

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ALINE BELUSSO

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE CIMENTO PORTLAND NA
DURABILIDADE E RESISTÊNCIA DE UM SOLO ARGILOSO**

CAXIAS DO SUL

2018

ALINE BELUSSO

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE CIMENTO PORTLAND NA
DURABILIDADE E RESISTÊNCIA DE UM SOLO ARGILOSO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia
Civil da Universidade de Caxias do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção
do título de Engenheiro Civil.

Orientador (a): Prof. Msc. Jaqueline
Bonatto.

CAXIAS DO SUL

2018

ALINE BELUSSO

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE CIMENTO PORTLAND NA
DURABILIDADE E RESISTÊNCIA DE UM SOLO ARGILOSO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia Civil da Universidade
de Caxias do Sul, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Aprovado em 22/11/2018

BANCA EXAMINADORA

Prof. MSc. Carolina Becker Pôrto Fransozi
Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES

Prof. MSc. Matheus Lemos Nogueira
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. MSc. Jaqueline Bonatto
Universidade de Caxias do Sul - UCS

RESUMO

BELUSSO, Aline. **Avaliação da Influência do Teor de Cimento Portland na Durabilidade e Resistência de um Solo Argiloso.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Caxias do Sul, Área de Conhecimento das Exatas e Engenharia, Caxias do Sul, 2018.

Os estudos referentes às técnicas de melhoramento das propriedades do solo são cada vez mais relevantes, pois representam uma ferramenta eficaz para a resolução de problemas na área da engenharia geotécnica. Um material já bastante conhecido e empregado é o cimento Portland sendo utilizado, por exemplo, como camada de suporte para fundações superficiais, proteção de taludes e construção de bases de pavimentos. O presente trabalho visou contribuir no que tange ao conhecimento da influência do teor de cimento Portland em uma mistura solo-cimento, por meio da avaliação da durabilidade e resistência. Para isso foram realizados ensaios de resistência à compressão simples e ciclos de molhagem e secagem, com amostras 100% solo e com adição de 10% e 15% de cimento, para um solo argiloso da cidade de Farroupilha/RS. Constatou-se no ensaio de durabilidade que a mistura solo-cimento com teor de 15% apresentou resultados melhores, mas em percentuais pouco significativos. No ensaio de resistência à compressão simples, observou-se que quantidade de cimento tem grande efeito sobre a resistência do material nos teores estudados, proporcionando ganhos significativos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeito da energia de compactação na estrutura de um solo argiloso compactado sob diferentes teores de umidade e densidades seca máxima	12
Figura 2 - Curva de dosagem para solo-cimento	20
Figura 3 - Resistência à compressão simples versus teor de cimento	21
Figura 4 - Relação vazios/cimento <i>versus</i> resistência a compressão simples.	24
Figura 5 - Relação vazios/cimento <i>versus</i> resistência a compressão simples	25
Figura 6 - Efeito do teor de cimento em função da resistência à compressão simples de diferentes tipos de solo estabilizados cimento Portland com cura de 7 dias.	27
Figura 7 – Localização do ponto de coleta do solo	28
Figura 8: Local da coleta de amostra de solo	29
Figura 9 - Evolução média da resistência a compressão de diferentes tipos de cimento Portland.....	29
Figura 10- Peneiras utilizadas no ensaio	31
Figura 11 – Aparelho de Casagrande para a determinação do Limite de Liquidez.	33
Figura 12 – Cilindros moldados no ensaio de Limite de Plasticidade.....	34
Figura 13 – Picnômetro + água destilada + solo	35
Figura 14 – (a) Moldagem do corpo de prova (b) Remoção do molde cilíndrico.....	36
Figura 15 - (a) Etapa de molhagem dos corpos de prova (b) Etapa de secagem dos corpos de prova	37
Figura 16 – Corpo de prova após o ensaio de compressão simples	38
Figura 17 - Curva granulométrica	40
Figura 18 – Curva limite de liquidez	42
Figura 19 – Curva compactação 100% solo	45
Figura 20 - Curva compactação 90% solo + 10% cimento	46
Figura 21 - Curva compactação 85% solo + 15% cimento	47

Figura 22 - Resultados de massa específica seca máxima.....	48
Figura 23 – Resultados de umidade ótima para massa específica seca máxima	48
Figura 24 – Amostras 100% solo após molhagem.	49
Figura 25 – Perda de massa dos corpos nº 2 nº 3 utilizados para avaliar a perda de massa nos teores de 10% e 15% de cimento.....	50
Figura 26 - (a) Corpos de prova nº 1 e nº 2 - 10% cimento após último ciclo (b) Corpos de prova nº 1 e nº 2 - 15% cimento após último ciclo.....	50
Figura 27 – Capacidade de absorção de água do material nos dois teores de cimento avaliados	51
Figura 28 - Gráfico Tensão x Deformação – Amostra 100% solo	53
Figura 29 – Gráfico Tensão x Deformação – Amostra 90% solo + 10% cimento	54
Figura 30 – Gráfico Tensão x Deformação – Amostra 85% solo + 15% cimento	55
Figura 31 – Teor de cimento versus resistência à compressão simples.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das argilas segundo consistência.....	11
Tabela 2 - Estimativa do percentual de cimento para diferentes tipos de solo.....	19
Tabela 3 – Composição do CP V - ARI	30
Tabela 4 – Características físicas e mecânicas do CP V – ARI	30
Tabela 5 - Distribuição granulométrica	39
Tabela 6 – Teores de umidade presente no solo	40
Tabela 7- Resultados do ensaio de limite de liquidez	41
Tabela 8 - Resultados do ensaio de limite de plasticidade	42
Tabela 9 - Peso específico real dos grãos	43
Tabela 10 – Resultados compactação amostra 100% solo	44
Tabela 11 - Resultados compactação amostra 90% solo + 15% cimento	45
Tabela 12 - Resultados compactação amostra 85% solo + 10% CPV – ARI.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AASHTO	<i>American Association of State Highway Transportation Officials</i>
CPV - ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
IC	Índice de Consistência
IL	Índice de Liquidez
IP	Índice de Plasticidade
LL	Límite de Liquidez
LP	Límite de Plasticidade
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
W	Teor de Umidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.2	OBJETIVOS	10
1.2.1	Objetivo principal	10
1.2.2	Objetivos específicos	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1	SOLOS ARGILOSOS	11
2.2	ASPECTOS GERAIS SOBRE MELHORAMANTO/ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	12
2.2.1	Solo-fibra	14
2.2.2	Solo-cal	15
2.2.3	Solo-cimento	15
2.2.3.1	Materiais utilizados no solo-cimento.....	17
2.2.3.1.1	<i>Solo</i>	17
2.2.3.1.2	<i>Cimento</i>	18
2.2.3.1.3	<i>Água</i>	18
2.2.3.2	Dosagem da mistura	18
2.3	COMPORTAMENTO SOLO – CIMENTO	20
2.3.1	Efeito do teor de cimento	21
2.3.2	Efeito da densidade de compactação	21
2.3.3	Efeito do teor de umidade	22
2.3.4	Efeito da relação vazios/cimento	23
2.3.5	Durabilidade	25
2.3.6	Resistência à compressão simples	26

3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	28
3.1	MATERIAIS	28
3.1.1	Solo.....	28
3.1.2	Cimento	29
3.1.3	Água	30
3.2	MÉTODOS	30
3.2.1	Ensaio de Caracterização	31
3.2.1.1	Granulometria.....	31
3.2.1.2	Limites de consistência.....	32
3.2.1.2.1	<i>Limite de liquidez</i>	<i>32</i>
3.2.1.2.2	<i>Limite de plasticidade.....</i>	<i>33</i>
3.2.1.3	Umidade natural.....	34
3.2.1.4	Peso específico real dos grãos	34
3.2.1.5	Compactação	35
3.2.2	Dosagem da mistura	36
3.2.3	Ensaio de durabilidade.....	36
3.2.4	Ensaio de resistência à compressão simples	37
4	RESULTADOS E ANÁLISE	39
4.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	39
4.2.1	Análise granulométrica	39
4.2.2	Umidade natural	40
4.2.3	Limites de consistência.....	41
4.2.3.1	Limite de liquidez	41
4.2.3.2	Limite de plasticidade.....	42
4.2.3.3	Índice de plasticidade	43

4.2.3.4	Índice de consistência	43
4.2.3.5	Índice de liquidez	43
4.2.4	Peso específico real dos grãos	43
4.2.5	Ensaio de compactação	44
4.3	ENSAIO DE DURABILIDADE	49
4.3.1	Perda de massa	49
4.3.2	Absorção de água.....	51
4.4	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES	52
4.4.1	Amostra 100% solo.....	52
4.4.2	Amostra 90% solo + 10% cimento.....	53
4.4.3	Amostra 85% solo + 15% cimento.....	54
4.4.4	Resistência à compressão simples em relação ao teor de cimento	55
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

O solo é um material variável e complexo, porém devido sua abundância, pequeno custo e simplicidade de aquisição e manuseio, gera inúmeras oportunidades de utilização na engenharia. Nem sempre o solo local corresponde às necessidades de projeto. Solos deficientes em características geotécnicas tornam a execução de obras, na maior parte das vezes, inviáveis economicamente. Nesses casos, o engenheiro geotécnico pode dispor de técnicas de melhoramento das propriedades do solo existente, criando assim um material novo apto a atender exigências de um projeto (ROJAS, 2012).

A tentativa de alterar algumas propriedades dos solos é bastante antiga. Alguns autores citam experimentos realizados há cerca de três mil anos. Porém as modificações das propriedades dos solos só se tornaram mais comuns no século XVIII, com o crescimento populacional e o desenvolvimento de novos sistemas de produção ocorridos após a Revolução Industrial (FONINI, 2012).

As possibilidades para melhorar as condições do comportamento do solo local podem englobar desde a modificação de suas propriedades, com a possível inclusão de algum agente estabilizante, até a retirada completa e substituição do material (FESTUGATO, 2008).

O emprego de cimento Portland no melhoramento das propriedades do solo é uma opção já muito utilizada em geotecnia. A técnica solo-cimento tem sido empregada com êxito na construção de plumas de contaminação, no encapsulamento de solos contaminados, para proteção de taludes em barragens de terra e canais ou ainda na construção de bases para pavimentos rodoviários e ferroviários (FLOSS, 2012).

Dentro desta abordagem, torna-se relevante os estudos que procurem compreender ainda mais os efeitos causados pela adição de cimento Portland, bem como seu comportamento e as variáveis influentes. Neste contexto, o presente trabalho busca entender a influência do teor de cimento Portland em um solo argiloso através da avaliação da durabilidade e resistência.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo principal

Avaliar a influência do teor de cimento na durabilidade e resistência de um solo argiloso.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Realizar a caracterização física do solo argiloso;
- b) Realizar ensaios de molhagem e secagem para avaliar a durabilidade do solo.
- c) Realizar ensaios de compressão simples para avaliar a resistência do solo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma revisão dos principais trabalhos que serviram como base para o desenvolvimento desta pesquisa.

2.1 SOLOS ARGILOSOS

As argilas são elementos componentes de uma grande parte de solos e podem ser encontradas no estado puro, em depósitos minerais, em ambientes naturais e de formação (CALLISTER, 2002). Esse tipo de solo apresenta granulometria fina, com partículas em formato lamelar, alongados ou tubulares e sua composição mineralógica varia com a quantidade de água que envolve esses grãos (DNIT, 2006).

De forma geral, o termo argilas está relacionado às partículas do solo que apresentam diâmetro inferior a 2 μm (micrometros) e das quais podem fazer parte distintos tipos de minerais como silicatos lamelares de magnésio e de alumínio (filossilicatos), feldspato, carbonatos, quartzo, óxidos metálicos e até mesmo matéria orgânica (LUNA e SCHCHARDT, 1999).

Segundo HACHICH et al. (1998), o estado das argilas, ou seja, sua consistência, é definida por Terzaghi e Peck (1948) como a resistência à compressão simples, conforme nomenclatura da Tabela 1. A resistência das argilas depende do arranjo entre as partículas e do índice de vazios em que se encontra.

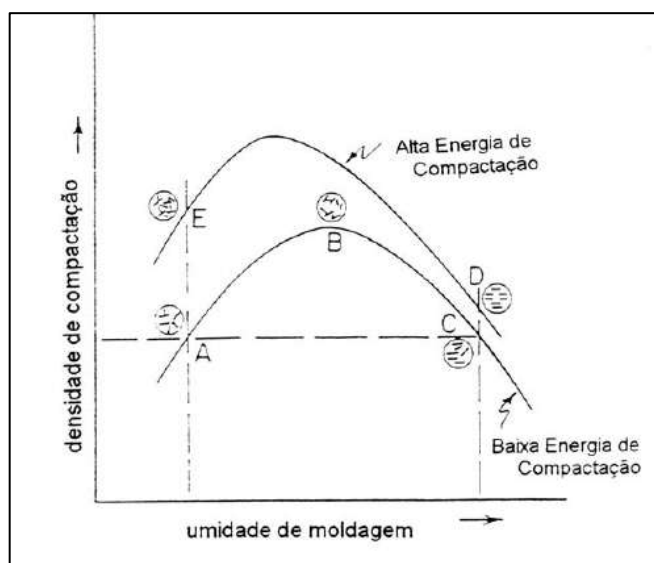
Tabela 1 - Classificação das argilas segundo consistência

Consistência	Resistência à compressão simples (kPa)
muito mole	< 25
mole	25 – 50
consistência média	50 – 100
rija	100 – 200
muito rija	200 – 400
dura	>400

Fonte: Adaptado de Terzaghi e Peck (1948 apud HACHICH et al., 1998).

Com relação à compactação de solos argilosos, a Figura 1 representa de maneira esquemática as estruturas de um solo argiloso sob o efeito da compactação dinâmica em função da energia de compactação e da relação de umidade (LAMBE¹, 1958 apud WERK, 2000). É possível observar que para um determinado esforço de compactação e peso específico seco, ocorre a modificação da estrutura do solo conforme o teor de umidade utilizado na compactação do corpo de prova.

Figura 1 - Efeito da energia de compactação na estrutura de um solo argiloso compactado sob diferentes teores de umidade e densidades seca máxima



Fonte: Lambe (1958 apud WERK, 2000).

2.2 ASPECTOS GERAIS SOBRE MELHORAMENTO/ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

De acordo com Casagrande (2005), a melhoria ou reforço de solos pode ser entendido como a utilização de processos físicos e/ou químicos que visem o melhoramento das propriedades mecânicas dos solos. Busca-se o acréscimo da sua resistência e a diminuição de sua compressibilidade e de sua permeabilidade.

Os mecanismos de melhoramento físico podem ser adquiridos pela adição de materiais que fisicamente vinculam as partículas de solo sem gerar reações químicas ou mudanças mineralógicas na estrutura do solo ou pela alteração granulométrica (pela adição de certos tamanhos de grãos ao solo). Já os mecanismos de melhoramento químico podem ser

¹ LAMBE, T. W.. “*The structure of compacted clay*”. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. Vol. 84, nº. SM2, Part 1, May, 1958.

² VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo. Ed. Mcgrall-Hill do Brasil. 509p. 1977.

alcançados pela adição de materiais que intencionalmente causam reações, ocasionando em mudanças físico-químicas na mineralogia da estrutura do solo (NICHOLSON, 2015).

