

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LUAN TEIXEIRA ALVARENGA

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURA DE UM
SOLO ARENOSO COM RESÍDUOS PROVENIENTES DA CONSTRUÇÃO CIVIL
EM DIFERENTES PROPORÇÕES**

Alegrete

2019

LUAN TEIXEIRA ALVARENGA

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURA DE UM SOLO ARENOSO COM RESÍDUOS PROVENIENTES DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM DIFERENTES PROPORÇÕES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. D.Sc. Diego Arthur Hartmann

Alegrete

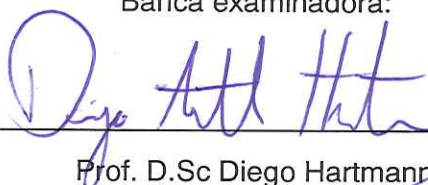
2019

LUAN TEIXEIRA ALVARENGA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Civil da Universidade Federal do Pampa,
como requisito parcial para obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em:

Banca examinadora:



Prof. D.Sc. Diego Hartmann
Orientador
UNIPAMPA



Prof. D.Sc. Jaelson Budny
Banca
UNIPAMPA



Prof. Me. Maurício Silveira dos Santos
Banca
UNIPAMPA

Dedico este trabalho...

... Aos meus pais, Marcelo e Rosangela por todo o incentivo dado ao longo da graduação, o pelo apoio necessário para que essa conquista pudesse se realizar.

“O TODO é MENTE; O Universo é Mental”

- O Caibalion

Resumo

A construção civil é um dos ramos de atividades mais crescentes no mundo, com isso uma das consequências é o aumento da produção de resíduos de construção e demolição (RCD), gerados por esta atividade. Esses resíduos, muitas vezes, são descartados de maneira inadequada, gerando danos a natureza e a sociedade. Com isso, tem-se procurado alternativas que busquem a reutilização desses materiais dentro da própria construção civil, seja como alternativa a utilização de outros materiais, como por exemplo quando substituem os agregados para produção de concreto ou asfalto, ou como reforços de solos para fundações, taludes e bases de pavimentos. O presente trabalho tem por objetivo a análise do comportamento do solo reforçado com diferentes teores de resíduos, cimentícios e cerâmicos, de acordo com a sua constituição, através da realização de ensaios de compactação e compressão simples, de modo que se obtenha parâmetros comparativos entre o solo natural e as misturas realizadas. Foram realizadas amostras de solos com resíduos em proporções de 10%, 30% e 50%, com materiais passantes na peneira de 4,8 mm, de modo que as comparações pudessem ser melhor realizadas. A partir da análise dos resultados foi possível verificar quais os efeitos causados pela adição dos resíduos ao solo natural, e quais os principais parâmetros que influenciam nesses resultados. Foi possível verificar a influência da absorção de água dos materiais para os resultados encontrados, uma vez que quanto maior a quantidade de resíduos, maior o tempo necessário para que a água seja absorvida de maneira satisfatória. Foi possível verificar ainda que o acréscimo de 10% de resíduos cerâmicos gera um aumento de 32,62% da resistência a compressão simples em relação ao solo natural.

Palavras-chave: Resíduos de construção, solo reforçado, RCD, compressão simples, reciclagem.

Abstract

Civil construction is one of the fastest growing branches in the world, with one consequence being the increase in the production of construction and demolition waste (RCD) generated by this activity. These wastes are often disposed of inappropriately, damaging nature and society. Thus, alternatives have been sought that seek to reuse these materials within the civil construction itself, or as an alternative to the use of other materials, such as when replacing aggregates for the production of concrete or asphalt, or as reinforcement of soils for foundations, slopes and floor bases. The present work has the objective of analyzing the behavior of the soil reinforced with different contents of residues, cement and ceramics, according to its constitution, by means of compaction and simple compression tests, in order to obtain comparative parameters between the natural soil and the mixtures made. Soil samples with 10%, 30% and 50% ratios of residuals were carried out with materials passing through the sieve of 4.8 mm, so that the comparisons could be better performed. From the analysis of the results it was possible to verify the effects caused by the addition of the residues to the natural soil, and what are the main parameters that influence these results. It was possible to verify the influence of the water absorption of the materials for the results found, since the larger the amount of residues, the greater the time required for the water to be absorbed satisfactorily. It was also possible to verify that the increase of 10% of ceramic residues generates a 32.62% increase of the resistance to simple compression in relation to the natural soil.

Keywords: Construction waste, reinforced soil, RCD, simple compression, recycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estimativa de produção de resíduos em diferentes países.....	19
Figura 2 - Produção nacional de RCD (tx 1000/ano).....	20
Figura 3 - Composição dos resíduos.....	21
Figura 4 - Fluxograma de pesquisa.....	27
Figura 5 - Localização dos resíduos.....	28
Figura 6 – Resíduos cimentícios britados e separados para realização das amostras	29
Figura 7 - Localização da jazida.....	30
Figura 8 - Coleta do solo: (A) Coleta do solo com auxílio de pá; (B) Secagem prévia até umidade higroscópica.....	32
Figura 9 - Determinação da granulometria do solo: (A) Aparelho de dispersão;(B) Ensaio de sedimentação.....	33
Figura 10 - Granulometria do solo.....	34
Figura 11 - Determinação da massa específica dos materiais.....	35
Figura 12 - Ensaio de compactação: (A) Amostras antes da mistura; (B) Amostras homogeneizadas; (C) Amostras com determinado teor de umidade para ensaio de compactação; (D) Amostra após ensaio de compactação.....	36
Figura 13 - Acondicionamento do solo antes da realização da moldagem dos CPs.....	38
Figura 14 - Macaco de ar comprimido utilizado para moldagem dos CPs.....	38
Figura 15 - CPs acondicionados em papel filme aguardando a realização dos ensaios de compressão simples.....	39
Figura 16 – Corpo de prova montado na prensa.....	41
Figura 17 - CPs após rompimento.....	41
Figura 18 - Curva de compactação do solo natural.....	42
Figura 19 - Umidade ótima e massa específica seca para a mistura de solo + resíduos cimentícios.....	43
Figura 20 - Umidade ótima e massa específica seca para a mistura de solo + resíduos cerâmicos.....	44
Figura 21 - Umidade ótima e massa específica seca para a mistura de solo + resíduos cimentícios + resíduos cerâmicos.....	45
Figura 22 - Resistência à compressão simples das amostras.....	47
Figura 23 - Gráfico de tensão x deformação.....	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Definições das amostras de solo + RCD	31
Quadro 2 - Composição das amostras de Solo + RCD.....	31
Quadro 3 – Caracterização do solo	33
Quadro 4 - Massa específica dos materiais	35
Quadro 5 - Massa de solo necessária para cada CP	37
Quadro 6 - Resultados da resistência a compressão simples	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CD – Consolidado Drenado

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

EPI – Equipamento de proteção individual

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

IP – Índice de Plasticidade

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

NBR – Norma Brasileira

PET - Poli Tereftalato de Etila

RCD – Resíduo de Construção e Demolição

σ – Tensão Normal (kPa)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos específicos.....	14
2 REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 Resíduos de construção e demolição (RCD)	16
2.1.1 Relação entre racionalização e geração de RCD.....	17
2.1.2 Importância da logística reversa.....	18
2.1.3 Geração de resíduos da construção civil.....	19
2.1.4 Composição gravimétrica do RCD.....	20
2.1.5 Legislação referente a geração de resíduos no Brasil.....	21
2.1.6 Classificação dos Resíduos	22
2.1.7 Classificação dos Resíduos na construção civil.....	24
2.1.8 Possíveis aplicações dos resíduos reciclados na construção civil	24
2.1.8.1 Agregados para produção de concreto.....	25
2.1.8.2 Agregados de RCD em misturas asfálticas	25
2.1.8.3 RCD utilizado como reforço de solo.....	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 Programa Experimental	27
3.2 Materiais.....	28
3.2.1 Resíduos de Construção e Demolição	28
3.2.3 Água	30
3.3 Proporção granulométrica.....	31
3.4 Métodos.....	32
3.4.1 Coleta e preparação do solo	32
3.4.2 Caracterização do solo	33
3.4.3 Determinação da massa específica dos materiais	34
3.4.4 Ensaio de compactação.....	36
3.4.6 Ensaio de resistência a compressão simples	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
4.1 Ensaio de compactação.....	42
4.2 Resistência a compressão	46

4.2.1 Análise dos resultados de resistência a compressão para as amostras de solo + RCD cimentício	47
4.2.3 Análise dos resultados de resistência a compressão para as amostras de solo + RCD cimentício + RCD cerâmico	49
4.3 Diagrama de tensão e deformação das misturas	50
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES	52
5.1 Considerações finais	52
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	53
REFERÊNCIAS.....	54
ANEXOS	59

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos ramos de atividade que mais colaboram com o desenvolvimento do país. Grande parcela da população, sobretudo a parcela com menos escolaridade, tem sua renda direta ou indiretamente influenciada pelo setor. Entretanto, diversos fatores, dentre os quais a grande disparidade de materiais e métodos utilizados durante os processos construtivos, colaboram para que a construção civil seja um dos maiores causadores de impactos negativos ao meio ambiente. Grande parte desses impactos são causados em consequência da inadequada destinação dos resíduos de construção e demolição (RCD) gerados ao longo do processo construtivo. Em geral, esses resíduos apresentam um grande potencial reciclável, tendo capacidade de serem reutilizados dentro ou fora da cadeia produtiva onde foram gerados, diminuindo assim a necessidade, de exploração das reservas minerais.

A geração de resíduos durante a construção ou reforma de edificações pode ocorrer por diversos fatores, dentre os quais a falta de racionalização do canteiro de obras, e a busca exclusiva por geração de lucros. Em um mundo cada vez mais preocupado com a sustentabilidade, tem-se, gradativamente, buscado maneiras de se reutilizar os resíduos gerados durante o processo construtivo. Para isso, o gerenciamento correto desses resíduos deve ser realizado, garantindo assim uma correta reutilização de materiais recicláveis, e uma destinação final adequada de materiais.

Uma das possíveis aplicações para reutilização de materiais provenientes de demolições, é a mistura de agregados reciclados com solos naturais. Essa mistura solo-agregado busca elevar parâmetros de resistência do solo, buscando possíveis aplicações em obras de engenharia, como melhoramento de bases e sub-bases de revestimentos asfálticos, estabilidade de taludes, fundações, misturas asfálticas, agregados para concreto, dentre outras diversas aplicações.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho consiste no estudo da estabilização do solo do município de Alegrete - RS com adição de resíduo de construção e demolição.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar a influência da adição de RCD na compactação do solo, avaliando os parâmetros de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo;
- Avaliar a resistência a compressão simples da mistura solo-RCD com diferentes teores de adição de RCD.

