CaO), e do trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>), somando 72,2%.

O pH medido foi de 2,6. A explicação para o pH baixo é que, com o passar do tempo, as pilhas estocadas sob efeito das intempéries tendem a reduzir sua acidez pela lixiviação do material (CANUT, 2006).

A massa específica real dos grãos foi determinada em 2,72 g/cm<sup>3</sup>. O método de ensaio seguiu a normativa para determinação de massa específica real dos grãos do cimento Portland e outros materiais em pó, utilizando frasco volumétrico de Le Chatelier NBR-NM23 (2000).

### 3.1.5.3 Termoanálises

Segundo Mothé e Azevedo (2002), na análise térmica, observa-se como uma amostra se modifica em função da mudança de temperatura ao longo de um período. Entre as

termoanálises mais usuais estão a termogravimetria (TG) e a termogravimetria derivada (DTG).

Na termogravimetria se estuda a variação de massa de uma amostra resultante de uma transformação física (sublimação, evaporação, condensação), em função do tempo ou da temperatura (MOTHÉ e AZEVEDO, 2002).

Na Figura 22 podem ser observados os valores do ensaio de termogravimetria dinâmica, realizado com o fosfogesso beneficiado e seco a 60°C. Na termoanálise apresentada, tem-se uma curva chamada TG e a sua primeira derivada, a DTG. Conforme Mothé e Azevedo (2002), esse tipo de estudo é muito utilizado para se observar as reações de desidratação das amostras, resultado almejado na determinação da temperatura onde torna-se possível a transformação na hidratação do fosfogesso.

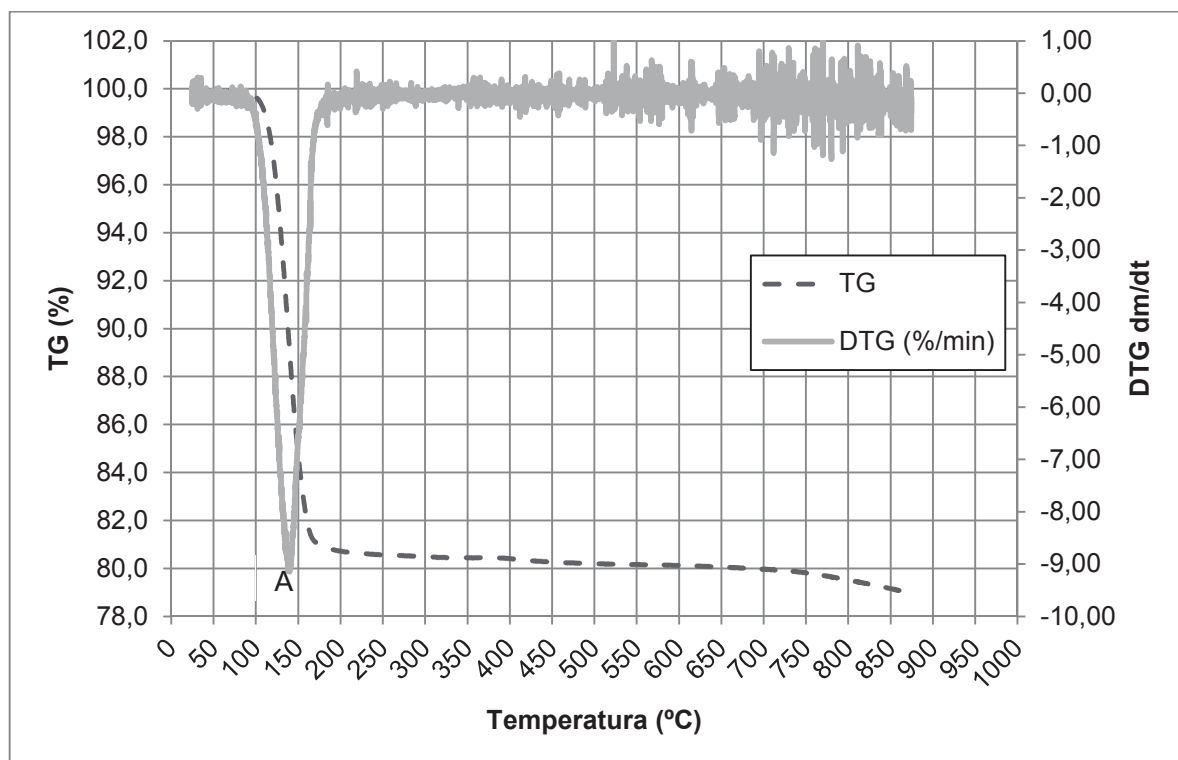


Figura 22 - Análise térmica do fosfogesso beneficiado seco a 60°C

Na Figura 22 o pico endotérmico “A” obtido a partir de análise térmica diferencial representa a temperatura a partir da qual começa a ocorrer a transformação do fosfogesso de dihidratado para hemihidratado (gipsita em bassanita).

A uma temperatura de 180°C, tem-se a perda de aproximadamente 20% em massa da amostra ensaiada de fosfogesso beneficiado seco a 60°C. Esses 20% representam a perda de água livre e estrutural além de alguns componentes voláteis da amostra. Sendo assim, a

temperatura de 180°C foi definida para que fosse viabilizado a completa obtenção da perda de 1,5 moléculas de água estrutural da amostra de fosfogesso. Valor acima dos 150 °C que Mehta e Monteiro (2008) indicam como sendo a temperatura de transformação.

Desta forma, a fim de se obter duas formas de composição estrutural do fosfogesso, foram definidos dois valores de temperatura para secagem do material beneficiado: um a 60°C, onde ter-se-ia FG(60C), com composição química composta por  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (Gipsita); e um outro onde esse mesmo material o FG(60C) é deixado em estufa por um período de 2h a 180°C, alterando sua composição estrutural para  $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$  (Bassanita), deste modo obtendo o FG(180C).

Para que fossem comprovadas essas alterações estruturais, fez-se um ensaio de difração de raio X. A amostra apresentada na Figura 23 apresenta a composição partir da obtenção dos espectros de difratometria de raios X do FG(60C) e a Figura 24 do FG(180C).

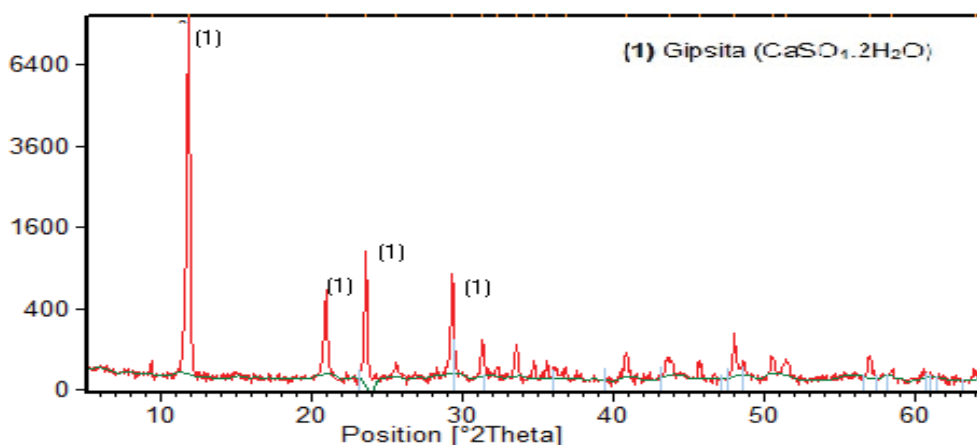


Figura 23 - Difratograma raio-X do fosfogesso Dihidratado FG(60C)

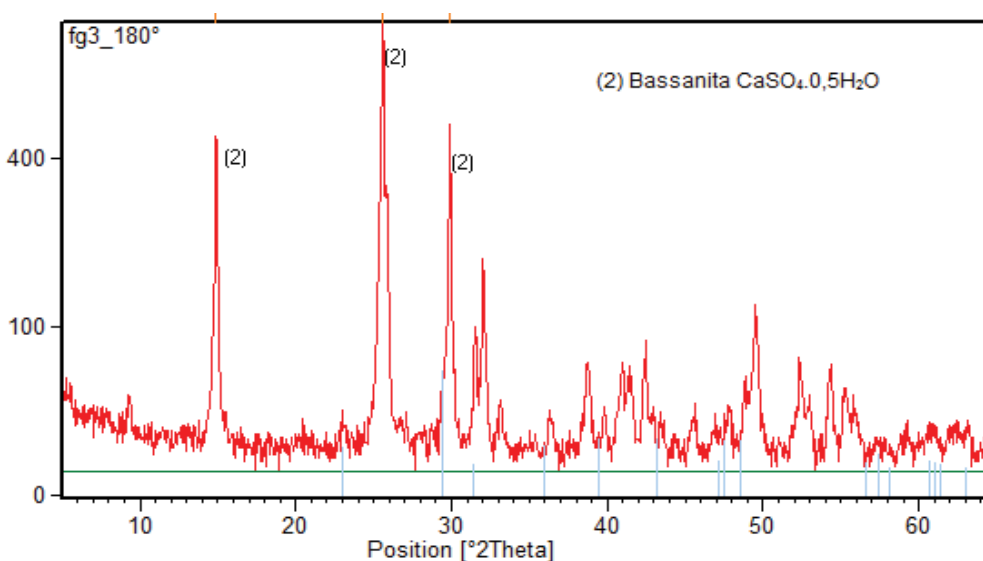


Figura 24 - Difratograma raio-X do fosfogesso Hemihidratado FG(180C)



A microestrutura das amostras do fosfogesso se caracteriza pela presença de fases cristalinas, com picos bem definidos do mineral Gipsita e da Bassanita. O mineral da gipsita é composto por duas moléculas de água, portanto mineral com fórmula dihidratada, enquanto a bassanita por meia molécula de água, ou seja, hemihidratado.

Pelas Figura 23 e Figura 24, comprova-se a obtenção de fosfogesso no formato dihidratado e hemihidratado, ambos estudados nesta pesquisa. Além da composição estrutural os resultados de granulometria, massa específica, e composição química do fosfogesso se enquadram no que tange a possibilidade de adicionar o FG(60C) e o FG(180C) nas misturas com cimento a fim da estabilização de solo mole orgânico.

### 3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste tópico, serão abordados os pontos referentes à dosagem e à preparação dos corpos de prova utilizados no programa experimental, do estudo de estabilização mecânica de solo mole orgânico, com diferentes dosagens de agente cimentante.

#### 3.2.1 Determinação das dosagens

Para as misturas de solo mais agentes cimentantes, é definido o valor do teor de umidade total da mistura de 120%, número este recorrente em outros estudos com solos moles orgânicos como o de Axelsson (2002), Correia (2011), Dias (2012), EuroSoilStab (2002), Janz e Johansson (2002) e Åhnberg (2006).

Os teores de agentes cimentantes são fixados em cinco valores para todas as misturas: 75 kg/m<sup>3</sup>, 125 kg/m<sup>3</sup>, 175 kg/m<sup>3</sup>, 225 kg/m<sup>3</sup> e 275 kg/m<sup>3</sup>, send “kg” referente ao agente cimentante por m<sup>3</sup> de solo, condizentes com teores apresentados em bibliografias como a EuroSoilStab (2002), na Figura 1. Optou-se pela dosagem em volume em função do material apresentar-se na condição saturada. Na Tabela 15 é apresentada a dosagem de agente cimentante em relação ao peso seco de solo.

**Tabela 15 - Relação de dosagem em volume e porcentagem**

	Volume	Porcentagem de agente cimentante em relação ao peso seco de solo
Dosagem	75 kg/m <sup>3</sup>	12%
Dosagem	125 kg/m <sup>3</sup>	20%
Dosagem	175 kg/m <sup>3</sup>	28%
Dosagem	225 kg/m <sup>3</sup>	35%
Dosagem	275 kg/m <sup>3</sup>	43%

Para avaliar como decorre o comportamento do solo cimentado artificialmente, com cimento ou cal aliados a adições distintas de resíduos, definiram-se misturas com base em estudos anteriores de Åhnberg et al. (2006), EuroSoilStab (2002), Axelsson (2002), Janz e Johansson (2002) e Benson et al. (2011):

- a) 50% Cal hidratada + 50% Escória de Alto Forno Moída - Ca-S(1) - em massa para cada agente cimentante;
- b) 50% Cimento CP V-ARI + 50% Escória de Alto Forno Moída - Ci-S(1) - em massa para cada agente cimentante, com granulometria da escória mais grosseira;
- c) 50% Cimento CP V-ARI + 50% Escória de Alto Forno Moída - Ci-S(2) - em massa para cada agente cimentante, com granulometria da escória mais fina;
- d) 50% Cimento CP V-ARI + 25% Escória de Alto Forno Moída + 25% Fosfogesso – Ci-S(1)-FG(60) - em massa, com a Escória de Alto Forno Moída com granulometria mais grossa e fosfogesso dihidratado;
- e) 50% Cimento CP V-ARI + 50% Fosfogesso - Ci-FG(60C) - em massa, com fosfogesso dihidratado;
- f) 50% Cimento CP V-ARI + 50% Fosfogesso - Ci-FG(180C) - em massa, com fosfogesso hemihidratado.

Na Tabela 16 pode ser visto um esquema das misturas realizadas, sendo 3 CP's para cada uma das dosagem e rompimento com três tempos de cura distintos: 7, 28 e 90 dias.

**Tabela 16 - Programa experimental da estabilização mecânica do solo mole orgânico**

Agentes Cimentantes (simbologia)	Teores (kg/m <sup>3</sup> )					Total para um tempo de cura	Tempos de cura (7, 28 e 90 dias)
	75	125	175	225	275		
Ca-S(1)	3	3	3	3	3	15	45
Ci-S(1)	3	3	3	3	3	15	45
Ci-S(2)	3	3	3	3	3	15	45
Ci-Ci-S(1)-FG(60C)	3	3	3	3	3	15	45
Ci-FG(60C)	3	3	3	3	3	15	45
Ci-FG(180C)	3	3	3	3	3	15	45
Total de corpos de prova							270

Em cada um dos corpos de prova, são medidas a velocidade de ondas cisalhantes e de compressão (ensaio não destrutivo), e a resistência à compressão simples. Os tempos de cura variam em 7, 28 e 90 dias. O esquema da Figura 25 representa os detalhes dos parâmetros a serem obtidos em cada tempo de cura.

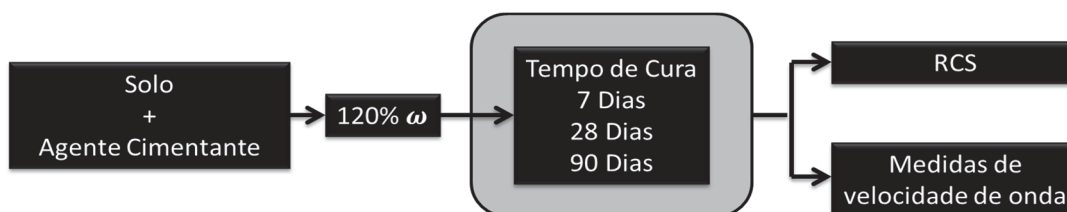


Figura 25 - Esquema do programa experimental

O cálculo das dosagens considerava as misturas saturadas, com teor de umidade 120%, representando um índice de vazios de 3,18 e porosidade de 76%. Essa umidade de 120% contempla o total da mistura, ou seja, solo natural mais agentes cimentantes.

Os teores foram mantidos iguais para que fossem comparados os valores resultantes de misturas distintas. O cimento ficou fixado em 50% em massa da mistura para avaliar as diferenças existentes entre as adições.

### 3.2.2 Homogeneização das misturas

De acordo com o EuroSoilStab (2002), para se ter uma mistura adequada, devem ser utilizados misturadores mecânicos, a fim de se obter uma amostra homogênea e confiável.

O misturador mecânico aplicado na homogeneização das misturas é dotado de uma hélice metálica com rotação acionada por um motor elétrico móvel operado manualmente.

As medidas de umidade natural do solo eram feitas frequentemente, para que fosse possível de se estabelecer a quantidade de água necessária a ser adicionada na mistura, a fim de obter um teor de umidade de 120%.

No misturador, adiciona-se uma quantidade de solo mais agente cimentante e água suficiente para preparar o número necessário de amostras de solo estabilizado para um teor de um dado agente cimentante. Cada mistura permitiu obter 9 corpos de prova.

Foram misturados todos os materiais (solo, agentes cimentantes e água), durante um período de 2 a 5 minutos, até que a massa se apresentasse visualmente homogênea. Diferenças nas propriedades do solo e dos estabilizadores tornam difícil definir um tempo fixo de mistura. A forma mais confiável da homogeneidade da mistura é quanto a aparência visual, ficando a cargo do operador definir o tempo de homogeneização.

### 3.2.3 Moldagem dos corpos de prova

No processo de moldagem foram definidos moldes de PVC com dimensões que, após serem desmoldados, os corpos de prova obtivessem medidas em torno de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura. Ficando de acordo com a EuroSoilStab (2002) que determina que o molde escolhido deva ser de altura igual a duas vezes o diâmetro do corpo de prova.

Os moldes são divididos em duas partes, conforme Figura 26, uma de 10 cm e outra de 5 cm de altura. A junção das partes é dada por uma fita adesiva, e a vedação da base é realizada com a mesma fita. A divisão superior do molde tem o intuito de eliminar algum tipo de contaminação do corpo de prova, que eventualmente, ocorre durante a cura submersa.

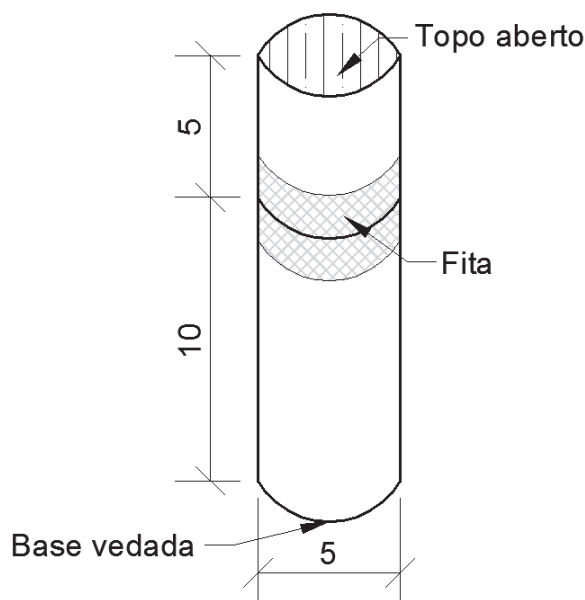
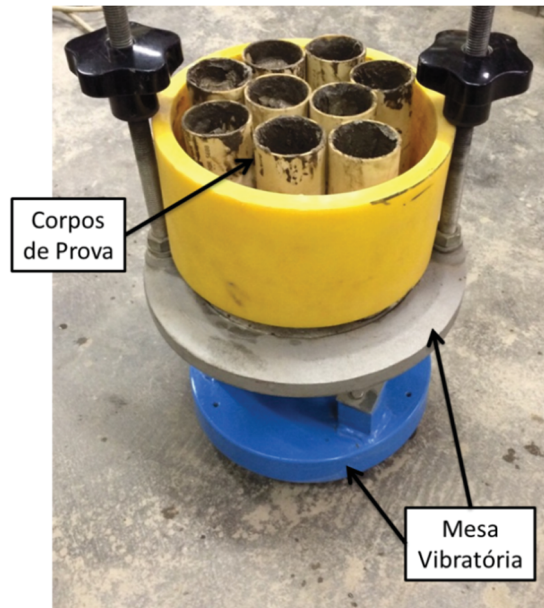


Figura 26 - Molde PVC bipartido (medidas em cm)

Esse tipo de solo com altos teores de umidade tem uma complexidade alta para se moldar. Ficando definido em testes experimentais que a utilização de uma densificação da mistura por meio de mesa vibratória seria o mais adequado.

Na confecção dos corpos de prova, foi utilizada uma técnica não de compactação, mas de densificação das misturas, por meio de uma mesa vibratória. O motivo desta opção é devido à amostra do solo mais o material cimentante ser muito plástica. Esse método se mostrou uma forma ágil, com resultados satisfatórios na qualidade das amostras, sendo possível a realização de 9 corpos de prova por vez, método demonstrado na Figura 27.



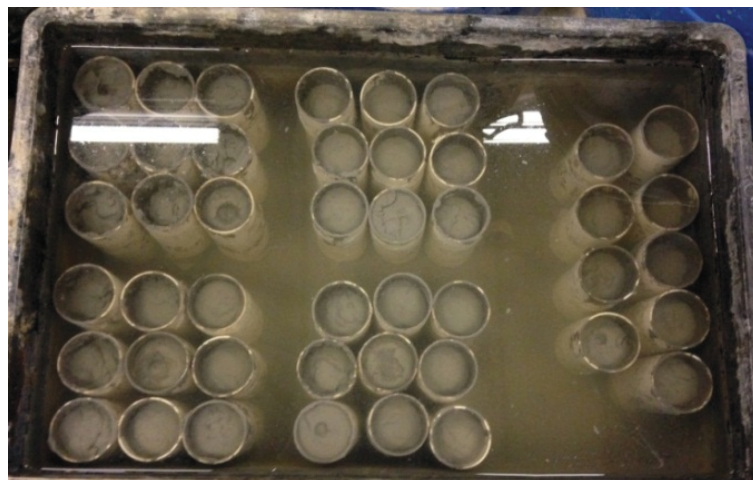
**Figura 27 - Mesa vibratória**

O material era disposto aos poucos dentro dos moldes a fim de se obter uma massa homogênea e sem a presença de bolhas de ar. Após os moldes eram dispostos sobre a mesa vibratória e densificados por um período de 5 min, com vibração constante.

Como proposto pela EuroSoilStab (2002), a moldagem foi realizada em menos de 30 min após a mistura.

#### **3.2.4 Processo de cura**

Com a moldagem completa, os corpos de prova foram totalmente submersos (Figura 28) a fim de atestar a completa saturação e evitar o surgimento do efeito de tensões de sucção. A temperatura de cura era mantida variando em  $22\pm 2^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 28 - Cura em imersão**

### 3.2.5 Desmolde

Um dia anterior ao do rompimento, os corpos de prova passavam pelo processo de desmolde, e retornavam para a imersão a fim de evitar qualquer possível alteração na sua saturação provocada pela desforma. Sendo assim, os moldes tinham a parte superior (5 cm) cortada e descartada, retirava-se a fita adesiva que sela a base do molde, e posicionava-se o conjunto para a extrusão em equipamento adaptado, conforme apresentado na Figura 29.

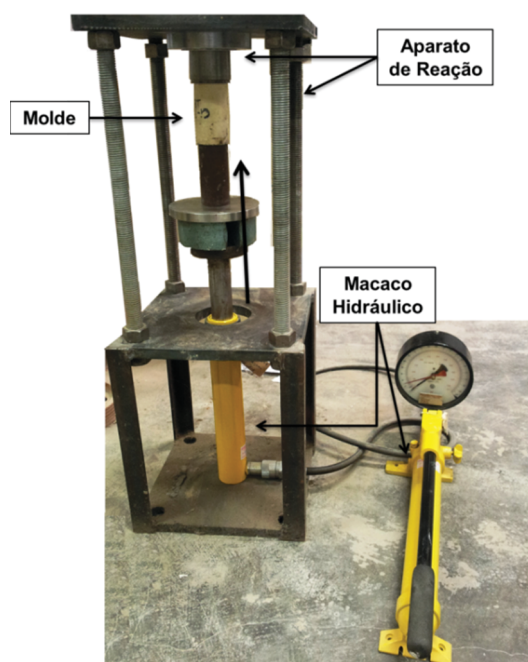


Figura 29 - Aparelho para extrusão dos corpos de prova

O procedimento de desmolde do corpo de prova é realizado com extrusão utilizando um macaco hidráulico. O corpo de prova desmoldado tem o aspecto apresentado na Figura 30.