A estabilização de solo, de acordo com Vargas² (1977 apud ZAMPIERI, 2015), é a sua capacidade de adquirir maior resistência a cargas por meio da correção granulométrica, compactação, plasticidade ou substâncias que, quando inseridas, oferecem uma coesão proveniente da cimentação ou aglomeração de partículas.

Uma diferença entre estabilização e melhoramento de solo é apresentada por Núñez (1991), onde o termo estabilizado designa misturas de solo e aditivo com durabilidade e resistência que permitam sua utilização como base de pavimentos. Já o termo melhorado é empregado a misturas de solo e aditivo que não demonstram características suficientes para utilização como base para pavimentos devido ao baixo teor de aditivo, apesar de ocorrerem alterações em suas propriedades mecânicas. Nesta revisão da literatura não será feita a distinção entre os termos melhoramento e estabilização, sendo mantido o termo utilizado pelo autor citado.

Em solos artificialmente cimentados, a introdução do agente cimentante possibilita alterações na granulometria da matriz, o que proporciona a mudança do comportamento mecânico do solo investigado. Além disso, a inserção desse tipo de reforço é capaz de transformar as propriedades mecânicas do solo. Dessa forma, um comportamento dúctil e simultaneamente compressivo de um material antes da cimentação poderá se transformar em um comportamento dilatante e frágil (DALLA ROSA, 2009).

O tipo de material a ser utilizado na estabilização de solos dependerá de variáveis como: propósito do uso, tipo de solo a ser tratado, critérios mínimos (ou especificações) das propriedades, disponibilidade de materiais, questões ambientais e custos (IBEIRO, 2016).

A cal e o cimento são os materiais mais comuns empregados na estabilização de solos. A adição desses materiais, de forma geral, dependendo da sua natureza e da quantidade, provocam modificações nas propriedades físicas e químicas dos solos. O maior ou menor grau e a velocidade com que ocorrem essas modificações dependem do grau de compactação do solo, da injeção, de características específicas do solo, da temperatura, da quantidade de água, dentre outros fatores (THOMÉ, 2008).

² VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo. Ed. McGrall-Hill do Brasil. 509p. 1977.

Além de cimento e cal, outros materiais vêm sendo estudados para serem aplicados visando à melhoria do solo, como é o caso do reforço através da inclusão de fibras, subprodutos industriais (como cinza volante) e betume (CASAGRANDE, 2005; MARCON, 1977; FRANÇA, 2003).

Thomé (2008) expõe uma ampla revisão bibliográfica com relação ao emprego de resíduos industriais no melhoramento de solos no Brasil. Entre os materiais utilizados estão o fosfogesso, cinza pesada, cal de carbureto, alcatrão de madeira, fibras de garrafas PET, resíduos de britagem, raspas de pneu, resíduos da indústria de pedras preciosas e resíduos de construção e demolição.

2.2.1 Solo-fibra

O reforço de solos com fibras é uma técnica já muito conhecida e empregada. Na antiguidade, para auxiliar na construção de diversas obras de terra, eram utilizadas hastes de bambu e junco no reforço de tijolos de barro e solos granulares (CASAGRANDE, 2005). Há também indícios do emprego desta técnica em partes da muralha da China e em estradas construídas pelos incas, no Peru, através do uso de lã de lhama como reforço, as quais existem até os dias atuais (PALMEIRA, 1992).

A técnica do reforço por meio da inclusão de fibras tem sido desenvolvida para melhorar o desempenho de materiais sujeitos a problemas gerados pelo aparecimento de fissuras como por exemplo, a perda da capacidade de suporte do solo, não somente na área geotécnica, mas em outras áreas da engenharia (CASAGRANDE, 2005).

No entanto, a técnica de reforço de solo com fibras só passou a ser investigada há mais ou menos três décadas nos moldes que se tem hoje. A técnica inicialmente desenvolvida tinha como foco o reforço de solo através de inclusões discretas e orientadas, com o passar do tempo passou a focar na introdução e distribuição aleatória dentro de uma massa de solo (FEUERHARMEL, 2000).

As fibras podem ser classificadas em quatro grandes grupos: naturais, poliméricas, minerais e metálicas (FESTUGATO, 2008). As características de comportamento de cada uma delas irá afetar o comportamento do material compósito e são relacionadas ao material do qual são compostas e de seu processo de fabricação. Portanto, para a definição do tipo de fibra a ser utilizado, é fundamental a compreensão do mecanismo de interação matriz-reforço e da fração de contribuição de cada uma dessas duas fases. Esta definição dependerá

fundamentalmente das particularidades almejadas e do material compósito resultante (FEUERHARMEL, 2000).

Atualmente, a inclusão de fibras como reforço continua sendo objeto de estudo de vários pesquisadores para as mais variadas aplicações, desde estabilização de solos sob fundações e pavimento até estruturas de contenção.

2.2.2 Solo-cal

Segundo Guimarães (2002), a adição da cal em solos é uma das técnicas mais antigas para se conseguir solos melhorados geotecnicamente. São encontrados exemplos históricos relevantes no sul da Itália, a via Apia entre a Porta Capena-Capua-Brindisi, construída em 312 a.C. e em trechos da muralha da China, em 228 a. C.

A cal utilizada na estabilização de solos é o produto derivado da calcinação de rochas carbonatadas cálcicas e magnésias existentes na superfície terrestre (IBEIRO, 2016). Com relação ao método de estabilização, pode ser realizado o tratamento do solo empregando a cal em duas formas: cal viva (CaO) ou hidratada (Ca(OH)_2) (SAMANIEGO, 2015).

A adição de cal ao solo desencadeia reações químicas entre os constituintes mineralógicos do solo e da cal. Estas reações são responsáveis pelas modificações de algumas características físicas como a granulometria, o teor de água, compactação, plasticidade e resistência imediata, refletindo diretamente na sua trabalhabilidade (MARÍN, 2017).

Solos tratados com cal apresentam comportamento mecânico complexo, motivado por distintos fatores, destacando-se a quantidade de cal adicionada, teor de umidade, a porosidade e principalmente o tempo de cura (LOPES JUNIOR, 2011).

De acordo com Lopes Junior (2011), diversas pesquisas sobre solos tratados com cal vêm sendo realizadas visando sua utilização como camada de suporte para fundações superficiais e como base para rodovias, investigando seu comportamento sob diversas condições de carregamento, até mesmo com ensaios de placa e provas de carga em verdadeira grandeza. Os resultados obtidos têm mostrado ganhos consideráveis na redução de recalques e na capacidade de suporte.

2.2.3 Solo-cimento

O melhoramento das características mecânicas dos solos por meio da adição de cimento Portland consiste em um método que na áreas da engenharia geotécnica passa a ser

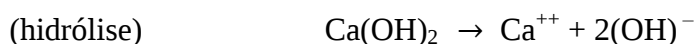
empregado de maneira gradativamente acentuada, por exemplo na execução de fundações sobre solos moles, na contenção de maciços, na prevenção de liquefação em areias e na execução de pavimento (HEINECK, 1998).

Conforme SENÇO (2001) foi na década de 1940 que teve início o emprego do solo-cimento no Brasil, em razão ao desenvolvimento acelerado do interior do estado e, conseqüentemente, à necessidade de aumento da malha rodoviária. A primeira experiência foi no acesso ao aeroporto de Bauru.

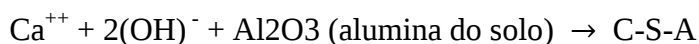
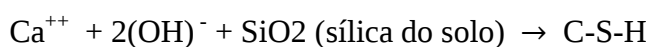
O solo-cimento é o produto gerado da mistura de solo, cimento Portland e água, que por meio das reações de hidratação do cimento irá adquirir resistência. A ABNT NBR 12253/92, Solo-cimento – Dosagem para emprego como Camada de Pavimento traz como definição de um solo cimentado o “Produto endurecido, resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem executada conforme a NBR 12254.” (1992, p. 1).

As reações do cimento quando misturado ao solo podem ser descritas do modo a seguir (MOH³, 1965 apud NUNEZ, 1991):

a) Reações primárias:



b) Reações secundárias:



Sendo o C-S-H (Silicato de cálcio hidratado) e o C-A-H (Aluminato de cálcio hidratado) compostos cimentantes responsáveis pela resistência.

Inicialmente ocorre a hidratação do cimento com a formação do C-S-H e liberação de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), que dissocia-se em água aumentando o pH do meio por volta de 12. Os produtos da hidratação do cimento formados nos primeiros instantes são gelatinosos e amorfos. Com o acréscimo do tempo de cura, o processo de dissecação dos compostos

³ MOH, Z. C. Reactions of soil minerals with cement and chemicals. **Highway Research Record**, Washington, v.86, p. 39-61, 1965.

gelatinosos e cristalinos de novos minerais promove o endurecimento dos produtos da hidratação. Numa fase seguinte, em que acontecem as reações secundárias, o cálcio liberado pela hidratação do cimento reage gradualmente com a sílica e alumina presentes no solo, formando produtos cimentantes adicionais (CROFT⁴, 1967 apud FOPPA, 2016).

Para Vendruscolo (1996), o mecanismo de compatibilizar solo com cimento é bastante parecido ao concreto. A diferença está no agregado, no concreto a granulometria é grossa e as partículas do cimento abraçam o agregado amarrando suas partículas, oferecendo relevante resistência para o concreto. Logo, no solo-cimento, os grãos de solos finos envolvem as partículas de cimento resultando em associações menos resistentes.

Estudos recentes realizados no sul do Brasil constataam que a utilização de fundações apoiadas em sistemas dupla camada, sendo a camada superior de solo-cimento compactado, é uma técnica alternativa, que na existência de camadas de solos de baixa resistência e com nível de carga das edificações baixo pode ser utilizada (Thomé *et al.*, 2005).

Foppa (2016) relata que, com a utilização da técnica solo-cimento, será reduzida significativamente a quantidade de recursos naturais utilizados no sistema de construção. Ele cita que aproximadamente 95% do solo-cimento podem ser obtidos no local da obra (solo), somente 5% (cimento) requer transporte para o local. Com a redução do consumo de recursos naturais também reduz a quantia de tráfego, poluição e danos globais ao meio ambiente.

2.2.3.1 Materiais utilizados no solo-cimento

2.2.3.1.1 Solo

Solos com qualquer granulometria podem ser estabilizados com cimento. Porém, é sabido que são necessárias quantidades de cimento maiores para atingir resistências adequadas em granulometrias mais finas do que em solos com granulometria mais grossa (ROSA, 2010).

Para execução de solo-cimento, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 1986) determina que os solos empregados devam possuir as seguintes características: granulometria desuniforme, sendo 100% do solo passante na peneira 4.8 mm e de 10 a 50%

⁴ CROFT, J. B. The Influence of Soil Mineralogical Composition on Cement Stabilization. **Géotechnique**, London, v.17, p. 119-135, 1967.

passante na peneira 0,075mm; limite de liquidez menor ou igual a 45% e índice de plasticidade menor ou igual a 18%.

Quando se refere à dosagem para emprego como camada de pavimento, a NBR 12253 (1992) descreve e delimita os tipos de solos que podem ser utilizados na composição do solo-cimento. Ela aponta que os solos A1, A2, A3 e A4, conforme a classificação da AASHTO (ASTM D 3282, 2004), sejam 100% de material passante na peneira de abertura de 76 mm e limita a fração de material retido na peneira 4,8 mm em no máximo 45%.

2.2.3.1.2 *Cimento*

O grande responsável pelo ganho rápido de resistência mecânica é o cimento Portland. Aproximadamente metade do cimento Portland reage até o 3º dia, 60 % até o 7º dia e 90% após três meses (JANZ e JOHANSSON, 2002). Não há restrições com relação ao tipo, ou seja, qualquer cimento pode ser utilizado nas misturas de solo-cimento (FOPPA, 2005).

2.2.3.1.3 *Água*

Segundo Foppa (2016), a água potável para utilização em misturas de solo-cimento é considerada satisfatória. A parcela a ser inserida, de acordo com Neville (1997), é determinada pela quantidade necessária para a compactação, visto que a água necessária para a completa hidratação do cimento é de cerca de 40% da massa de cimento, sendo destes 40%, 20% consumido na hidratação e os outros 20% fica retida na água de gel.

2.2.3.2 Dosagem da mistura

A dosagem consiste na realização de uma sucessão de testes de laboratório que se destinam a selecionar a quantidade mínima de cimento que deve ser inserida ao solo para proporcionar a durabilidade e resistência adequada ao uso que o material se destina (FOPPA, 2015).

A NBR 12253 (1992) indica um teor de cimento de 5% até 10% conforme a classificação granulométrica do solo (A1, A2, A4 ou A4 de acordo com a norma ASTM D 3282) para a execução de ensaios de compactação.

Ingles e Metcalf⁵ (1972) citados por Rosa (2010) descrevem um indicativo da proporção de cimento a ser acrescentado na mistura para a estabilização conforme os tipos de solos descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Estimativa do percentual de cimento para diferentes tipos de solo

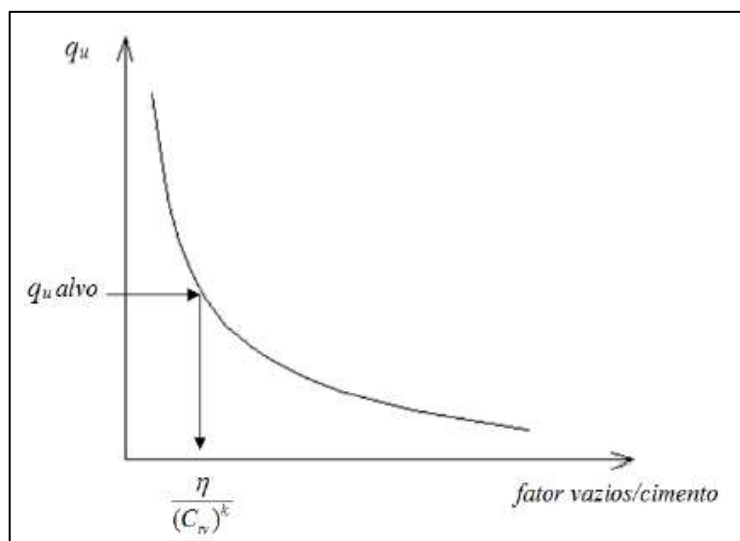
Solo	Quantidade de cimento
pedra finamente britada	0,5 - 1%
pedregulho areno-argiloso bem graduado	2 - 4%
areia bem graduada	2 - 4%
areia mal graduada	4 - 6%
argilo arenosa	4 - 6%
argilo siltosa	6 - 8%
argila	8 - 15%

Fonte: Adaptado de Ingles e Metcalf (1972 apud ROSA, 2010).

Foppa (2005) apresenta um método de dosagem semelhante ao existente para concreto, o método basicamente consiste na obtenção da curva fator vazios/cimento em relação à resistência a compressão simples, conforme a Figura 2, chamada por ele de curva de dosagem. Através do gráfico verifica-se o fator vazios/cimento correspondente à resistência a compressão simples pretendida para o projeto.

⁵ INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization**: principles and practice. Sydney: Butterworths, 1972. 374 p.

Figura 2 - Curva de dosagem para solo-cimento



Fonte: Foppa (2005)

Sendo:

$\eta / (C_{iv}^k) = \text{Fator vazios/cimento}$ (η = porosidade da mistura compactada; (C_{iv}^k) = teor de cimento volumétrico ajustado por um expoente).