1.2 Justificativa

Aumento da quantidade de resíduos gerados pela indústria da construção civil é significativo ao longo dos anos em todo o mundo. Grande parte desses resíduos acaba tendo destinação inadequada, causando impactos ambientais e não sendo um fator favorável a uma indústria cada vez mais voltada a sustentabilidade.

Uma das possíveis formas de se resolver esse problema, é a reutilização de materiais gerados, dentro da própria indústria de construção civil, através do reaproveitamento de materiais com potencial reciclável. Dentro desta possibilidade, estudos estão sendo realizados para realização de reforço de solos com resíduos de construção. Essa solução busca além de dar correta destinação aos resíduos, diminuição da exploração de recursos naturais, e por consequência aumento do nível de desenvolvimento sustentável da indústria.

1.3 Estrutura do trabalho

- **Capítulo 1** – Introdução ao tema, objetivos gerais e específicos e justificativa do trabalho;
- **Capítulo 2** – Revisão da literatura;
- **Capítulo 3** – Materiais e métodos utilizados;

- **Capítulo 4** – Resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, apresentando comparação entre os parâmetros mecânicos entre o solo natural e as misturas realizadas;
- **Capítulo 5** – Conclusões obtidas no estudo e sugestões para trabalhos futuros;
- **Capítulo 6** – Referências bibliográficas utilizadas na pesquisa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo será apresentada a revisão de literatura, onde serão descritos os tipos e composições dos resíduos de construção e demolição, causas do aumento gradativo da geração de resíduos e possíveis destinações dentro da própria engenharia civil dos materiais com potencial reciclável.

2.1 Resíduos de construção e demolição (RCD)

Segundo Santos (2007), no Brasil, grande parte das cidades não dispõe de áreas para destinação final dos resíduos gerados, entretanto, devido ao fato desses serem produtos altamente recicláveis, são necessários estudos que ofereçam soluções para essa problemática, de modo a possibilitar maior economia, e melhor reaproveitamento de materiais, gerando assim ganhos financeiros e menores níveis de agressão ao meio ambiente.

Karpinsk (2009) destaca ainda que dado à falta de local adequado para depósito de materiais provenientes de demolições, principalmente nos grandes centros urbanos, devido ao volume gerado e a escassez de áreas, isso acaba ocasionando transtornos à população, além da necessidade de investimentos elevados para readequação conforme legislação vigente.

Devido as técnicas e metodologias de controle de qualidade no processo produtivo serem ainda recentes e pouco aplicadas, aliando a isso o fato de os materiais aplicados na indústria de construção civil serem compostos por diferentes materiais e propriedades, não se pode generalizar esse material, mas sim, classificá-lo de maneira correta (KARPINSK, 2009)

Segundo a Resolução nº 307 do Conselho Nacional de meio ambiente (BRASIL, 2002), responsável por estabelecer diretrizes e critérios para gestão de resíduos sólidos de construção da construção civil, a definição de RCD se refere a todo material produzido em construções, reparos ou demolições, resultante dos processos construtivos dessas obras. Nessa definição, engloba-se materiais como: metais, blocos de alvenaria, vidros, madeira, cerâmica, argamassa, materiais elétricos e hidráulicos.

2.1.1 Relação entre racionalização e geração de RCD

A geração de resíduos durante a execução de uma obra, está diretamente relacionada ao processo de racionalização dos processos construtivos. O desenvolvimento dos processos, métodos e sistemas que levam a racionalização está relacionado a fatores cruciais, como: Desenvolvimento tecnológico, recursos disponíveis e metodologia adequada (SABBATINI, 1987).

Sabbatini (1987) ainda destaca que não existe no Brasil uma cultura que promova a melhoria da eficácia dos processos construtivos, o que seria responsável por um desenvolvimento mais eficaz e racional. O que existe são interesses desorganizados em economia de materiais, e falta de investimento no melhoramento dos métodos construtivos e aprimoramento de mão de obra.

Quanto mais bem planejada uma obra, mais eficaz ela se torna, reduzindo assim os custos oriundos das perdas de materiais, além do tempo empregado por cada profissional para execução do serviço. Quanto menos racionalizada uma obra, maior a sua produção de resíduos.

Para Callegari (2007), a deficiente compatibilização entre os diferentes projetos desenvolvidos para concepção de uma estrutura está diretamente ligada a maximização dos resíduos gerados durante o processo executivo. O ajuste correto entre os projetos, acarreta a simplificação da execução, correta utilização de materiais, e conseqüente minimização da necessidade de retrabalho no canteiro de obras.

Segundo Cabral e Moreira (2011), a introdução de técnicas simples e não onerosas durante o processo construtivo, é o suficiente para ocasionar diminuição na geração de RCD. Algumas das técnicas citadas são:

- Produção de argamassa de forma controlada, produzindo apenas o que for utilizado por dia, a partir de análise prévia;
- Armazenamento de materiais como blocos e telhas em pilhas de igual quantidade, sobre paletes para evitar ação da umidade e quebra durante transporte e armazenamento;
- Armazenamento de cimento em local arejado, protegido de sol, chuva e umidade;
- Modulação correta dos projetos, para evitar, por exemplo, cortes desnecessários em placas cerâmicas;

- Definição do layout da obra, escolhendo local apropriado para central de concreto, evitando que os operários percorram grandes distâncias com os materiais.

2.1.2 Importância da logística reversa

Devido a necessidade crescente de se produzir bens e serviços que não afetem negativamente o meio ambiente, políticas cada vez mais voltadas para a reutilização de materiais antes descartados estão sendo aderidas. A logística reversa busca pela evolução capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem que ocorra o comprometimento de recursos para suprir as necessidades das gerações futuras.

Para Marcondes (2007), a implantação de uma logística reversa na construção civil é a oportunidade de desenvolvimento de uma sistematização dos resíduos gerados, e o seu aproveitamento dentro ou fora da cadeia que a originou, proporcionando assim economia das reservas minerais, e conseqüente respeito ao meio ambiente.

Um dos problemas a serem enfrentados para uma possível implantação de logísticas reversas, é a baixa capacitação dos profissionais de construção. Para Marcondes (2007), existe a necessidade das empresas dispostas a integrar suas atividades no sistema, em capacitar seus funcionários, para que eles possam ser capazes de serem eficientes nas atividades desenvolvidas.

Luchezzi (2014) defende que o desenvolvimento de logísticas reversas dentro de uma empresa pode ser a longo prazo uma forma de aumento da lucratividade, com ganho de novos mercados, privando pelo investimento em materiais reciclados e minimizando a necessidade de investimento na compra e transporte de materiais.

Existe ainda, a possibilidade de se desenvolverem atividades secundárias dentro de uma obra, como a implantação de mini-usinas de reciclagem no canteiro de obras, para que o material possa ser reciclado e reutilizado sem que haja necessidade de grandes gastos com transportes (LUCHEZZI, 2014).

Entretanto, para que esses sistemas possam de fato ser considerados ecológicos, deve-se tomar cuidado para que a qualidade dos materiais gerados a partir da reciclagem dos resíduos, apresente eficiente durabilidade, incentivando assim a verdadeira redução desses resíduos, e não o aumento do consumo (CARVALHO, 2015).

2.1.3 Geração de resíduos da construção civil

Segundo o IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada), estima-se que anualmente sejam gerados 0,5 toneladas de resíduo de construção por habitantes no Brasil. Entretanto uma análise estimativa mais condizente com a realidade em relação a produção é difícil de ser realizada, devido a fatores como a falta de participação de municípios em pesquisas, ou as diferentes metodologias utilizadas para o levantamento dos dados. De maneira geral, não existe uma forma padronizada de se estimar a geração de resíduos no país.

Para uma análise estimativa, é importante a comparação de dados entre a produção nacional de resíduos em relação a outros países. A Figura 1, mostra uma estimativa da produção de resíduos em diferentes países.

Figura 1 - Estimativa de produção de resíduos em diferentes países

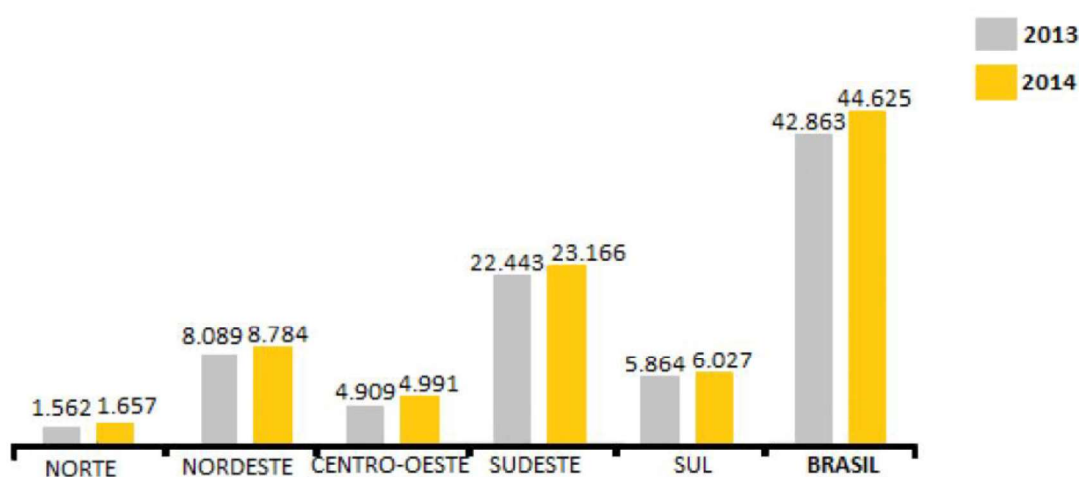
País	Quantidade anual		Fonte
	Em milhões t/ano	Em kg/habitante/ano	
Suécia	1,2 - 6	136 - 680	Tolstoy, Borklund e Carlson (1998) e EU (1999)
Holanda	12,8 - 20,2	820 - 1.300	Lauritzen (1998), Brossink, Brouwers e Van Kessel (1996) e EU (1999)
Estados Unidos	136 - 171	463 - 584	EPA (1998), Peng, Grosskopf e Kibert (1994)
Reino Unido	50 - 70	880 - 1.120	Detr (1998) e Lauritzen (1998)
Bélgica	7,5 - 34,7	735 - 3.359	
Dinamarca	2,3 - 10,7	440 - 2.010	Lauritzen (1998) e EU (1999)
Itália	35 - 40	600 - 690	
Alemanha	79 - 300	963 - 3.658	
Japão	99	785	Kasai (1998)
Portugal	3,2 - 4,4	325 - 447	EU (1999) e Ruivo e Velga (<i>apud</i> Marques Neto, 2009)
Brasil	31	230 - 760	Abrelpe (2011), Pinto (1999), Carneiro et al. (2001) e Pinto e González (2005)

Fonte: IPEA

É importante ressaltar em relação a Tabela 1, que existe uma dificuldade para realização de comparações entre a produção nos diferentes países verificados, devido a variação das datas das pesquisas. Outro ponto que deve ser levado em consideração, é o momento da economia e política desses países no período de realização dessas pesquisas, o que pode influenciar na alteração dos dados apurados (IPEA, 2012).