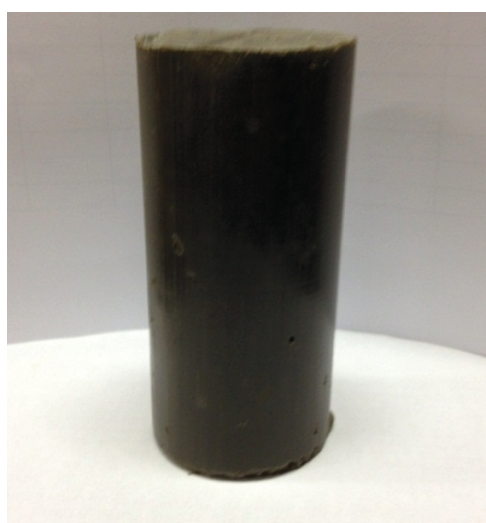


Figura 30 - Corpo de prova desmoldado



### 3.3 ENSAIO DE RUPTURA

Neste item será apresentado o ensaio utilizado para determinação de resistência da à compressão simples dos corpos de prova ensaiados.

O ensaio de resistência à compressão é uma forma simples, barata e rápida de se encontrar parâmetros relacionados à capacidade de suporte do solo. Muitos trabalhos com solos cimentados fazem uso dessa técnica como o de Janz e Johansson (2002), Åhnberg (2006), EuroSoilStab (2002), Correia (2011), entre tantos outros.

O procedimento de ensaio seguiu as recomendações da ASTM D 5102/96, realizado em prensa automática com anel dinamométrico calibrado com capacidade de 10 kN. Com velocidade de deslocamento do ensaio de 1,14 mm/min.

O corpo de prova é acomodado na prensa de forma que seu eixo vertical fique alinhado com o eixo vertical do equipamento, como representado na Figura 31. O carregamento é aplicado com velocidade de carregamento constante durante o decorrer de todo o ensaio.

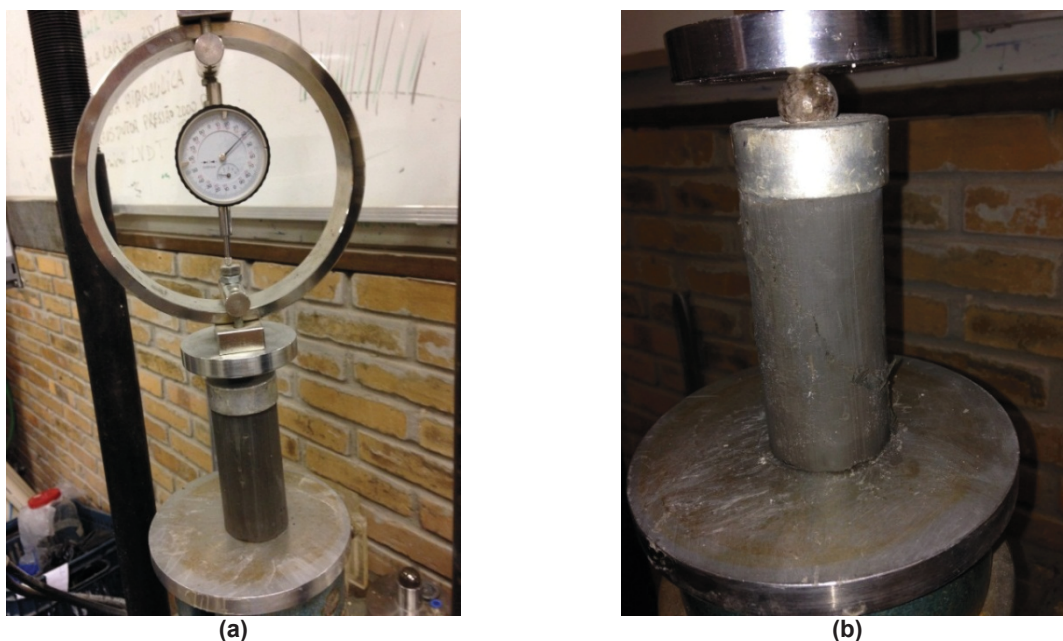


Figura 31 - Posicionamento do corpo de prova na prensa para ensaio de resistência à compressão simples (a), corpo de prova recebendo carga (b).

No medidor de deslocamento, lê-se a maior medida de deslocamento do anel através de um relógio comparador com precisão de 0,001 mm. O deslocamento é convertido, através da equação de calibração do anel, para a carga de ruptura que, dividida pela área da seção transversal da amostra, resulta na tensão de ruptura.

São rompidos três corpos de prova para cada dosagem (teor), medindo-se a resistência à compressão simples de cada um deles.

### 3.4 ENSAIO DE MEDIDAS DE RIGIDEZ INICIAL

Através de um ensaio não destrutivo, foi determinado o módulo de cisalhamento elástico inicial ( $G_0$ ), para baixas deformações, em misturas de solo mais agente cimentante.

Para o ensaio, é utilizado o equipamento ultrassônico denominado Pundit Lab, da marca Proceq, nas dependências do LEGG.

O equipamento tem por base uma unidade de emissão e recepção de ondas, um conjunto de transdutores de ondas “S” e um conjunto de transdutores de ondas “P”, cabos (para unir os transdutores às unidades de transmissão e recepção de ondas), cabo USB, que faz a ligação da unidade onde são emitidas e recebidas as ondas, até o computador portado de um *software* onde acontecem as aquisições de dados.

O ensaio é executado com o posicionamento de dois transdutores acoplados com o uso de um gel condutor de ultrassom, que facilita o envio das ondas, pressionados nas extremidades do corpo de prova.

Um transdutor emite uma onda que viaja pelo corpo de prova e é recebido pelo transdutor do lado oposto. Mede-se o tempo necessário para esta onda atravessar o corpo de prova. Sabendo-se o comprimento do corpo de prova tem-se a velocidade da onda.

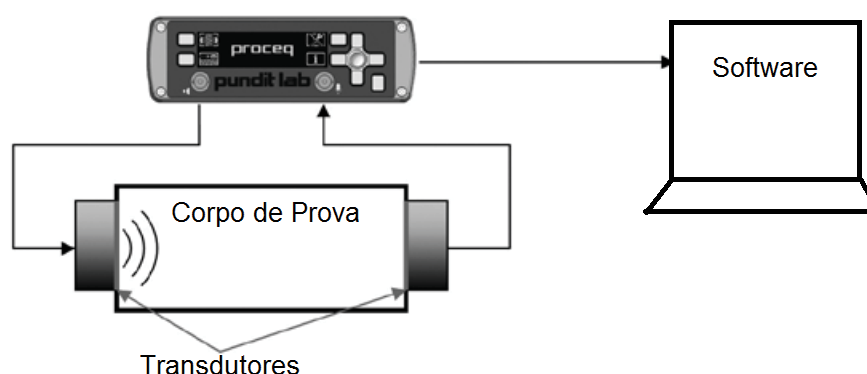


Figura 32 - Esquema do equipamento Pundit Lab (Adaptado de manual Proceq, 2014)

O transdutor de onda P emite uma onda mecânica que viaja através do corpo de prova. Essa onda é captada por um sensor colocado na extremidade oposta, onde a velocidade da onda P é simplesmente a razão entre o comprimento e o tempo.



Na determinação das ondas S procede-se da mesma forma no posicionamento dos transdutores. Emite-se um pulso de onda no sentido transversal ao eixo do corpo de prova e lê-se o sinal referente ao tempo que levou para a onda de corte atravessá-lo. A chegada da onda S é mais dificilmente detectada que a onda P.

Portanto, as ondas sísmicas são analisadas na identificação do tempo de chegada da onda emitida de um extremo ao outro do corpo de prova.

Pela diferença entre a transmissão e a recepção das ondas, é que se pode calcular a velocidade da onda cisalhante chamada de  $V_s$ . Com posse de dados como peso específico do material, L distância entre os transdutores, e t tempo de viagem da onda, é que se calcula o parâmetro  $G_0$ , equação (2).

$$G_0 = \rho \cdot V_s^2 = \rho \cdot \left( \frac{L^2}{t^2} \right) \quad (2)$$

Determinam-se por meio de formulações tantos outros parâmetros elásticos, em um ensaio não destrutivo. Valores dos parâmetros são relacionados a outros dados coletados neste estudo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na sequência do programa experimental, obtiveram-se resultados relevantes para a pesquisa, que são apresentados e discutidos neste capítulo. A apresentação dos parâmetros obtidos é exibida de forma individual em função de cada variável de resposta, ou seja, a resistência à compressão simples e o módulo cisalhante inicial. As correlações existentes entre estas variáveis são verificadas e analisadas em seguida.

Com o intuito de gerar maiores comparações e discussões entre os resultados, são utilizados dados oriundos de Rilho (2014), onde realizaram-se ensaios de resistência à compressão simples e medidas de módulo cisalhante inicial, para misturas realizadas com o mesmo solo utilizado nesta pesquisa e adições de cimento Portland CP-V ARI e/ou Cal viva.

### 4.1 INFLUÊNCIA DO TEOR DE AGENTE CIMENTANTE E DO TEMPO DE CURA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Os resultados obtidos dos ensaios de resistência à compressão simples dos corpos de prova curados com 7, 28 e 90 dias relacionados aos cinco teores de agente cimentante para cada uma das misturas serão apresentadas a seguir. Cada um dos pontos ilustrados nos gráficos representam uma média de três medidas e com desvio padrão amostral representado graficamente.

O aumento no teor de agente cimentante em todas as misturas tende a elevar o valor da resistência à compressão simples, umas com maior e outras com uma menor intensidade, como previsto em estudos com solos moles e solos moles orgânicos, na EuroSoilStab (2002); em Åhnberg (2006) e Janz e Johansson (2002).

Na Figura 33, mostra-se a resistência à compressão simples ( $q_u$ ) com relação à adição de cimento Portland CP-V ARI, dados obtidos de Rilho (2014). Com o aumento no teor de agente cimentante para o tempo de cura de 7 dias, a resistência à compressão simples apresentou uma tendência crescente. Para os tempos de cura de 28 e 90 dias, as tendências se apresentaram muito semelhantes, sem elevação nos valores referentes a 90 dias de cura em relação a 28 dias, tendendo a estabilizar o ganho de resistência a partir do

teor de 175 kg/m<sup>3</sup>. É perceptível o alto ganho de resistência nos primeiros 28 dias de cura, havendo um salto grande entre 7 e 28 dias de cura.

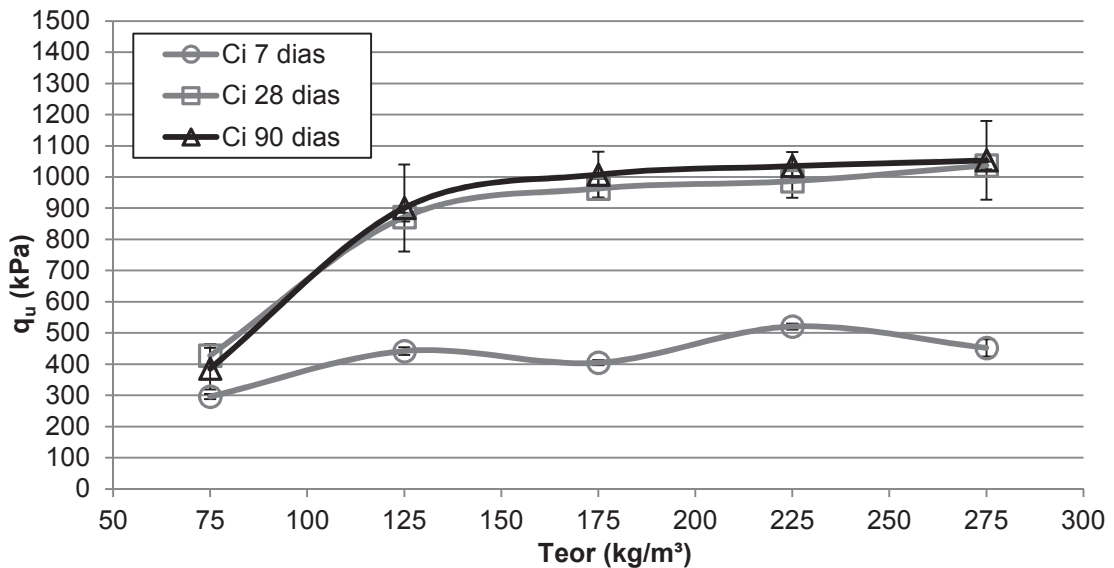


Figura 33 - Resistência à compressão simples da mistura de solo com Cimento CP-V ARI, Ci (Adaptado de Rilho, 2014)

Na Figura 34, verifica-se o comportamento das misturas com substituição de 50% em massa de cimento Portland CP-V ARI por escória de alto forno moída, (granulometria grosseira). Para os três tempos de curas estipulados, quanto mais elevado é o teor de agente cimentante adicionado ao solo, maior é o ganho de resistência à compressão simples, assim como, quanto maior o tempo de cura, maiores os ganhos de resistência. Contrário ao que ocorre na mistura com cimento.

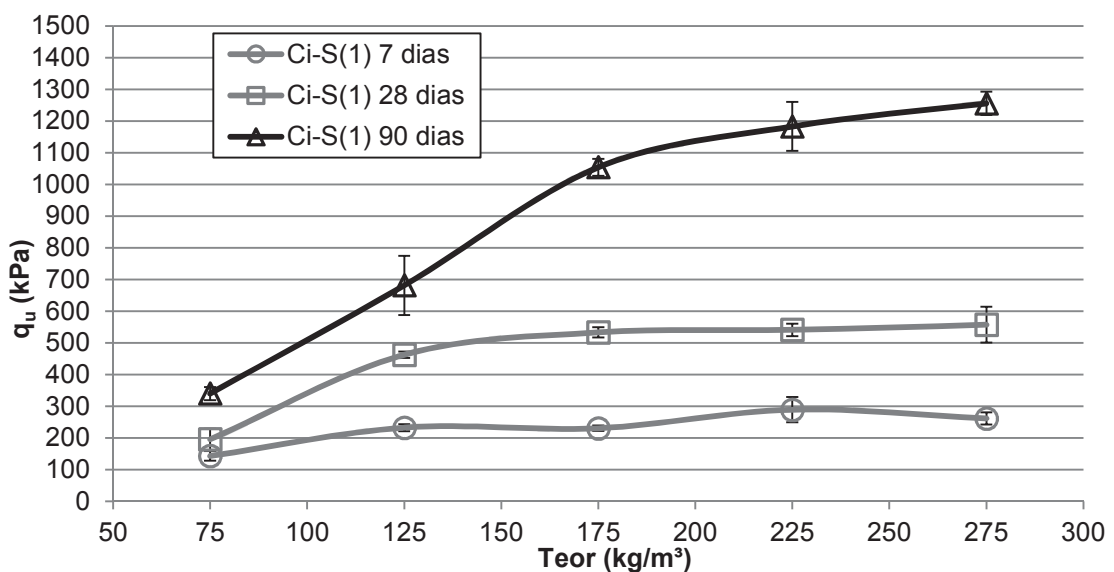


Figura 34 – Resistência à compressão simples da mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Escória de alto forno moída (grosseira), Ci-S(1)

A Figura 35 mostra os resultados da mistura de solo com adições de 50% de cimento CP-V ARI mais 50% de escória de alto forno moída (granulometria fina), em massa para os dados teores. Com o aumento do teor de agente cimentante, obtêm-se um ganho de resistência à compressão simples. O ganho de resistência entre o período de 7 e 28 dias é de aproximadamente o dobro no valor de  $q_u$ , enquanto, o ganho de resistência entre o tempo de cura de 28 e 90 dias apenas se tornam consideráveis para os teores de 225 e 275  $\text{kg/m}^3$ .

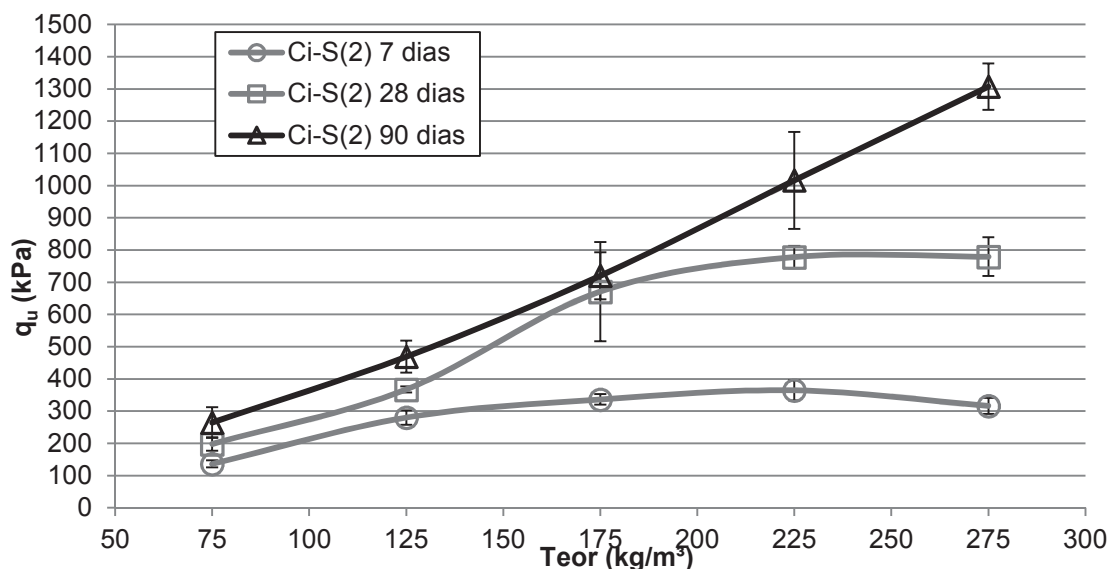


Figura 35 - Resistência à compressão simples da mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Escória de alto forno moída (fina), Ci-S(2)

A mistura Ci-FG(60), onde temos solo adicionado de 50% cimento mais 50% fosfogesso dihidratado em massa para cada teor, tem seus resultados de resistência última à compressão simples apresentados na Figura 36. Para o tempo de cura de 7 dias não foi possível a realização dos ensaios, em função da cimentação não suficiente, impossibilitando a realização do desmolde dos corpos de prova. Nos resultados de resistência à compressão simples não se pronuncia uma diferença considerável entre o período de 28 e 90 dias de cura, porém, ocorrem algumas condições de cimentação, não existentes no tempo de cura de 7 dias.

É possível notar a obtenção de um valor baixo de resistência, quando comparado a outras misturas já apresentadas anteriormente. Condição de acordo com Mehta e Monteiro (2008), dizendo que cimentos adicionados de gipsita tendem a resistências menores.

Apesar da quantidade de cimento incorporado na mistura Ci-FG (60C) ser a metade do que quando adicionado apenas cimento, o valor de  $q_u$  fica abaixo de 50% do valor indicado na mistura "Ci".

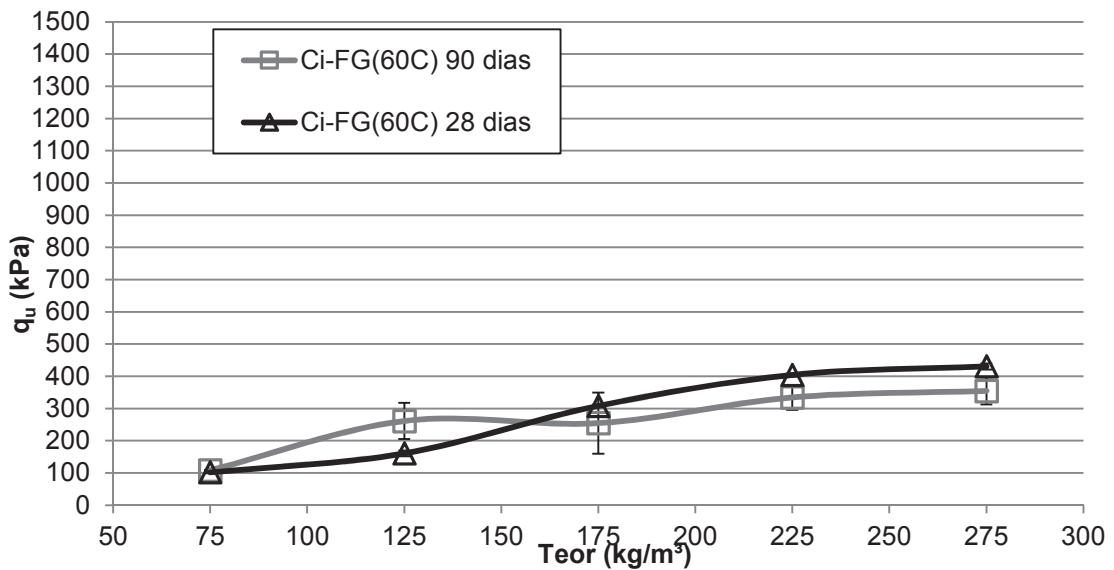


Figura 36 - Resistência à compressão simples da mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais fosfogesso dihidratado, Ci-FG(60)

A mistura que leva o fosfogesso hemihidratado como adição ao cimento nas misturas com solo, tem os seus resultados de  $q_u$  representados na Figura 37. Percebe-se a elevação na resistência à compressão simples com o aumento do teor de agente cimentante. Assim como, com o prolongamento nos dias de cura, maior é o ganho de resistência. Diferente da mistura com fosfogesso dihidratado, a mistura de cimento adicionado de fosfogesso hemihidratado tem cimentação suficiente que possibilita o desmolde dos corpos de prova, obtendo-se valores representativos para 7 dias de cura.

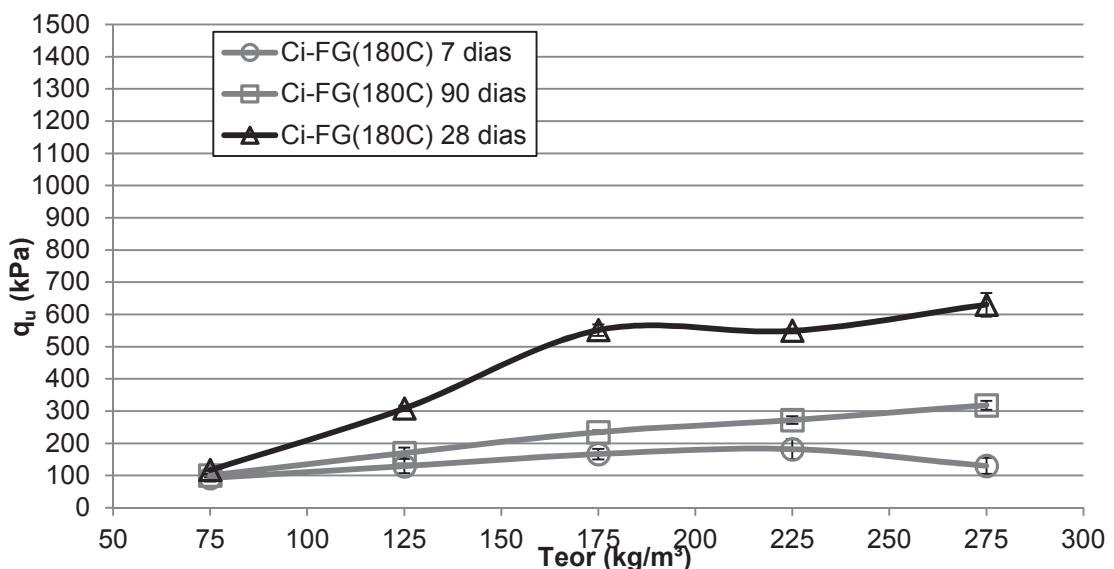


Figura 37 - Resistência à compressão simples da mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais fosfogesso hemihidratado, Ci-FG(180)

Além da mistura de solo com cimento, também foram utilizados os dados provenientes de Rilho (2014). Para o solo cimentado artificialmente com mistura de 50% de cimento mais

50% de cal viva, em massa para os dados teores. Os resultados de resistência à compressão simples são apresentados na Figura 38. Para o tempo de cura de 7 dias, as resistências mantiveram-se constantes mesmo para teores de agente cimentantes maiores. Nos períodos de 28 e 90 dias, pode-se perceber uma tendência de aumento na resistência em função do aumento no teor, assim como, um ganho de resistência para os mesmos teores da mistura em função de tempos de cura mais prolongados.