2.3 COMPORTAMENTO SOLO – CIMENTO

Inúmeros pesquisadores vêm disponibilizando ao longo das últimas décadas, um conjunto consistente de informações a respeito do comportamento e das variáveis influentes neste comportamento dos solos com adição de cimento Portland, enriquecendo ainda mais o campo de conhecimento e aplicação sobre este assunto.

Prietto (1996) afirma que modificações substanciais ocorrem nas propriedades geotécnicas do material com a adição de cimento ao solo. Em aspecto geral, a rigidez e a resistência melhoraram, os limites de consistência são alterados, a compressibilidade diminui, a durabilidade medida em ciclos de molhagem e secagem aumenta e a permeabilidade aumenta nos solos argilosos, mas é reduzida nos solos granulares.

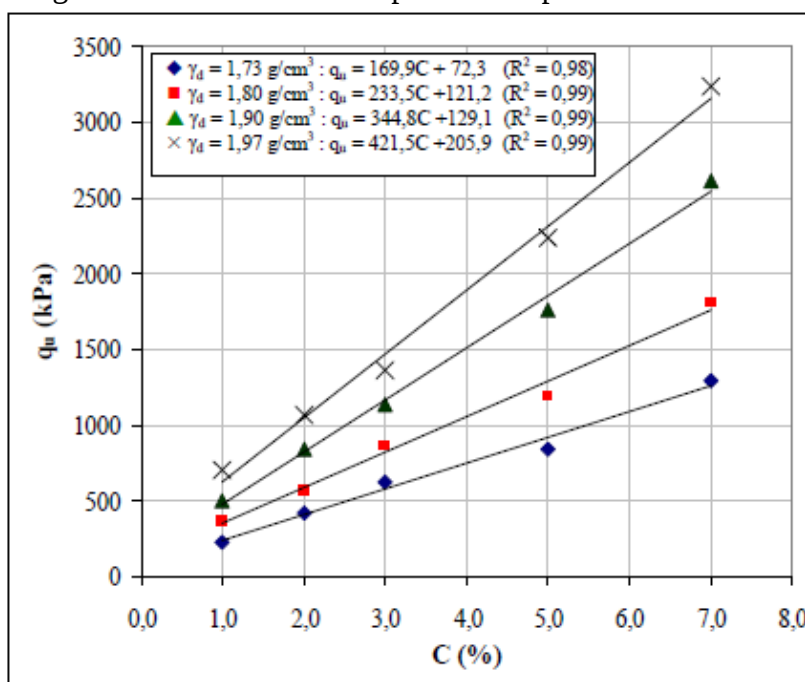
Núñez (1991) concluiu que as propriedades gerais dos solos estabilizados com cimento dependem inicialmente do cimento e em seguida da compactação. A compactação é importante principalmente com relação ao momento em que é realizada, pois após a hidratação do cimento sua realização é ineficaz.

2.3.1 Efeito do teor de cimento

De acordo com Núñez (1991), as propriedades originais dos solos são modificadas com o acréscimo do teor de cimento, ou seja, a durabilidade a ciclos de molhagem e secagem, a resistência e a capacidade de suporte aumentam. Nos solos granulares, a propensão à contração pode aumentar, já nos solos argilosos há redução na expansibilidade.

Foppa (2005) cita que a quantidade de cimento utilizada gera um grande impacto com relação a resistência à compressão simples do material. Mesmo adições em quantidades pequenas são capazes de produzir ganhos consideráveis de resistência. Conforme o autor, que estudou um solo residual de arenito botucatu, o aumento dos teores de cimento de 1% para 7% quintuplicou a resistência à compressão podendo ser percebido na Figura 3.

Figura 3 - Resistência à compressão simples versus teor de cimento



Fonte: Foppa (2005).

2.3.2 Efeito da densidade de compactação

A densidade de compactação de um solo estabilizado tem influência sobre a resistência e a durabilidade. Variações pequenas de densidade de 48 a 80 g/cm³, podem vir a gerar decréscimos na resistência de até mais de 25% (MARCON, 1977).

Felt⁶ (1955 apud FOPPA, 2005) analisou, a partir da realização de ensaios em siltes, argilas e areias, que aumentando a densidade do material compactado ocorre a redução da perda de material em protótipos submetidos a testes de durabilidade, principalmente em solos argilosos e siltosos. Ele percebeu que mantendo constante o teor de umidade e aumentando a densidade da mistura, ocorre um aumento exponencial de resistência à compressão simples e que as misturas ensaiadas demonstraram características satisfatórias quando compactadas no teor de umidade ótimo e massa específica seca máxima.

Segundo Ingles e Metcalf (1972) citados por Velazquéz (2016), inúmeros pesquisadores apresentam uma relação entre resistência e densidade conforme a Equação 1:

$$S = Ae^{bD} \quad (1)$$

Sendo:

S = resistência;

A e b são constantes;

D = densidade.

2.3.3 Efeito do teor de umidade

Como determina o ensaio de compactação de Proctor, os solos estabilizados com cimento geralmente são compactados em campo na umidade ótima para o alcance da massa específica aparente seca máxima. Porém, estudos comprovam que em algumas situações o teor de umidade que propicia a máxima durabilidade e resistência não é obrigatoriamente equivalente à umidade que fornece a maior massa específica aparente seca (LIGHTSEY⁷ et al., 1970 apud ROJAS, 2012).

Rosa (2010), ao estudar um solo siltoso tratado com cimento, constatou que o teor de umidade de moldagem demonstrou ter papel essencial na resistência à compressão simples. O aumento do teor de umidade gerou um aumento na resistência à compressão simples do material ensaiado.

⁶ FELT, E. J. Factors Influencing Physical Properties of Soil-cement Mixtures. **Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association**: Bulletin D5. Authorized Reprint from Bulletin 108 of the Highway Research Board, 1955, 138p.

⁷ LIGHTSEY, G. R.; ARMAN, A.; CALLIHAN, C. D. Changes in the Characteristics of Cement-stabilized Soils by the Additions of Excess Compaction Moisture. **Highway Research Record: Soil Stabilization**: Multiple Aspects. Washington D. C., n. 315, p. 36-45, 1970.

Foppa (2005) estudou um solo areno-siltoso estabilizado com distintas quantidades de cimento (2%, 3%, 5%, 7%, 9% e 12%) e avaliou o efeito do teor da umidade de moldagem, com massa específica aparente seca constante, na realização de ensaios da resistência a compressão simples. Ele observou que o teor de umidade até chegar a um valor ótimo gera um aumento na resistência à compressão simples, a partir de então ocorre à diminuição dessa resistência, constatando que esse teor ótimo de umidade independente do teor de cimento é em torno de 10%.

Foppa (2005) salienta ainda que, o efeito do teor de umidade sobre a resistência foi mais evidente para os teores de cimento iguais a 9% e 12%. Isto pode estar ligado ao aumento do teor de finos devido ao cimento, já que este apresenta granulometria fina, com elementos de diâmetro inferior a 0,075 mm. Este acréscimo no teor de finos pode ter tornado o material mais sensível às variações no teor de umidade de moldagem.

2.3.4 Efeito da relação vazios/cimento

A relação vazios/cimento associada à previsão do desempenho mecânico de solos artificialmente cimentados é foco de inúmeras pesquisas dentro da literatura (LANARCH, 1960; FOPPA, 2005; CRUZ, 2008; LOPEZ JUNIOR, 2007).

Larnach (1960) citado por Lopes Junior (2007), utilizou um fator correlacionando o teor de vazios com a quantidade de cimento, expressa na Equação 2, para estimar a resistência de um solo-cimento. Ele estudou uma areia fina combinada com uma argila variando os teores de cimento a cerca da massa de solo seco (5,3%, 11,1% e 17,7%). Para as diferentes proporções de cimento realizou-se uma sucessão de testes de resistência à compressão simples em vigotas.

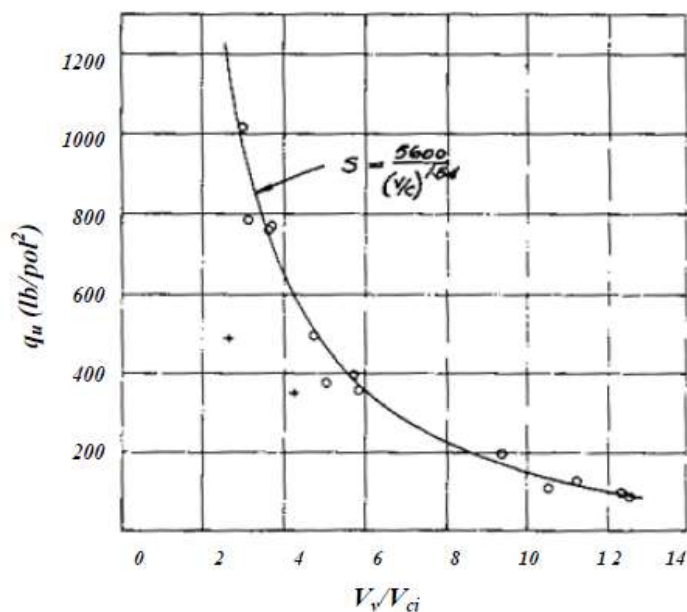
$$\frac{V_v}{V_{ci}} = \frac{\text{Volume absoluto de vazios (ar + água)}}{\text{Volume absoluto de cimento}} \quad (2)$$

A Figura 4 expressa os resultados encontrados por Lanarch nos ensaios de resistência à compressão simples pela relação vazios/cimento em amostras curadas por 7 dias. Segundo Larnach⁸ (1960 apud LOPES JUNIOR, 2007), o uso desse tipo de relação, semelhante ao que

⁸ LARNACH, W. J. Relationship Between Dry Density, Voids/Cement Ratio and Strenghth of Soil-cement Mixtures. **Civil Engineering and Public Works Reviews**, London: Lomax Erskine and Co., vol 55, n. 648, p.903-905, 1960.

acontece com o concreto, pode ser de fundamental utilidade em campo para dosagem e controle de execução de misturas solo-cimento.

Figura 4 - Relação vazios/cimento *versus* resistência a compressão simples.

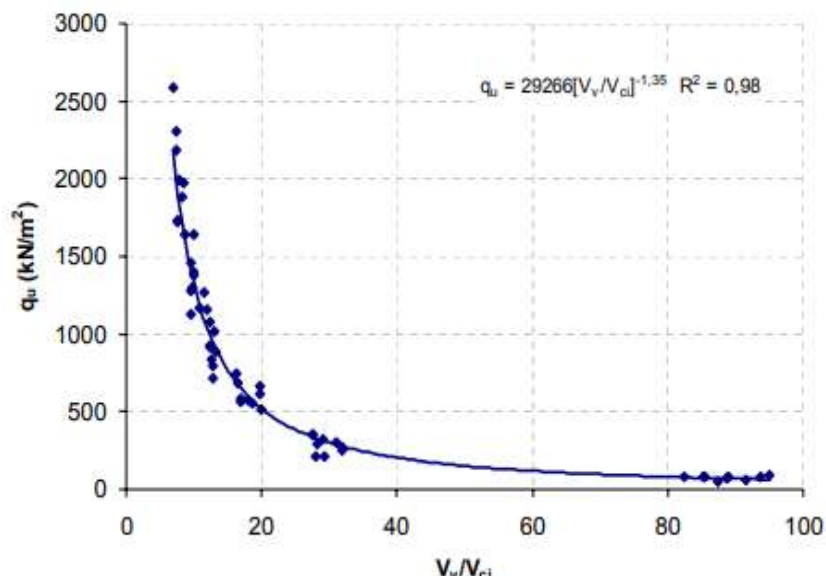


Fonte: Larnach (1960 apud LOPES JUNIOR, 2007).

Para Dias (2012), com a diminuição do número de vazios há um aumento de resistência à compressão não confinada do solo. A eficiência da estabilização com adição de cimento Portland pode vir a depender ainda de como ocorre a compactação do material.

Cruz (2008), usando do mesmo conceito de vazios/cimento, fez o melhoramento de uma areia fina variando o percentual de cimento (2%, 3%, 5%, 7%, 9% e 12%) e realizou ensaios de compressão simples. Os corpos de prova foram moldados com umidade de 10% e índice de vazios de 0,68, 0,73 e 0,80. Os resultados obtidos desses ensaios, com os corpos de prova curados por 7 dias, são apresentados na Figura 5.

Figura 5 - Relação vazios/cimento *versus* resistência a compressão simples



Fonte: Cruz (2008).

Segundo Cruz (2008), quanto maior a relação vazios/cimento menor a resistência à compressão simples. Isso se deve ao fato da maior parcela de vazios ou menor quantidade de cimento nas amostras. Logo, é expressa uma dependência da RCS em relação a η/C_{iv} , indistintamente dos valores específicos de η e de C_{iv} .

Foppa (2005) verificou que para um mesmo fator vazios/cimento variando o teor de umidade de moldagem, os valores obtidos de resistência são diferentes. Isto pode indicar que talvez a relação vazios/cimento estabelecida é válida apenas quando considerado constante o teor de umidade de moldagem.

De acordo com Velázquez (2016), tendo em conta todos os estudos realizados sobre a relação vazios/agente cimentante, é fácil perceber que esta técnica mostra-se como uma ferramenta ideal para a escolha de um teor adequado de agente cimentante e energia de compactação, para possibilitar uma mistura que tenha a resistência requerida de projeto com o menor custo possível e com elevada confiabilidade.

2.3.5 Durabilidade

A durabilidade está relacionada com a competência de um material manter a integridade estrutural sob condições as quais é exposto. As variações de umidade e temperatura são as principais forças deteriorantes de um material estabilizado com pozolana.

Além desses fatores ambientais, as ações das cargas repetidas do tráfego debilitam o pavimento por fadiga (MARCON, 1977).

A relevância da durabilidade de um material cimentado é especialmente se ele se destina a ficar sujeito a condições intensas de molhagem e secagem e/ou carga, como ocorre no caso de uma sub-base de solo-cimento, sujeita a bombeamento, sob uma placa de concreto (NÚÑEZ, 1991).

A avaliação da durabilidade de misturas solo-cimento é dada, geralmente, por meio de ensaios de congelamento e degelo e de molhagem e secagem, este primeiro não é exigido em regiões tropicais e sub-tropicais (NÚÑEZ, 1991).

A finalidade das condições a que o material estabilizado é exposto em laboratório para a realização dos ensaios de durabilidade deve ser simular as condições ambientais de campo. Por esse motivo, é relevante que os procedimentos desse ensaio levem em conta parâmetros como temperatura local, pluviosidade, umidade do ar e temperatura das camadas do pavimento. A temperatura das camadas do pavimento é importante pelo fato de que nos processos de estabilização de solos em que intervêm reações químicas, a temperatura determina a velocidade do ganho de resistência (MARCON, 1977).

Velázquez (2016) realizou ensaios de durabilidade para um solo-cimento baseado na norma ASTM D559 (2003), que tem por objetivo avaliar a durabilidade através da porcentagem da perda de massa obtida mediante a escovação de amostras ao longo de 12 ciclos de molhagem e secagem. Foram moldados corpos de prova com percentuais de cimento de 3%, 6% e 9% para diferentes pesos específicos (14 kN/m^3 , 15 kN/m^3 e 16 kN/m^3), e para um teor de umidade de 20%. Ele observou que as perdas de massa dos corpos de prova eram menores para maiores teores de cimento e peso específico. Segundo o autor, foi possível também observar que existe uma relação entre a perda de massa e a relação vazios/cimentos, a qual é tanto maior quanto maior é a relação vazios/cimento.