A Figura 2 mostra a variação da produção brasileira de RCD nos anos de 2013 e 2014, distribuído por regiões.

Figura 2 - Produção nacional de RCD (tx 1000/ano)



Fonte: ABRELPE (2013, p.33)

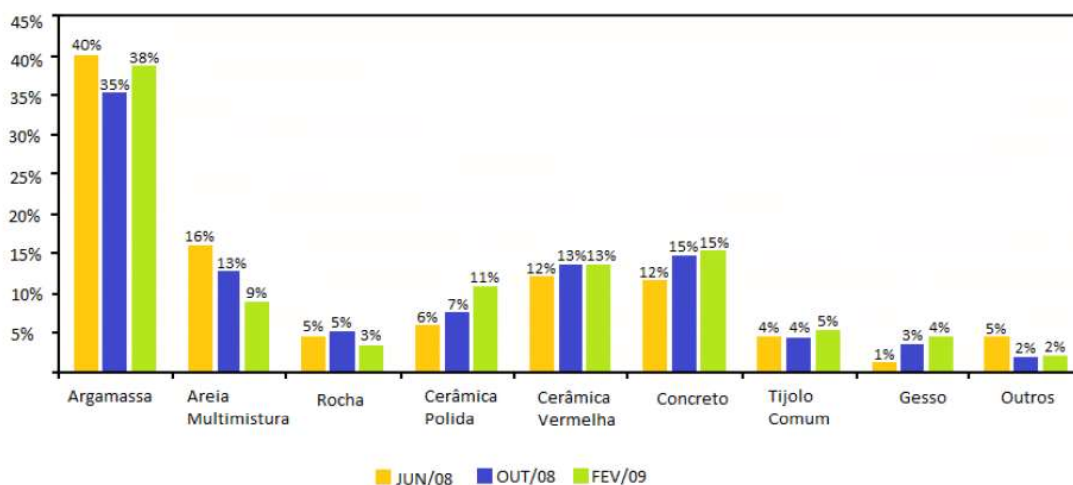
2.1.4 Composição gravimétrica do RCD

A composição gravimétrica é a distribuição percentual dos diferentes tipos de materiais que compõe uma determinada amostra de resíduo. Em resíduos de construção e demolição, podem existir diferentes composições de materiais, sendo as mais comuns, materiais cimentícios, cerâmicos, vidros, madeira, metal, dentre outros.

Para Pasquali (2012), a determinação do percentual de materiais presentes em amostras de resíduos, aumentaria o controle dos sistemas de gerenciamento dos mesmos, uma vez que projetos de coleta seletiva poderiam ser mais bem embasados de acordo com os resultados.

Oliveira et al. (2011), realizou pesquisa sobre a composição dos resíduos de construção e demolição na cidade de Salvador - BA. Os resultados podem ser verificados na Figura 3.

Figura 3 - Composição dos resíduos



Fonte: Oliveira et al (2011)

2.1.5 Legislação referente a geração de resíduos no Brasil

No Brasil, inúmeras leis e resoluções foram criados nas últimas décadas para se obter um melhor gerenciamento dos resíduos gerados. Pode-se citar a Lei Federal 12.305, que estabeleceu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, definindo prazo de 4 anos para que todas as cidades brasileiras desenvolvessem um plano para readequação as exigências da legislação vigente, tornando passível de multa a disposição incorreta dos resíduos gerados ao meio ambiente. Outra lei relacionada ao assunto é a resolução do CONAMA nº 307, que

estabeleceu critérios e diretrizes para a gestão de resíduos sólidos de construção. Com essa resolução, foram criados parâmetros de classificação dos tipos de resíduos, de acordo com as diferentes categorias. A Resolução CONAMA 348 serviu como complemento a Resolução 307 incluindo o amianto como resíduo perigoso. A Resolução CONAMA 275 estabelece diferentes tipos de cores de acordo com a classe de resíduos a serem coletados, para facilitar a identificação por coletores, além de auxiliar em campanhas informativas.

Cabral e Moreira (2011) destacam ainda que a utilização de RCD na engenharia civil é regida por diversas normas técnicas da ABNT. A norma NBR 15.112 trata das diretrizes para projeto, implantação e operação de resíduos da construção civil, as normas NBR 15.113 e NBR 15.114 tratam de projetos de aterros e áreas de reciclagem, estabelecendo as principais diretrizes necessárias para execução de projeto, implantação e operação. As normas NBR 15.115 e NBR 15.116 abordam ainda a utilização de resíduos como componentes em camadas de pavimentação e utilização de resíduo como material para preparo de concreto não estrutural.

2.1.6 Classificação dos Resíduos

Segundo a NBR 10004 (2004), a classificação dos resíduos é feita a partir da análise dos seus constituintes, e da sua destinação original. Os resíduos são classificados nas seguintes classes:

2.1.6.1 Resíduos Classe I – Perigosos

Resíduos que apresentem em sua composição materiais com características perigosas, tais como: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. São exemplos de resíduos perigosos:

- Restos de tintas;
- Produtos hospitalares;
- Lâmpadas fluorescentes;
- Pilhas e baterias;
- Produtos químicos.

A resolução nº 348 do CONAMA (BRASIL, 2004), inclui ainda o Amianto, utilizado em materiais como cabos, moveis, canalizações, isolamentos, telhas e reservatórios, na classe de resíduos perigosos, devido ao seu potencial cancerígeno.

2.1.6.2 Resíduos Classe II – Não perigosos

Resíduos que não estão enquadrados como resíduos de Classe 1. São exemplos de resíduos classificados como não perigosos, segundo a NBR 10004 (2004):

- Restos de alimentos;
- Sucata de metais ferrosos;
- Sucata de metais não ferrosos;
- Resíduos de papel e papelão;
- Resíduos de plástico polimerizado.
- Resíduos de borracha;
- Resíduos de madeira;
- Resíduos de materiais têxteis;
- Resíduos de minerais não-metálicos;
- Areia de fundição.

2.1.6.3 Resíduos Classe II A – Não inertes

São os tipos de resíduos que não apresentam capacidade de contaminação de solo e água, entretanto são grandes poluidores do meio ambiente. São exemplos de resíduos não inertes:

- Garrafas PETs;
- Plásticos;
- Lodo proveniente de filtros;
- Poliuretano;
- Gessos;
- Lixas;
- Discos de corte;
- Equipamentos de proteção individual (EPIs);
- Limalhas de ferro.

2.1.6.4 Resíduos Classe II B – Inertes

Resíduos que quando em contato com água, não apresentam mudanças em duas propriedades, não apresentando solubilidade ou combustibilidade. São exemplos de resíduos inertes:

- Entulhos de demolição;
- Pedras;
- Areias;
- Sucatas de ferro;

- Madeira;
- Vidros;
- Latas;
- Borrachas.

2.1.7 Classificação dos Resíduos na construção civil

A resolução 307 do CONAMA (BRASIL, 2002) classifica os resíduos provenientes da construção civil em 4 classes, sendo elas:

I - Classe A: Materiais que podem ser reutilizados como agregados, subdivididos segundo a sua procedência em:

a) Obras de pavimentação e obras de infraestrutura, incluindo solos oriundos de terraplanagem;

b) Obras de edificações: Blocos cerâmicos, pisos, concreto, argamassa, telhas, etc;

c) Do processo de fabricação de peças pré-moldadas produzidos no canteiro de obras, tais como blocos, meios-fios, tubos, etc.

II - Classe B: Resíduos que podem ser reciclados para outras destinações, como: Plástico, papel, papelão, vidro, metal, madeira etc;

III - Classe C: Produtos que ainda não foram desenvolvidas tecnologias economicamente viáveis que permitam a sua reutilização;

IV – Classe D: Resíduos oriundos do processo de construção, que podem apresentar perigo ou contaminação, tais como tintas, solventes etc.

2.1.8 Possíveis aplicações dos resíduos reciclados na construção civil

Estudos realizados tendo como base a reutilização de materiais provenientes de demolições estão sendo realizados em várias áreas da engenharia. Desde a construção civil, através da reutilização de materiais agregados para produção de concreto e tijolos, passando pela área de pavimentação, utilizando agregados para produção de misturas asfálticas, além da combinação de misturas solo-agregado para aumento da resistência de solos de base e sub-base de pavimentos, estabilidade de taludes e aterros, dentre outros.

2.1.8.1 Agregados para produção de concreto

Uma das possíveis destinações dos resíduos provenientes da construção civil é o emprego em substituição a agregados minerais. Zordan (1997) concluiu em pesquisa realizada, que existe a possibilidade do emprego desse tipo de material para produção de concreto não estrutural, apresentando em média 49%, 62% e 93% da resistência do concreto de referência, que utilizou areia e brita como agregados, e traços 1:3, 1:5 e 1:7 respectivamente.

Ainda, Zordan (1997) salienta que se houvesse controle dos materiais reciclados que vão para britagem, evitando materiais de qualidades inferiores, os valores de resistência obtidos poderiam ser ainda maiores, com resultados mais satisfatórios que os obtidos.

Souza (2006) expressa que a substituição de 25% de areia comum por material reciclado britado não afeta significativamente a massa específica do concreto estrutural, e conseqüentemente a sua resistência mecânica aos 28 dias. Em relação a resistência a abrasão o percentual aumenta para 50% da possibilidade de substituição, sem que ocorra alterações significativas das propriedades.

2.1.8.2 Agregados de RCD em misturas asfálticas

A utilização de materiais agregados reciclados pode ser realizada também em misturas asfálticas, sobretudo em áreas com carência de agregados naturais, desde que observadas as relações custo-benefício devido a fatores como o potencial aumento do percentual de ligante na mistura e a distância média de transporte. O percentual maior de ligante utilizado se deve a elevada capacidade de absorção do RCD, e a irregularidades das partículas que tende a aumentar a superfície específica e conseqüentemente a quantidade de material ligante para cobrimento do material (FERNEY, 2014).

2.1.8.3 RCD utilizado como reforço de solo

Outra grande aplicação dos resíduos de construção em obras de engenharia é a utilização de agregados reciclados como reforço de solos para base e sub-base de pavimentação. Amorim (2013) destaca que a mistura solo-resíduo apresenta satisfatória capacidade de suporte através do ensaio de CBR. Ele destaca que quando

realizada mistura de resíduos de construção com solo laterítico, o resultado culmina em valores próximos ao apresentado pelo solo em seu estado puro, podendo o resultado desta pesquisa servir como embasamento técnico-científico para soluções alternativas em obras de pavimentação.