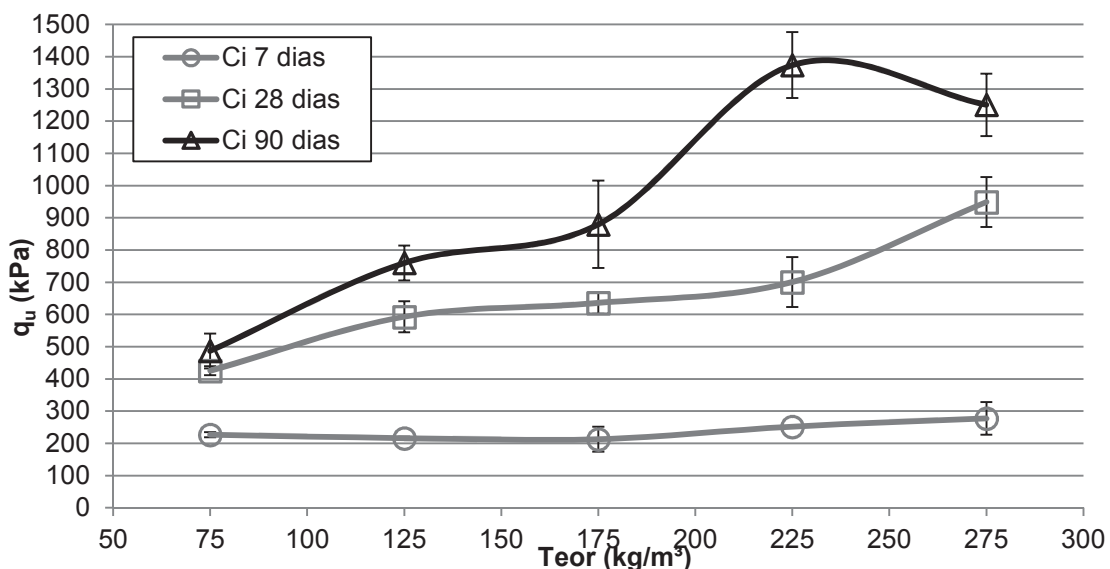


Figura 38 - Resistência à compressão simples da mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Cal viva, Ci-Ca. (Adaptado de Rilho, 2014)

Além dos resultados já apresentados, foram realizadas misturas conforme citada no tópico do programa experimental, com cal hidratada mais escória de alto forno moída, e uma mistura com 50% de cimento mais 25% de escória de alto forno moída e 25% de fosfogesso.

A mistura composta com cal mais escória de alto forno moída não apresentou cimentação suficiente para realizar o desmolde dos corpos de prova em nenhum dos teores, e para os três tempos de cura estipulados, ficando impossível a realização do ensaio de resistência à compressão simples e medidas de velocidade de onda. Desta forma não se obteve qualquer resultado referente a esta mistura. Este resultado contraria o que apresenta a EuroSoilStab (2002), que estabelece que essa mistura seria apropriada para solo moles com matéria orgânica, e reafirmando o apontamento de Correia (2009), que para solos orgânicos o cimento Portland é o agente cimentante mais indicado como adição.

A mistura com cimento mais escória e fosfogesso, não apresentou capacidade de desmolde do corpo de prova, exceto para os teores de 225 e 275 kg/m³ com 90 dias de cura, porém, os ensaios de resistência à compressão simples destes teores mostraram valores muito

inferiores a todos os demais representados nessa pesquisa. Além da incompatibilidade dos resultados quando comparados aos demais, desta forma, não serão levados em consideração.

#### 4.2 COMPARAÇÃO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES EM DIFERENTES MISTURAS PARA MESMO TEMPO DE CURA

A fim de comparar os resultados obtidos das diferentes misturas, são apresentadas, num mesmo gráfico, as resistências à compressão simples por teor de agente cimentante, das misturas distintas ensaiadas num mesmo tempo de cura.

Na Figura 39, são apresentados os resultados de resistência à compressão simples dos corpos de prova ensaiados com 7 dias de cura.

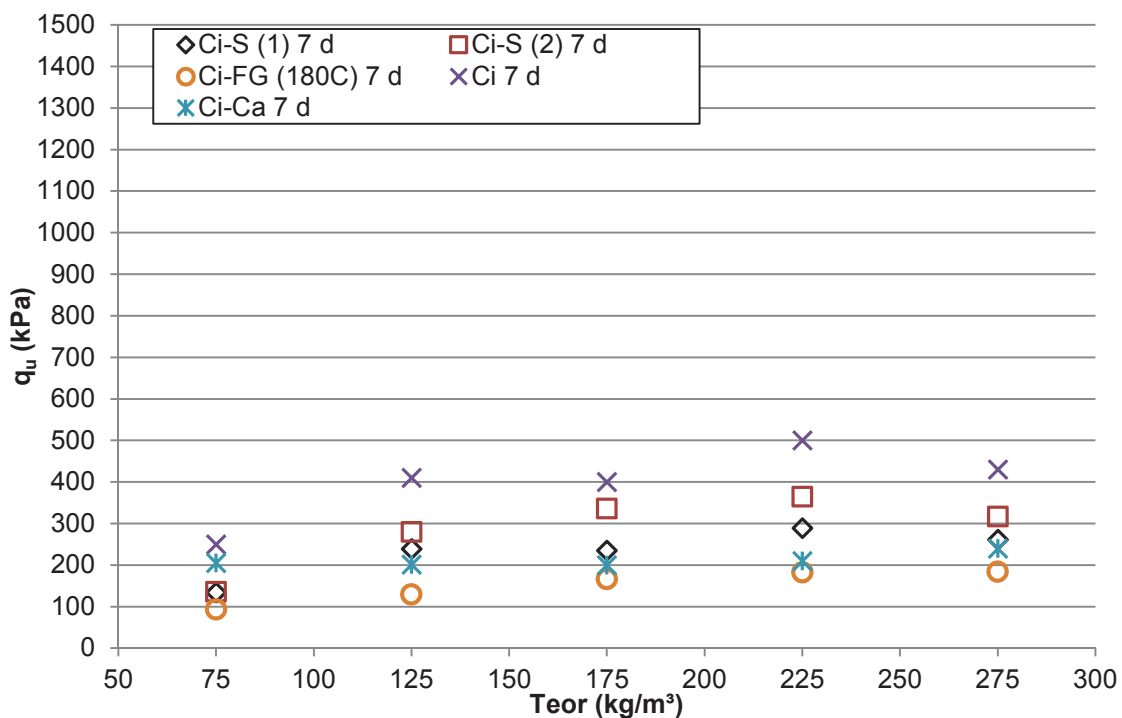


Figura 39 - Resistência à compressão simples x Teor de agente cimentante, com 7 dias de cura

A mistura de solo adicionado de cimento (Ci) apresentou os maiores valores de resistência à compressão simples seguida da mistura de cimento com escória de alto forno moída (fina), Ci-S (2) e cimento mais escória de alto forno moída (grossa), Ci-S (1) seguida das misturas de cimento adicionado de fosfogesso hemihidratado ou cal, que ficaram abaixo das demais misturas.

Os resultados obtidos do ensaio de resistência à compressão simples com 28 dias de cura dos corpos de prova são apresentados na Figura 40.

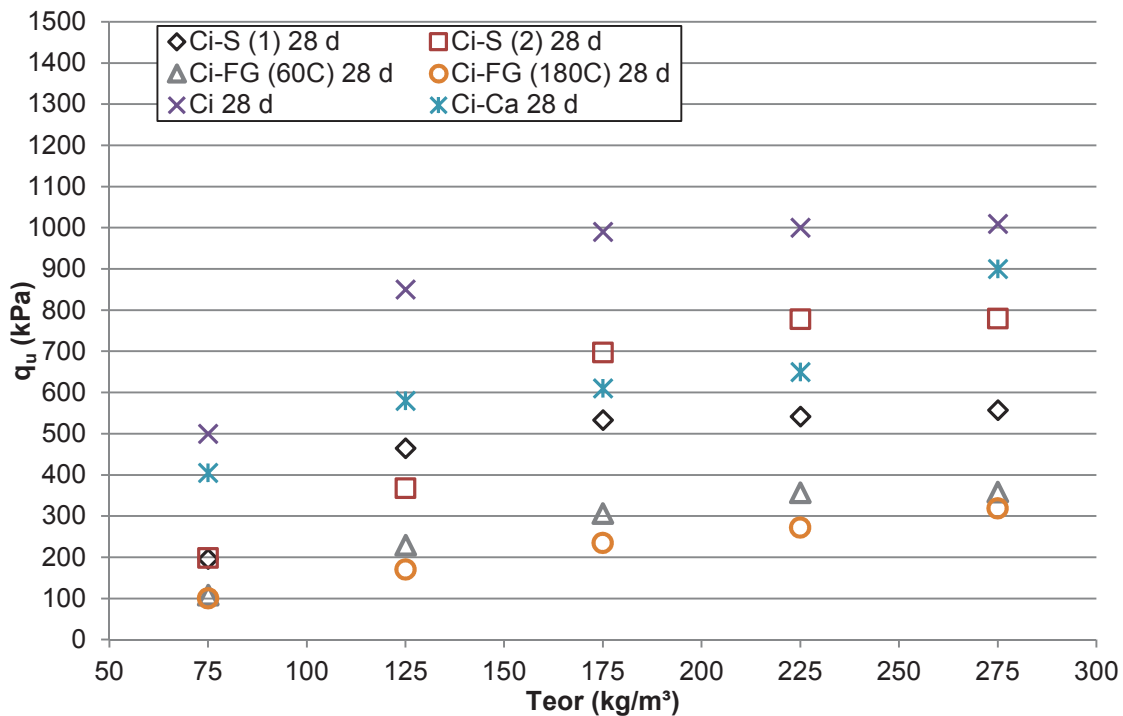


Figura 40 - Resistência à compressão simples x Teor de agente cimentante, com 28 dias de cura

Como no tempo de cura de 7 dias, com 28 dias de cura em todos os teores de agente cimentante, a mistura que tem os valores mais elevados de  $q_u$  é a com cimento adicionado ao solo. Para os teores de 75 e 125 kg/m<sup>3</sup> as duas misturas que adicionam escória de alto forno moída ao cimento se mostram similares, mas apresentando valores abaixo da mistura de cimento mais cal viva. Nos teores subsequentes de 175 e 225 kg/m<sup>3</sup>, a mistura com cimento mais escória de alto forno moída (fina) apresenta melhor desempenho, sendo seguido da mistura de cimento mais cal, e cimento mais escória de alto forno moída (grossa). No último teor e o mais elevado dos estudados nesta pesquisa, a mistura de cimento mais cal viva tem desempenho semelhante à adição com apenas cimento, e superior às misturas que levam escória de alto forno moída. Em todos os teores, as misturas com fosfogesso se mostram com resistência à compressão simples muito inferior as demais.

Na Figura 41 são apresentados os valores de resistência à compressão simples dos corpos de prova ensaiados com 90 dias de cura.



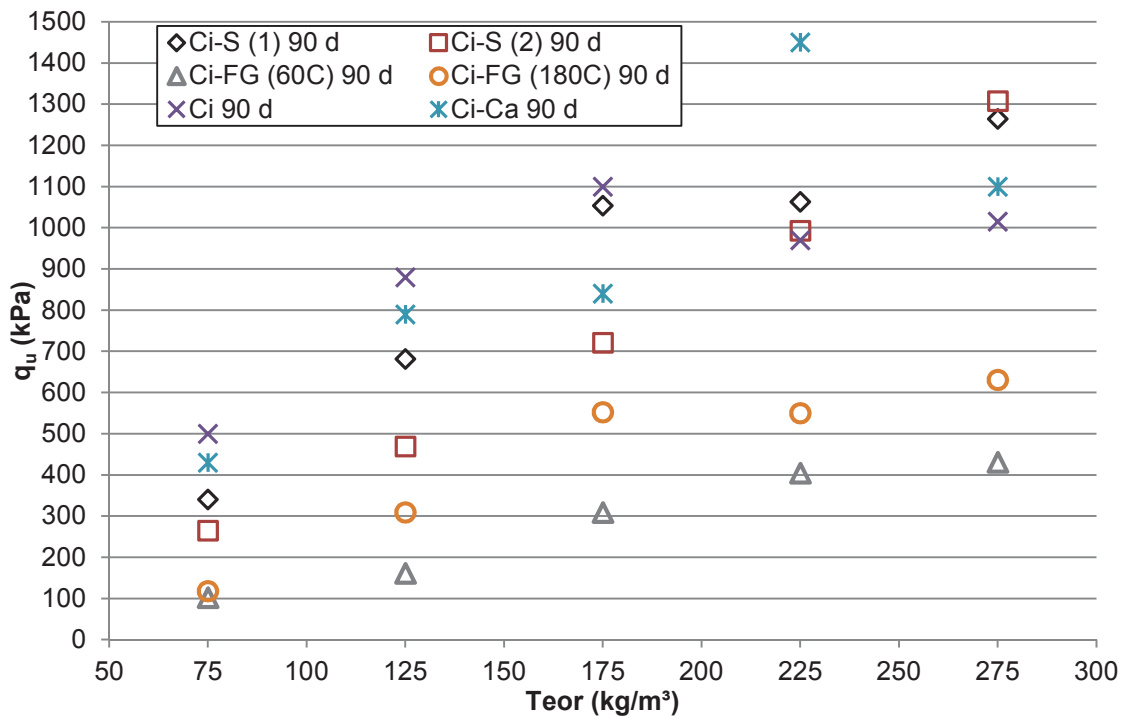


Figura 41 - Resistência à compressão simples x Teor de agente cimentante, com 90 dias de cura

Ao observar as resistências para os rompimentos dos corpos de prova com 90 dias de cura, percebe-se que as misturas de cimento mais as com cimento mais escória de alto forno moída (fina e grossa), tem uma tendência ao mesmo ponto no teor de 275 kg/m³. As misturas com fosfogesso como nos demais tempos de cura não apresentam bom desempenho, mas a mistura com fosfogesso hemihidratado se mostra com melhores resultados do que a dihidratada. A mistura com cimento mais escória de alto forno moída (fina) apresenta uma tendência linear de crescimento no valor de  $q_u$  com o aumento do teor de agente cimentante em 90 dias de cura, apresentando a maior resistência obtida com 275 kg/m³. Aos 90 dias de cura a escória de alto forno moída grossa apresenta, em geral, melhor desempenho do que a moída fina, e com valores muito semelhantes à mistura de cimento CP V - ARI.

De uma forma geral, para todos os tempos de cura, as misturas de solo mais cimento; cimento/cal viva e cimento/escória de alto forno moída apresentaram desempenho semelhante e com crescente elevação do valor de  $q_u$  com o aumento dos teores de agente cimentante. Sendo que, quando existem adições ao cimento, há a substituição da metade da quantidade do cimento Portland CP-V ARI por outro material também cimentício. As misturas com fosfogesso não apresentaram desempenho que se equivaliam às demais misturas.

#### 4.3 INFLUÊNCIA DO TEOR DE AGENTE CIMENTANTE E DO TEMPO DE CURA NAS MEDIDAS DO MÓDULO CISALHANTE INICIAL

Os resultados de módulo cisalhante inicial, obtidos em função das medidas de velocidade em ensaio não destrutivo, são apresentados referentes a cada mistura, e um comparativo entre as misturas para os tempos de cura de 28 e 90 dias.

Não foram realizadas medidas para 7 dias de cura em função da dificuldade e inconstância dos resultados.

A Figura 42, com valores obtidos de Rilho (2014), mostra as medidas de módulo cisalhante inicial dos corpos de prova de solo adicionados de cimento Portland CP-V ARI. Percebe-se que a medida de  $G_0$  para 75 kg/m<sup>3</sup> tem valor abaixo em relação aos demais teores enquanto, nos demais teores a variação não se torna bem definida, tendendo a uma estabilização com o aumento dos teores. O tempo de cura maior mostrou afetar aumentando o resultado de  $G_0$  para os teores de 125, 175 e 225 kg/m<sup>3</sup>, mas para 75 e 275 kg/m<sup>3</sup> com 28 dias de cura o valor da módulo cisalhante inicial é maior.

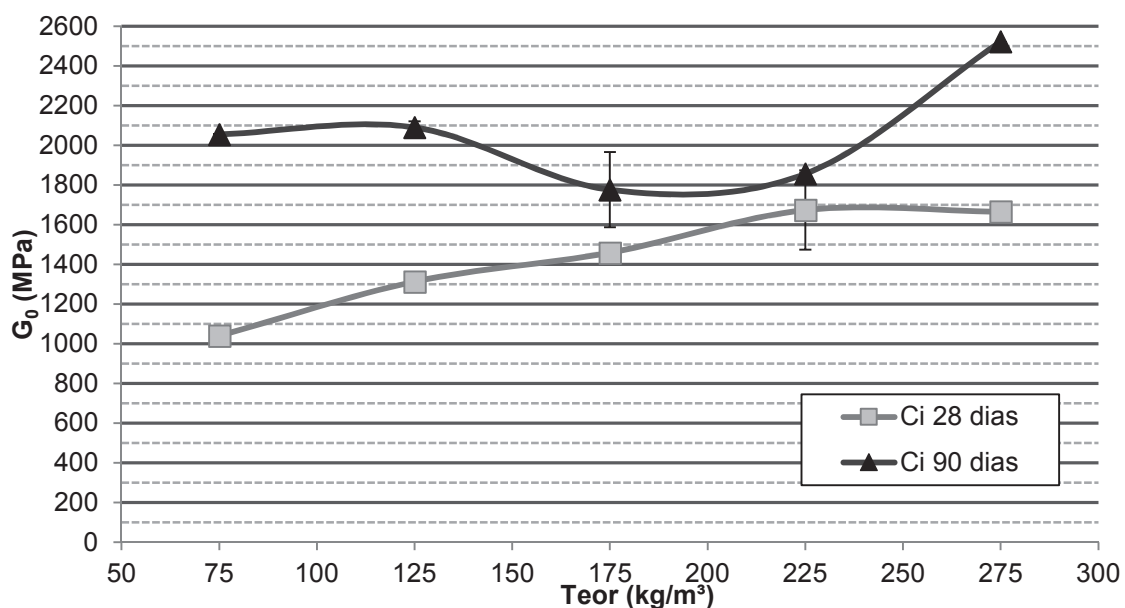


Figura 42 - Medidas de módulo cisalhante inicial x teor de agente cimentante, da mistura de solo com Cimento CP-V ARI, Ci. (Rilho, 2014)

A mistura de cimento Portland CP-V ARI mais escória de alto forno moída (grossa), adicionada ao solo é apresentada na Figura 43, nota-se uma tendência de aumento na medida de módulo cisalhante inicial com a elevação dos teores de agente cimentante, assim como, com o tempo de cura mais longo, obtém-se valores de  $G_0$  maiores. Tendo um módulo cisalhante inicial maior para 90 dias do que para 28 dias de cura, exceto para 75 kg/m<sup>3</sup>, caso inverso.

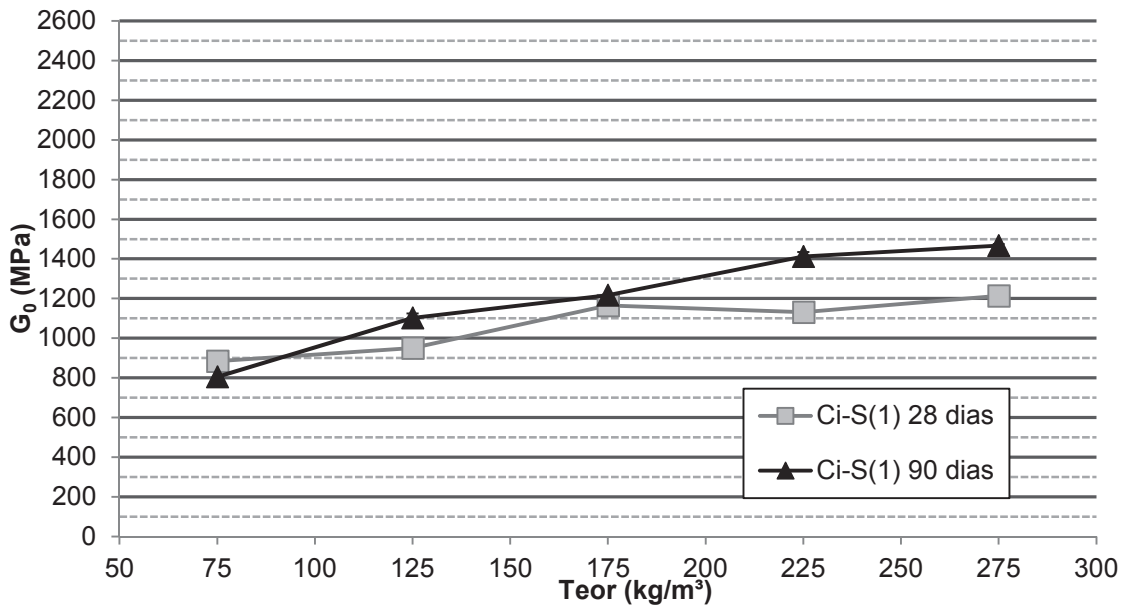


Figura 43 – Medidas de módulo cisalhante inicial x teor de agente cimentante, da mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Escória de alto forno moída (grosseira), Ci-S(1)

A mistura de cimento com escória de alto forno moída (fina), demonstrado na Figura 44, apresenta comportamento muito semelhante à da escória moída mais grossa, com aumento do módulo cisalhante inicial ao ser elevado o teor de agente cimentante, assim como, para o tempo de cura de 28 dias, os valores de  $G_0$  se mostram abaixo do que para os de 90 dias, exceto para  $75 \text{ kg/m}^3$ , onde esse fato se inverte.

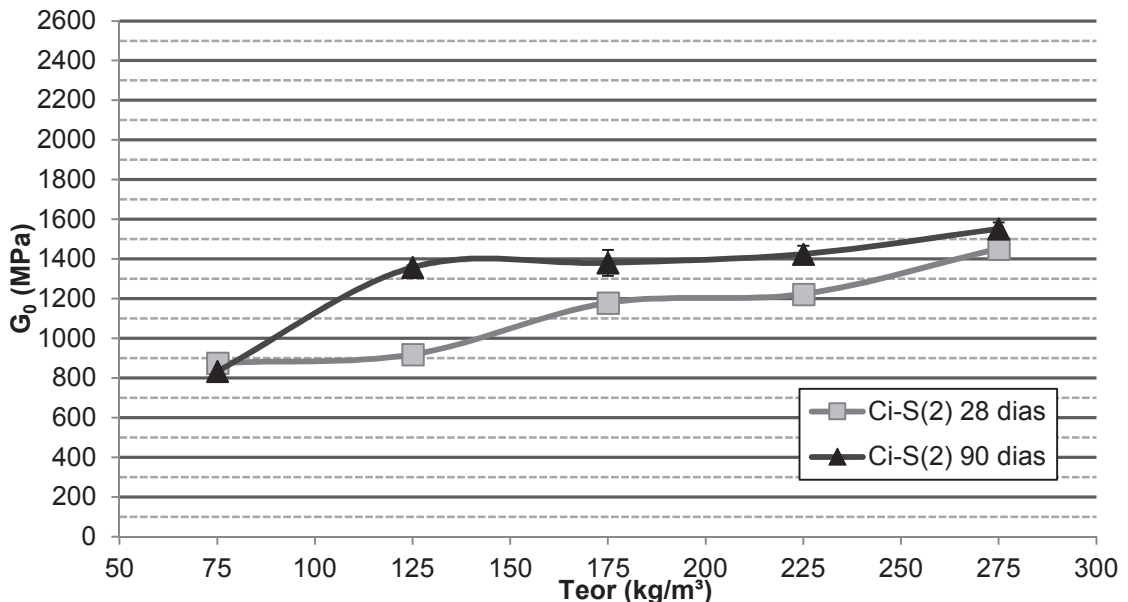


Figura 44 - Medidas de módulo cisalhante inicial x teor de agente cimentante, da mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Escória de alto forno moída (fina), Ci-S(2)

A Figura 45, apresenta as medidas de módulo cisalhante inicial para o solo adicionado de cimento mais fosfogesso dihidratado, as medida de  $G_0$  se mantém relativamente constantes tanto para teores distintos como para tempo de cura mais longo.