2.3.6 Resistência à compressão simples

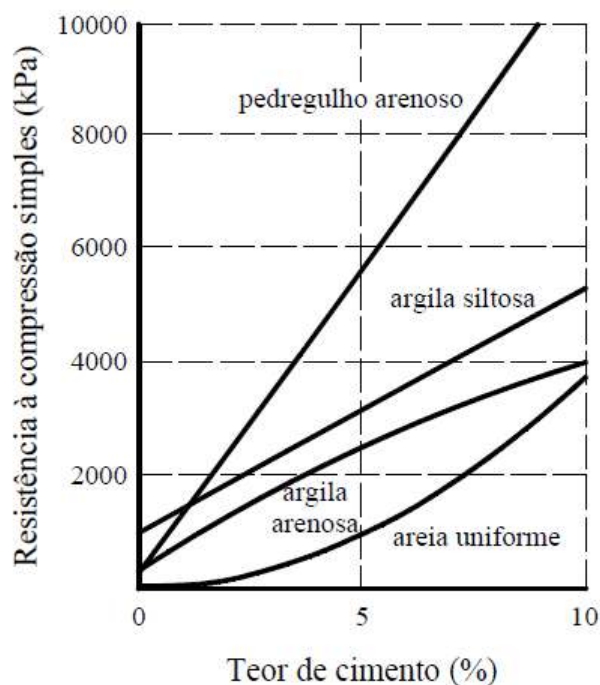
Segundo Velázquez (2016), a resistência à compressão simples é um dos ensaios mais populares e simples de executar para determinar a eficiência da estabilização de um solo-cimento.

Prietto (1996) constatou que, nos solos arenosos cimentados, a resistência à compressão simples está diretamente relacionada com o grau de cimentação. De acordo com o autor, na grande parte dos trabalhos presentes na literatura a respeito de solos artificialmente

cimentados, o grau de cimentação é demonstrado pela quantidade de material cimentante, geralmente pelo percentual de cimento em função à massa de solo seco.

De acordo com Marques (2016), em geral, a resistência à compressão simples aumenta linearmente com a adição de cimento, mas, em taxas diferentes para distintos tipos de solos, como pode ser verificado na Figura 6, onde são demonstrados os efeitos do teor de cimento sobre a resistência à compressão simples de alguns corpos de prova melhorados com cimento Portland com tempo de cura de 7 dias.

Figura 6 - Efeito do teor de cimento em função da resistência à compressão simples de diferentes tipos de solo estabilizados cimento Portland com cura de 7 dias.



Fonte: Adaptado de Ingles e Metcalf (1972 apud ROJAS, 2012).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para a obtenção de resultados e análises consistentes, o programa experimental foi dividido em três etapas. A primeira compreendeu a coleta de amostras de solo e a realização de ensaios de caracterização geotécnica e compactação. A segunda consistiu na realização dos ensaios de ciclos de molhagem e secagem, a fim de avaliar a durabilidade do material. E por fim, a última etapa compreendeu a análise e caracterização do comportamento mecânico do solo através do ensaio de resistência à compressão simples.

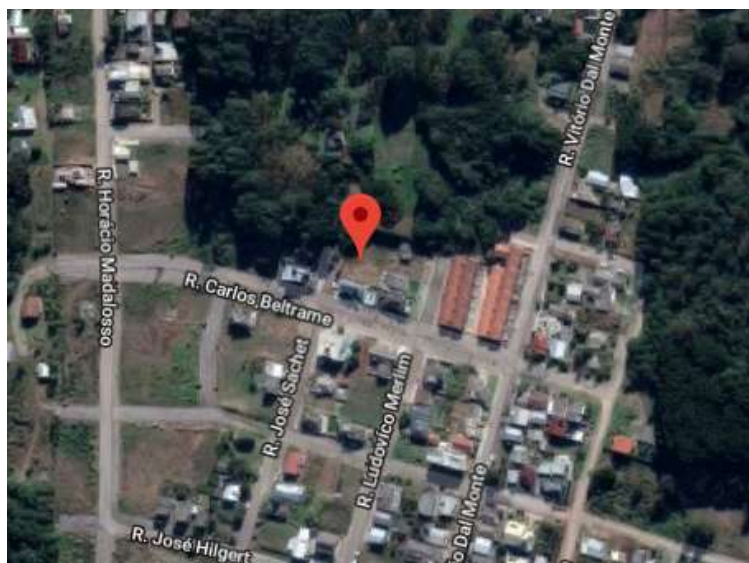
As etapas do programa experimental estabelecido são detalhadas neste capítulo, bem como a descrição dos materiais, métodos e equipamentos utilizados.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Solo

O solo utilizado no estudo foi coletado na cidade de Farroupilha – RS, no bairro São Luis, nas seguintes coordenadas: $29^{\circ}13'06.6''$ S, $51^{\circ}21'39.8''$ W. O material apresenta estrutura argilosa e coloração avermelhada e é caracterizado como residual de basalto pertencente à formação da Serra Geral. Nas Figuras 7 e 8 é possível visualizar o ponto de localização e o local onde foi coletado o solo, respectivamente.

Figura 7 – Localização do ponto de coleta do solo



Fonte: Google Maps (2018).

Figura 8: Local da coleta de amostra de solo

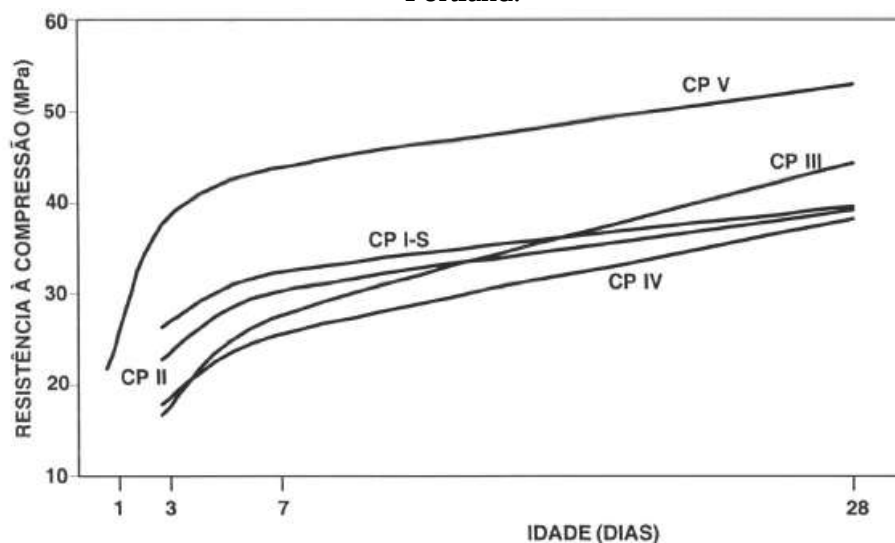


Fonte: A autora (2018)

3.1.2 Cimento

Foi utilizado neste estudo o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) como agente cimentante. O motivo pela sua escolha é o seu acelerado ganho de resistência nas idades iniciais, como ilustrado na Figura 9. Este fator permite que o tempo de cura adotado para a execução dos ensaios compressivos sejam de 7 dias. Além disso, de acordo com Foppa (2016), o estágio avançado de hidratação atingido nesta idade tende a ocasionar uma menor dispersão dos resultados.

Figura 9 - Evolução média da resistência a compressão de diferentes tipos de cimento Portland.



Fonte: ABCP (2002).

De acordo com a ABCP (2002), a alta resistência inicial é conseguida por meio de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, assim como pela moagem mais fina do cimento, de forma que, ao reagir com a água, ele adquira elevadas resistências, com maior velocidade.

A composição do cimento Portland CP V-ARI bem como suas características físicas e mecânicas estão apresentadas, respectivamente, na Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 3 – Composição do CP V - ARI

Tipo	Sigla	Composição (% em massa)		Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Material carbonático	
Alta resistência inicial	CP V – ARI	100 – 95	0 – 5	NBR 5733

Fonte: Adaptado da ABCP (2002).

Tabela 4 – Características físicas e mecânicas do CP V – ARI

	Finura	Tempo de pega		Resistência à compressão simples			
	Massa específica	Início	Fim	1º dia	3º dia	7º dia	28º dia
	(kg/m³)	(min)	(min)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)
Média	3,11	195	296	23,5	39,2	45,2	53,3
Mínimo	3,11	165	258	22,1	37,8	41,6	21,4
Máximo	3,11	218	365	25,2	41,8	47,2	53,6
Desvio padrão	0,00	14	27	0,9	0,9	1,2	1,3

Fonte: ABCP (2003 apud ROJAS, 2012).

3.1.3 Água

Para a realização dos ensaios foi utilizada água destilada, visando esta não influenciar na composição das misturas.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Ensaios de Caracterização

Para a caracterização do solo foram realizados os ensaios de granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, umidade, peso específico dos grãos e compactação Proctor Normal. Os procedimentos realizados são descritos a seguir.

3.2.1.1 Granulometria

A análise granulométrica, ou seja, determinação das dimensões das partículas de solo e das proporções relativas em que elas se encontram, seguiu as recomendações da NBR 7181:2016 sendo realizado o ensaio por meio do peneiramento. O principal objetivo deste ensaio foi conhecer a distribuição granulométrica do solo e representá-la através de uma curva, possibilitando assim a determinação de suas características físicas.

Conforme a NBR 6457:2016, após a secagem de uma amostra de 500 g solo ao ar, fez-se a desagregação dos torrões e quarteamento da amostra. A partir disso, com peneiras de distintas aberturas posicionadas em ordem decrescente de abertura, conforme representado na Figura 10, realizou-se o agitação mecânica da amostra por 5 minutos, com o propósito de o material se dispersar entre as peneiras.

Com o material devidamente separado em cada peneira, realizou-se a pesagem em balança digital de precisão das frações retidas em cada abertura e com isso obtido o percentual retido em cada faixa de tamanho granulométrico.

Figura 10- Peneiras utilizadas no ensaio



Fonte: A autora (2018).

3.3.1.2 Limites de consistência

Os limites de consistência foram definidos pelo Eng. Atterberg com o objetivo de caracterizar as mudanças entre os estados de consistência definidos como Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP) (PEDROSO, 2015). Através dos resultados destes ensaios foi possível calcular o índice de plasticidade, índice de consistência e índice de liquidez.

O índice de plasticidade indica a faixa de valores em que o solo se apresenta plástico. Este índice é calculado conforme Equação 3 (PINTO, 2006).

$$IP = LL - LP \quad (3)$$

O índice de consistência (IC), segundo Caputo (2000), pode ser encontrado fazendo uso da Equação 4.

$$IC = \frac{LL-h}{IP} \quad (4)$$

Sendo:

h = teor de umidade.

O índice de liquidez permite inferir sobre a sensibilidade e pré-adensamento dos solos argilosos. O IL é calculado através da Equação 5.

$$IL = \frac{W-LP}{LL-LP} \quad (5)$$

3.2.1.2.1 Limite de liquidez

O limite de liquidez pode ser entendido como o teor de umidade que indica a transição entre o estado plástico de um solo para o estado líquido. O procedimento para a obtenção do limite de liquidez ocorreu de acordo com a NBR 6459:2016.

Para a realização do ensaio, colocou-se o material em uma cápsula, cerca de 200 g de material passante na peneira de 0,42 mm, acrescentou-se água destilada em pequenos incrementos e misturou-se por meio de uma espátula de forma a obter uma pasta homogênea. Esta pasta foi transferida para a concha do aparelho de Casagrande e abriu-se uma ranhura no centro com o auxílio de um cinzel, conforme pode ser observado na Figura 11. A partir disso,

com a concha devidamente ajustada ao aparelho, realizou-se o golpeamento através da manivela, a razão de duas voltas por segundo, até que as bordas inferiores da ranhura se unissem em no mínimo 13 mm de comprimento.

Como última etapa do procedimento, transferiu-se uma parte da massa de solo que se uniu para uma cápsula e em seguida para a estufa para a determinação da umidade. Repetiu-se este processo por cinco vezes para distintas umidades.

Figura 11 – Aparelho de Casagrande para a determinação do Limite de Liquidez.



Fonte: A autora (2018).

3.2.1.2.2 Limite de plasticidade

O limite de plasticidade pode ser entendido como o teor de umidade em que o solo deixa de ser plástico e tornando-se quebradiço, sendo a umidade de transição entre os estados plástico e semissólido do solo.

O ensaio para a determinação do limite de plasticidade foi realizado de acordo com a NBR 7180:2016. Com cerca de 200 g de material passante na peneira de 0,42 mm, adicionou-se água destilada em pequenas quantidades até se obter uma pasta homogênea de consistência plástica. Posteriormente, com uma porção da amostra sobre uma placa de vidro, foi formado com os dedos uma pequena quantidade, que foi rolada sobre a placa de vidro até atingir forma de um cilindro, com dimensões aproximadas de 3 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento, conforme gabarito especificado pela norma. O ensaio foi repetido quatro vezes obtendo-se quatro cilindros, conforme pode ser observado na Figura 12.

Após a conclusão do ensaio, uma pequena quantidade de cada cilindro foi inserida em cápsulas de alumínio. As cápsulas juntamente com as amostras de fragmentos de solo foram levadas para a estufa por 48 horas para determinação da umidade.

Figura 12 – Cilindros moldados no ensaio de Limite de Plasticidade



Fonte: A autora (2018).

3.2.1.3 Umidade natural

O ensaio para determinar a umidade natural do solo foi realizado de acordo com a NBR 6457:2016. O ensaio consistiu na inserção de uma quantidade de massa de solo destorroado e em estado fofo em uma cápsula. Conhecendo o peso da cápsula e do solo inserido, o conjunto foi levado para estufa, à temperatura de 105°C a 110°C, até apresentar constância de massa. Por fim, a amostra foi pesada novamente. Efetuam-se três determinações de umidade por amostra.

3.2.1.4 Peso específico real dos grãos

Peso específico dos grãos de solo é a relação entre o peso de sólidos e o volume das partículas sólidas. Este ensaio de caracterização foi realizado conforme as prescrições da NBR 6458:2016.

Na execução do ensaio, primeiramente foi determinada a massa do picnômetro e sua massa após o preenchimento com água destilada até o menisco (picnômetro + água). A partir disso, transferiu-se uma amostra de 50 g de solo para o picnômetro e adicionou-se água destilada até que a base do menisco coincidissem com a marca de referência do aparelho, como pode ser observado na Figura 13. Por fim, agitou-se o picnômetro em intervalos regulares de tempo e pesou-se o conjunto (picnômetro + solo + água). O ensaio de peso específico real dos grãos foi realizado três vezes.

Figura 13 – Picnômetro + água destilada + solo



Fonte: A autora (2018).

3.2.1.5 Compactação

O Ensaio de Compactação Proctor Normal, que seguiu as orientações da NBR 7182:2016, consistiu em compactar uma amostra de solo em três camadas sucessivas (26 golpes em cada camada), através de um cilindro metálico de volume conhecido, para distintas umidades. A partir disso, foi traçada a curva de compactação do solo, que é dada pela relação entre o teor de umidade e o peso específico aparente seco.

O ensaio foi repetido cinco vezes a fim de obter 5 pontos para a curva de compactação. A cada ensaio acrescentou-se aproximadamente 2% de água destilada em comparação à amostra anterior.

O ensaio de compactação foi realizado para amostras de solo e solo-cimento com teores de 10% e 15% de cimento. A Figura 14 demonstra algumas etapas do ensaio de compactação.