Ainda deve-se destacar a forte influência da energia de compactação utilizada para misturas de solos-resíduos. Leite (2007) destaca que desde que utilizada adequada energia de compactação, o material reciclado pode ser considerado apresentando as mesmas características que uma brita graduada, devido as propriedades mecânicas analisadas.

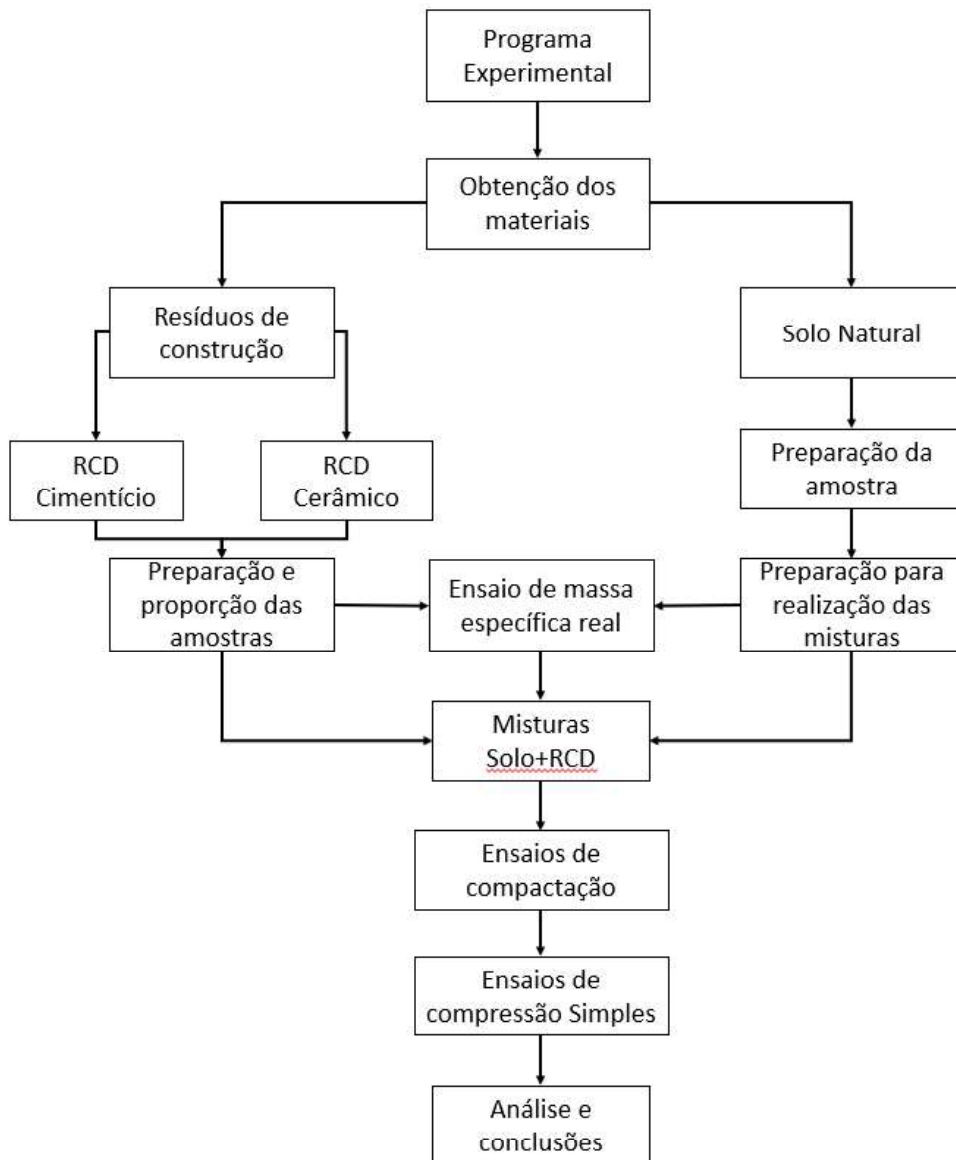
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados, de forma objetiva, os métodos e materiais que foram utilizados para realização dos procedimentos experimentais desta pesquisa.

3.1 Programa Experimental

O programa experimental foi dividido em diferentes etapas. Na Figura 4 pode ser observado o fluxograma de pesquisa realizado.

Figura 4 - Fluxograma de pesquisa



Fonte: Próprio autor

3.2 Materiais

Neste tópico são apresentados os materiais utilizados para elaboração dos procedimentos experimentais desta pesquisa. Nele são apresentados os tipos de solos e resíduos utilizados para misturas, além das normas e métodos utilizados para análise dos parâmetros necessários.

3.2.1 Resíduos de Construção e Demolição

Foram utilizados para elaboração dos procedimentos dessa pesquisa resíduos de Classe A, segundo definição da Resolução 307 do CONAMA (BRASIL, 2002). Os resíduos utilizados foram obtidos no canteiro de obras do novo prédio da Vara do Trabalho de Alegrete, localizado na Avenida Tiaraju, a 300 metros da UNIPAMPA Campus Alegrete, como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Localização dos resíduos



Fonte: Próprio autor

Foi previamente realizada segregação e limpeza dos resíduos coletados, a fim de se obter um material livre de detritos indesejáveis, tais como: vidros, papel, plástico, gesso, tubulações e fiações elétricas, matéria orgânica, dentre outros.

Os resíduos foram posteriormente separados em materiais cimentícios e cerâmicos, para realização das misturas. Após a separação, foi realizada a britagem,

a fim de se obter um material com granulometria mais fina, visto que para este estudo interessavam apenas os agregados passantes na peneira de 4,8 mm.

A Figura 6 mostra os materiais já separados, britados, livres de materiais indesejados, e prontos para a realização do peneiramento para posterior preparação das amostras.

Figura 6 – Resíduos cimentícios britados e separados para realização das amostras



Fonte: Próprio autor

3.2.2 Solo

O solo utilizado nesta pesquisa, foi extraído no interior do município de Alegrete-RS através de amostras representativas deformadas, garantindo parâmetros como peso específico aparente e umidade natural do solo. Foram garantidos os cuidados especiais necessários durante a extração, manuseio e transporte das amostras, para melhor análise das condições naturais do solo.

A jazida onde o solo foi extraído (Figura 7) pertence a empresa Pedra Rosada, especializada em materiais de construção para cidade de Alegrete e região oeste do estado do Rio Grande do Sul, fica localizada a uma distância de aproximadamente 6 Km da UNIPAMPA Campus Alegrete, com as coordenadas geográficas $29^{\circ}50'12.8''S$ $55^{\circ}46'26.8''W$.

Foram realizadas 4 retiradas de amostras ao longo da jazida, distantes em aproximadamente 50 metros, para melhor obtenção de uma amostra representativa mais condizente com o solo da região.

Figura 7 - Localização da jazida



Fonte: Google Maps, em 08/06/2018

3.2.3 Água

Foi utilizada água proveniente da rede de abastecimento da cidade de Alegrete/RS, para a produção dos corpos de prova e execução dos ensaios.

3.3 Proporção granulométrica

Foram produzidas amostras de misturas solo-resíduo, com as definições mostradas no Quadro 1. O Quadro 2 mostra a proporção das misturas realizadas.

Foram elaboradas 9 diferentes composições de misturas, com diferentes proporções entre solo natural e os resíduos de construção. Todo material foi previamente peneirado e apenas os materiais passantes na peneira de 4,8 mm foram utilizados para os ensaios realizados nesse estudo.

Quadro 1 – Definições das amostras de solo + RCD

Solo + RCD Cimentício	Solo natural + mistura de materiais como: resíduo de telhas de fibrocimento, rebocos, concretos, argamassas de assentamento e revestimento etc.
Solo + RCD Cerâmico	Solos natural + mistura de materiais como: telhas cerâmicas, tijolos vazados, tijolos maciços, pisos cerâmicos etc.
Solo + RCD Cimentício + RCD Cerâmico	Solo natural + mistura entre materiais cerâmicos e cimentícios

Fonte: Próprio autor

Quadro 2 - Composição das amostras de Solo + RCD

Tipo	Amostra	Solo natural	RCD - Cimentício	RCD - Cerâmico
Solo Natural	1	100%	-	-
Solo + RCD Cimentício	2	90%	10%	-
	3	70%	30%	-
	4	50%	50%	-
Solo + RCD Cerâmico	5	90%	-	10%
	6	70%	-	30%
	7	50%	-	50%
Solo + RCD Cimentício + RCD Cerâmico	8	90%	5%	5%
	9	70%	15%	15%
	10	50%	25%	25%

Fonte: Próprio autor

3.4 Métodos

Neste tópico são especificados, segundo pesquisa bibliográfica, os principais métodos e normas empregados para obtenção dos parâmetros e propriedades das amostras de solo analisadas.

Todos os ensaios para obtenção das propriedades das amostras foram realizados no Laboratório de Solos do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa – Campus Alegrete.

3.4.1 Coleta e preparação do solo

A quantidade de solo suficiente para realização dos ensaios foi preparada de acordo com a NBR 6457/2016, como mostra a Figura 8. As amostras foram coletadas de maneira indeformadas e acondicionadas para posterior secagem ao ar. Em sua umidade higroscópica o solo foi quarteado e passado na peneira de 4,8 mm para composição das misturas e posterior execução dos ensaios de compactação e compressão simples.

Figura 8 - Coleta do solo: (A) Coleta do solo com auxílio de pá; (B) Secagem prévia até umidade higroscópica



Fonte: Próprio autor

3.4.2 Caracterização do solo

Os estudos de caracterização do solo estudado foram realizados por Kanaan (2018) e foram utilizados como referência para esta pesquisa. As propriedades físicas dos solos são mostradas no Quadro 3. O Limite de Liquidez (LL) foi determinado através das especificações descritas na NBR 6459/2017. O Limite de Plasticidade (LP) foi determinado através dos procedimentos descritos na NBR 7180/2016.