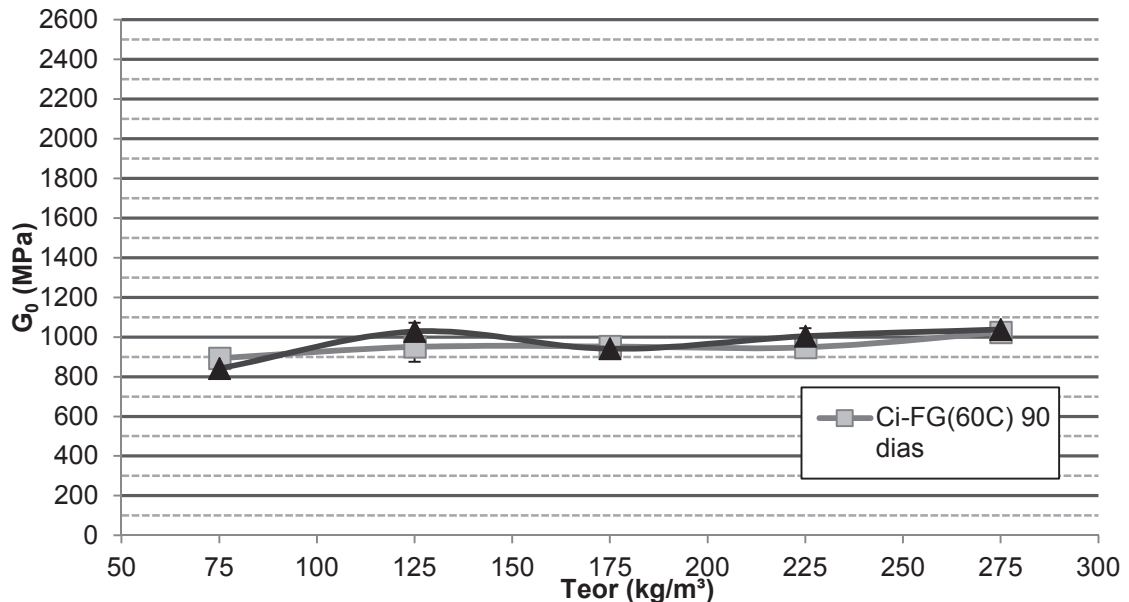


Figura 45 - Medidas de módulo cisalhante inicial x teor de agente cimentante, da mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Fosfogesso dihidratado, Ci-FG(60C)

Na Figura 46, a misturas de cimento mais fosfogesso hemihidratado mostram valores constantes de  $G_0$  com 28 dias de cura. Nota-se significativo um aumento no módulo cisalhante inicial para 90 dias. Neste tempo de cura, o  $G_0$  tende a aumentar com a elevação dos teores de agente cimentante.

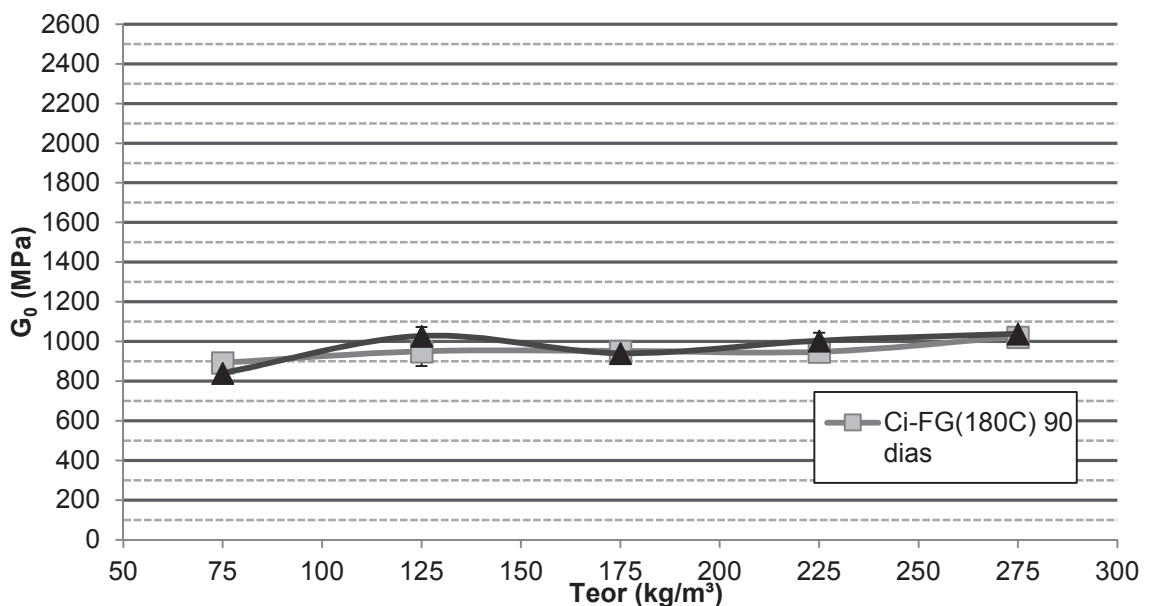


Figura 46 - Medidas de módulo cisalhante inicial x teor de agente cimentante, da mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Fosfogesso hemihidratado, Ci-FG(180C)

A mistura adicionada ao solo, composta por cimento Portland CP-V ARI mais cal viva (50% em massa para cada teor), tem seus resultados extraídos de Rilho (2014). Através da Figura 47, percebe-se que, com 28 dias de cura, os corpos de prova ensaiados obtiveram valores de módulo cisalhante inicial crescente com a elevação no teor de agente cimentante, demonstrando uma uniformidade nesse aumento de  $G_0$  com relação aos teores. Com 90 dias de cura, as amostras ensaiadas com 75, 125 e 275  $\text{kg/m}^3$  no teor de agente cimentante adicionado ao solo seguem a mesma tendência das amostras curadas em 28 dias, porém, as medidas com os teores de 175 e 225  $\text{kg/m}^3$  destoam, estão abaixo com relação às demais, ficando fora dos padrões apresentados pela maioria das misturas estudadas.

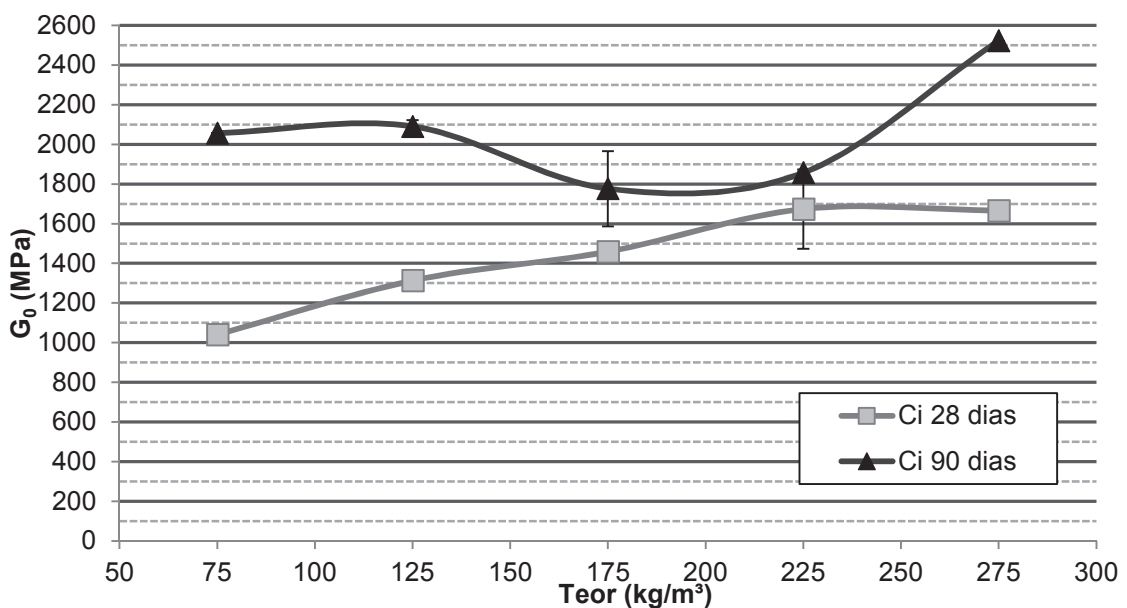


Figura 47 – Medidas de módulo cisalhante inicial x teor de agente cimentante, da mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Cal viva, Ci-Ca. (Rilho, 2014)

Para comparar as medidas de módulo cisalhante inicial em função do teor de agente cimentante, para o tempo de cura de 28 dias entre todas as misturas estudadas, apresenta-se a Figura 48. Tendo por base os resultados apresentados, nota-se que todas as misturas têm uma tendência de aumento na medida de módulo cisalhante inicial ( $G_0$ ), com o aumento no teor de agente cimentante incorporado às misturas com o solo mole orgânico. As misturas apresentam valores crescentes de  $G_0$  pela seguinte ordem: Cimento mais fosfogesso dihidratado, Ci-FG(60C), cimento mais fosfogesso hemihidratado, Ci-FG(180C), cimento mais escória de alto forno moída (grossa), Ci-S(1), cimento mais escória de alto forno moída (fina), Ci-S(2), cimento mais cal viva, Ci-Ca, e cimento, Ci. Sendo que, por vezes, alguns pontos de medidas se sobrepõem, principalmente nas misturas de cimento mais fosfogesso e nas misturas de cimento mais escória de alto forno moída.

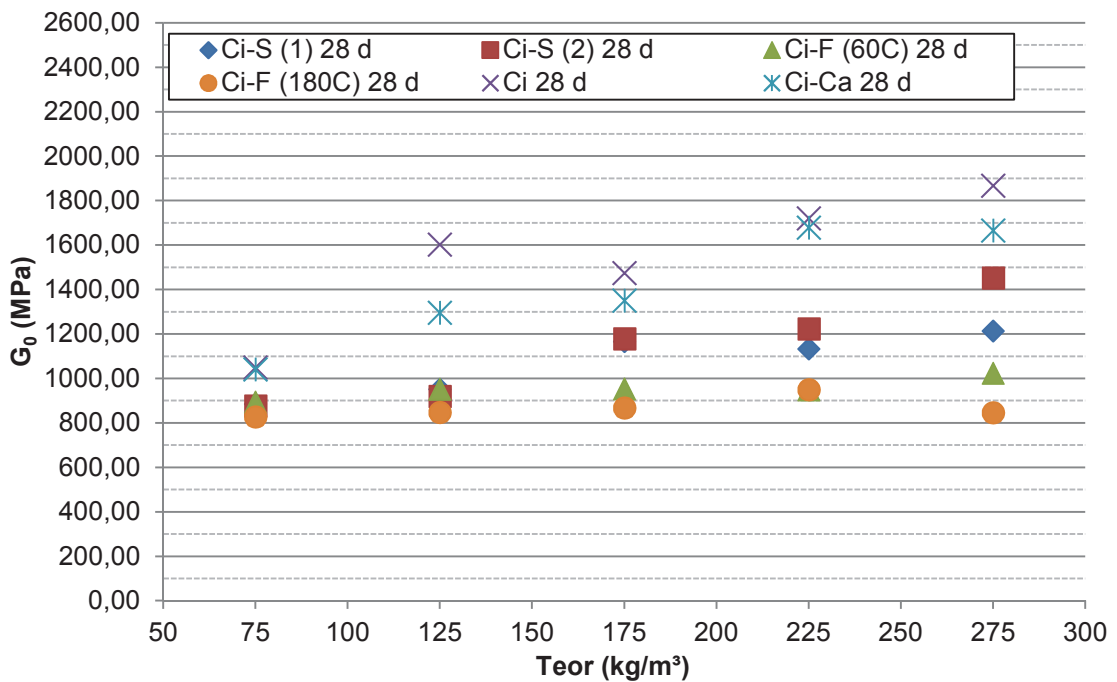


Figura 48 – Medida de módulo cisalhante inicial  $G_0$  x Teor de agente cimentante, com 28 dias de cura

A mesma comparação é feita para o tempo de cura de 90 dias, Figura 49. Os resultados seguem a mesma tendência que para 28 dias de cura. Porém, com o tempo de cura mais prolongado a mistura que leva fosfogesso hemihidratado possui valores de  $G_0$  equivalentes às misturas com escória de alto forno moída. A mistura de cimento, e cimento mais cal viva, tem pontos bem distintos entre si mas que, em geral, são superiores aos demais agentes cimentantes.

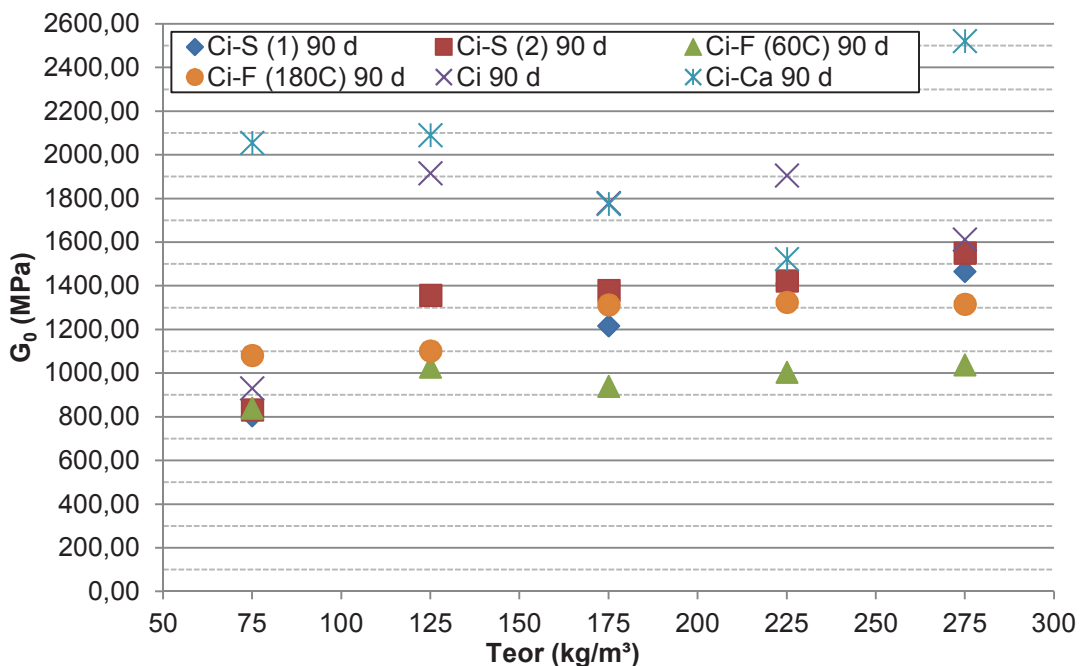


Figura 49 - Medida de rigidez inicial  $G_0$  x Teor de agente cimentante, com 90 dias de cura

De uma maneira geral, com o aumento no teor de agente cimentante, e com um tempo de cura mais longo, as medidas de módulo cisalhante inicial ( $G_0$ ) são mais elevadas, exceto para a mistura com o agente cimentante composto de cimento mais fosfogesso dihidratado, que se mantém praticamente constante ao longo do tempo e em todos os teores.

#### 4.4 EFEITO DA RELAÇÃO ENTRE POROSIDADE/TEOR DE AGENTE CIMENTANTE NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E MEDIDAS DE RIGIDEZ INICIAL

Conforme já citado por autores como Foppa (2005), Consoli, et al. (2007), Cruz (2008) e Dalla Rosa (2009), a relação existente entre o volume de vazios e o volume de agente cimentante proporciona bons resultados na previsão da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) e de medidas de módulo cisalhante inicial ( $G_0$ ) em solos artificialmente cimentados, tendo uma melhor conformação quando expressa pela razão entre a porosidade da mistura e o teor volumétrico de agente cimentante.

##### 4.4.1 Efeito sobre a resistência à compressão simples

Podem ser observadas as relações de  $q_u \times (\eta/C_{iv})$ , das misturas do solo mole orgânico estabilizado com os seguintes agentes cimentantes: cimento CP-V ARI + escória de alto forno moída (grossa) “Ci-S (1)” apresentada na Figura 50; cimento CP-V ARI + escória de alto forno moída (fina) “Ci-S (2)” apresentada na Figura 51; cimento CP-V ARI + fosfogesso (dihidratado) “Ci-FG (60C)” apresentada na Figura 52; cimento CP-V ARI + fosfogesso (hemihidratado) “Ci-FG (180C)” apresentada na Figura 53; e os resultados das misturas, adaptados de Rilho (2014): cimento CP-V ARI “Ci” apresentada na Figura 54; cimento CP-V ARI + cal viva “Ci-Ca” apresentada na Figura 55.

Percebe-se que quanto maior o fator de porosidade/teor volumétrico de agente cimentante, menor será a resistência à compressão simples das amostras. Conforme citado por Cruz (2008) e Consoli, et al. (2012), cada solo e agente cimentante tem um “expoente” de refinamento adequado, para todos os casos estudados nesta pesquisa utilizou-se o expoente igual a 1 (um),  $\eta/(C_{iv})^1$ .

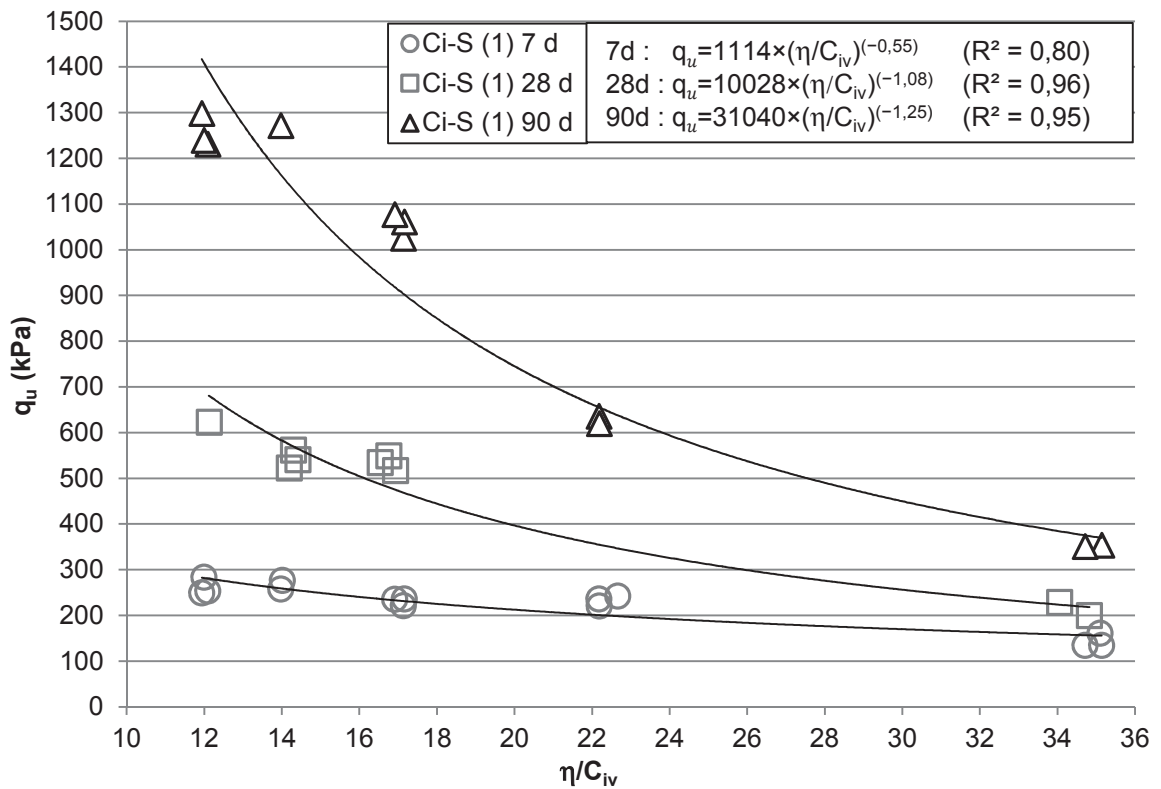


Figura 50 – Resistência à compressão simples x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Escória de alto forno moída (grosseira), Ci-S(1)

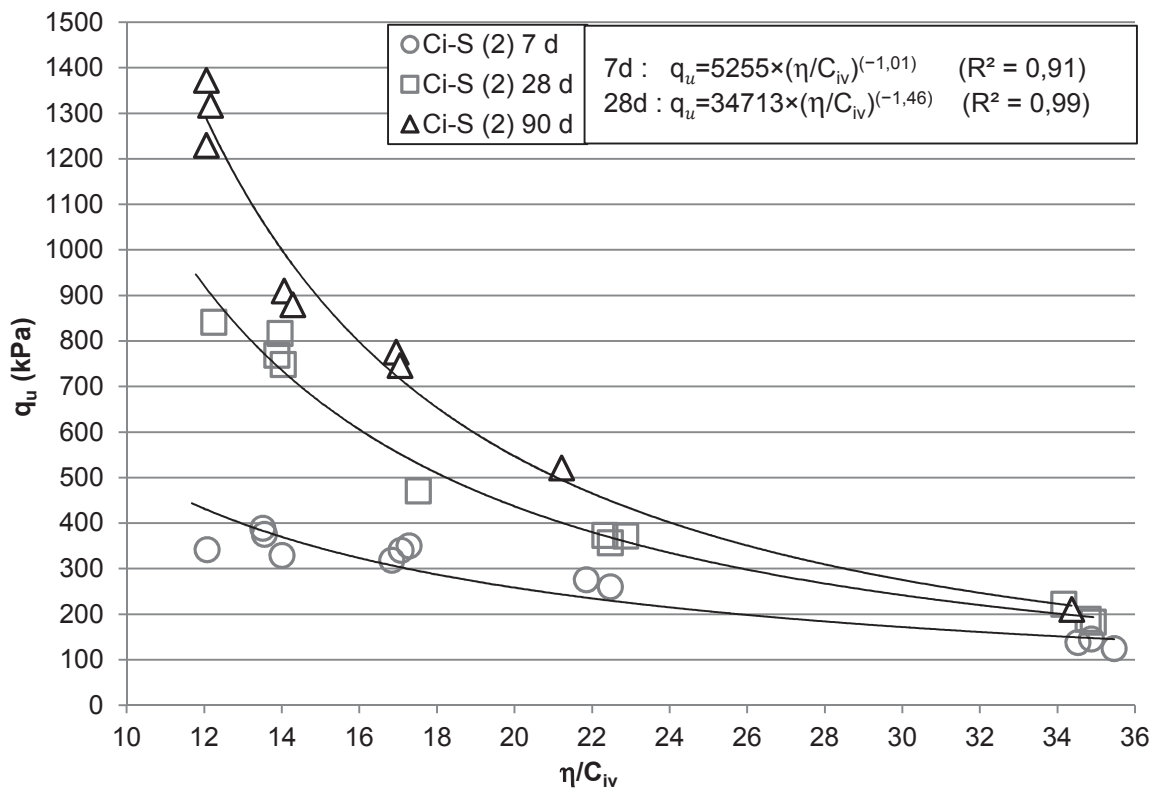


Figura 51 - Resistência à compressão simples x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Escória de alto forno moída (fina), Ci-S(2)



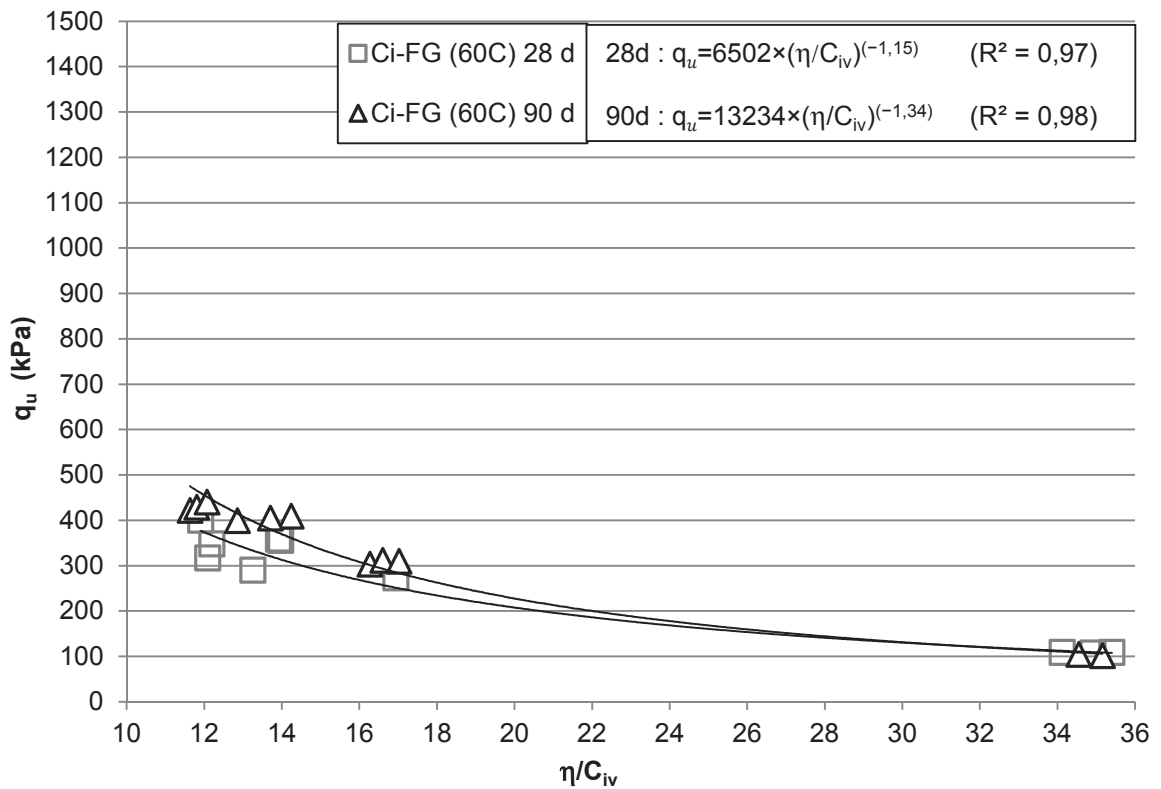


Figura 52 - Resistência à compressão simples x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais fosfogesso dihidratado, Ci-FG(60C)