Figura 14 – (a) Moldagem do corpo de prova (b) Remoção do molde cilíndrico



(a)

(b)

Fonte: A autora (2018).

3.2.2 Dosagem da mistura

Os corpos de prova foram moldados com teores de cimento de 10% e 15%. A escolha desses teores de cimento foi com base em estudos publicados na literatura. Segundo Ingles e Metcalf (1972 apud ROSA, 2010) para argilas a porcentagem de cimento a ser adicionada pode variar entre 8% e 15% conforme Tabela 2, apresentada anteriormente. Em estudos realizados por Foppa (2006) e Lopes Junior (2007) foram adotadas teores de cimento em quantidades variadas, chegando até 11%. Diante disso, justifica-se o teor escolhido pelo fato de optar-se por quantidades de cimento que variam dentro de valores publicados na literatura, estando dentro percentuais aceitáveis para estabilização convencional de solo-cimento.

3.2.3 Ensaio de durabilidade

A avaliação da durabilidade ocorreu de acordo com a NBR 13554:1996, cuja norma estabelece o método para avaliar a perda de massa, variação de umidade e variação de volume de corpos de prova de solo-cimento por meio de ciclos de molhagem e secagem.

O ensaio consistiu em moldar três corpos de prova de acordo com a NBR 12024:1992. O corpo de prova nº 1 foi utilizado para a obtenção da variação de umidade e volume, e os demais corpos de prova foram utilizados para obter a perda de massa durante o ensaio. A partir da moldagem dos mesmos, a norma de durabilidade solicita que todos sejam curados por 7 dias em cura úmida, entretanto, para este estudo, optou-se por curá-los em temperatura

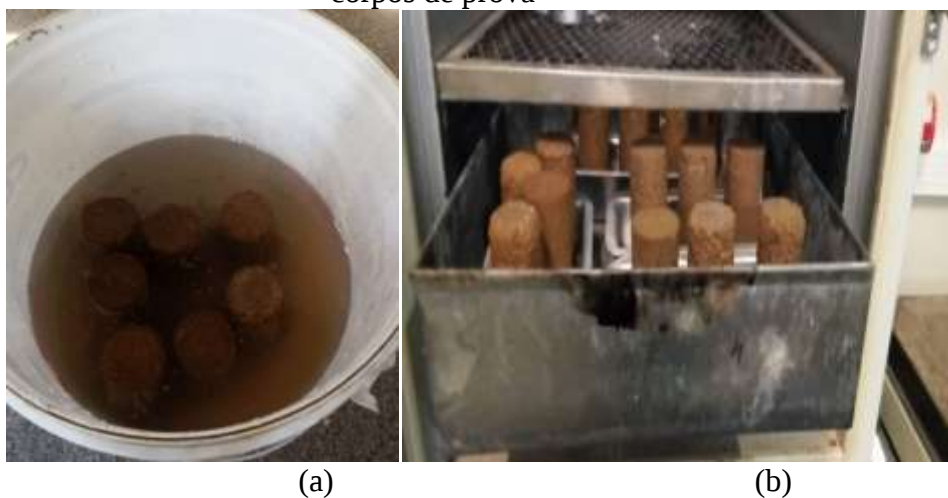
ambiente (aproximadamente 20°) pelo fato de o laboratório não possuir o suporte necessário para realizar-se a cura especificada.

Após o período de cura, iniciaram-se os ciclos de molhagem e secagem, conforme Figura 15. Esses consistiram na imersão dos corpos de prova em água por cinco horas, seguido de um período de 42 horas em estufa com temperatura de $(71 \pm 2)^\circ\text{C}$. Exceto o corpo de prova nº 1, após saírem da estufa, as amostras passavam por um processo de escovação. Esta escovação foi realizada em todo o comprimento do corpo de prova, sendo requeridas 18 a 20 escovações verticais para cobrir a área lateral e quatro para cada uma das bases. Este procedimento, a contar da imersão em água, foi repetido seis vezes.

Com os três corpos de prova tendo passado pelos seis ciclos, as amostras retornaram a estufa, agora em temperatura entre 105° a 110° até atingir massa constante.

O ensaio de durabilidade foi realizado para amostras de solo natural e solo com teores de 10% e 15% de cimento.

Figura 15 - (a) Etapa de molhagem dos corpos de prova (b) Etapa de secagem dos corpos de prova



Fonte: A autora (2018).

3.2.4 Ensaio de resistência à compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão simples foram executados conforme NBR 12770:1992 e a NBR 12025:2012. O ensaio consiste na aplicação de carga axial com controle de deformação.

Os corpos de prova ensaiados foram confeccionados compactando um corpo de prova cilíndrico na energia Proctor Normal com umidade ótima e massa específica seca máxima, valores esses obtidos a partir do ensaio de compactação discutido no item 3.1.5.

Com o auxílio de um talhador foi ajustado o diâmetro do corpo de prova por meio de elementos cortantes, e posteriormente ajustado suas extremidades, de modo a ficar com todas as dimensões conforme requer o ensaio.

A NBR 12025:2012 solicita que os corpos de prova sejam imersos em água por um período de 4 horas antes do rompimento, a fim de evitar o efeito de sucção. Entretanto, para este estudo se optou por não fazer a imersão dos corpos de prova, desconsiderando-se então este efeito. O motivo de não ter sido considerado a sucção é pelo fato de estar se trabalhando com um solo argiloso em umidade natural, entendendo-se então que a sucção para dentro da partícula de solo já tenha ocorrido.

Os carregamentos foram aplicados até que os valores da carga diminuíssem a partir da evolução dos deslocamentos ou até que se obtivesse 15% de deformação axial específica. Por fim, registraram-se os valores da carga, deslocamento e tempo para definir a forma da curva de tensão-deformação. Para uma maior representatividade dos resultados, foram ensaios três corpos de prova por mistura.

Foram realizados ensaios de compressão simples para amostras de solo natural e solo com teores de 10% e 15% de cimento com cura de 7 dias. O resultado do ensaio para uma das amostras pode ser visualizado na Figura 16.

Figura 16 – Corpo de prova após o ensaio de compressão simples



Fonte: A autora (2018).

4 RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos dos ensaios descritos no capítulo anterior e analisado as principais percepções denotadas a respeito dos comportamentos encontrados.

Os resultados estão apresentados em formas de tabelas e gráficos de maneira a possibilitar uma melhor visualização.

4.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

4.2.1 Análise granulométrica

Os resultados do ensaio de granulometria por peneiramento pode ser observados na Tabela 5.

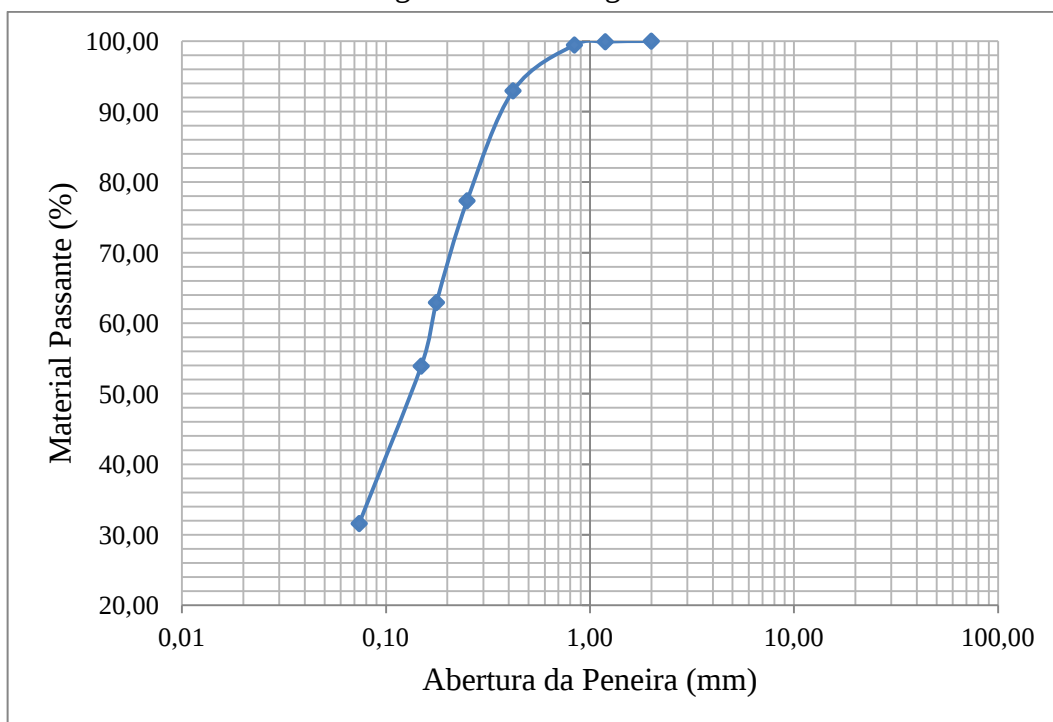
Tabela 5 - Distribuição granulométrica

Peneira n°	Abertura (mm)	Massa retida (g)	% Retida simples	% Retida acumulada	% Passante acumulada	%	Tipo de solo
10	2,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0.00	Pedregulho
16	1,19	0,42	0,08	0,08	99,92	0.55	Areia grossa
20	0,84	2,31	0,46	0,55	99,45		
40	0,420	32,48	6,50	7,04	92,96	22.09	Areia média
60	0,25	77,97	15,59	22,64	77,36		
80	0,177	72,1	14,42	37,06	62,94	45.76	Areia fina
100	0,149	45,08	9,02	46,07	53,3		
200	0,074	111,6	22,32	68,39	31,61		
Fundo	0,00	158,04	31,61	100,00	0,00	31.61	Silte/Argila

Fonte: A autora (2018).

Com os dados da Tabela 5, foi possível traçar a curva granulométrica do solo avaliado, tendo no eixo das abscissas o diâmetro das partículas, que corresponde à abertura das peneiras, e no eixo das ordenadas o percentual passante acumulado. A curva granulométrica é apresentada na Figura 17.

Figura 17 - Curva granulométrica



Fonte: A autora (2018).

Com base na escala da ABNT NBR 6502:1995, os resultados da análise granulométrica evidenciam a predominância de areia do tipo fina (45,76%), seguido de silte-argila (31,61%), areia média (22,09%) e areia grossa (0,55%).

4.2.2 Umidade natural

O resultado do ensaio umidade natural do solo pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6 – Teores de umidade presente no solo

Amostras	Massa solo úmido (g)	Massa solo seco (g)	W (%)	Média W (%)
W1	15,03	11,42	31,61	31,63
W2	18,24	13,88	31,41	
W3	15,35	11,64	31,87	

Fonte: A autora (2018).

Verificou-se que a umidade natural média do solo encontra-se na ordem de 31,63%, ou seja, uma quantidade significativa de água, que demonstra uma grande capacidade de

retenção. Este valor posteriormente auxiliou na identificação do teor de água necessária para obter uma melhor compactação do solo, assim como na quantidade necessária para alcançar maiores valores de resistência.

4.2.3 Limites de consistência

Como complementos da caracterização física do solo foram realizados os ensaios de limite de plasticidade (LP) e limite de liquidez (LL), que possibilitaram juntamente com o resultado obtido de umidade natural, calcular os valores de índice de plasticidade, índice de consistência e índice de liquidez.

4.2.3.1 Limite de liquidez

Na Tabela 7 observam-se os resultados do ensaio de limite de liquidez, com as umidades de cada uma das amostras e o número de golpes necessários para que as bordas inferiores da ranhura se unam no aparelho de Casagrande.

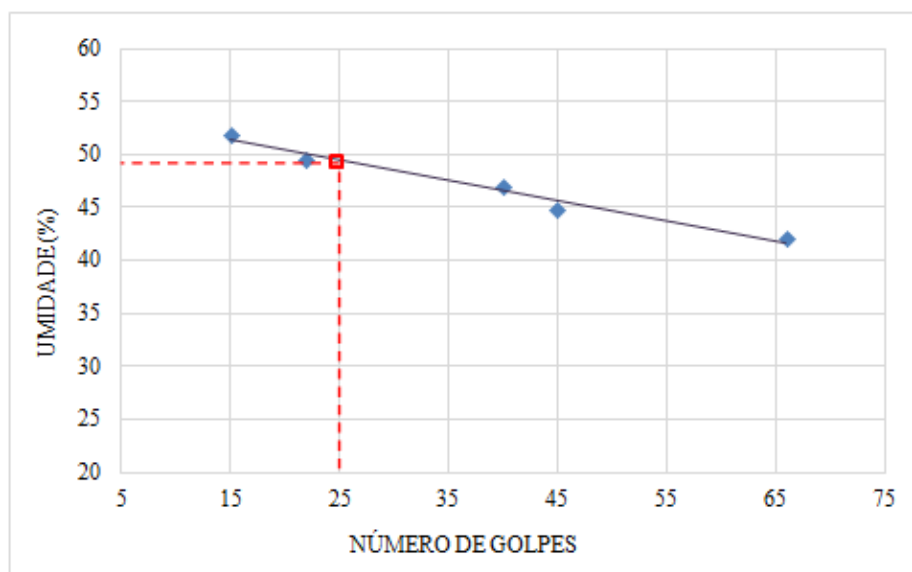
Tabela 7- Resultados do ensaio de limite de liquidez

Amostra	Massa solo úmido (g)	Massa solo seco (g)	Nº de Golpes	Umidade (%)
LL1	5,61	3,95	66	42,03
LL2	9,62	6,64	45	44,88
LL3	8,07	5,49	40	46,99
LL4	10,47	7,00	22	49,57
LL5	8,4	5,53	15	51,90

Fonte: A autora (2018).

Com o número de golpes no eixo das abscissas e o percentual de umidade no eixo das ordenas foi traçado o gráfico para determinação do limite de liquidez (Figura 18).

Figura 18 – Curva limite de liquidez



Fonte: A autora (2018).

A partir da equação da reta foi possível obter o valor do limite de liquidez para um número de 25 golpes de 49,46%.

4.2.3.2 Limite de plasticidade

Na Tabela 8 são apresentados os valores obtidos no ensaio para determinação do limite de plasticidade.

Tabela 8 - Resultados do ensaio de limite de plasticidade

Amostra	Msolo úmido (g)	Msolo seco (g)	Umidade (%)
LP1	1,58	1,16	36,20
LP2	1,77	1,29	37,20
LP3	1,97	1,43	37,76
LP4	1,79	1,28	39,84

Fonte: A autora (2018).

Observa-se que o solo apresenta um limite de plasticidade de 36,20%.

4.2.3.3 Índice de plasticidade

A partir dos resultados de limite de liquidez e plasticidade obteve-se então um índice de plasticidade de 13,25 %, que representa a quantidade de água a acrescentar ao solo para que este passe o estado plástico para líquido. De acordo com a classificação encontrada no livro de Sousa Pinto (2006), o solo em estudo apresenta uma plasticidade média.

4.2.3.4 Índice de consistência

A partir da aplicação da Equação 4, obteve-se um valor para o índice de consistência de 1,35 que de acordo com a classificação encontrada no livro de Sousa Pinto (2006) representa uma consistência dura.

4.2.3.5 Índice de liquidez

O Índice de Liquidez foi calculado através da Equação 5, aonde obteve-se um valor de -0,35. Com o referido valor de IL, é possível determinar que a amostra se refira a um solo muito pré-adensado, de acordo com a classificação encontrada no livro de Sousa Pinto (2006).