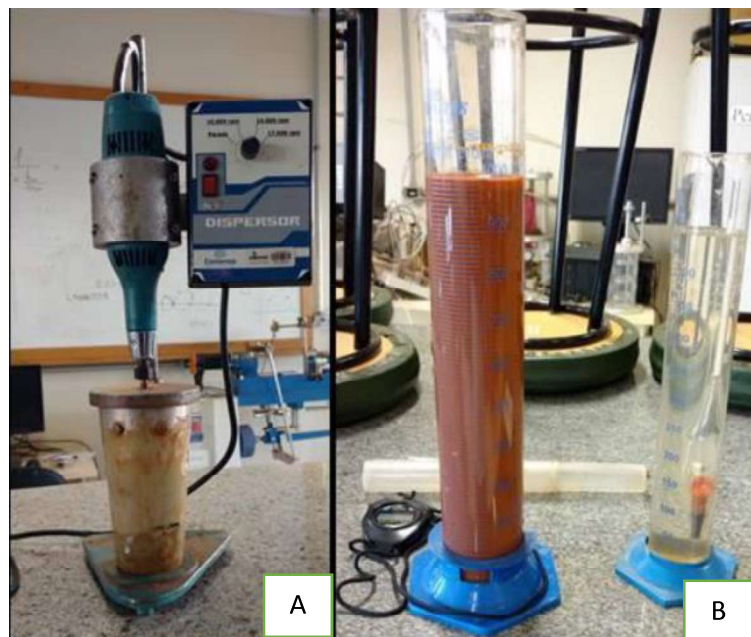
Quadro 3 – Caracterização do solo

Propriedades	Valores Médios
Limite de Liquidez (LL)	24%
Limite de Plasticidade (LP)	19%
Índice de Plasticidade (IP)	5%

Fonte: Kanaan (2018)

Kanaan (2018) definiu as granulometrias dos grãos das amostras analisadas por peneiramento através dos métodos especificados pela NBR 7181 (2016), que aponta o método de análise granulométrica do solo por peneiramento ou por uma combinação de sedimentação e peneiramento, sendo o método combinado tendo sido utilizado para essa determinação (Figura 9).

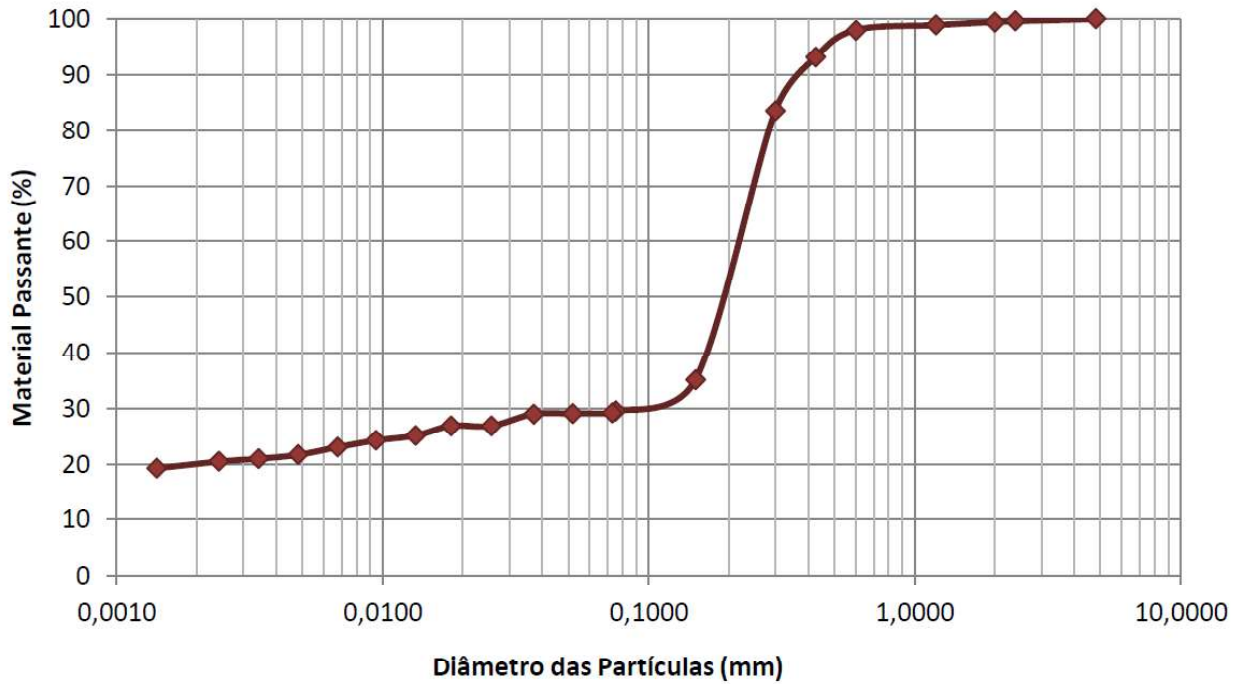
Figura 9 - Determinação da granulometria do solo: (A) Aparelho de dispersão;(B) Ensaio de sedimentação



Fonte: Kanaan (2018)

A Figura 10 apresenta a distribuição granulométrica do solo, descrito por Kanaan (2018) como arenoso laterítico com base na utilização de Metodologia MCT de classificação dos solos.

Figura 10 - Granulometria do solo



Fonte: Kanaan (2018)

3.4.3 Determinação da massa específica dos materiais

Foram realizados ensaios para determinação das massas específicas das amostras de resíduos utilizadas neste estudo (Figura 11), seguindo as indicações da NBR 6508 (1984). Foram executados 3 ensaios para cada amostra, a fim de se obter resultados mais confiáveis, foram considerados resultados satisfatórios quando não diferiram em $0,02 \text{ g/cm}^3$. O resultado foi considerado como a média aritmética entre os três ensaios realizados e estão mostrados no Quadro 4.

Figura 11 - Determinação da massa específica dos materiais



Fonte: Próprio autor

Quadro 4 - Massa específica dos materiais

Material	Resultado do ensaio (g/cm ³)		Massa específica real dos grãos (g/cm ³)
	1	2	
Solo Natural	2,94	2,92	2,93
RCD - Cimentício	2,50	2,48	2,49
RCD - Cerâmico	2,63	2,65	2,64

Fonte: Próprio autor

3.4.4 Ensaio de compactação

Para determinação de parâmetros como peso específico aparente seco, e umidade ótima das amostras de solo, foi realizado ensaio de compactação, segundo a NBR 7182/1986. A compactação foi realizada em 3 camadas, com energia normal, utilizando um cilindro pequeno com 26 golpes por camada. A umidade inicial foi estimada em 5% abaixo da umidade presumível do solo natural, inclusive para as misturas.

A Figura 12 mostra a preparação e procedimentos realizados durante a realização dos ensaios.

Figura 12 - Ensaio de compactação: (A) Amostras antes da mistura; (B) Amostras homogeneizadas; (C) Amostras com determinado teor de umidade para ensaio de compactação; (D) Amostra após ensaio de compactação.



Fonte: Próprio autor

3.4.5 Moldagem dos corpos de prova

Após os procedimentos descritos no item 3.3.4, foi possível se definir a massa de material necessário para se elaborar os Corpos de Prova (CPs) para os ensaios de compressão simples, de acordo com o seu peso específico seco e a sua umidade ótima. Foram produzidos CPs com dimensões de 11 cm de altura e 5 cm de diâmetro. As massas de solo e resíduos necessárias para cada mistura são mostradas no Quadro 5.

Quadro 5 - Massa de solo necessária para cada CP

	Amostra	Massa específica (g/cm³)	Massa de Solo de cada CP (g)
Solo Natural	1	1,82	392,11
Solo + RCD Cimentício	2	1,86	401,73
	3	1,82	393,09
	4	1,85	399,57
Solo + RCD Cerâmico	5	1,81	390,93
	6	1,75	377,97
	7	1,75	377,97
Solo + RCD Cimentício +Cerâmico	8	1,85	399,57
	9	1,86	401,73
	10	1,79	386,61

Fonte: Próprio autor

A quantidade de água necessária para se atingir a umidade ótima das misturas foi calculada levando-se em consideração a quantidade de água naturalmente existente, após secagem ao sol, em cada um dos materiais.

As misturas de materiais, bem como a aplicação de água para se atingir a umidade ótima, foi realizada no mínimo 1 dia antes da elaboração dos CPs, para que assim os materiais de diferentes propriedades pudessem ter uma melhor absorção de água. Nesse intervalo as misturas foram acondicionadas em sacos plásticos para que assim pudessem manter a umidade determinada (Figura 13).

Figura 13 - Acondicionamento do solo antes da realização da moldagem dos CPs



Fonte: Próprio autor

Para a compactação estática dos CPs foi utilizado o macaco de ar comprimido que se encontra no Laboratório de Geotécnica e Pavimentação da UNIPAMPA, mostrado na Figura 14. Salienta-se que foi optado pela compactação estática do solo, apesar da sua restrição a camadas superiores de solo quando realizada em campo, devido a maior facilidade e rapidez para produção das amostras.

Figura 14 - Macaco de ar comprimido utilizado para moldagem dos CPs



Fonte: Próprio autor

A Figura 15 mostra os CPs após moldagem, todos ficaram acondicionados por 7 dias até o ensaio de compressão simples, envolvidos em papel filme de modo que não perdessem a umidade ao longo dos dias, armazenados em local com temperatura controlada de 22°C.

Figura 15 - CPs acondicionados em papel filme aguardando a realização dos ensaios de compressão simples



Fonte: Próprio autor

3.4.6 Ensaio de resistência a compressão simples

A etapa final dos ensaios foi a execução do ensaio de compressão simples afim de se obter a resistência a compressão das amostras e se realizar a comparação entre elas. O ensaio é padronizado pela NBR 12770/92 e é considerado um método rápido e eficaz.

A Equação 1 apresenta o cálculo necessário para se obter a tensão de compressão do solo.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Sendo:

P = Carga na ruptura medida na prensa (N);

A = Área de contato do corpo de prova (m²);

A velocidade de aplicação da carga é controlada e padronizada.

A prensa utilizada para a realização do ensaio é da fabricante SHIMADZU, presente no Laboratório de Aerodinâmica e Transferência de Calor, da Universidade Federal do Pampa, e está apresentada na Figura 16. A velocidade de deslocamento é variável, sendo ajustada pelo programa operacional. Para esta pesquisa a velocidade de ensaio foi de 0,1mm/min, como indicado na NBR 12770/92.