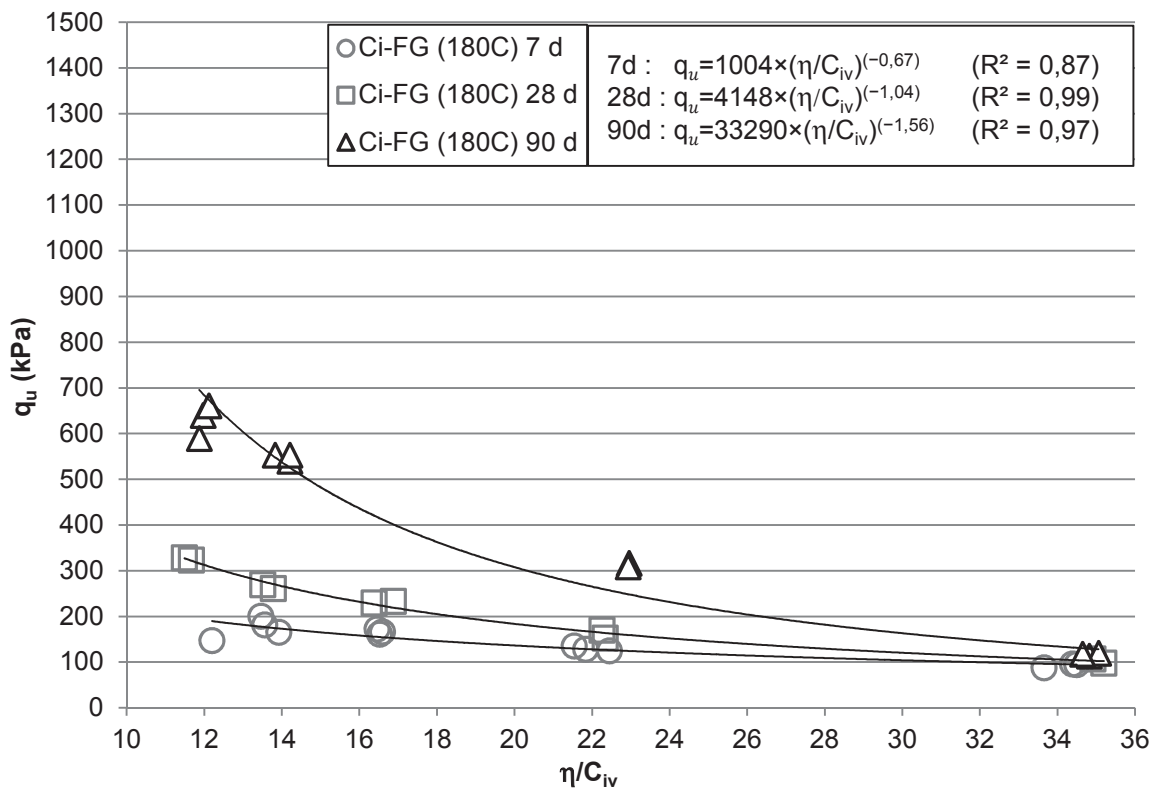


Figura 53 - Resistência à compressão simples x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais fosfogesso hemihidratado, Ci-FG(180C)

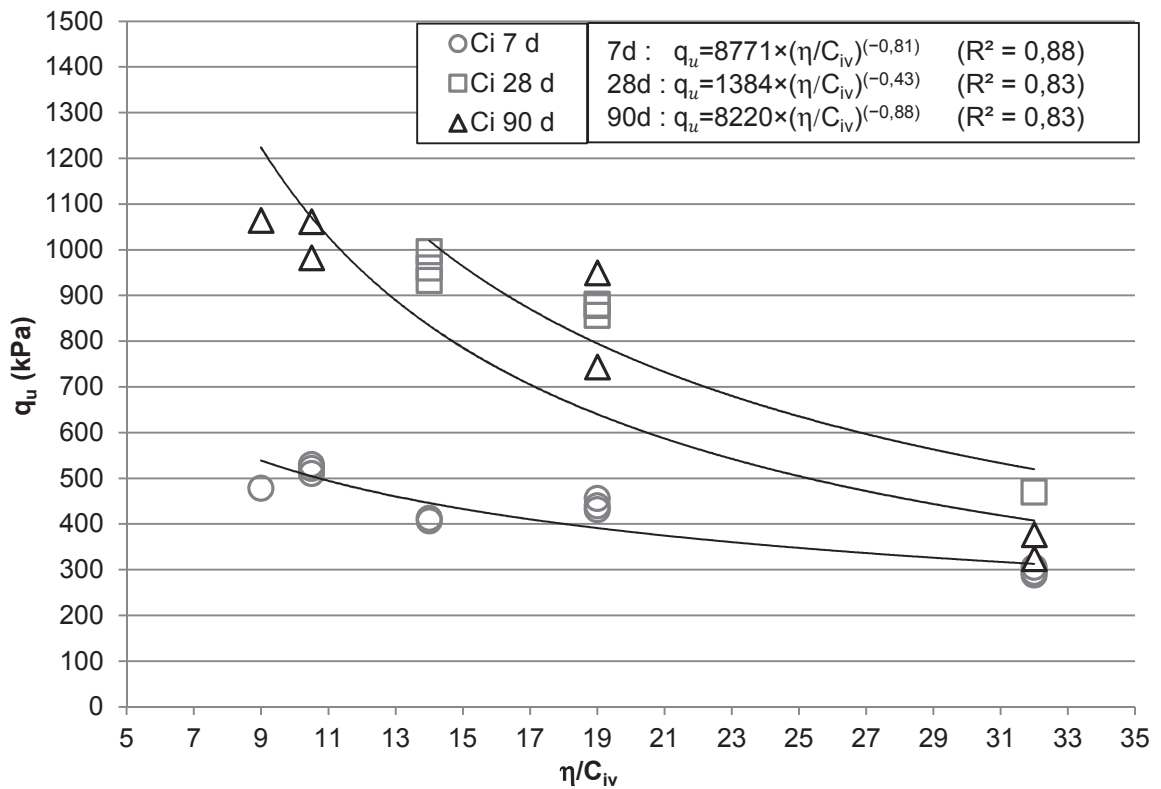


Figura 54 - Resistência à compressão simples x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI, Ci

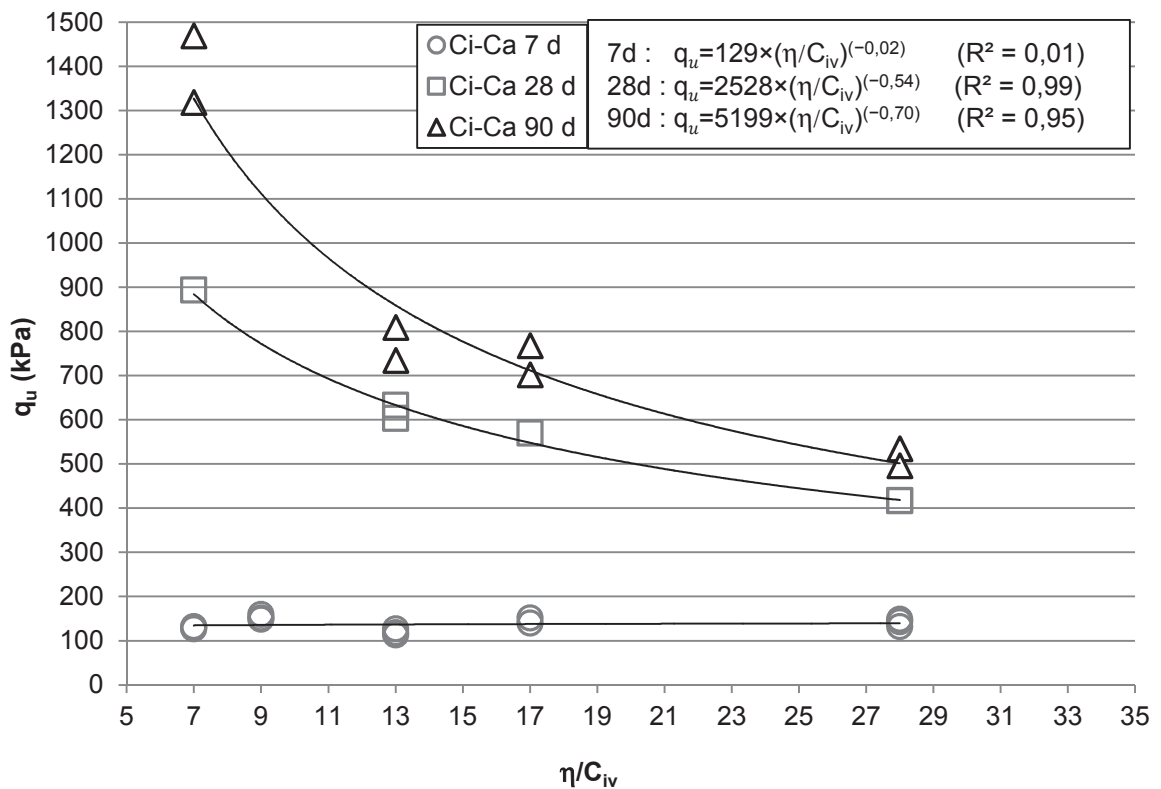


Figura 55 - Resistência à compressão simples x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais cal viva, Ci-Ca

Para todas as misturas de agentes cimentantes aplicadas ao mesmo solo, percebe-se que a metodologia, que leva em consideração a porosidade ( $\eta$ ) e o teor volumétrico de agente cimentante ( $C_{iv}$ ), tem uma resposta adequada a sua proposta de previsão de comportamento, conforme haviam dito Foppa (2005), Consoli, et al. (2007) e Cruz (2008).

Nas curvas onde se tem um tempo de cura inferior, 7 dias, os coeficientes de determinação se mostram menores do que os para tempos de cura de 28 e 90 dias, observando que os ganhos de resistência mais pronunciados também se dão a idades de cura maiores. Se forem observadas as tendências para o tempo de cura de 90 dias, pode-se perceber que, quanto menor a relação do ( $\eta/C_{iv}$ ), maior é a perspectiva do ganho de capacidade de resistência à compressão simples, diferente das curvas com 28 dias de cura com tendências mais amenas, e das de 7 dias onde a variação é baixa comparada aos demais períodos de cura, e com praticamente nenhuma variação para a mistura de cimento mais cal viva.

De maneira geral todas as curvas apresentam coeficientes de determinação plausíveis de confiança para utilização de tal metodologia.

#### **4.4.2 Efeito sobre as medidas de rigidez inicial**

A mesma relação feita de ( $\eta/C_{iv}$ ) com a resistência à compressão simples ( $q_u$ ) é aplicada às medidas de módulo cisalhante inicial ( $G_0$ ). Os valores de módulo cisalhante foram medidos em todas as misturas, porém, diferenciando-se da resistência à compressão simples nos tempos de cura. As medidas foram realizadas apenas para os tempos de cura com 28 e 90 dias.

As medidas de módulo cisalhante são obtidas exatamente dos mesmos corpos de prova ensaiados à compressão simples das misturas do solo mole orgânico artificialmente cimentado, sendo portanto, os seguintes agentes cimentantes adicionados: cimento CP-V ARI + escória de alto forno moída (grossa) “Ci-S (1)” apresentada na Figura 56; cimento CP-V ARI + escória de alto forno moída (fina) “Ci-S (2)” apresentada na Figura 57; cimento CP-V ARI + fosfogesso (dihidratado) “Ci-FG (60C)” apresentada na Figura 58; cimento CP-V ARI + fosfogesso (hemihidratado) “Ci-FG (180C)” apresentada na Figura 59; e os resultados das misturas, adaptados de Rilho (2014): cimento CP-V ARI “Ci” apresentada na Figura 60; cimento CP-V ARI + cal viva “Ci-Ca” apresentada na Figura 61. Assim como na relação com a resistência à compressão simples, quanto menor for o fator da porosidade/teor volumétrico de agente cimentante ( $\eta/C_{iv}$ ), maior é o valor do módulo cisalhante ( $G_0$ ).

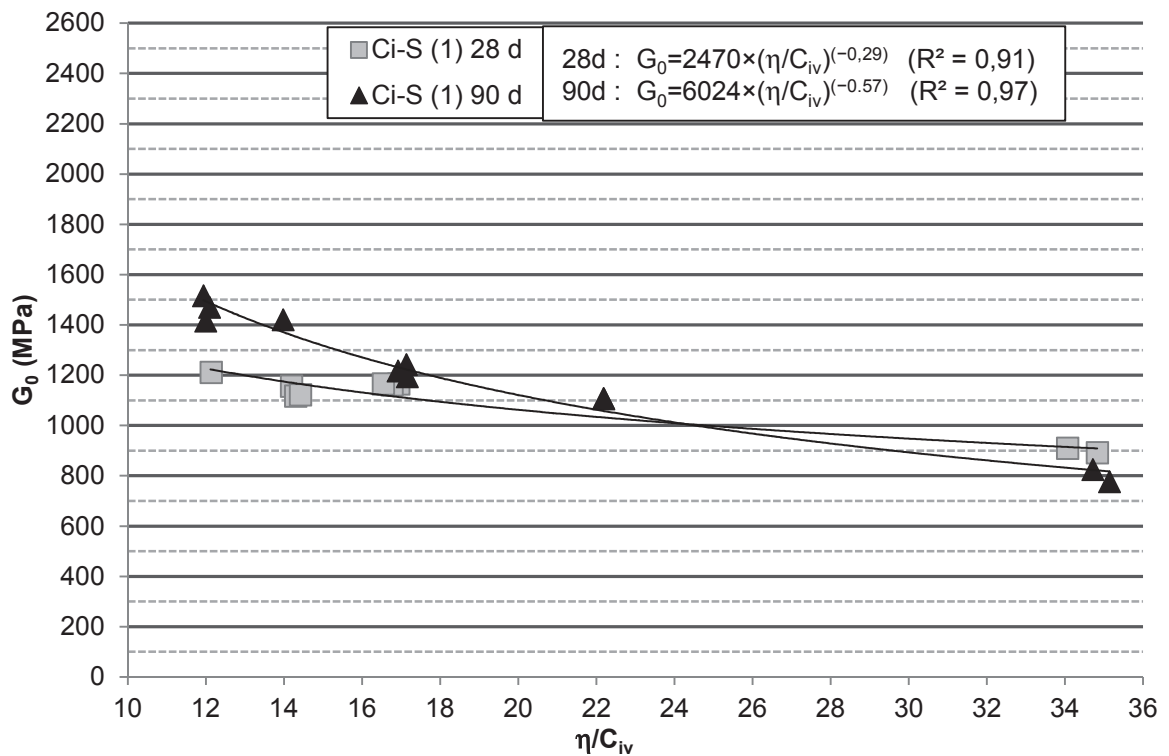


Figura 56 – Módulo cisalhante inicial x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Escória de alto forno moída (grosseira), Ci-S(1)

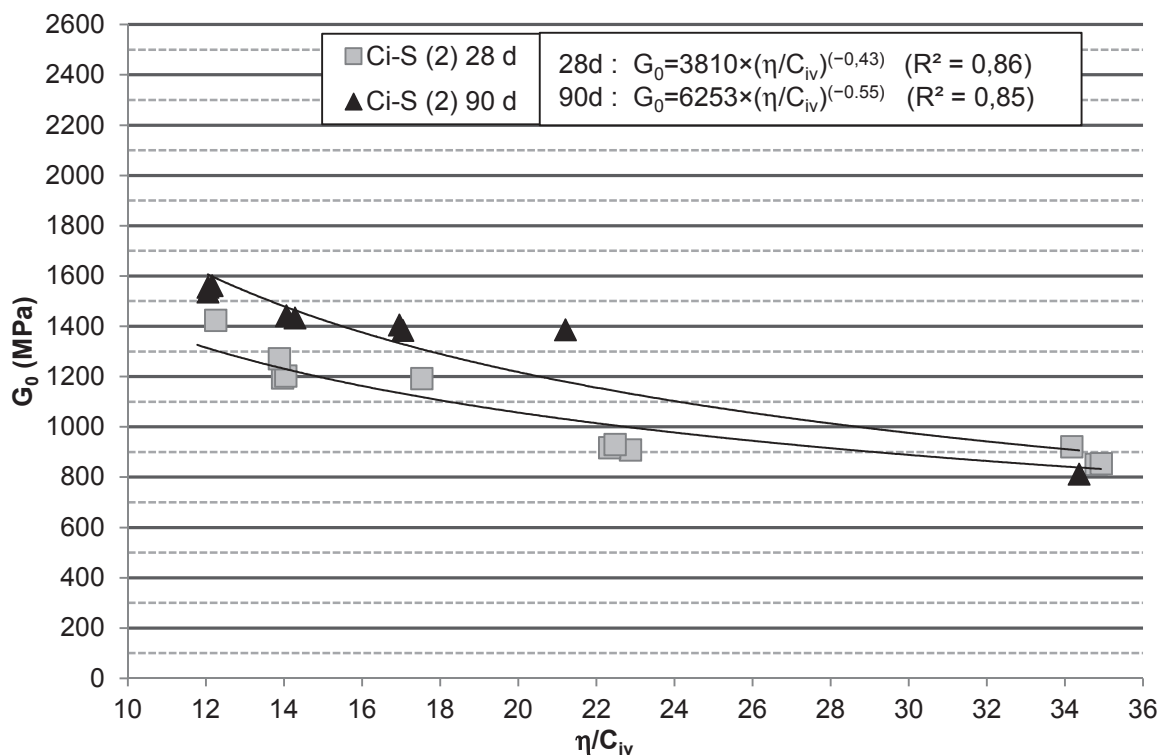


Figura 57 - Módulo cisalhante inicial x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Escória de alto forno moída (fina), Ci-S(2)

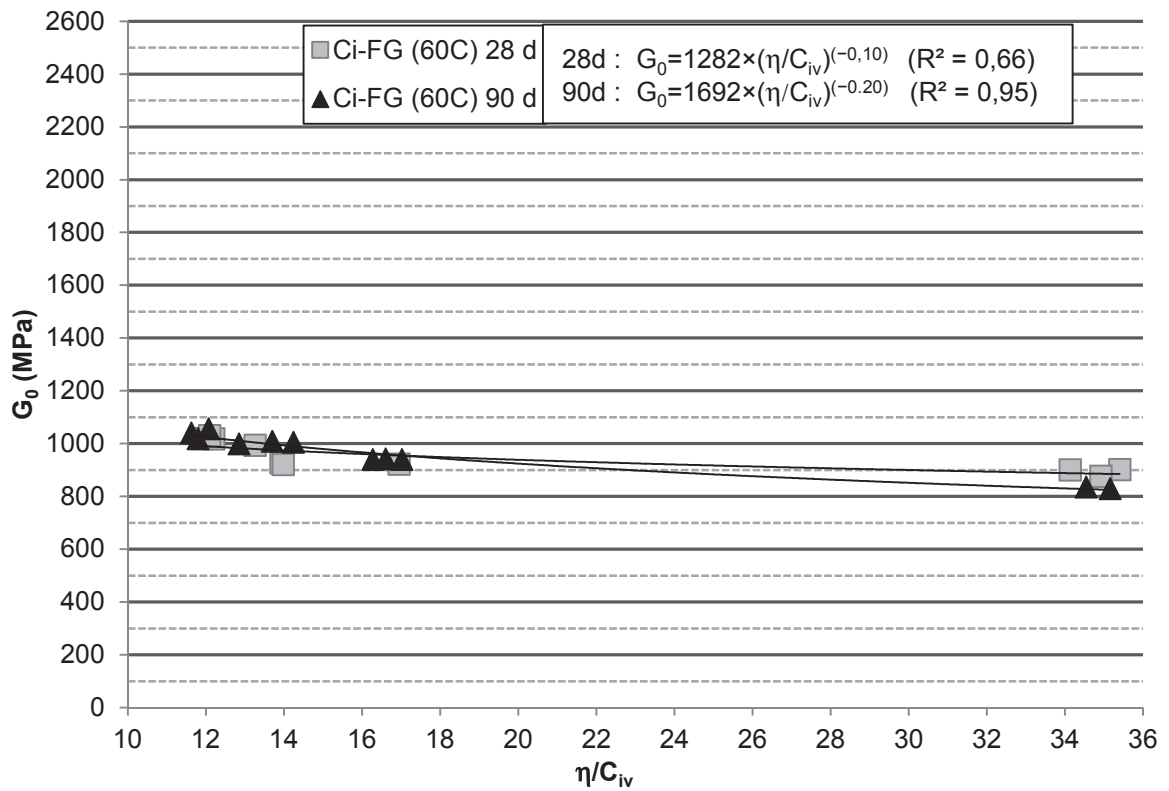


Figura 58 - Módulo cisalhante inicial x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais fosfogesso dihidratado, Ci-FG(60C)

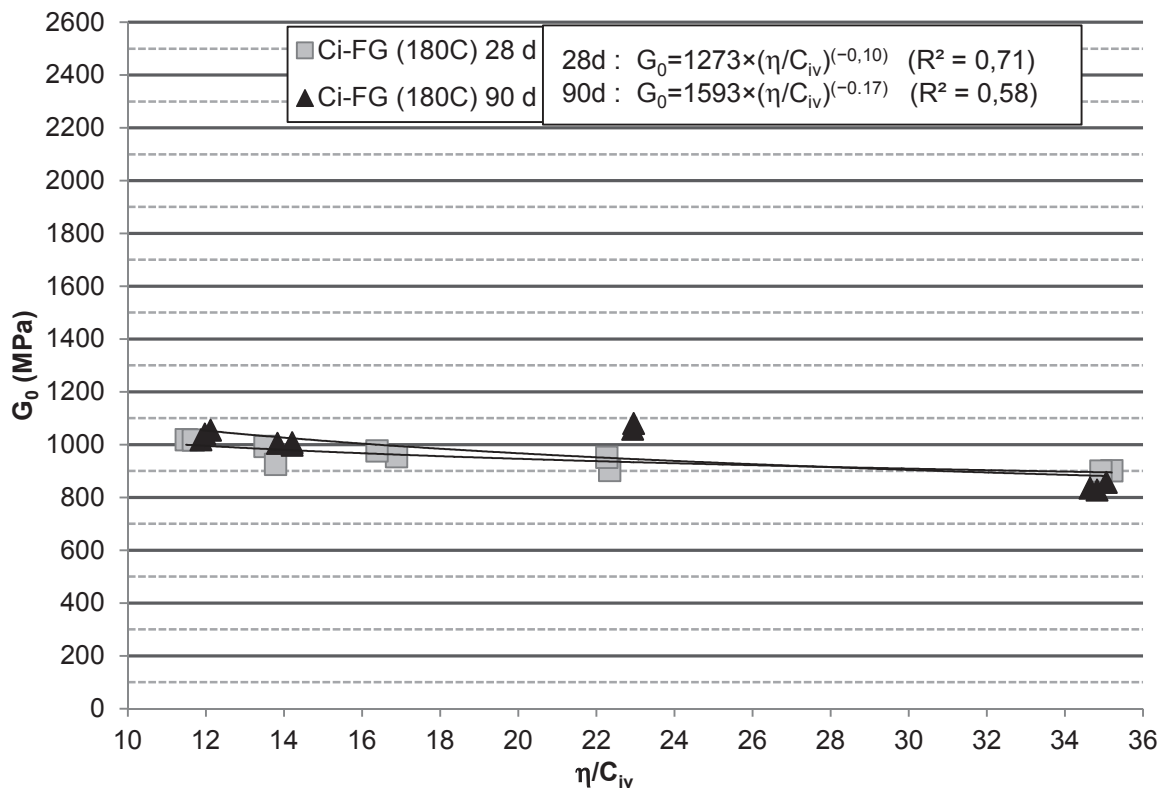


Figura 59 - Módulo cisalhante inicial x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais fosfogesso hemihidratado, Ci-FG(180C)