4.2.4 Peso específico real dos grãos

Na Tabela 9 é possível visualizar os resultados obtidos no ensaio de peso específico real dos grãos, que resultou em um valor médio de 25,20 kN/m³, muito próximo a valores encontrados por BORSATTO (2011) em seu estudo geológico-geotécnico da área urbana de Caxias do Sul, cidade próxima do local de estudo. Isso demonstra ser um valor típico para o solo da região estudada.

Tabela 9 - Peso específico real dos grãos

Pic	Mpic (g)	Mpic + água (g)	M água (g)	Msolo seco (g)	Msolo seco+pic +água (g)	Msolo + pic + água (g)	Mdeslo- cada (g)	Mespecífica (g/cm ³)	Pespecífico (kN/m ³)
Pic 1	204,27	720,62	516,35	48,73	769,35	749,27	20,08	2,51	24,59
Pic 2	204,27	720,62	516,35	48,63	769,25	750,02	19,23	2,61	25,62
Pic 3	204,27	720,62	516,35	48,61	769,23	749,84	19,39	2,59	25,40

Fonte: A autora (2018).

4.2.5 Ensaios de compactação

Foram realizados ensaios de compactação para energias Proctor normal em amostras de solo e em amostras de solo-cimento com teores de cimento (CPV-ARI) de 10% e 15%, conforme mencionado anteriormente. Os resultados detalhados de cada ensaio são apresentados nos itens a seguir.

4.2.5.1 Compactação amostras 100% solo

Os resultados obtidos no ensaio com a amostra de 100% solo estão apresentados na Tabela 10.

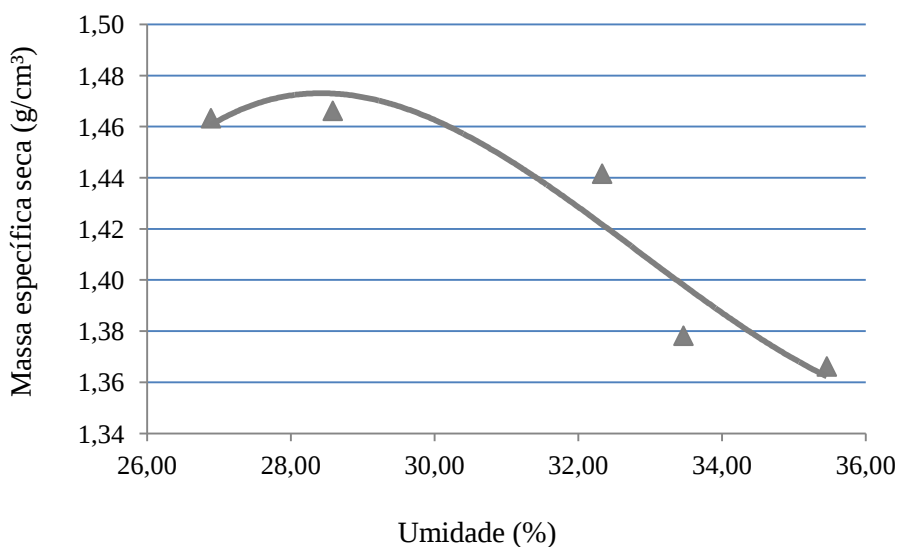
Tabela 10 – Resultados compactação amostra 100% solo

Massa solo (g)	Massa Específica (g/cm³)	Peso da Cápsula	Peso Cápsula + Solo Umido (g)	Peso Cápsula + Solo Seco (g)	Peso da Água (g)	W (%)	W Média (%)	Massa Específica Seca (g/cm³)
1822	1,86	16,64	31,75	28,38	3,37	28,71	26,88	1,46
		17,66	34,74	31,21	3,53	26,05		
		16,46	35,08	31,25	3,83	25,90		
1850	1,89	15,82	39,96	34,61	5,35	28,47	28,58	1,47
		17,15	37,26	32,79	4,47	28,58		
		16,71	37,66	32,99	4,67	28,69		
1872	1,91	18,06	40,25	34,81	5,44	32,48	32,33	1,44
		15,05	33,41	29,02	4,39	31,42		
		17,08	43,59	37,00	6,59	33,08		
1805	1,84	16,96	42,97	36,39	6,58	33,87	33,46	1,38
		17,11	41,72	35,58	6,14	33,24		
		17,06	38,65	33,26	5,39	33,27		
1816	1,85	15,37	40,67	34,15	6,52	34,72	35,46	1,37
		16,03	46,96	38,82	8,14	35,72		
		17,06	51,26	42,22	9,04	35,93		

Fonte: A autora (2018).

Com base nos resultados da Tabela 10, foi traçada a curva de compactação, apresentada na Figura 19, onde é possível constatar que a massa específica seca máxima é de 1,47 g/cm³ para um valor de umidade ótima de 28,58%.

Figura 19 – Curva compactação 100% solo



Fonte: A autora (2018).

4.2.5.2 Compactação amostras 90% solo + 10% cimento

Os resultados obtidos no ensaio com a amostra 90% solo + 10% cimento estão contidos na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados compactação amostra 90% solo + 15% cimento

(continua)

Massa solo (g)	Massa Específica (g/cm³)	Peso da Cápsula	Peso Cápsula + Solo Umido (g)	Peso Cápsula + Solo Seco (g)	Peso da Água (g)	Umidade (%)	Média Umidade (%)	Massa Específica Seca (g/cm³)
1736	1,77	6,03	19,15	16,68	2,47	23,19	22,88	1,44
		6,44	19,95	17,43	2,52	22,93		
		5,93	17,46	15,34	2,12	22,53		
1803	1,84	7,28	12,91	11,78	1,13	25,11	25,84	1,46
		7,95	14,56	13,19	1,37	26,15		
		7,02	13,94	12,50	1,44	26,28		

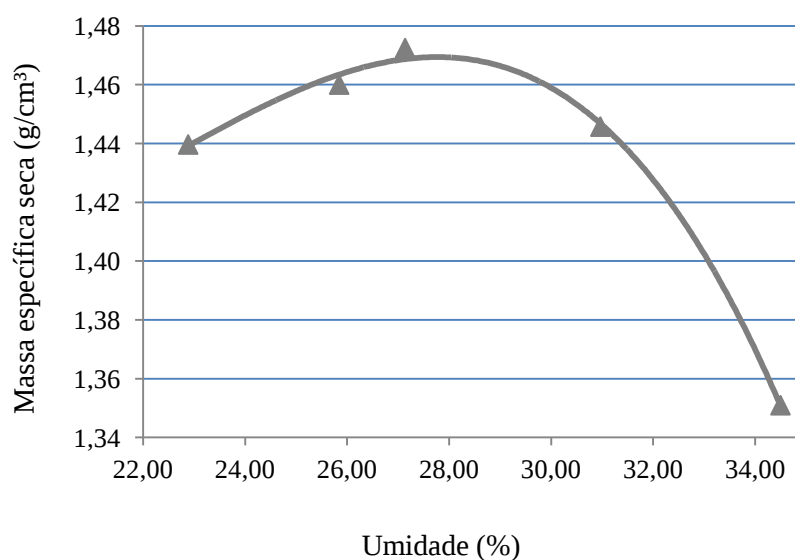
(conclusão)

1837	1,87	7,82	18,41	16,15	2,26	27,13	27,14	1,47
		7,92	22,15	18,89	3,26	29,72		
		7,65	16,93	15,10	1,83	24,56		
1858	1,89	5,78	15,40	13,24	2,16	28,95	30,97	1,45
		5,34	11,78	10,31	1,47	29,58		
		7,64	17,61	15,06	2,55	34,37		
1783	1,82	6,09	15,23	12,05	3,18	53,36	34,50	1,35
		6,48	13,40	12,01	1,39	25,14		
		5,97	14,77	13,01	1,76	25,00		

Fonte: A autora (2018).

Com base nos resultados da Tabela 11, foi traçada a curva de compactação da amostra 90% solo + 10% cimento conforme demonstrado na Figura 20. Constatou-se que a massa específica seca máxima é de 1,47 g/cm³ e a umidade ótima neste ponto é de 27,14%.

Figura 20 - Curva compactação 90% solo + 10% cimento



Fonte: A autora (2018).

4.2.5.3 Compactação amostras 85% solo + 15% cimento

Os resultados obtidos no ensaio com amostras de 85% solo + 15% cimento estão contidos na Tabela 12.

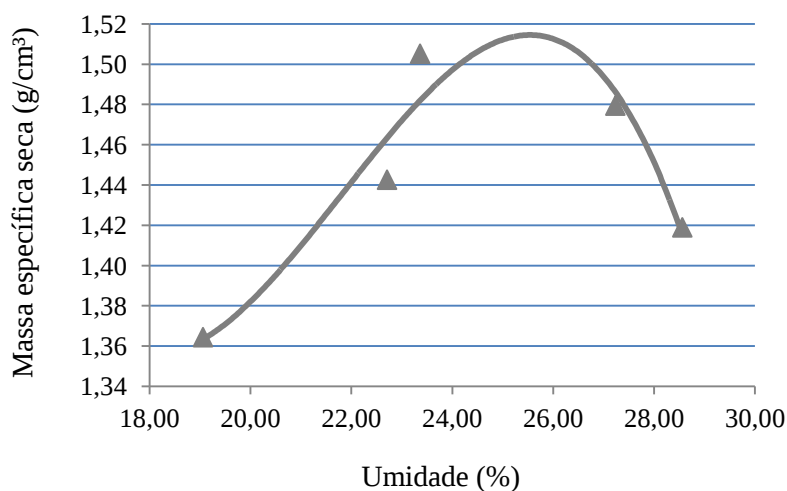
Tabela 12 - Resultados compactação amostra 85% solo + 10% CPV – ARI

Massa solo (g)	Massa Específica (g/cm ³)	Peso da Cápsula	Peso Cápsula + Solo Umido (g)	Peso Cápsula + Solo Seco (g)	Peso da Água (g)	Umidade (%)	Média Umidade (%)	Massa Específica Seca (g/cm ³)
1594	1,62	16,72	39,83	36,17	3,66	18,82	19,06	1,36
		17,16	39,78	36,07	3,71	19,62		
		17,13	32,91	30,42	2,49	18,74		
1737	1,77	17,49	46,85	41,51	5,34	22,23	22,71	1,44
		17,73	46,13	40,82	5,31	23,00		
		16,11	45,21	39,79	5,42	22,89		
1822	1,86	17,80	47,01	41,43	5,58	23,61	23,36	1,51
		16,79	47,16	41,22	5,94	24,31		
		16,97	61,58	53,49	8,09	22,15		
1847	1,88	17,11	57,80	49,11	8,69	27,16	27,23	1,48
		16,44	59,61	50,34	9,27	27,35		
		17,23	63,12	53,31	9,81	27,19		
1790	1,82	7,16	17,78	15,50	2,28	27,34	28,56	1,42
		7,02	22,36	18,77	3,59	30,55		
		6,12	22,54	18,97	3,57	27,78		

Fonte: A autora (2018).

Para teor de cimento de 85%, obteve-se como resultado uma massa específica aparente seca de 23,36 g/cm³ e umidade ótima de 23,36%, como é possível observar na curva de compactação da Figura 21 elaborada a partir dos dados da Tabela 12.

Figura 21 - Curva compactação 85% solo + 15% cimento

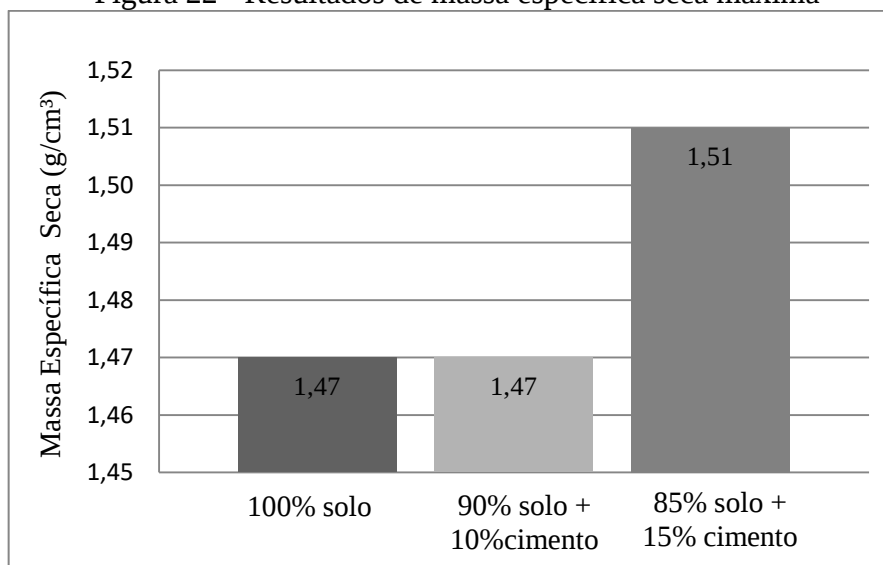


Fonte: A autora (2018).

4.2.5.4 Análise dos resultados obtidos nos ensaios de compactação

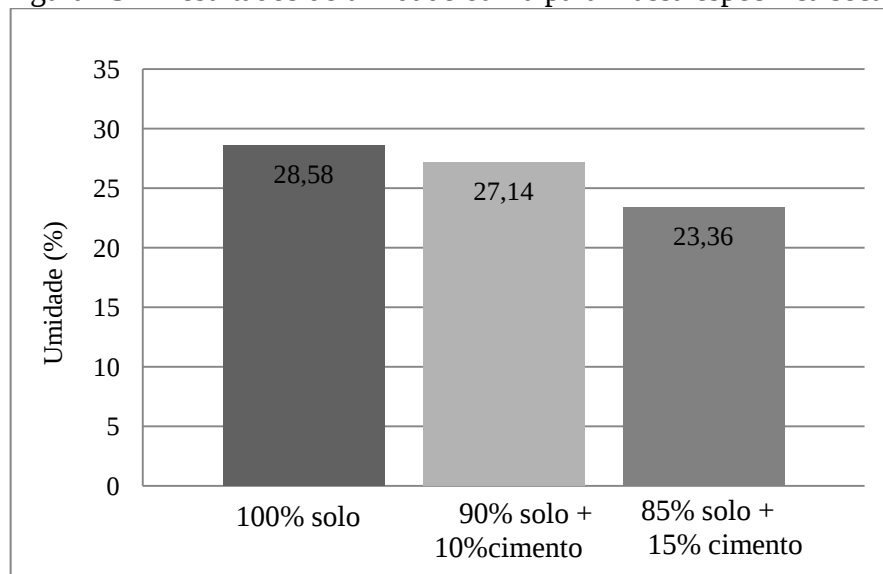
Na Figura 22 e na Figura 23 são apresentados os resultados dos ensaios de compactação das três amostras distintas ensaiadas, 100% solo, 90% solo + 10% cimento e 85% solo + 15% cimento, para massas específicas secas máximas e umidades máximas, respectivamente.

Figura 22 - Resultados de massa específica seca máxima



Fonte: A autora (2018).

Figura 23 – Resultados de umidade ótima para massa específica seca máxima



Fonte: A autora (2018).

É possível constatar que a massa específica aparente seca máxima se manteve constante em $1,47 \text{ g/cm}^3$ ao ser adicionado o teor de 10% de cimento a amostra. Já em relação ao teor de 15% de cimento houve um acréscimo passando para $1,51 \text{ g/cm}^3$. Com relação às umidades atingidas nas massas específicas secas máximas, observa-se um decréscimo conforme o teor de cimento foi aumentando, mas menos significativo para o teor de 10%, o que justificaria o mesmo resultado de massa específica seca máxima.