A Figura 17 mostra os corpos de prova após a realização do ensaio de compressão

Figura 16 – Corpo de prova montado na prensa



Fonte: Próprio autor

Figura 17 - CPs após rompimento



Fonte: Próprio autor

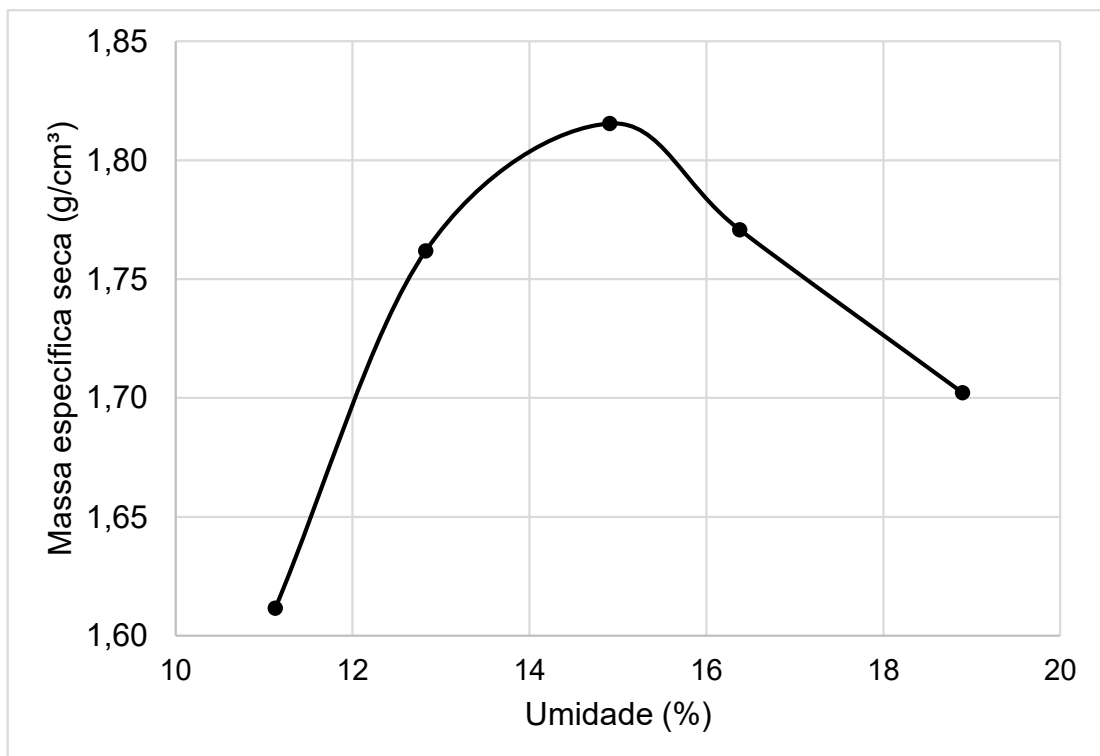
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos para os ensaios de compressão simples, avaliando a influência da mistura de resíduos nas diferentes proporções para os resultados obtidos.

4.1 Ensaio de compactação

A curva de compactação para o solo natural pode ser observada através da Figura 18. A umidade ótima encontrada foi de 14,9% e a massa específica aparente seca foi de 1,82 g/cm³.

Figura 18 - Curva de compactação do solo natural

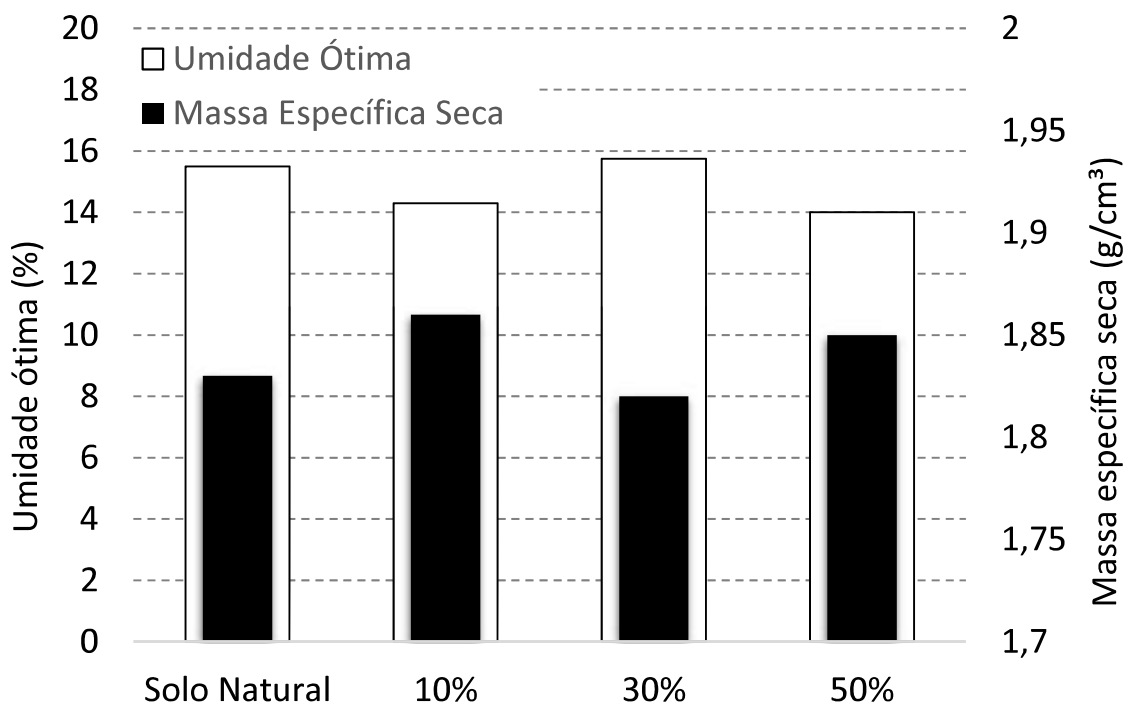


Fonte: Próprio autor

As curvas de compactação das misturas realizadas neste trabalho se encontram nos Anexos A, B e C.

A Figura 19 mostra os valores de umidade ótima e massa específica seca para as misturas de solo natural e resíduo cimentício nas proporções de 10%, 30% e 50% em comparação a curva de compactação do solo natural. Nota-se que não há diferenças significativas entre as umidades ótimas e a massa específica aparente seca entre as misturas. Percebe-se que há uma variação máxima de 1,75% entre as umidades encontradas e uma variação máxima de 0,04 g/cm³ da massa específica aparente seca entre as amostras.

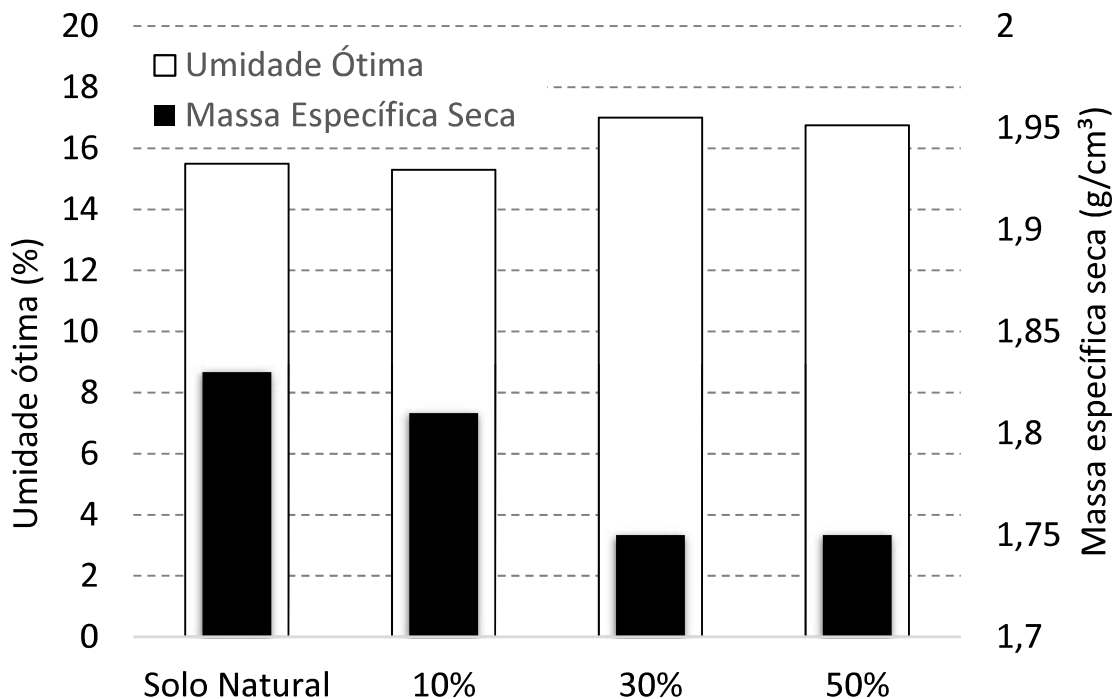
Figura 19 - Umidade ótima e massa específica seca para a mistura de solo + resíduos cimentícios



Fonte: Próprio autor

A Figura 20 mostra as comparações dos resultados obtidos para as misturas de solo natural e resíduo cerâmico nas proporções de 10%, 30% e 50% em comparação aos valores do solo natural. Há uma variação máxima de 1,70% entre as umidades encontradas e uma variação máxima de 0,08 g/cm³ da massa específica aparente seca entre as amostras.

Figura 20 - Umidade ótima e massa específica seca para a mistura de solo + resíduos cerâmicos

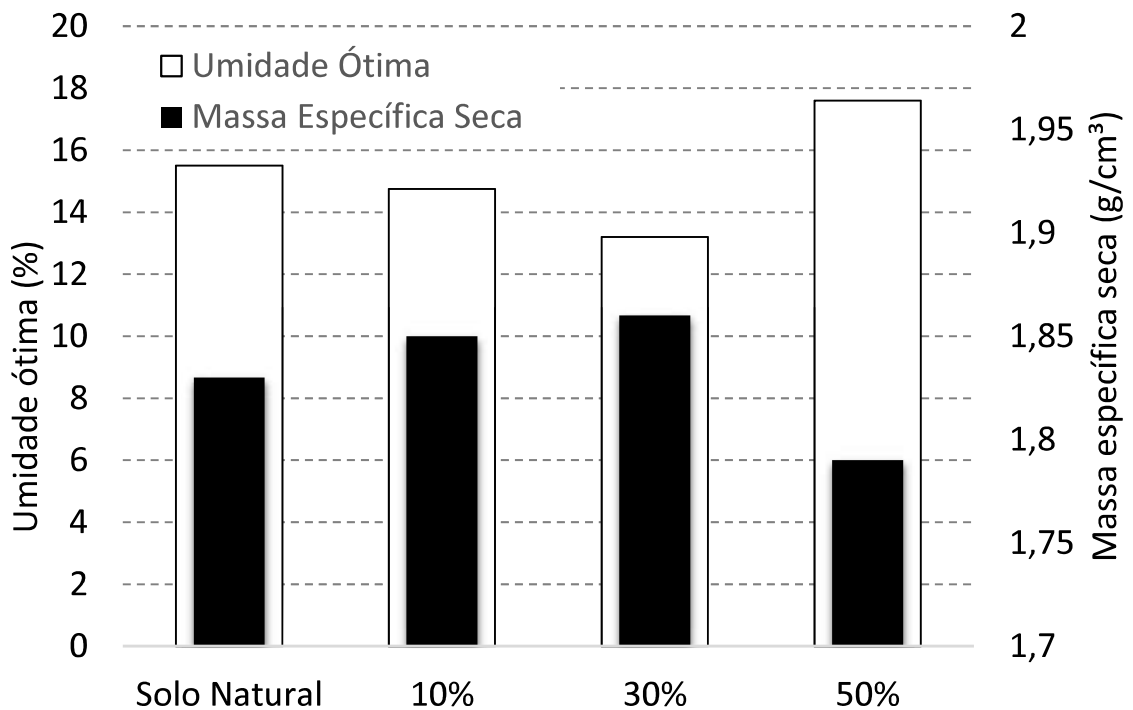


Fonte: Próprio autor

A partir da análise da Figura 16 é possível verificar a variação no peso específico aparente seco que diminuiu conforme se aumenta o teor de resíduo nas amostras. Isso pode ter ocorrido devido a massa específica dos grãos de RCD cerâmico ser menor que a massa específica de solo natural. Notou-se ainda que não houveram grandes variações em relação a umidade ótima, mas que uma umidade adicional de cerca de 2% foi necessária para atingir o teor ótimo das misturas com mais de 30% de adição de resíduo. Isto pode estar conectado a absorção do material adicionado, resultando na necessidade de adição de água para obter uma compactação ótima.