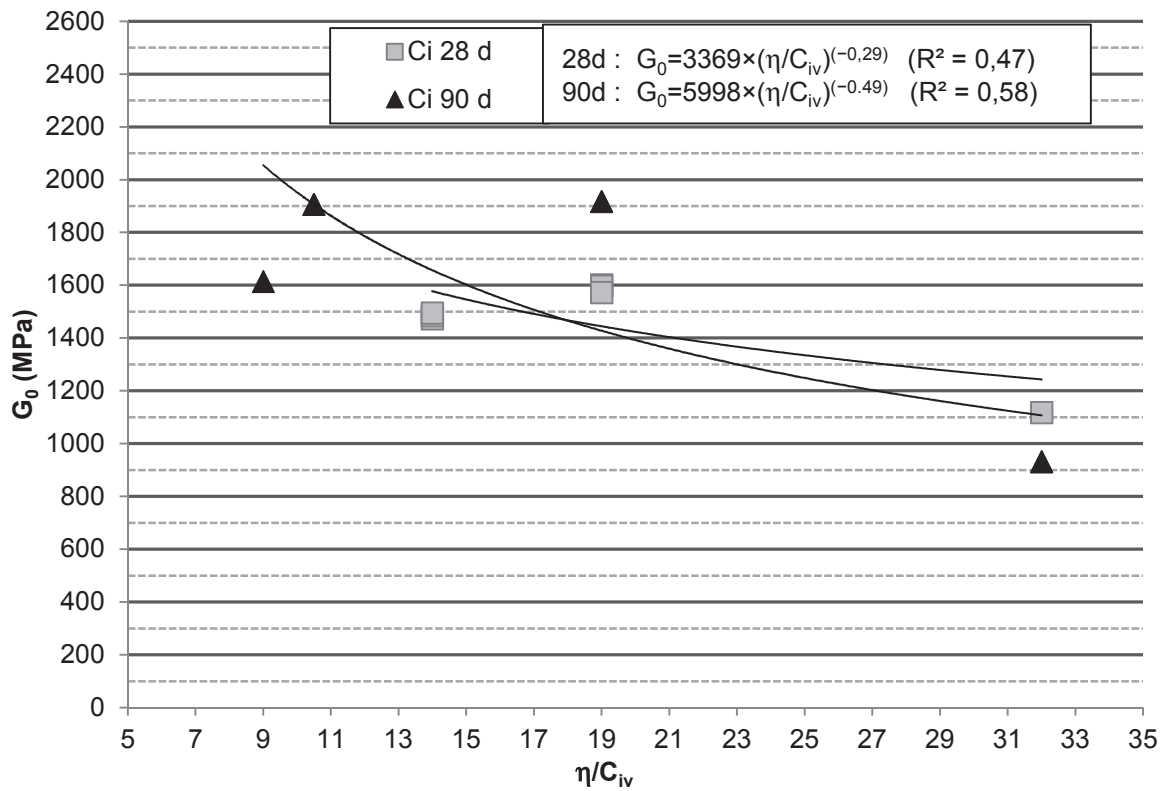


Figura 60 - Módulo cisalhante inicial x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI, Ci. (Rilho, 2014)

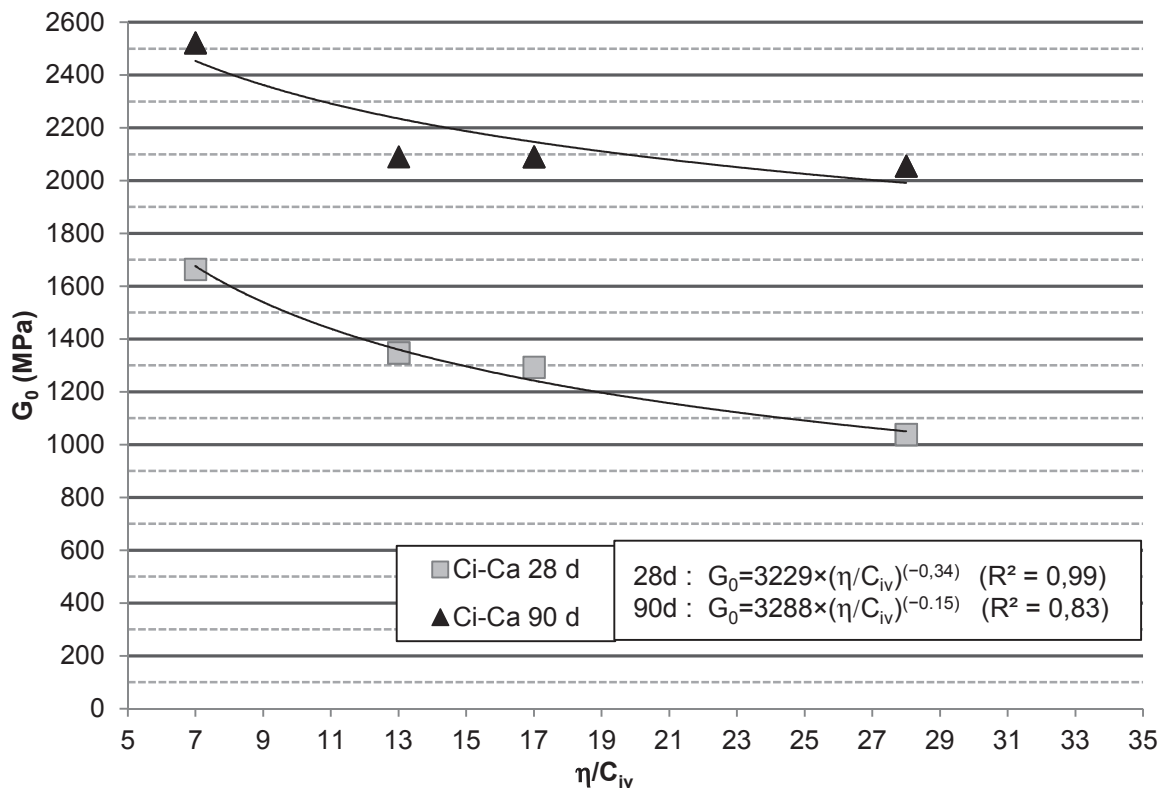


Figura 61 - Módulo cisalhante inicial x porosidade/teor volumétrico de agente cimentante: mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais cal viva, Ci-Ca. (Rilho, 2014)

As curvas ajustadas para estabelecer uma metodologia de previsão do comportamento das medidas de módulo cisalhante iniciais apresentam, na maioria das misturas, bons coeficientes de determinação, porém algumas amostras não demonstraram resultados tão satisfatórios quanto as apresentadas na relação de  $q_u/(\eta/C_{iv})$ .

A relação existente nas medidas de solo mole orgânico artificialmente cimentado com cimento CP-V ARI, com cimento CP-V ARI mais fosfogesso dihidratado com 7 dias de cura, e com cimento CP-V ARI mais fosfogesso hemihidratado não tem boa relação. Um dos fatores explicativo a este fato é a dificuldade da realização das medidas de velocidade de ondas, que resulta por correlações em  $G_0$  quando o material ensaiado apresentava rigidez baixa.

O comportamento de todas as misturas se mostrou muito semelhante, sendo que houve aumento do valor de  $G_0$  em função da redução dos valores de  $\eta/C_{iv}$ , conforme apresentado no estudo de Consoli, et al. (2012). Houve também, uma elevação nos valores de  $G_0$  quando ensaiados a tempos de cura maiores, salvo a mistura de cimento Portland CP-V ARI com fosfogesso dihidratado “Ci-FG (60C)” e hemihidratado “Ci-FG (180C)”, que praticamente não apresentam alteração em função do tempo de cura.

#### 4.4.3 Resumo das Relações

De uma maneira geral, todas as relações se mostraram consistentes. Na Tabela 17 é apresentado um resumo das equações referentes à previsão da capacidade de carga  $q_u$ , equação (3), para cada um dos tempos de cura e para cada mistura separadamente.

$$q_u = A \left( \frac{\eta}{C_{iv}} \right)^B \quad (3)$$

**Tabela 17 - Resumo das equações para determinação de  $q_u$**

Mistura	7 dias		28 dias		90 dias	
	A	B	A	B	A	B
Ci-S (1)	1114	-0,55	10028	-1,08	31040	-1,25
Ci-S (2)	5255	-1,01	34713	-1,46	87047	-1,70
Ci-FG (60C)	-	-	6502	-1,15	13234	-1,34
Ci-FG (180C)	1004	-0,67	4148	-1,04	33290	-1,56
Ci	8771	-0,81	1384	-0,43	8220	-0,88
Ci-Ca	123	-0,02	2528	-0,54	5199	-0,70

Pode ser dito através da Figura 50 até a Figura 55, que demonstram a relação  $q_u \times (\eta/C_{iv})$ , e pelas Figuras Figura 56 a Figura 61, referentes à  $G_0 \times (\eta/C_{iv})$ , que ambas cumprem a

proposta apresentada nessa pesquisa quando se deseja estabelecer uma metodologia de dosagem e previsão do comportamento mecânico das amostras.

#### 4.4.4 Normalização

A metodologia apresentada na previsão de comportamento mecânico referente à resistência à compressão simples de um solo mole orgânico artificialmente cimentado com várias misturas de agente cimentante, tem se mostrado muito adequada à proposta. Porém, para cada uma das misturas e para cada tempo de cura dessa mistura, obtém-se uma diferente equação, conforme apresentado no resumo do item 4.4.3.

A fim de se estabelecer uma relação única que compreenda todas as misturas e tempos de cura, propõe-se uma normalização da resistência à compressão simples,  $q_u$ , de cada um dos pontos pelo valor de  $q_u$  para um dado  $\eta/C_{iv}$  de sua mistura e tempo de cura, conforme já sugerido por Consoli, et al. (2013). Na Figura 62 podem ser observados os pontos normalizados e o enquadramento da linha de tendência adicionada, além do bom coeficiente de determinação obtido.

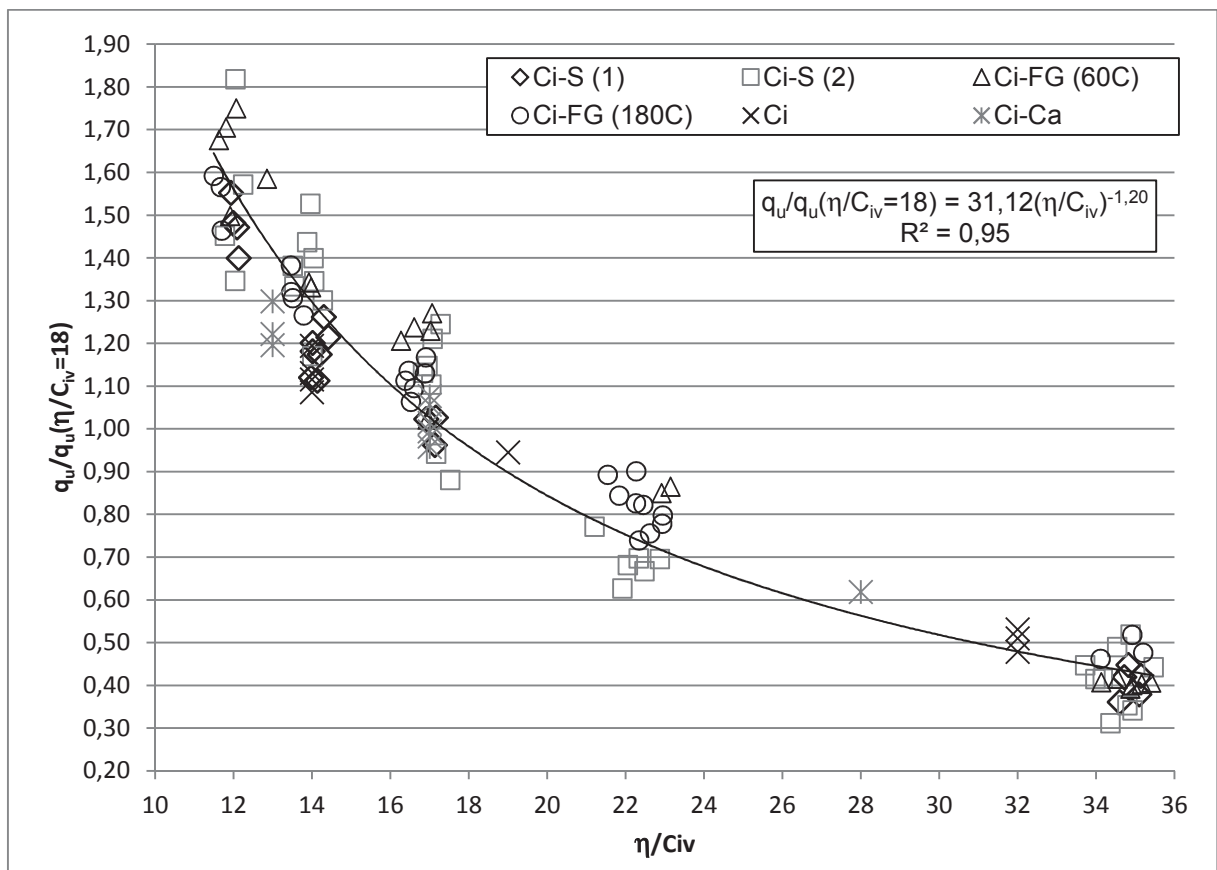


Figura 62 – Normalização da resistência compressão simples para todas as misturas e tempos de cura



Desta forma é possível ter uma previsão muito eficaz do comportamento, seja ele para qualquer um dos agentes cimentantes, seja para qualquer um dos tempos de cura neste único formato.

#### 4.5 RELAÇÃO ENTRE MEDIDAS DE MÓDULO CISALHANTE INICIAL ( $G_0$ ) E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES ( $q_u$ )

Segundo concluem Consoli, et al. (2012), para uma dada matriz de solo e adições de agente cimentantes, a relação entre  $G_0/q_u$  varia praticamente de forma linear com a relação entre a porosidade e o teor volumétrico de agente cimentante  $(\eta/C_{iv})^{\text{expoente}}$ , revelando um padrão consistente de dependência entre essas propriedades geotécnicas e esse índice.

Conforme cita Cruz (2008), com a relação existente entre os parâmetros  $q_u$  e  $G_0$  e a porosidade/teor volumétrico de agente cimentante, pode-se finalmente correlacionar os dois parâmetros  $G_0$  e  $q_u$ , pela razão existente entre as equações geradas em cada uma das curvas de  $q_u \times (\eta/C_{iv})$  e  $G_0 \times (\eta/C_{iv})$ . Representando um bom enquadramento e coeficiente de determinação, como demonstrado a seguir.

A fim de se obter uma melhor visualização serão apresentadas as relações de  $G_0/q_u$  em duas figuras: Figura 63 e Figura 64, ambas para as misturas com 28 dias de cura.

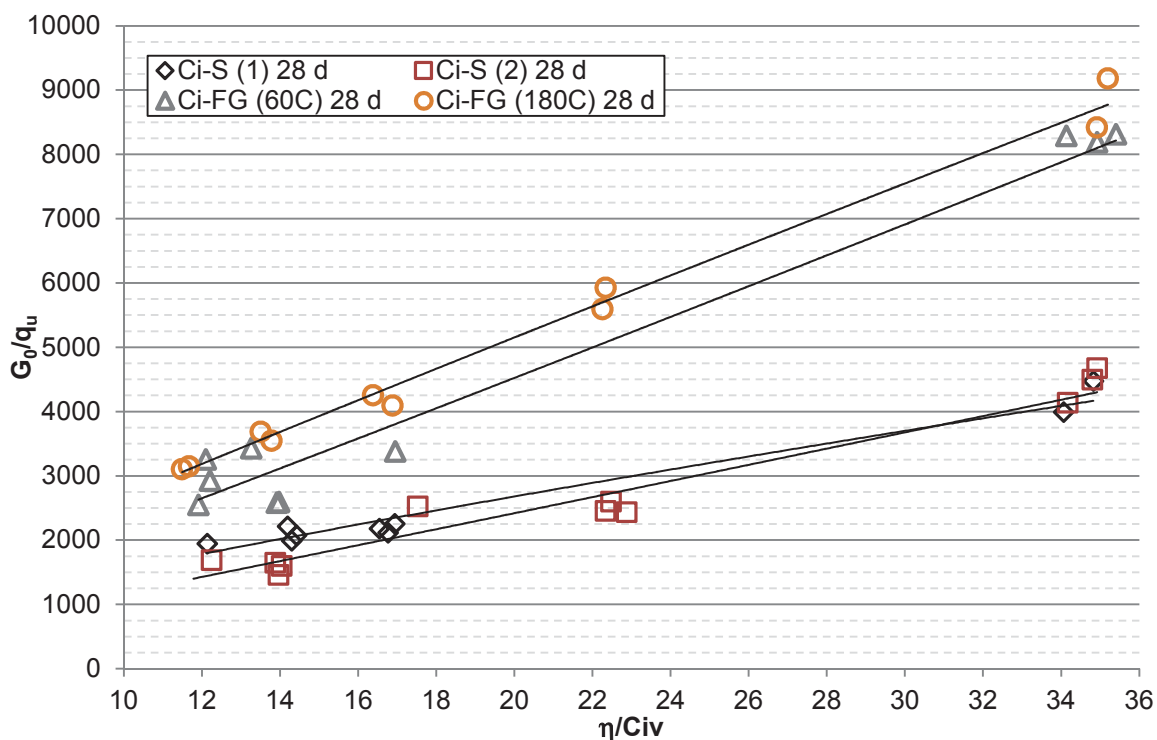


Figura 63 – Relação entre  $G_0/q_u$  e  $\eta/C_{iv}$ , 28 dias de cura

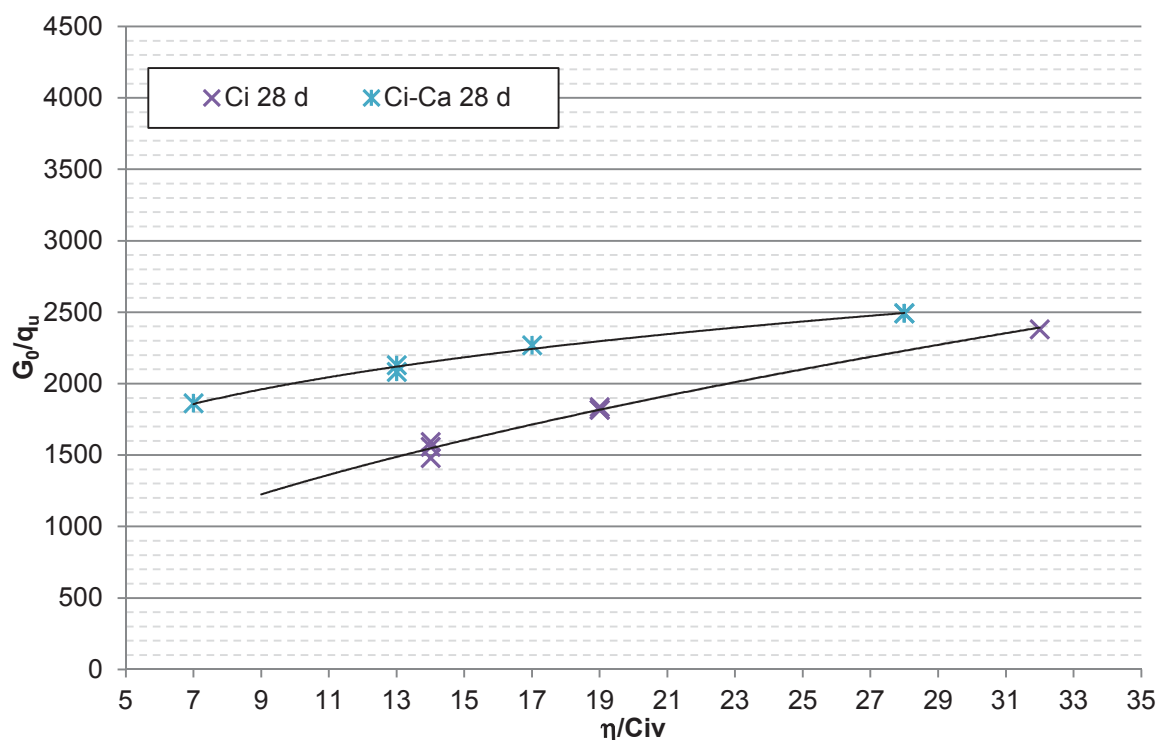


Figura 64 - Relação entre  $G_0/q_u$  e  $\eta/C_{iv}$ , 28 dias de cura. (Rilho, 2014)

As equações resultantes da relação de  $G_0/q_u$  para cada uma das misturas, com tempo de cura de 28 dias, são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Resumo das equações da relação  $G_0/q_u$  de cada uma das misturas para 28 dias de cura

Cimento CP-V ARI + escória de alto forno moída (grossa) “Ci-S (1)” – 28 dias de cura	$G_0/q_u = 246 \left(\frac{\eta}{C_{iv}}\right)^{0,79}$	$R^2 = 0,96$
Cimento CP-V ARI + escória de alto forno moída (fina) “Ci-S (2)” – 28 dias de cura	$G_0/q_u = 110 \left(\frac{\eta}{C_{iv}}\right)^{1,03}$	$R^2 = 0,94$
Cimento CP-V ARI + fosfogesso (dihidratado) “Ci-FG (60C)” – 28 dias de cura	$G_0/q_u = 197 \left(\frac{\eta}{C_{iv}}\right)^{1,05}$	$R^2 = 0,94$
Cimento CP-V ARI + fosfogesso (hemihidratado) “Ci-FG (180C)” – 28 dias de cura	$G_0/q_u = 307 \left(\frac{\eta}{C_{iv}}\right)^{0,94}$	$R^2 = 0,99$
Cimento CP-V ARI “Ci” – 28 dias de cura	$G_0/q_u = 384 \left(\frac{\eta}{C_{iv}}\right)^{0,53}$	$R^2 = 0,98$
Cimento CP-V ARI + cal viva “Ci-Ca” – 28 dias de cura	$G_0/q_u = 1228 \left(\frac{\eta}{C_{iv}}\right)^{0,22}$	$R^2 = 0,99$

Na Figura 65 e Figura 66 são apresentadas as relações de  $G_0/q_u$  das misturas ensaiadas com 90 dias de cura.