SILVA et al. (2010), em seu estudo de umidade ótima de compactação de solo-cimento para diferentes traços, concluiu que se aumentando os índices de cimento à mistura ocorre a necessidade de uma menor quantidade de água.

4.3 ENSAIO DE DURABILIDADE

A partir dos dados coletados no ensaio de durabilidade, foram avaliados os parâmetros de perda de massa e absorção de água do material.

4.3.1 Perda de massa

Na Figura 25 são apresentados os resultados de perda de massa dos corpos de prova nº 2 e nº 3, para os diferentes teores de cimento avaliados. Salienta-se que os corpos de prova 100% solo apresentaram grande perda de massa ainda no primeiro ciclo do ensaio, como pode ser observado na Figura 24. Dessa forma, não foi prosseguido com o ensaio para esta condição.

Figura 24 – Amostras 100% solo após molhagem.

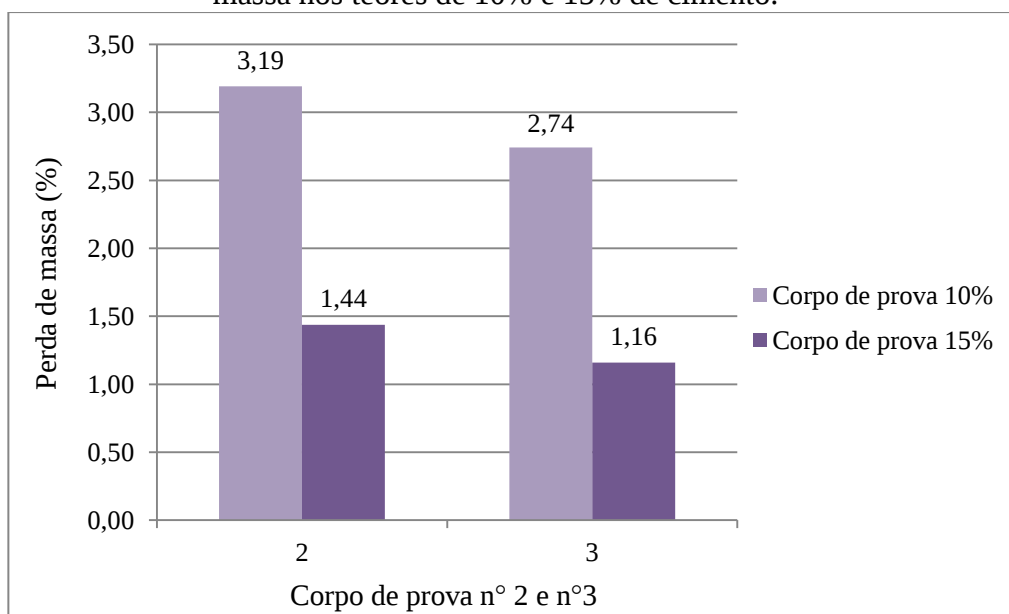


Fonte: A autora (2018).

Observa-se através dos resultados mostrados na Figura 25 e Figura 26, que a mistura se comportou de maneira durável ao final do 6º ciclos. Destaca-se ainda que ocorreu uma evolução dessa durabilidade com o passar dos ciclos, ou seja, redução da perda de massa com o passar do tempo, um indicativo do potencial de desempenho das amostras.

Comparando a durabilidade entre os teores de 10% e 15%, pode-se verificar que a mistura solo-cimento com teor de 15% de cimento apresentou resultados melhores, ou seja, a perda de massa foi menor, mas em percentuais pouco significativos, inferiores a 2%.

Figura 25 – Perda de massa dos corpos n° 2 e n° 3 utilizados para avaliar a perda de massa nos teores de 10% e 15% de cimento.



Fonte: A autora (2018).

Figura 26 - (a) Corpos de prova n° 1 e n° 2 - 10% cimento após último ciclo (b) Corpos de prova n° 1 e n° 2 - 15% cimento após último ciclo



(a)

(b)

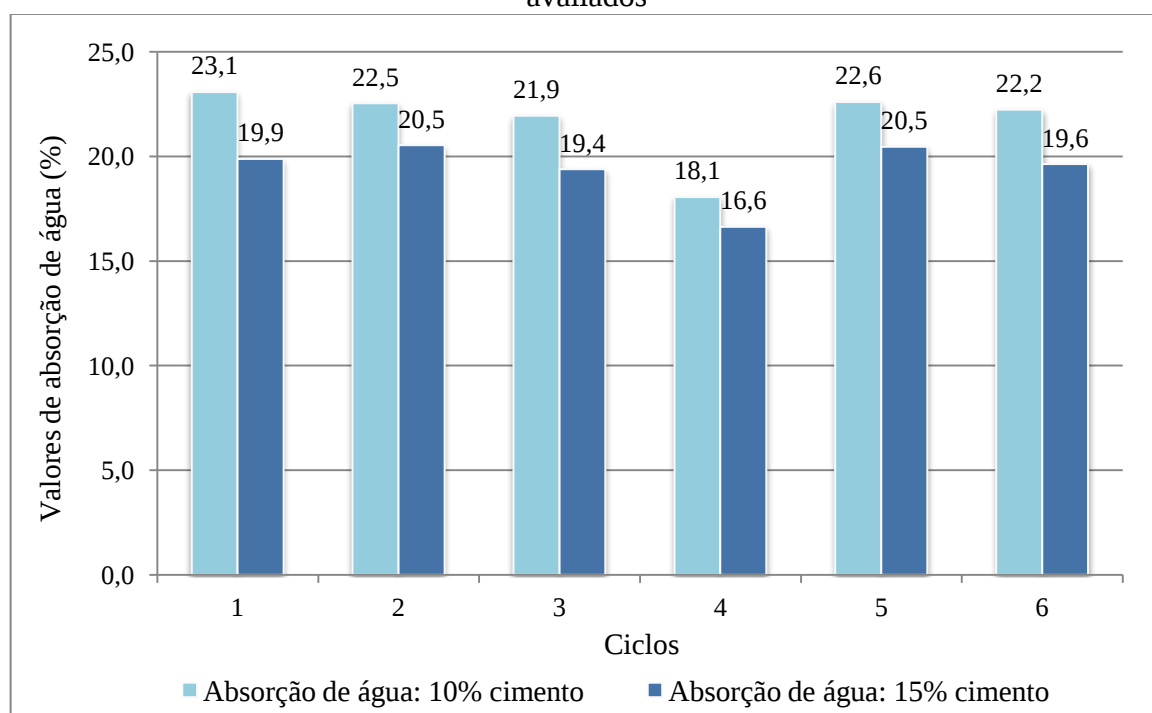
Fonte: A autora (2018).

Velázquez (2016) realizou ensaios de durabilidade para uma mistura solo-cimento com um solo siltoso baseado na norma ASTM D559 (2003) com percentuais de cimento de 3%, 6% e 9%. Os resultados obtidos pelo autor foram efetivamente melhores para maiores teores de cimento. Para a amostra com maior teor (9%) o percentual perdido até o 6º ciclo ficou em torno de 1%. Os melhores resultados obtidos por Velázquez (2016), em relação ao presente trabalho, podem ser justificados pelo tipo de solo utilizado, mais adequado para esse tipo de mistura e que precisa um menor teor de cimento do que um solo argiloso para melhores resultados, conforme evidenciado na fundamentação teórica.

4.3.1 Absorção de água

Os resultados da capacidade de absorção de água do material para diferentes teores de cimento podem ser observados na Figura 27.

Figura 27 – Capacidade de absorção de água do material nos dois teores de cimento avaliados



Fonte: A autora (2018).

A partir dos resultados obtidos pode-se observar que as amostras com maior teor de cimento na composição foram as que apresentaram os valores mais reduzidos de absorção de água, possivelmente por conta da diminuição da porosidade em função da maior quantidade de cimento. Enfatiza-se, ainda, que não houve diferenças significativas de absorção ao longo

dos ciclos, exceto no ciclo 4. Essa discrepância ocorrida no ciclo apontado possivelmente decorreu devido a um aceleração no processo de realização do mesmo, por motivos de horário de funcionamento do laboratório em que os corpos foram ensaiados, permanecendo por um período menor de tempo na estufa do que o recomendado pela norma.

Ferreira e Crispim (2015) ao avaliarem um solo areno-siltoso e uma argila de baixa plasticidade e ambas com misturas distintas de cimento e cal, verificaram que a absorção por imersão das misturas não sofreu influência significativa durante o tempo de cura, visto que a variação foi inferior a 2% entre os dois períodos avaliados (7 e 28 dias) para ambos os solos.

4.4 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

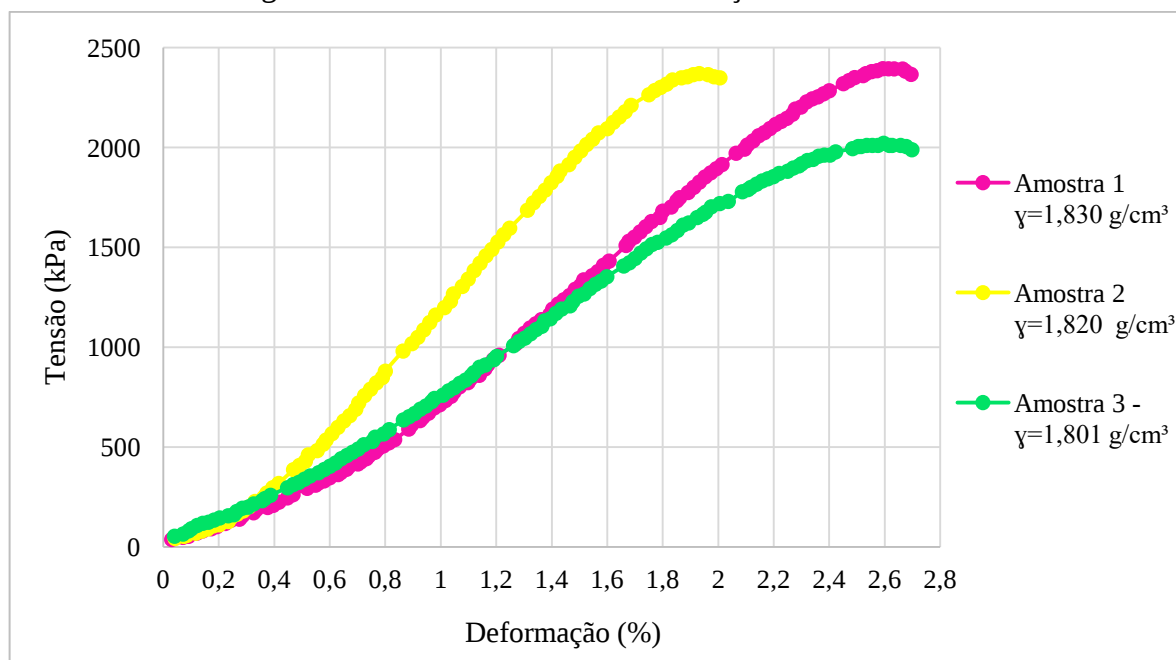
Os ensaios de compressão simples, juntamente com os ensaios de durabilidade, consistiram na principal etapa desta pesquisa. Os ensaios de compressão simples objetivaram avaliar a influência da variável teor de cimento.

Através dos procedimentos normatizados foi possível realizar os ensaios de compressão simples para as distintas amostras. Salienta-se que foram moldados corpos de prova para ruptura após um período de cura de 7 dias.

4.4.1 Amostra 100% solo

Os resultados obtidos no ensaio com amostras 100% solo estão contidos na Figura 28. Os valores de tensão de ruptura obtidos para cada amostra foram: amostra 1 = 2395,07 kPa; amostra 2 = 2370,49 kPa; amostra 3 = 2021,54 kPa, obtendo-se uma média entre os valores de tensão de ruptura de 2262,36 kPa. O desvio padrão resultante das amostras foi de 208,92 kPa. Esse valor de dispersão relativamente alto se deve principalmente a amostra 3, que resultou numa tensão de ruptura bem menor em relação a amostra 2 e 3. Observa-se que a amostra com valor de massa específica relativamente maior foi a que apresentou a maior tensão de ruptura.

Figura 28 - Gráfico Tensão x Deformação – Amostra 100% solo

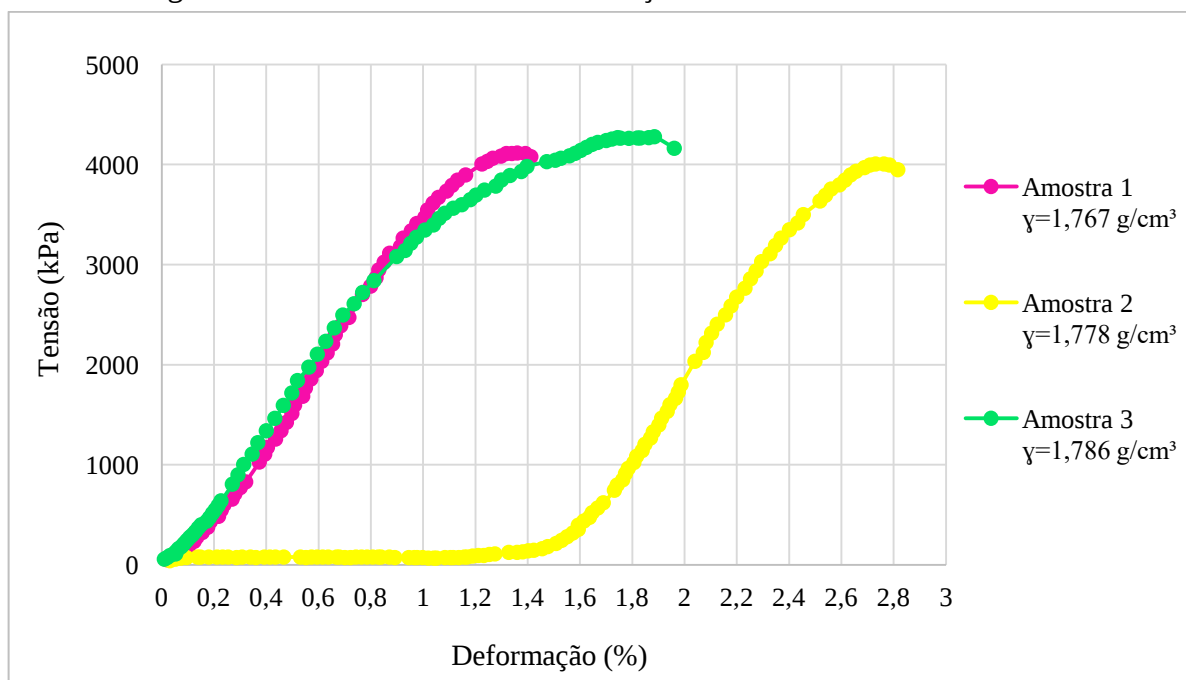


Fonte: A autora (2018).

4.4.2 Amostra 90% solo + 10% cimento

Na Figura 29 encontram-se os resultados obtidos no ensaio com as amostras 90% solo + 10% cimento. Observa-se que os valores de ruptura das amostras foram: amostra 1 = 4116,67 kPa; amostra 2 = 4007,10 kPa; amostra 3 = 4279,65 kPa, obtendo-se uma média entre os valores de tensão de ruptura de 4134,47 kPa e um desvio padrão de 137,14 kPa. A amostra com maior massa específica foi a que apresentou a maior resistência.