A Figura 21 mostra as comparações dos resultados obtidos para as misturas de solo natural e resíduos cerâmicos + cimentícios nas proporções de 10%, 30% e 50% em comparação a curva de compactação do solo natural. Percebe-se que para qualquer adição excetuando-se a de 50% há uma queda na umidade ótima e um aumento da massa específica aparente seca. Já para o caso de 50% o comportamento inverso pode ser observado, com um aumento da umidade ótima e uma queda na massa específica aparente seca.

Figura 21 - Umidade ótima e massa específica seca para a mistura de solo + resíduos cimentícios + resíduos cerâmicos



Fonte: Próprio autor

4.2 Resistência a compressão

Para este trabalho, os valores de tensão máxima à compressão foram determinados por meio de ensaio de compressão simples, descrito no item 3.4.6.

O Quadro 6 e a Figura 22 demonstram os resultados obtidos através do ensaio de resistência a compressão simples. É possível observar através do Quadro 5, a resistência de cada um dos CPs ensaiados. Determinados resultados obtidos para algumas misturas foram desconsiderados pois os CPs não estavam na umidade ótima correta, entretanto foram realizados no mínimo 3 moldagens como recomendado pela NBR 12770/92.

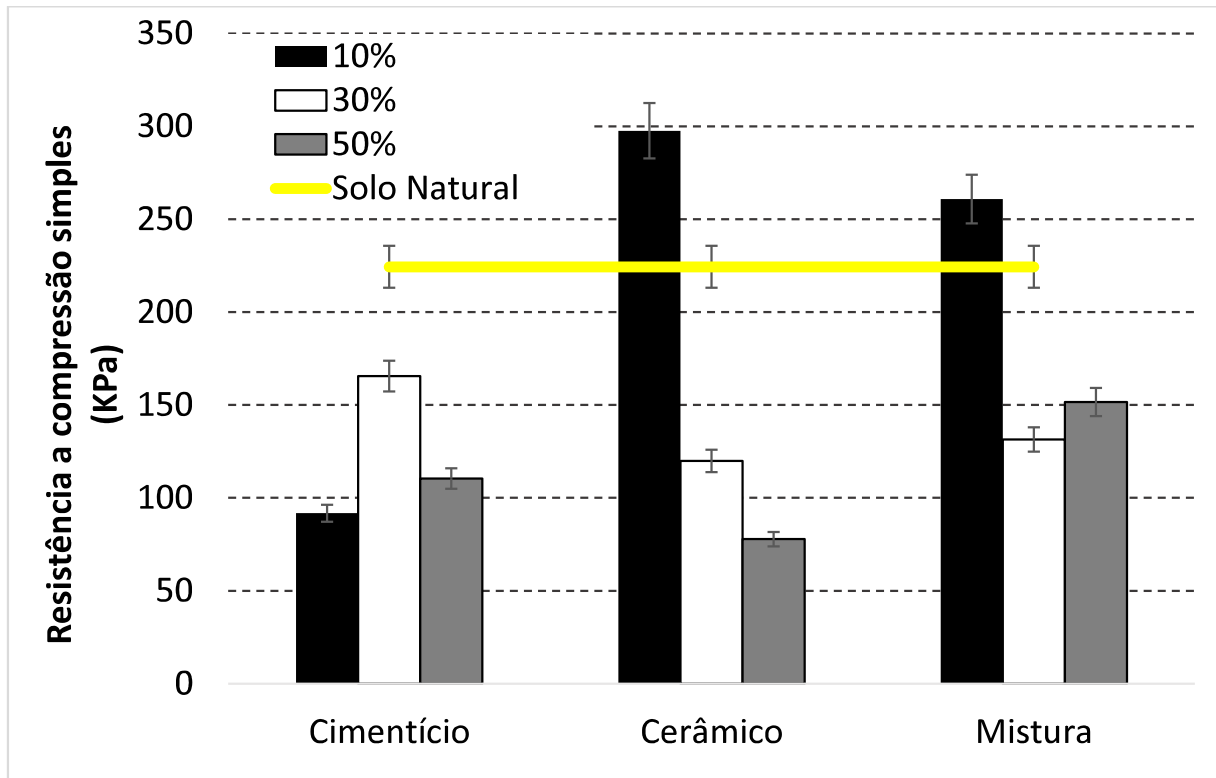
No Quadro 6 é possível se verificar a comparação entre a resistência média das amostras de solo + RCD nas diferentes proporções, em relação a resistência média do solo natural.

Quadro 6 - Resultados da resistência a compressão simples

Ensaio	1	2	3	4	Média
Solo (kPa)	193,87	260,28	224,35	219,01	224,38
Cimentício-10% (kPa)	87,74	100,36	99,48		95,68
Cimentício-30% (kPa)	180,94	204,54	186,49	165,38	184,34
Cimentício-50% (kPa)	103,12	111,85	102,97	123,96	110,48
Cerâmico-10% (kPa)	281,46	294,31	316,93		297,56
Cerâmico-30% (kPa)	123,37	112,63	123,87		119,96
Cerâmico-50% (kPa)	73,49	60,39	99,48		77,79
Mistura-10% (kPa)	289,07	260,08	283,25	276,89	277,32
Mistura-30% (kPa)	124,30	136,76	139,83	125,03	131,48
Mistura-50% (kPa)	128,52	195,52	130,81		151,62

Fonte: Próprio autor

Figura 22 - Resistência à compressão simples das amostras



Fonte: Próprio autor

4.2.1 Análise dos resultados de resistência a compressão para as amostras de solo + RCD cimentício

É possível perceber através da Figura 22 uma tendência de diminuição da resistência média do solo quando adicionados percentuais de resíduos cimentícios. Para uma proporção de 10% de resíduo, a diminuição da resistência média foi igual a 57,28% em relação ao solo natural, ficando 95,68 kPa contra 224,38 kPa do solo de referência. Com 30% de RCD a resistência em relação ao percentual de 10% foi maior, atingindo 184,34 kPa, porém ainda menor em relação a referência, tendo uma redução de 17,85% em relação ao solo natural. Para a proporção de 50% de RCD, a resistência do solo voltou a diminuir, chegando a 110,48 kPa, sendo maior que a resistência média para proporção de 10% e menor que a resistência para proporção de 30%, com uma diminuição de 50,76% em relação ao solo natural.

Para as amostras realizadas com misturas de resíduos cimentícios, ao contrário dos resíduos cerâmicos, não se obteve uma proporcionalidade entre os resultados em relação ao aumento do teor de resíduos, não havendo diminuição ou aumento gradual

dos resultados de acordo com o aumento das proporções de resíduos. Uma das possíveis explicações pode ser relacionada a absorção mais lenta de água pelos resíduos durante a realização dos ensaios, sobretudo os ensaios de compactação, que foram realizados com reaproveitamento de material. Quando adicionado determinado teor de umidade para obtenção de um ponto da curva de compactação, não se aguardou tempo suficiente para que os resíduos cimentícios absorvessem completamente, ou de maneira satisfatória, a quantidade de água que eram capazes de absorver, essa absorção acontecia ao longo do ensaio, assim o teor de água absorvido durante a obtenção do primeiro ponto da curva de compactação era diferente do teor absorvido no último ponto, comprometendo os resultados. Se o ensaio tivesse sido realizado sem reaproveitamento de material, isso não teria ocorrido, pois o intervalo de tempo entre a adição de água e a realização dos parâmetros necessários para obtenção de cada um dos pontos da curva teria sido o mesmo em todos os casos.

4.2.2 Análise dos resultados de resistência a compressão para as amostras de solo + RCD cerâmico

Através da análise da Figura 22 é possível verificar que quando a amostra de solo + RCD de resíduos cerâmicos, houve um acréscimo em relação a resistência a compressão para proporção de 10% de resíduos, sendo o resultado dessa mistura 32,62% mais resistente que o solo natural, resistindo em média 297,56 kPa. Percebe-se também que após isso, quanto maior a proporção de resíduos adicionados ao solo, menor a resistência, apresentando 119,96 kPa de resistência para uma proporção de 30%, representando diminuição de 46,54% em relação ao solo natural. Para a proporção de 50%, a diminuição de resistência chegou a 65,33% em relação ao solo de referência, atingindo em média 77,79 kPa.

Para este tipo de amostra, percebe-se uma melhor relação de resistência em relação ao percentual de RCD, chegando a atingir um pico de resistência média superior quando comparadas ao solo natural, a qual diminui com o acréscimo da proporção de resíduos.

Foi possível perceber que para determinados teores de umidade houve um acréscimo de resistência em relação ao solo natural, principalmente quando a proporção de mistura foi de 10% de resíduo cerâmico em relação ao solo. Isso pode

ter ocorrido devido ao rearranjo das partículas que possibilitaram uma diminuição do índice de vazios do solo, colaborando para o aumento da resistência.

Percebeu-se ainda que os resultados com misturas realizadas com resíduos cerâmicos foram mais proporcionais de acordo com o aumento do teor de resíduo nas amostras, tanto nos ensaios de compactação quanto nos ensaios de compressão simples. No ensaio de compactação foi possível verificar claramente a diminuição da massa específica aparente seca, devido ao fato do resíduo ter uma massa específica real dos grãos menor que a massa específica do solo, enquanto a umidade ótima não teve grandes variações, aumentando pouco em relação a referência.

4.2.3 Análise dos resultados de resistência a compressão para as amostras de solo + RCD cimentício + RCD cerâmico

Ainda de acordo com a Figura 22, é possível perceber que para amostras de solo + RCD cimentício + RCD cerâmico, houve, um acréscimo da resistência em relação ao solo natural para adição de 10% de RCD, atingindo uma resistência de 277,32 KPa, sendo este valor 23,60% maior que os valores obtidos para o solo de referência. Para as demais proporções de RCD, houve decréscimo de resistência, ficando com 131,48 kPa de resistência para uma proporção de 30% e 151,62 kPa para uma proporção de 50%, ficando 41,40% e 32,43% menos resistente, respectivamente.