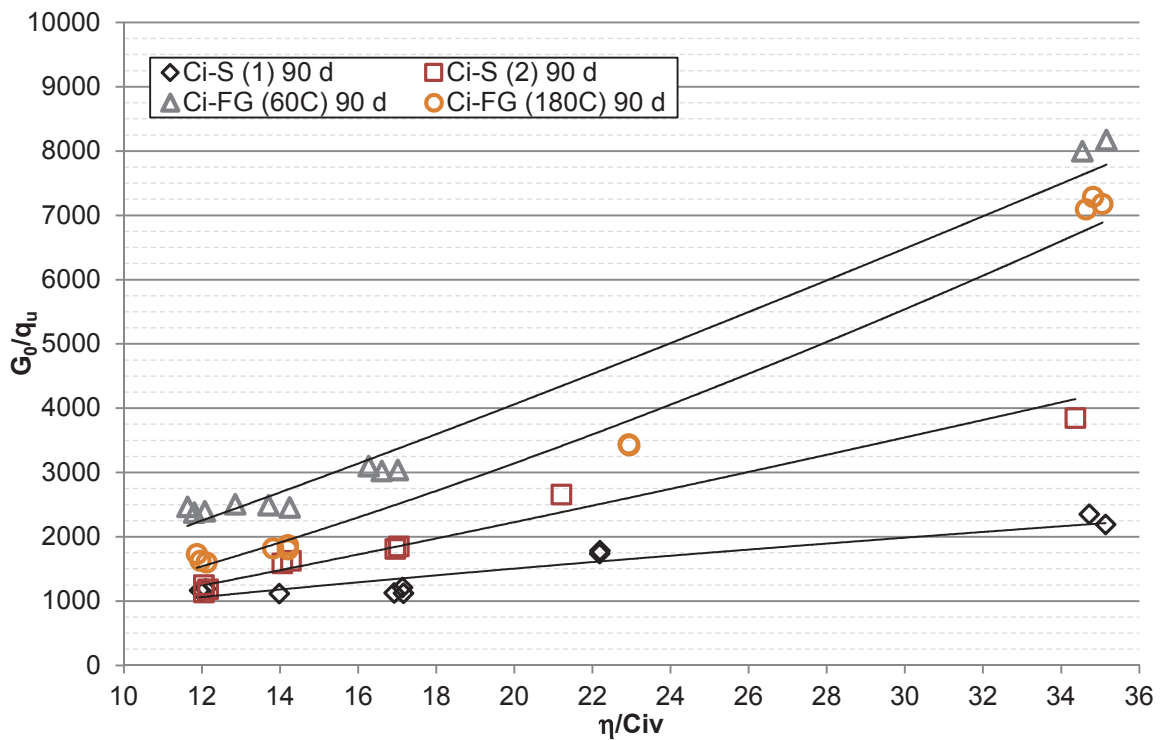


Figura 65 - Relação entre  $G_0/q_u$  e  $\eta/C_{iv}$ , 90 dias de cura

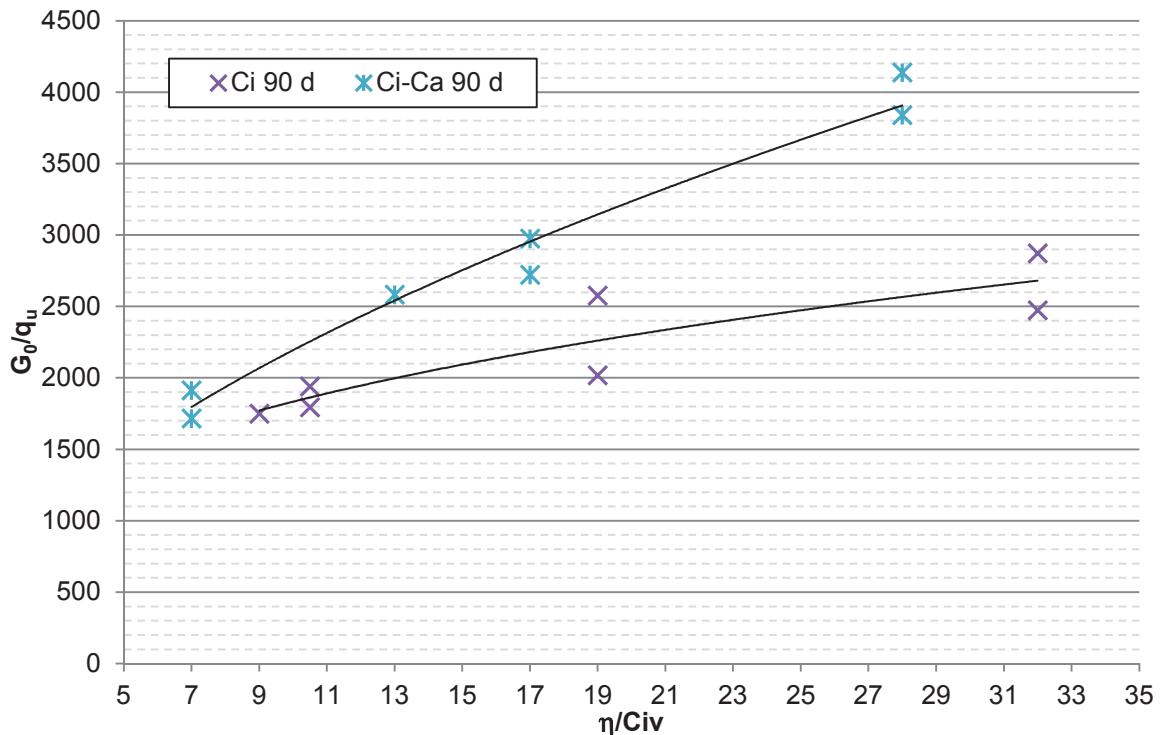


Figura 66 - Relação entre  $G_0/q_u$  e  $\eta/C_{iv}$ , 90 dias de cura. (Rilho, 2014)

Um resumo das equações resultantes da razão  $G_0/q_u$  para o tempo de cura de 90 dias é apresentado na Tabela 19.

**Tabela 19 – Resumo das equações da relação  $G_0/q_u$  de cada uma das misturas para 90 dias de cura**

Cimento CP-V ARI + escória de alto forno moída (grossa) “Ci-S (1)” – 90 dias de cura	$G_0/q_u = 194 \left(\frac{\eta}{C_{iv}}\right)^{0,68}$	$R^2 = 0,85$
Cimento CP-V ARI + escória de alto forno moída (fina) “Ci-S (2)” – 90 dias de cura	$G_0/q_u = 72 \left(\frac{\eta}{C_{iv}}\right)^{1,15}$	$R^2 = 0,97$
Cimento CP-V ARI + fosfogesso (dihidratado) “Ci-FG (60C)” – 90 dias de cura	$G_0/q_u = 128 \left(\frac{\eta}{C_{iv}}\right)^{1,15}$	$R^2 = 0,97$
Cimento CP-V ARI + fosfogesso (hemihidratado) “Ci-FG (180C)” – 90 dias de cura	$G_0/q_u = 48 \left(\frac{\eta}{C_{iv}}\right)^{1,40}$	$R^2 = 0,98$
Cimento CP-V ARI “Ci” – 90 dias de cura	$G_0/q_u = 864 \left(\frac{\eta}{C_{iv}}\right)^{0,34}$	$R^2 = 0,80$
Cimento CP-V ARI + cal viva “Ci-Ca” – 90 dias de cura	$G_0/q_u = 603 \left(\frac{\eta}{C_{iv}}\right)^{0,22}$	$R^2 = 0,99$

A relação para as misturas com 28 dias de cura, de cimento Portland CP-V ARI mais fosfogesso (di e hemi hidratado), demonstram um comportamento muito similar, assim como a mistura de cimento com adição das escórias de alto forno moída, com valores resultantes muito próximos e com pequenos pontos de dispersão entre eles. Enquanto, para 90 dias, as tendências já tem uma outra perspectiva, tendo uma maior disparidade. As misturas com cimento e cimento mais cal viva, demonstram uma tendência distinta das demais, seja para 28 ou 90 dias de cura.

Há uma relação direta existente entre o  $\eta/C_{iv}$  e  $G_0/q_u$ , sendo que com a redução da relação da porosidade pelo teor volumétrico de agente cimentante, tem-se uma diminuição do valor da razão entre o módulo cisalhante inicial e a resistência à compressão simples.

As tendências das misturas de cimento, e cimento mais cal viva, fogem do que propõem Consoli, et al. (2012), de uma tendência retilínea. Mas por outro lado, as demais misturas tem um comportamento bem similar ao que os autores propõem, de uma tendência quase que reta no aumento da razão  $G_0/q_u$  com o aumento do  $\eta/C_{iv}$ .

Conforme propõem Consoli, et al. (2012), com essa relação, o engenheiro pode escolher a quantidade de agente cimentante e a densidade mínima adequada para proporcionar uma mistura que atenda à capacidade de resistência à compressão simples e rigidez exigida pelo projeto. Além disso, a relação de porosidade/teor volumétrico de agente cimentante também pode ser útil no controle de campo de camadas de solo-cimento.

As misturas de solo mole orgânico adicionados de agentes cimentantes apresentam uma relação clara entre o  $G_0/q_u$  com o  $\eta/C_{iv}$ , evidenciando a utilização dessa metodologia na previsão do comportamento das propriedades geotécnicas das misturas deste solo mole orgânico cimentado artificialmente.

#### 4.6 EFEITO DO FATOR A/C NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Para Horpibulsuk (2011), a relação existente entre a quantidade de água e a quantidade de agente cimentante contida na mistura do solo estabilizado é o principal parâmetro da análise das misturas de argilas moles com cimentos. Essa relação só é possível pela mistura de solo mais agente cimentante estar no estado completamente saturado.

A relação de água pelos agentes cimentantes empregados na estabilização do solo mole orgânico é aqui apresentada como  $a/c$ , sendo o “a” referente à água, em litros; e “c” referente aos agentes cimentantes, em kg.

No estudo é possível identificar o aumento da resistência à compressão simples com o decréscimo no valor do fator  $a/c$ , e que, para cada um dos tempos de cura estudados se observa uma linha de tendência e equação diferenciada das demais, conforme já exposto por outros autores como Janz e Johansson (2002), Azambuja (2004) e Horpibulsuk (2011).

Nas figuras subsequentes é apresentada a relação entre a resistência à compressão simples e o fator de água/agente cimentante das misturas de solo mole orgânico com os seguintes agentes cimentantes: cimento CP-V ARI + escória de alto forno moída (grossa) “Ci-S (1)” apresentada na Figura 67; cimento CP-V ARI + escória de alto forno moída (fina) “Ci-S (2)” apresentada na Figura 68; cimento CP-V ARI + fosfogesso (dihidratado) “Ci-FG (60C)” apresentada na Figura 69; cimento CP-V ARI + fosfogesso (hemihidratado) “Ci-FG (180C)” apresentada na Figura 70; e os resultados das misturas, adaptados de Rilho (2014): cimento CP-V ARI “Ci” apresentada na Figura 71; cimento CP-V ARI + cal viva “Ci-Ca” apresentada na Figura 72.

Assim como nas relações anteriores as misturas de cimento CP-V ARI + fosfogesso (dihidratado) “Ci-FG (60C)” não tem valores representativos referente ao tempo de cura de 7 dias devido aos motivos expostos no item 4.4.1.

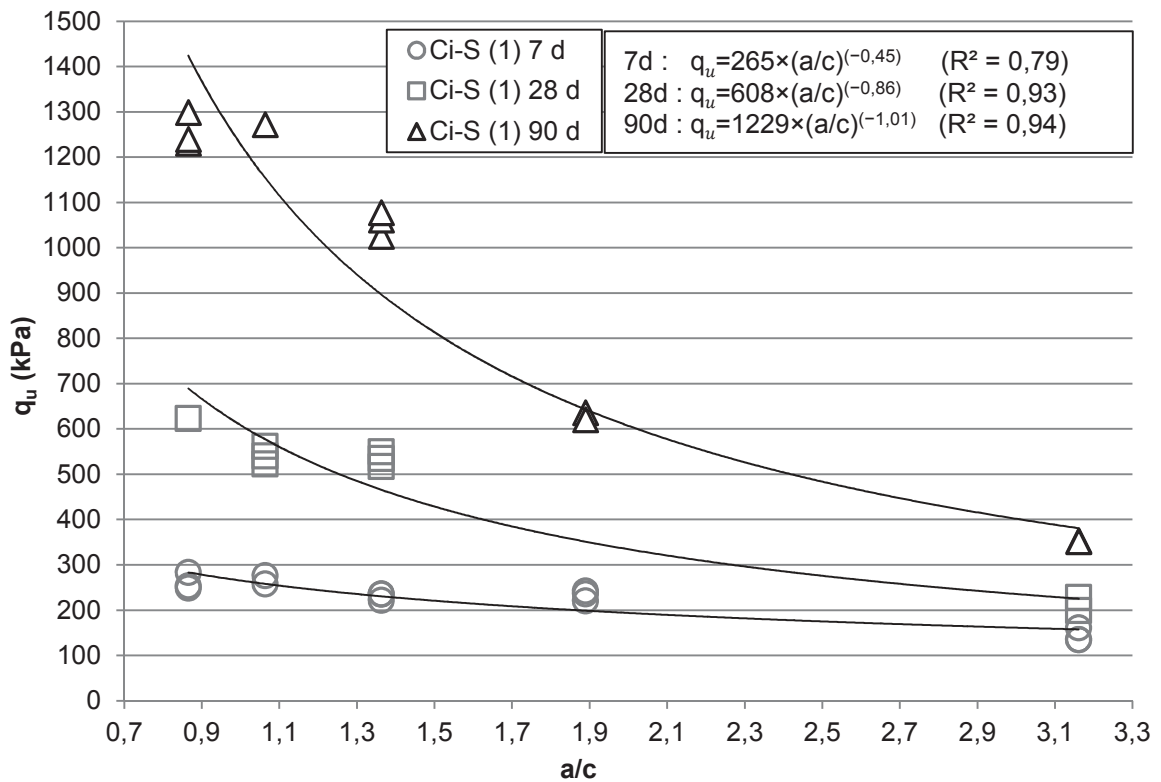


Figura 67 – relação entre a resistência à compressão simples e o fator de água/agente cimentante, mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Escória de alto forno moída (grosseira), Ci-S(1)

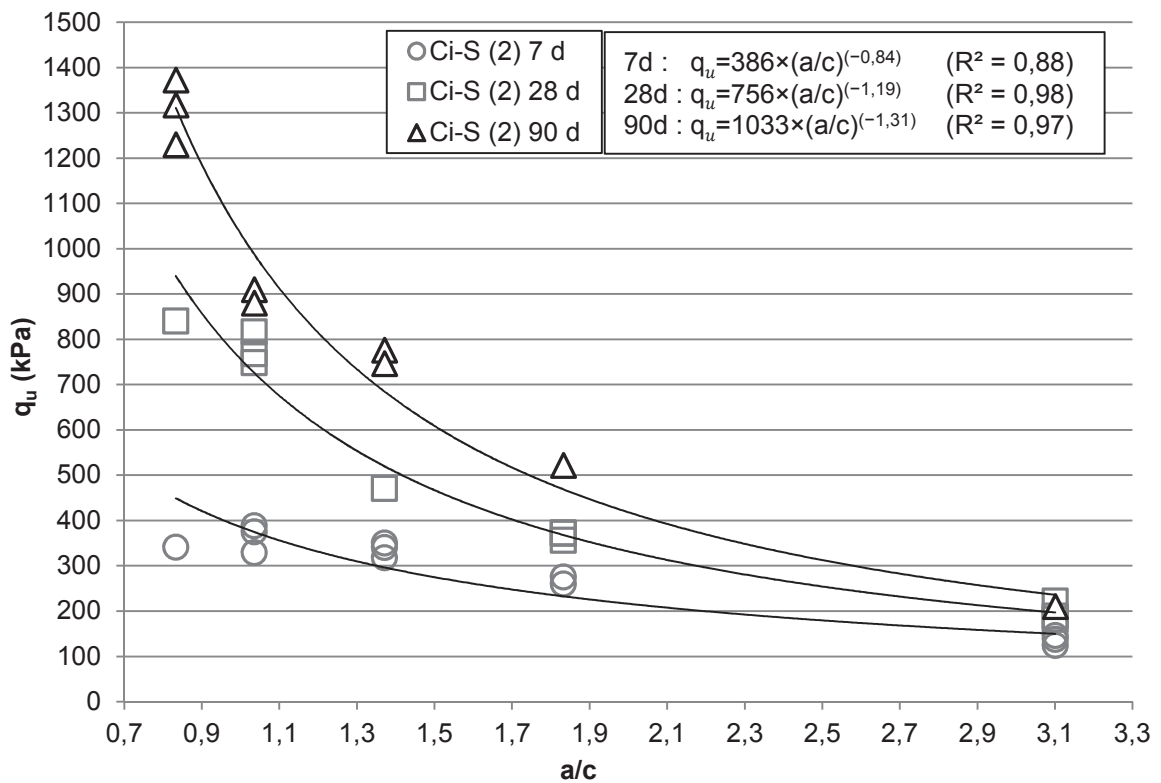


Figura 68 - relação entre a resistência à compressão simples e o fator de água/agente cimentante, mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais Escória de alto forno moída (fina), Ci-S(2)

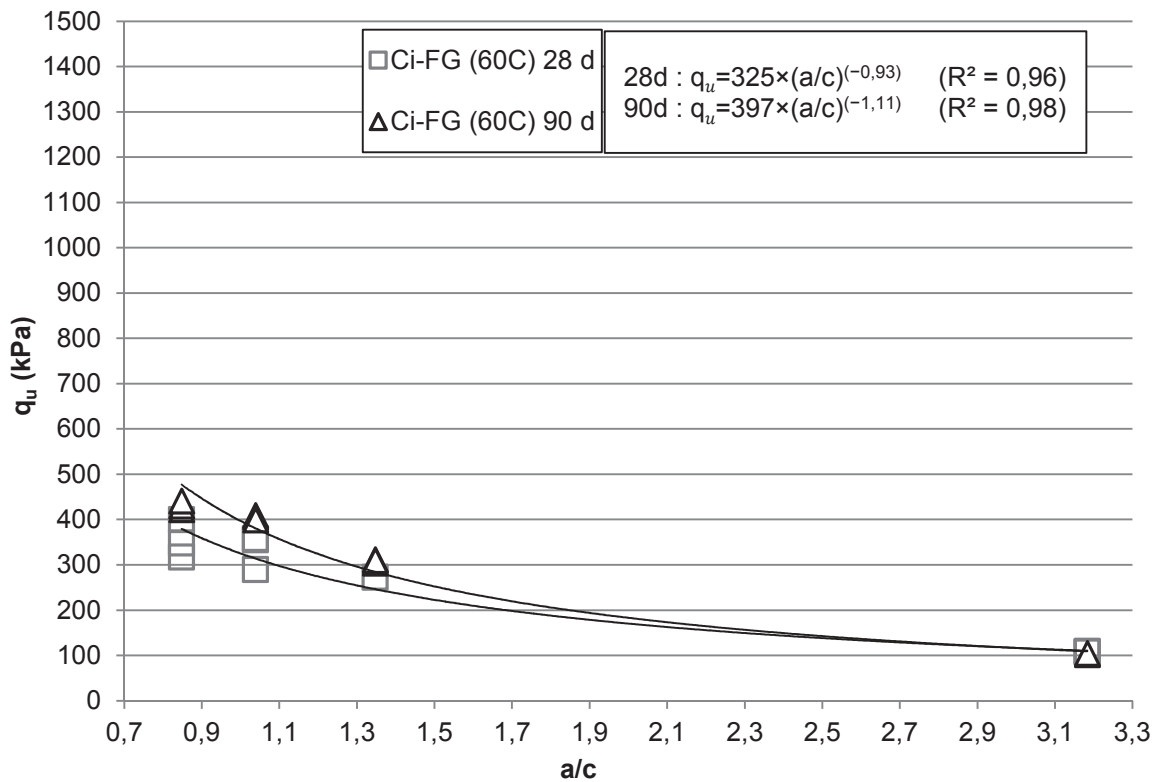


Figura 69 - relação entre a resistência à compressão simples e o fator de água/agente cimentante, mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais fosfogesso dihidratado, Ci-FG(60C)

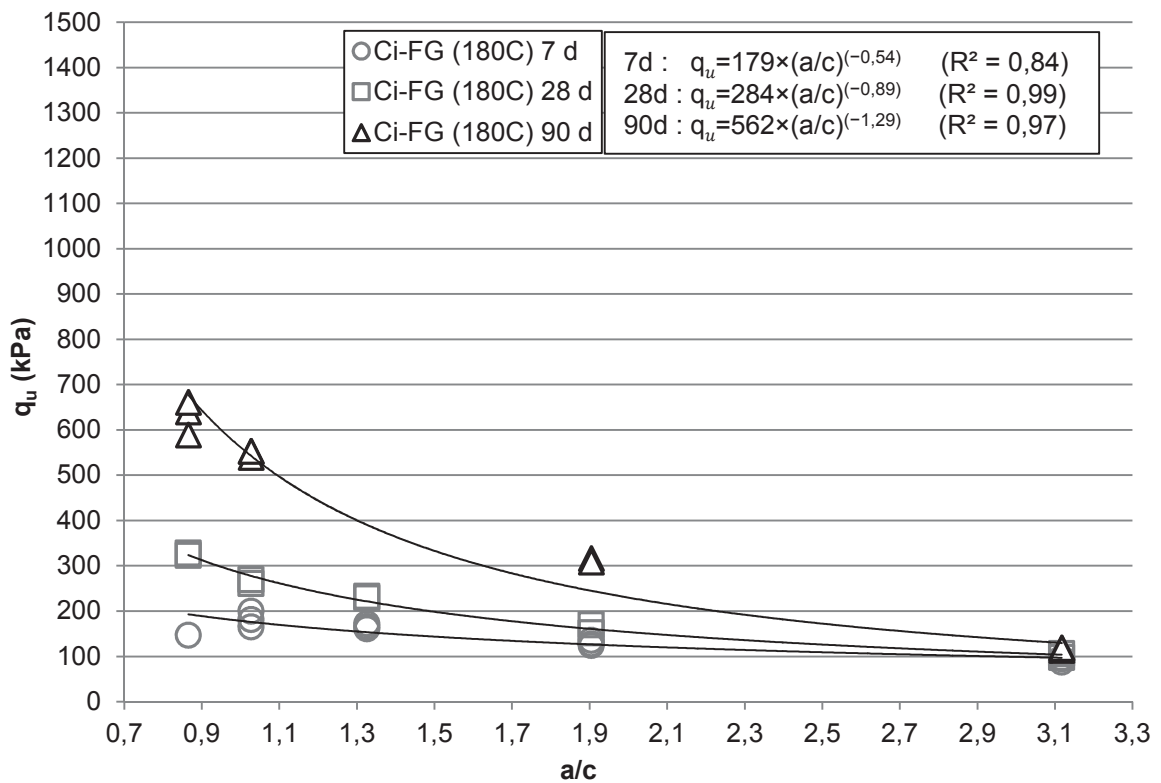


Figura 70 - relação entre a resistência à compressão simples e o fator de água/agente cimentante, mistura de solo com Cimento CP-V ARI mais fosfogesso hemihidratado, Ci-FG(180C)

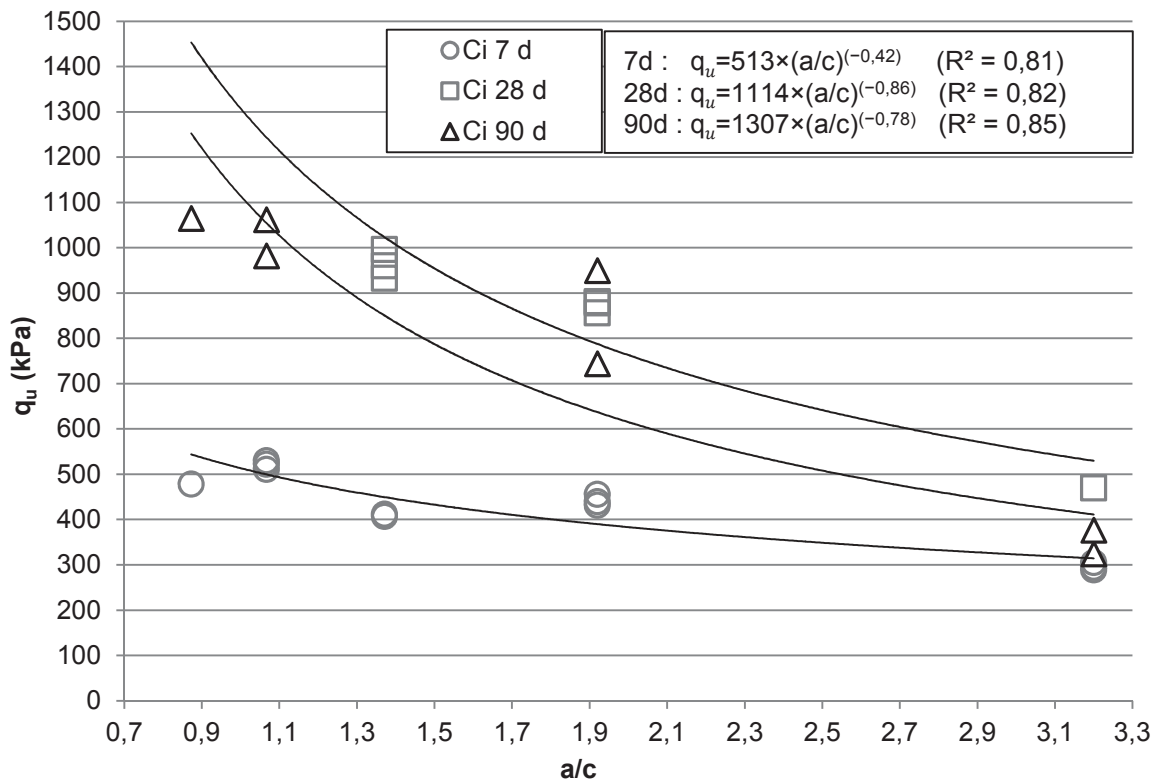


Figura 71 - relação entre a resistência à compressão simples e o fator de água/agente cimentante, mistura de solo com Cimento CP-V ARI, Ci. (Rilho, 2014)