Figura 29 – Gráfico Tensão x Deformação – Amostra 90% solo + 10% cimento

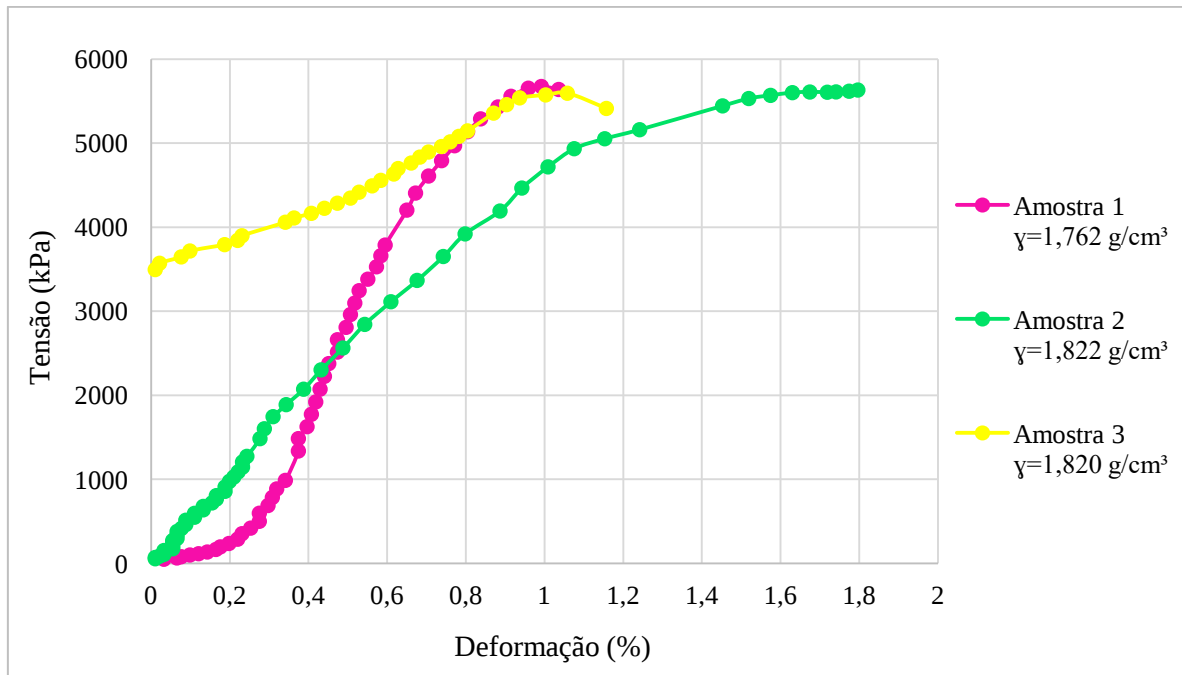


Fonte: A autora (2018).

4.4.3 Amostra 85% solo + 15% cimento

Os resultados obtidos nos ensaios com as amostras 85% solo + 15% cimento podem ser observados na Figura 30. Nota-se que os valores de ruptura variam entre as amostras ensaiadas. Para a amostra 1 obteve-se uma tensão de ruptura de 5676,46 kPa, para a amostra 2 o valor foi de 5634,17 kPa e para a amostra 3 obteve-se 5596,18 kPa. Para as três amostras ensaiadas obteve-se uma média de tensão de ruptura de 5635,60 kPa. O desvio padrão calculado para os valores foi de 40,15 kPa, o menor desvio obtido entre os ensaios. Verifica-se que a amostra com a maior massa específica foi a que apresentou o maior valor de tensão de ruptura.

Figura 30 – Gráfico Tensão x Deformação – Amostra 85% solo + 15% cimento

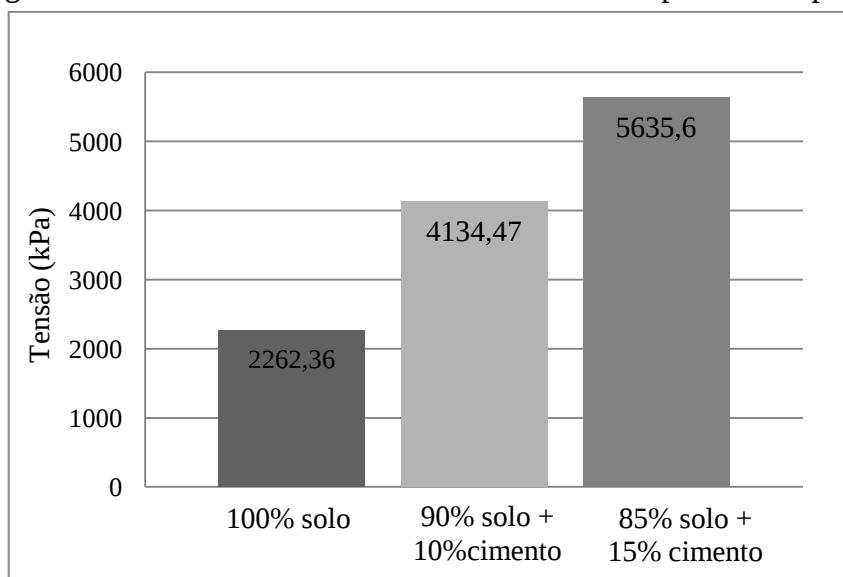


Fonte: A autora (2018).

4.4.4 Resistência à compressão simples em relação ao teor de cimento

A Figura 31 demonstra a variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cimento para os teores estudados. Nota-se que quanto maior o teor de cimento maior a resistência, ou seja, a quantidade de cimento tem um grande efeito sobre a resistência à compressão simples do material. Observa-se que, ao adicionar-se 10% de cimento ao solo, a resistência quase que dobrou e ao aumentar-se de 0% para 15% essa resistência foi relativamente mais do que o dobro.

Figura 31 – Teor de cimento versus resistência à compressão simples



Fonte: A autora (2018).

Ao analisar os resultados de compressão simples de Rojas (2012), que estudou um solo argiloso com adição de cimento de 5%, 10%, 15% e 20% para um tempo de cura de 7 dias, notou-se semelhança na proporção de acréscimo de resistência obtido nos teores de 10% para 15%. Ele alcançou uma resistência média de 2000 kPa e 2800 kPa, respectivamente, resultados que representam um aumento de resistência de 1,4 vezes mais entre um teor e outro, aproximadamente a mesmo acréscimo que ocorre para os teores do presente estudo.

De acordo com Foppa (2005), o aumento da resistência do material também está relacionado com a porosidade. A existência de um maior contato entre os grãos pela compactação do material, ou seja, pela redução da porosidade, acarreta na maior possibilidade do cimento promover a união das partículas, o que também explicaria o aumento no ganho de resistência do material.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do programa experimental e dos resultados e análises foram estabelecidas as conclusões a seguir.

a) Quanto à caracterização do material

O solo estudado apresentou granulometria de areia fina (45,76%) e peso específico de 25,20 kN/m³. Constatou-se que se trata de um material de consistência dura, medianamente plástico e muito pré-adensado. No ensaio de compactação, observou-se de modo geral que, a umidade ótima diminui com o incremento de cimento na mistura.

b) Quando a durabilidade

Verificou-se que as amostras apresentaram perda de massa menor com o maior teor de cimento incorporado a mistura, mas em percentuais pouco significativos entre os teores avaliados. Salienta-se ainda que ocorreu uma evolução dessa durabilidade no decorrer dos ciclos, ou seja, uma redução na perda de massa. Com relação a absorção de água do material, notou-se a influência da porosidade, as amostras com maior teor de cimento apresentaram valores mais reduzidos de absorção, porém não houve diferenças significativas de absorção ao longo dos ciclos.

c) Quanto à resistência do material

No que tange ao comportamento mecânico, a adição de cimento promoveu ganhos substanciais de resistência ao material, quanto maior foi essa adição maior a resistência obtida. Observou-se ainda que as amostras com maior massa específica foram as que apresentam maiores valores de resistência.

De maneira geral, a técnica apresentou bons resultados e um bom potencial para utilização. As diferenças pouco expressivas nos resultados do ensaio de durabilidade entre os teores estudados, levando-se em conta o custo do cimento, evidenciaram uma melhor relação custo benefício utilizando-se o teor de 10% de cimento. Com relação à resistência a

compressão simples do material, ambos os resultados foram satisfatórios, dependendo o teor a ser empregado da resistência requerida para o projeto.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. 7 ed. São Paulo, 1986. 12 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. 7 ed. São Paulo, 2002. 28 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 6458: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro, 1995.
- _____. **NBR 6459: Rochas e solos**. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 7180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 12024: Solo - cimento - Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 12025: Solo - cimento –Ensaio de compressão simples de corps de prova cilíndrico**. 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 13554: Solo – cimento – Ensaio de Durabilidade por molhagem e secagem**. Rio de Janeiro, 1996.
- BORSATTO, Saulo. **Contribuição ao estudo Geológico-Geotecnico da área urbana de Caxias do Sul – RS**. 2011. 97 p. Trabalho de Diplomação (Graduação em Geologia), UFRGS, Porto Alegre, 2011.
- CALLISTER, J. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**. 5 ed. Rio de Janeiro. Livros Técnicos Científicos. 2002. 589 p.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas aplicações**. 6ª Edição. Revisada e ampliada. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

CASAGRANDE, M. D. T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. 2005. 217 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

CRUZ, R. C. **Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatação de uma areia artificialmente cimentada**. 2008. 216 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2008.

DALLA ROSA, F. **Efeito do Estado de Tensões de Cura no Comportamento de uma Areia Artificialmente Cimentada**. 2009. 191 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2009.

DIAS, D. R. **Resistência à compressão não confinada de misturas de solo-cimento visando à aplicação do sistema de estabilização Dry-Mix**. 2012. 220 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 3º Edição. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006. 274 p.

FERREIRA, R. T. L.; CRISPIM, F. A. COBRANSEG: **Avaliação da durabilidade por molhagem e secagem e da capacidade de suporte de solos estabilizados em Sinop-MT**. 2015.

FESTUGATO, L. **Análise do comportamento mecânico de um solo micro - reforçado com fibras de distintos índices de aspecto**. 2008. 145 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2008.

FEUERHARMEL, M. R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. 2000. 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2000.

FLOSS, M. F. **Parâmetros de controle da resistência e da rigidez de solos granulares artificialmente cimentados**. 2012. 183 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2012.

FONINI, A. **Comportamento Mecânico de uma areia Cimentada: Análise experimental e Micromecânica**. 2012. 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**. 2005. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

FOPPA, D. **Novo método para cálculo da capacidade de carga de fundações superficiais assentes sobre camada de reforço em solo-cimento**. 2016. 229 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2016.

FRANÇA, F. C. **Estabilização química de solos para fins rodoviários: estudo de caso com o produto “RBI GRADE 81”**. 2003. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Viçosa: Imprensa Universitária - Universidade Federal de Viçosa.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal - Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2º Edição. São Paulo: Pini, 2002.

HACHICH, Waldemar(Ed.) et al. **Fundações: teoria e prática**. 2 ed. São Paulo: PINI, 1998. 751 p.

HEINECK, K. S. **Estudo da Influência de cimentações introduzidas sob tensão**. 1998. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 1998.

IBEIRO, L. S. **Estudo da distribuição dimensional de poros e da condutividade hidráulica de solos arenosos compactados tratados com cal e cimento**. 2016. 173 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2012.

JANZ, M. and JOHANSSON, S. E. **The function of different binding agents in deep stabilization**. Sweedish Deep Stabilization Research Centre, Report 9, Linkoping, Sweeden, p. 47, 2002.

LOPES JUNIOR., Luizmar da Silva. **Parâmetros de Controle de Resistência Mecânica de Solos Tradados com Cal, Cimento E Rocha Basáltica Pulverizada**. 2007. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2007.

LOPES JUNIOR., Luizmar da Silva. **Metodologia De Previsão Do Comportamento Mecânico De Solos Tratados Com Cal**. 2011. 226 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2011.

LUNA, F. J. ; SCHUCHARDT, U. Argilas pilarizadas - Uma Introdução. **Química Nova**, v. 22, n.1, p. 104 - 109, 1999,

MARÍN, E. J. B. **Estudo de campo e laboratório do comportamento mecânico de um solo sufaltado estabilizado com cal**. 2017. 177 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2017.

MARCON, A. F. **Durabilidade e módulo de elasticidade de misturas areia-cal- cinza volante**. 1977. 130 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 1977.

MARQUES, S. F. V. **Comportamento de uma Areia Artificialmente Cimentada até Altas Tensões de Confinamento**. 2016. 238 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2016.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.

NICHOLSON, P. G. **Soil improvement and ground modification methods**. Elsevier, 2015.

NÚÑEZ, W. P. **Estabilização físico-química de um solo residual de Arenito Botucatu**

visando seu emprego na pavimentação. 1991. 145 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 1991.

PALMEIRA, E. M. **Geossintéticos: tipos e evolução nos últimos anos.** In: SEMINÁRIO SOBRE APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS EM GEOTECNIA. Geossintéticos 92... Brasília, p.1-20, 1992.

PEDROSO, C. D. V. **Estudo sobre melhoramento da capacidade de suporte de solos com misturas com cal submetidos a esforços de tração.** 2015. 136 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia) - Instituto Lactec, Curitiba, 2015.

PRIETTO, P. D. M. **Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Artificialmente Cimentado.** 1996. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 1996.

ROSA, D. A. **Validação Da Relação Vazios/Cimento Na Estimativa Da Resistência À Compressão Simples Do Caulim Artificialmente Cimentado.** 2010. 79 p. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil), UFRGS, Porto Alegre, 2010.

ROJAS, J. W..J. **Estudo da resitência, condutividade hidráulica e lixiviação de um solo argiloso cimentado e contaminando.** 2012. 193 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2012.

SAMANIEGO, R. AL. Q. **Estabilização de um solo dispersivo com adição de cal.** 2015. 172p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2015.

SILVA, C. Z. et al. Umidade ótima de compactação de solo-cimento para diferentes traços. In: **XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Contruído.** 2010. p. 9. Acesso em: <<http://www.infohab.org.br/entac2014/2010/arquivos/295.pdf>>.

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

SOUSA PINTO, C. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** 3a Edição, São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

THOMÉ, A. Melhoramento de Solos com Uso de Resíduos Industrpais: a experiência brasileira. In: **Anais 2008 ABMS XIV Congresso Brasileiro de Mecânoca dos Solos e Engenharia Geossintética.**

THOMÉ, A., DONATO, M.; CONSOLI, N. C.; GRAHAM, J. Circular Footings on a Cemented Layer Above Weak Foundation Soil. **Canadian Geotechnical Journal**, 2005.

VELÁZQUEZ, L. E. G. **A Influência da Umidade de Compactação na Durabilidade, Rigidez e Resistência de um Solo Fino Artificialmente Cimentado.** 2016, 113 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2016.

VENDRUSCOLO, M. A. **Análise numérica e experimental do comportamento de fundações superficiais assentes em solo melhorado.** 1996. 141 p. Dissertação (Mestrado em

Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 1996.

ZAMPIERI, L. Q. **Comportamento Mecânico de um Solo Mole Orgânico Cimentado com Aglomerantes Variados**. 2015. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2015.

WERK, S. M. S. DE. **Estudo da influência dos métodos de compactação no comportamento resiliente de solos**. 2000. 103 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2000.