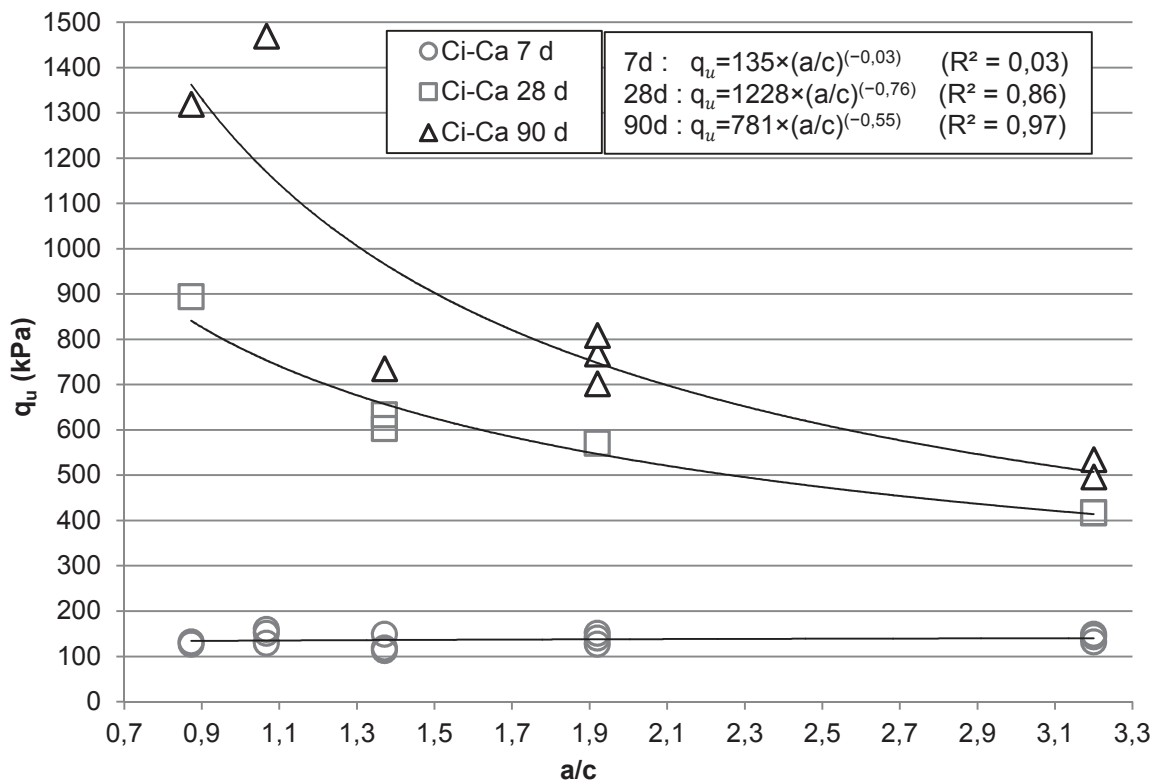


Figura 72 - relação entre a resistência à compressão simples e o fator de água/agente cimentante, mistura de solo com Cimento CP-V ARI, mais cal viva, Ci-Ca. (Rilho, 2014)



O comportamento das curvas de  $q_u$  pelo fator de água/agente cimentante ( $a/c$ ) é muito similar ao que acontece na relação do parâmetro  $q_u$  com a relação da porosidade/teor volumétrico de agente cimentante ( $\eta/C_{iv}$ ). Sempre que há uma redução no fator de  $a/c$ , tem-se um incremento no valor da resistência à compressão simples ( $q_u$ ).

Essa similaridade dos resultados de  $\eta/C_{iv}$  com os da relação de  $a/c$  só são possíveis pois as misturas de solo mais agente cimentante encontravam-se completamente saturadas. Com a água representando os vazios e o agente cimentante a porcentagem de agente cimentante incorporada a mistura.

Pode ser observado que os coeficientes de determinação são elevados, atestando que essa relação também pode ser utilizada na previsão do comportamento mecânico das misturas citadas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros que englobam a pesquisa descrita ao longo desta dissertação.

### 5.1 CONCLUSÕES

As conclusões proferidas neste capítulo são proveniente das análises realizadas através dos dados obtidos de ensaios e pesquisas, e apresentados no capítulo de resultados e discussões.

Portanto, é possível estabelecer uma forma de previsão para do comportamento do solo mole orgânico artificialmente cimentado com variados tipos de agentes cimentantes, relacionando a resistência à compressão simples e/ou o módulo cisalhante inicial com  $(\eta/C_{iv})$  e o  $a/c$ .

A substituição de 50% de cimento Portland por escória de alto forno moída propicia resultados satisfatórios e equivalentes as misturas de solo adicionado de 100% de cimento Portland CP V-ARI.

#### Quanto aos teores de agente cimentante

Sintetizando todas as misturas de uma maneira geral temos as seguintes conclusões:

A resistência à compressão simples das misturas tem influência do teor de agente cimentante adicionado ao solo matriz, de forma com que quanto maior o teor de agente cimentante maiores as resistência à compressão simples alcançadas. Exceto para adição composta apenas de cimento CP V - ARI que tende a estabilizar o ganho de resistência em teores mais elevados de agente cimentante;

As medidas de módulo cisalhante inicial tendem ao aumento no seu valor com o acréscimo do teor de agente cimentante adicionado na mistura com o solo, havendo acréscimo no teor de agente cimentante tem se elevação do valor do módulo cisalhante inicial. Há uma

diferença na mistura que adiciona cimento Portland CP V – ARI mais fosfogesso dihidratado, a qual não apresenta variação significativa com a variação dos teores de agente cimentante.

Algumas misturas como a que leva adição de cal hidratada mais escória de alto forno moída, e a mistura que leva adição de cimento Portland CP V – ARI mais fosfogesso e escória de alto forno moída não apresentaram cimentação suficiente para que fossem obtidos dados de resistência à compressão simples e medidas de módulo cisalhante inicial para nenhum dos teores estudados. Sendo assim, não se aconselha o uso desses agentes cimentantes nessas proporções para a estabilização deste solo mole orgânico.

#### Quanto ao tempo de cura

Com o período mais prolongado no tempo de cura, as misturas, de uma maneira geral, apresentaram aumento nos valores de resistência à compressão simples. Sendo que, o grande salto no ganho de resistência se mostra do período de 7 para 28 dias na mistura com cimento Portland CP V – ARI, e mantendo-se praticamente constante até os 90 dias de cura. Porém, para as demais misturas, os ganhos de resistência se dão tanto para o período compreendido entre os 7 e 28 dias de cura, quanto para o tempo de 90 dias de cura, evidenciando a ocorrência das reações de hidratação ao longo deste período. Outra constatação é de que a mistura de cimento Portland CP V – ARI mais fosfogesso dihidratado não demonstra reações de hidratação suficientes para cimentação a 7 dias de cura, ocorrendo em 28 dias e com ganho de resistência praticamente nulo para 90 dias.

Para as medidas de módulo cisalhante inicial, foram realizadas medidas nos tempos de 28 e 90 dias de cura. Para os resultados obtidos, percebe-se que, com o aumento no tempo de cura, tem-se um aumento no valor do módulo cisalhante inicial. Fato não observado para a mistura adicionada de cimento Portland CP V – ARI mais fosfogesso dihidratado, que se manteve constante ao longo do tempo.

As misturas estudadas mostram a necessidade de um tempo de cura maior para que possam atingir valores de resistência à compressão simples mais elevados, evidenciando a dependência desse fator em se tratando de melhoramento de solo mole orgânico com agente cimentantes diversos.

### Relação da porosidade pelo teor volumétrico de agente cimentante

As resistências à compressão simples dos corpos de prova ensaiados de todas as misturas estudadas tem relação com a porosidade/teor volumétrico de agente cimentante ( $\eta/C_{iv}$ ) de que, quanto menor for a relação entre a porosidade/teor volumétrico de agente cimentante, maior será a sua resistência à compressão simples.

As tendências para 7 dias de cura em relação a 28 e 90 dias são inferiores, evidenciando mais uma vez a necessidade de um tempo de cura mais prolongado para que sejam obtidas resistências superiores.

Assim como na resistência à compressão simples para os valores de módulo cisalhante inicial, quanto maior a relação da porosidade/teor volumétrico de agente cimentante ( $\eta/C_{iv}$ ) menor será o valor do módulo cisalhante inicial.

A relação das medidas de resistência à compressão simples e de módulo cisalhante inicial tem boa correlação com a porosidade/teor volumétrico de agente cimentante ( $\eta/C_{iv}$ ), estabelecendo, desta forma, uma metodologia para previsão do comportamento destes parâmetros nas características estudadas.

Ainda, é possível de se estabelecer uma razão direta entre a resistência à compressão simples ( $q_u$ ) e as medidas de módulo cisalhante inicial ( $G_0$ ), com influência da relação da porosidade/teor volumétrico de agente cimentante ( $\eta/C_{iv}$ ). Obtendo-se uma equação do tipo  $G_0/q_u = M \left( \frac{\eta}{C_{iv}} \right)^B$ , onde “M” e “B” variam de acordo com a mistura aplicada.

A fim de agrupar todas as informações referentes à resistência à compressão simples e a relação da porosidade/teor volumétrico de agente cimentante ( $\eta/C_{iv}$ ), pode-se afirmar que a normalização proposta com a razão dos  $q_u$  por um determinado valor de  $q_u$  para um dado ( $\eta/C_{iv}$ ), apresenta-se como uma boa estimativa para o comportamento da resistência à compressão simples de todas as misturas estudadas nesta pesquisa, tendo um coeficiente de determinação elevado.

### Relação do fator de água/agente cimentante

A relação existente entre a resistência à compressão simples e o fator de água/agente cimentante tem variação de que, quanto menor o valor do fator a/c (água/agente cimentante) maior será o valor da resistência à compressão simples.

Tendo sido obtidos coeficientes de determinação elevados para as equações, essas relações também podem ser utilizadas para previsão do comportamento mecânico das amostras ensaiadas.

Relação possível em misturas de solo artificialmente cimentado com agente cimentante desde que essa misturas encontre-se no estado completamente saturado.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De maneira a dar continuidade ao trabalho realizado nesta dissertação e compreender melhor o comportamento deste solo artificialmente cimentado, o autor indica alguns tópicos de pesquisa:

- a) Execução do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, relacionando com a resistência à compressão simples, e com a porosidade/teor volumétrico de agente cimentante.
- b) Variar os teores de umidade da mistura final.
- c) Testar outras possíveis variações de agentes cimentantes.
- d) Realizar ensaios de investigação microestrutural para os corpos de prova ensaiados a fim de identificar as reações existentes durante o processo de cura.

## REFERÊNCIAS

- ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. Boletim Técnico 106. Publicações ABCP. São Paulo. 14p. 2002.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro. 1987.
- \_\_\_\_\_. **NBR 11579**: Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro. 2012.
- \_\_\_\_\_. **NBR 12253**: Solo – Cimento: dosagem para emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro. 1992.
- \_\_\_\_\_. **NBR 12770**: Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada. Rio de Janeiro. 1992.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6457**: Amostra de solos – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização Rio de Janeiro. 1986.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro. 1984.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6473**: Cal virgem e cal hidratada - Análise química. Rio de Janeiro. 2003.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro. 1984.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro. 1984.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. 2000.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 76**: Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). 1998.
- AHMED, A.; UGAI, K.; KAMEI, T. **Assessment of Recycled Gypsum for Organic Soft Clay Soil Improvement**. GeoCongress. ASCE. p. 1026-1035, 2012.
- ÅHNBERG, H. **Strength of Stabilized Soil - A laboratory study on clays and organic soils stabilised with different types of binder**. – Report p. 72–57, 2006.
- ÅHNBERG, H.; JOHANSSON, S. E.; PIHL, H.; CARLSSON, T. **Stabilising effects of different binders in some Swedish soils**. Proceedings of the ICE - Ground Improvement, v.7, n1. p. 9-23. 2003.
- AXELSSON, K.; JOHANSSON, S. E.; ANDERSSON, R.; **Stabilization of Organic Soils by Cement and Pozzolanic Reactions – Feasibility Study**. Svensk Djupstabilisering – Swedish Deep Stabilization Research Centre. Report 3. 5 p. 2002.
- AZAMBUJA, R. M. B. **Comportamento Mecânico e Hidráulico de Misturas de Solo-Cimento-Bentonita para Aplicação em Barreiras Verticais de Contenção de Contaminantes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 98p. 2004.

BENSON, C. H.; TASTAN, E. O.; EDIL, T. B.; AYDILEK, A. H. **Stabilization of Organic Soils with Fly Ash**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE v.137. n.9, p. 819-833, 2011.

BERGADO, D. T., LORENZO, G.A., **Economical Mixing Method for Cement Deep Mixing, Inovations in Grouting and Soil Improvement**. GeoFrontiers, ASCE, p. 1-10, 2005.

BERGADO, D. T.; ANDERSON, L. R.; MUIRA, N.; BALASUBRAMANIAM, A. S. **Soft Ground Improvement: In Lowland and Other Environments**. New York. ASCE. 1996.

BURLAND, J. B. Small is Beautiful – **The Stiffness of Soils at Small Strains**. Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, v.26, p. 499-516, 1989.

CANTO, E. L. **Minerais minérios metais: de onde vêm? Para onde vão?** São Paulo: Editora Moderna, 1998.

CANUT, M. M. C. **Estudo da Viabilidade do Uso do Resíduo Fosfogesso como Material de Construção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Construção Civil Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais – MG, 2006.

CHANG, W.F.; MANTELL, M.I. **Engineering properties and construction applications of phosphogypsum**. Florida Institute of Phosphate Research. Coral Gables: Florida. 201 p. 1990.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. **GESTÃO DE RESÍDUOS E PRODUTOS PERIGOSOS – Tratamento**. Resolução Conama nº 307, de 5 de julho de 2002. Publicada no DOU no 136, de 17 de julho de 2002, Seção 1, páginas 95-96. 2002.

CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L.; ROCHA, C.G.; CRUZ, R.C. **Key parameters for strength control of rammed sand–cement mixtures: Influence of types of portland cement**. Construction and Building Materials, v.49, p. 591-597, 2013.

CONSOLI, N. C.; FONSECA, A. V.; SILVA, S. R.; CRUZ, R. C.; FONINI, A. **Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils**. Technical Note. Géotechnique, Lodon, Vol.62, n.2, p.177-183, 2012.

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, New York: ASCE, v.133, n.2, p.197-205, 2007.

CONSOLI, N.C.; ROTTA G. V.; PRIETTO P. D. M. **The influence of curing under stress on triaxial response of cement soil**. Technical Note. Géotechnique, Lodon, Vol.50, n.1, p.99-105, 2000.

CORREIA, A. A. S. **Aplicabilidade da técnica de deep mixing aos solos moles do Baixo Mondego**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra - Portugal. 2011.

CRUZ, R. C. **Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatância de uma areia artificialmente cimentada**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2008.

DALLA ROSA JOHANN, A. **Metodologias para a Previsão do Comportamento Mecânico e para a Análise da Variação da Porosidade de um Solo Siltoso Tratado com Cal em**

**Diferentes Tempos de Cura.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2013.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos Parâmetros-chave no Controle da Resistência de Misturas Solo-Cinza-Cal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 198p, 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994. DNER 260/94 – **Escória de Alto Forno para Pavimentos Rodoviários.** 4p.

DIAS, D. R. **Resistência à Compressão não Confinada de Misturas de Solo-Cimento Visando à Aplicação do Sistema de Estabilização Dry-Mix.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 220p, 2012.

EUROSOILSTAB. **Development of design and construction methods to stabilize soft organic soils. Design guide soft soil stabilization.** CP 97-0351. Project N° BE 96- 3177. European Commission. Industrial & Materials Technologies Programme (Brite- EU-Ram III). Brussels. 2002.

FERNANDES, M. M. **Mecânica dos Solos: Introdução a Engenharia Geotécnica.** 1 ed. FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 593p. 2011.

FONINI, A. **Comportamento Mecânico de uma Areia Cimentada: Análise Experimental e Micromecânica.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2012.

FOPPA, D. **Análise de Variáveis-Chave no Controle da resistência mecânica de solos Artificialmente cimentados.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 143p. 2005.

GHAFOORI, N.; CHANG, W. F. **Investigation of Phosphate Mining Waste for Construction Materials.** Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE. v.5, n.2. p. 249–264, 1993.

GUMIERI, A. G. **Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Escória de Aciaria do Processo LD como Adição em Cimentos.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2002.

HANDY, R. L. **Cementation of soil minerals with Portland cement or alkalis.** Highway Research Record. Washington, v. 36. p. 55-64, 1958.

HORPIBULSUK, S. MIURA, N. NAGARAJ, T. S. **Clay–Water/Cement Ratio Identity for Cement Admixed Soft Clays.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. New York: ASCE, v.131, n.2, p.187-192, 2005.

HORPIBULSUK, S. RACHAN, R. SUDDEEPPONG, A. **Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay.** Construction and Building Materials, v.25, n.4, p.1521-1531, 2011.

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

INSTITUO AÇO BRASIL – IAB. **Relatório de Sustentabilidade 2013.** Disponível em: <[http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/downloads/relatorio\\_sustentabilidade\\_2013v3.pdf](http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/downloads/relatorio_sustentabilidade_2013v3.pdf)>. Acesso em: 15 de jul. 2014.



INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA – IBS. **Livro Policy Final 2**. Disponível em: <[http://www.acobrasil.org.br/site%5Cportugues%5Cbiblioteca%5CLivro\\_Policy\\_final\\_2.pdf](http://www.acobrasil.org.br/site%5Cportugues%5Cbiblioteca%5CLivro_Policy_final_2.pdf)>. Acesso em: 15 de jul. 2014.

JANZ, M.; JOHANSSON, S.E. **The function of different binding agents in deep stabilization**. Swedish Deep Stabilization Research Centre, Report 9, Linköping, Sweden, p. 47. (2002).

JOHN, V. M. ; CINCOTTO, M. A. . **Gesso de Construção Civil**. In: Geraldo C Isaia. (Org.). *Maateriais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. 1 ed. São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 727-760. 2010.

JOHN, V. M. **Cimentos de Escória Ativada com Silicatos de Sódio**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP. São Paulo, 117p, 1995.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. **Escória de Alto Forno como Aglomerante**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 1995.

LARNACH, W. J. **Relationship Between Dry Density, Voids/Cement Ratio and Strength of Soil-cement Mixtures**. Civil Engineering and Public Works Reviews. London: Lomax Erskine and Co., vol.55, n.648, p.903-905, 1960.

LEA, F. M. **The chemistry of cement and concrete**. 4ed. Elsevier Science & Technology Books. 1057p. 2004.

LI, X.; LI, X. **Micro-Macro Quantification of the Internal Structure of Granular Materials**. Journal of Engineering Mechanics. ASCE. v.135, n.7, p.641–656, 2010.

LOPES JUNIOR, L. S. **Metodologia de Previsão do Comportamento Mecânico de Solos Tratados com Cal**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2011.

LORENZO, G. A., BERGADO, D. T. **Fundamental Characteristics of cement-Admixed Clay in Deep Mixing**. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2006.

MARQUES, J. C.; TANGO C. E. S. **Escória de Alto Forno: Estudo Visando Seu Emprego no Preparo de Argamassas E Concretos**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 1994.

MATOS, T. H. C. **Caracterização Hidro-Mecânica do Fosfogesso e das Misturas Solo-Fosfogesso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília – DF. 108p. 2011.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **CONCRETO. Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3ª Ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MINDNESS, S.; YOUNG, J. F.; DARWIN, D. **Concrete**. 2ed. New Jersey: Pearson Education, 644p. 2003.

MITCHELL, J. K; SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**. 3ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 592p. 2005.

MOH, Z. C. **Reactions of Soil Minerals With Cement and Chemicals**. Highway Research Record. Washington. V. 86. p. 39-61. 1965.

MOTHÉ, C. G.; AZEVEDO, A. D. **Análise Térmica de Materiais**. Escola de Química/UFRJ. São Paulo: iEditora. 297p. 2002.

NUERNBERG, N.J.; RECH, T.D.; BASSO, C. **Uso do gesso agrícola**. Boletim Técnico. n. 122. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina S.A (EPAGRI). Santa Catarina: EPAGRI, 2005.

NUÑEZ, W. P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu visando seu emprego na pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. Porto Alegre. 145 p. 1991.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3ed. São Paulo: Oficina de Textos. 356p. 2006.

PORTO ALGRE, BR. (23. Jan. 2015). **Google Maps**. Google. Consultado em <https://www.google.com.br/maps/place/Aeroporto+Internacional+de+Porto+Alegre+-+Salgado+Filho/@-29.9953796,-51.1716053,15z/data=!3m1!4b1!4m2!3m1!1s0x9519775afc8a359f:0xc999a14760dd538f>.

PRUSINSKI, J.R.; BHATTACHARJA, S. **Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils**. Transportation Research Record, Washington, D.C., n. 1652, p.215-227, 1999.

ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING, S. **Lime Requirement for Stabilization**. In: Transportation Research Board. 79th Annual Meeting, Washinton, D.C. 2000.

ROTTA G. V.; CONSOLI, N.C.; PRIETTO P. D. M. **Influencia da formação da matriz cimentante no comportamento tensão-deformação de solos cimentados**. In: XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 1998, Brasília. Anais... São Paulo: ABMS/ABGE/UNB, 1998. P.1125-1132.

RUTHERFORD, P.M.; DUDAS M.J; SAMEK, R.A. **Environmental impacts of phosfogypsum**. The Science of the Total Environment, V. 149, p. 1-38, 1994.

SALES, L. F. P. **Estudo do Comportamento de Fundações Superficiais Assentes em Solos Tratados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, p.146, 1998.

SARGENT, P.; HUGHES, P. N.; ROUAINIA, M.; GLENDINNING, S. **Soil Stabilisation using Sustainable Industrial By-Product Binders and Alkali Activation**. GeoCongress. p. 948-957. 2012.

SCHNAID, F., NACCI, D., MILITITSKY, J. **Aeroporto Internacional Salgado Filho: Infra-Estrutura Civil e Geotécnica**. Ed. Sagra Luzzatto, 2001.

SHARMA, S. S., FAHEY, M. **Degradation of Stiffness of Cemented Calcareous Soil in Cyclic Triaxial Compression**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE v.129. n.7, p. 619-629, 2003.

TATSUOKA, F. **Inelastic Deformation Characteristics of Geomaterial. Soil Stress-Strain Behavior: Measurement, Modeling and Analysis**. Geotechnical Symposium in Roma, March 2006.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo. Ed. McGrall-Hill do Brasil. 509p. 1977.

VENDRUSCOLO, M. A. **Análise numérica e experimental do comportamento de fundações superficiais assentes em solo melhorado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. Porto Alegre. 141p.1996.

WINTER, D., RILHO, A. S., CONSOLI, B. S., CONSOLI, N., C. **A prompt procedure for prediction of strength in artificially cemented soft soils**. Journal of Geo-Engineering Sciences 1, p. 95-100. 2014.

YESILLER, N., HANSON, J., USMEN, M. **Ultrasonic Assessment of Stabilized Soils**. Soft Ground Technology. ASCE. p. 170-181. 2001.

YESILLER, N., INCI, G., MILLER, C. **Ultrasonic Testing for Compacted Clayey Soils**. GeoDenver. Advances in Unsaturated Geotechnics. ASCE. p. 54-68. 2000.