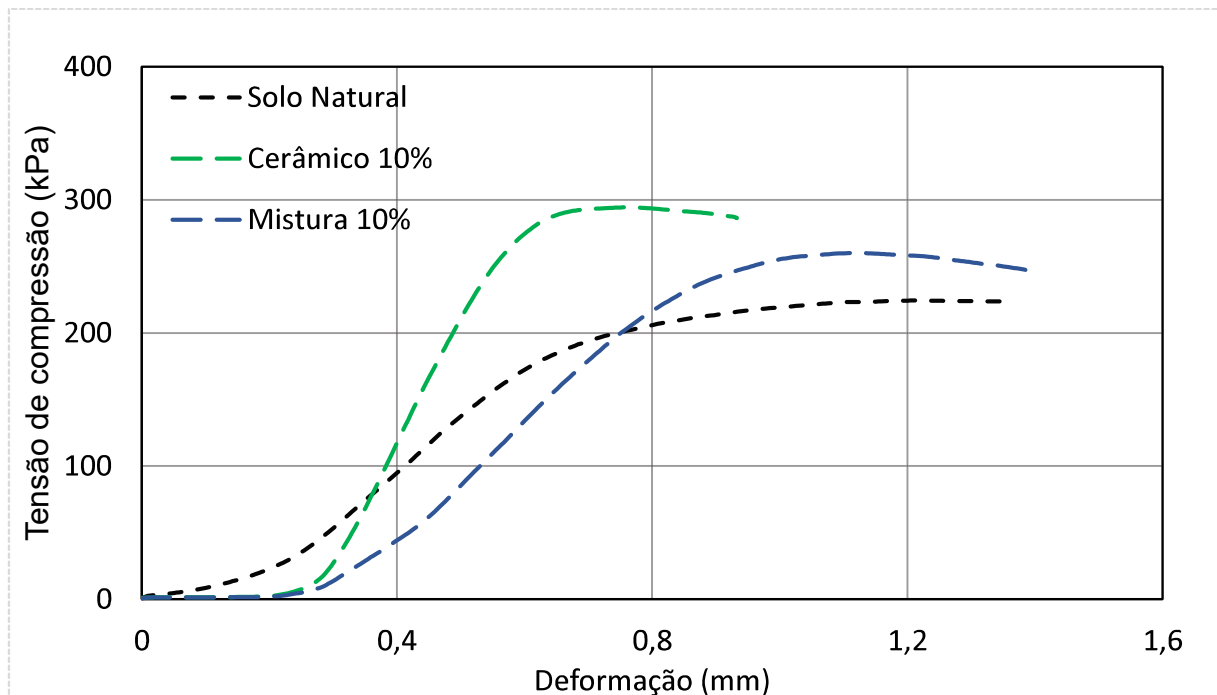
Pode-se perceber ainda que existe uma relação entre os dados mostrados na Figura 22, quando realizadas as misturas dos dois tipos de resíduos, percebe-se que para uma proporção de 10% houve um acréscimo de resistência em relação ao solo natural, porém esse acréscimo é inferior ao apresentado para a mesma proporção de 10% de RCD apenas com resíduos cerâmicos. Isso se torna óbvio quando se analisa que para um percentual de 10% de RCD apenas cimentício, houve uma diminuição da resistência a compressão, tendendo a utilização dos resíduos cimentícios, quando misturados aos cerâmicos, para esta proporção causar um decréscimo da resistência. O inverso acontece para a proporção de 30%, para esta proporção as amostras com resíduos cerâmicos apresentaram uma resistência menor que as amostras com resíduos cimentícios, e quando utilizados os dois ao mesmo tempo, para a proporção de 30%, a menor resistência atingida pelo resíduo cerâmico diminui a resistência provocada pelo resíduo cimentício.

Foi possível ainda verificar que com o aumento dos percentuais de resíduos em relação ao solo, houve em quase todos os casos analisados uma diminuição da resistência a compressão. Uma explicação possível pode ser o fato do solo natural se tratar de um solo arenoso, com baixa coesão real entre as partículas, que pode ter diminuído ainda mais quando misturado a outro material, com propriedades diferentes. Para se determinar a coesão do solo, seria necessária a realização de ensaios de cisalhamento direto, a fim de se verificar se esse era realmente o fator responsável pela diminuição da resistência. Se o solo utilizado nesta pesquisa se tratasse de um solo argiloso, com maior capacidade de atração entre as partículas, esse fator poderia ter influenciado positivamente para os resultados obtidos (Silva, 2007).

4.3 Diagrama de tensão e deformação das misturas

De modo complementar as análises realizadas ao longo dos tópicos anteriores, foram produzidos diagramas que relacionam a tensão aplicada ao solo durante o ensaio de compressão simples e a sua deformabilidade. A Figura 23 mostra os diagramas de tensão e deformação do solo natural e das misturas que melhor apresentaram resultados de tensão máxima aplicada.

Figura 23 - Gráfico de tensão x deformação



Fonte: Próprio autor

Percebe-se a partir da análise da Figura 23, que enquanto o solo natural apresenta uma deformação de 1,30 mm até atingir a tensão de compressão máxima, os solos com resíduos na proporção de 10% apresentam uma deformação muito menor, sendo esta de 0,7 mm para a proporção de 10% de RCD cerâmico e 1,10 mm para a proporção de 10% de RCD cimentício + RCD cerâmico. Isto demonstra que ocorre uma acomodação melhor entre os grãos de solo, que enquanto sofrem a ação do carregamento vão se aglomerando de modo a suportarem melhor os carregamentos.

A análise deste comportamento é relevante pois para obras de engenharia é importante que os materiais apresentem deformabilidade enquanto sofrem o carregamento, uma vez que atingir a maior capacidade de maneira abrupta reflete em um material frágil, portanto sujeito ao rompimento sem aviso prévio.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

Nesse capítulo são apresentadas as considerações finais e conclusões obtidas após análise dos resultados desta pesquisa, bem como algumas sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros envolvendo a mistura de solos com resíduos de construção.

5.1 Considerações finais

Com o desenvolvimento deste estudo foi possível realizar a verificação da reutilização de materiais que atualmente são um dos problemas da construção civil. Com base em estudos do tipo, é possível analisar a possibilidade de utilização de resíduos provenientes da construção civil, que são na maioria das vezes descartados de forma inadequada, muitas vezes causando danos a natureza.

Os resultados desta pesquisa servem como parâmetros para realização de novos estudos sobre a combinação de solos arenoso com resíduos de construção e demolição, combinados de forma a se produzir um material com características apropriadas para utilização na construção civil.

Os valores da resistência a compressão simples atingidos por determinadas proporções de misturas de resíduos cerâmicos apresentaram bons resultados, aumentando a capacidade resistente do solo em até 32,62%, podendo ser utilizado em obras como fundações, bases de pavimentos ou aumentando a estabilidade de taludes feitos com solo natural.

Quanto a deformabilidade das misturas, avaliada através do diagrama tensão x deformação, pode-se constatar que quanto maior o teor de RCD nas misturas analisadas, menor a deformação máxima atingidas por elas quando atingem sua tensão máxima, o que se reflete que a adição de RCD torna o solo mais frágil que o natural, deixando ele assim menos atrativo a obras de engenharia.

Resultados negativos encontrados nos experimentos, como a redução da resistência para determinadas misturas e proporções, também podem ser utilizados como parâmetros, uma vez que as possíveis causas destes resultados foram discutidas ao longo deste trabalho.

Em geral, com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a utilização de resíduos como reforço de solo é uma técnica viável, desde que haja um estudo

cauteloso em relação a proporção em relação ao solo e parâmetros desses resíduos que possam influenciar na sua capacidade de coesão com o solo, e conseqüentemente na sua resistência. O conhecimento prévio dos parâmetros do solo também é muito importante para realização desse tipo de estudo, uma vez que a utilização de solos com menor capacidade de carga pode apresentar melhores resultados quando misturados aos resíduos, enquanto solos com boa capacidade resistente podem apresentar redução da capacidade quando feita a mistura.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Durante a realização dos experimentos práticos foram percebidas possíveis melhorias que podem ser implantadas para a obtenção de resultados mais confiáveis em relação ao estudo. Com a intenção de acrescentar este estudo, são citadas algumas sugestões para trabalhos futuros relacionados ao reforço de solo com resíduos de construção e demolição:

- Realização da análise gravimétrica dos resíduos, de modo a se possibilitar a verificação de proporções de materiais mais condizentes com as encontradas no ambiente natural;
- Realizar ensaios de cisalhamento direto, com diferentes proporções de adições de resíduos, buscando avaliar os parâmetros de resistência das misturas;
- Possibilitar um maior intervalo entre a adição de água e a realização dos ensaios como compactação e moldagem dos CPs de modo que os materiais realizem uma melhor absorção de água.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

_____. **NBR 5734:** Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 6457:** Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 7181:** Solo – Análise granulométrica dos resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 10004:** Classificação dos resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 12.235:** Armazenamento de resíduos sólidos perigosos. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 15112:** Resíduos de construção civil e resíduos volumosos, áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15113:** Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15114:** Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15115:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15116:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM ISO – 2395:** Peneiras de ensaio e ensaio de peneiramento - Vocabulário. Rio de Janeiro, 1997.

ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2014 <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>.> Acesso em: jun. 2018

AMORIM, Enio Fernandes. **Viabilidade técnica econômica de misturas de Solo-RCD em camadas de base de pavimentos urbanos. Estudo de caso: Município de Campo Verde – MT.** Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília. Brasília, 2013.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 1981.

_____. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 2010b.

_____. Resolução CONAMA nº. 275, de 25 de abril de 2001. Estabelece o código de cores para diferentes tipos de resíduos na coleta seletiva. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 2001.

_____. Resolução CONAMA nº. 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 2002.

_____. Resolução CONAMA nº. 348, de 16 de agosto de 2004. Altera a Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 2004.

CALLE, José Antonio Cancino. **Análise de ruptura de talude em solo não saturado.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de São Carlos. São Carlos, 2000.

CALLEGARI, Simara. **Análise da compatibilização de projetos em três edifícios residenciais multifamiliares.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 3ª edição, editora JC, 1973.

CABRAL, A. E. B.; MOREIRA, K. M. V. **Manual sobre os Resíduos Sólidos da Construção Civil**. Programa Qualidade de Vida na Construção. SINDUSCON – CE. Fortaleza, 2011.

CARVALHO, Juliane Erthal de. **A importância da consensualidade na implementação da logística reversa**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Direito da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.

CRUDEN, D.M; VARNES, D.J. **Landslides: Investigation and Mitigation**, National Academy of Sciences. Department Of Civil Engineering University of Alberta. Edmonton, Canada, 1993.

FABRÍCIO, João Vicente Falabella. **Análise probabilística da estabilidade de taludes e contenções**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

FIORI, Alberto Pio; CARMIGNANI, Luigi. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas – Aplicações na estabilidade de taludes**. Editora: Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

GERSCOVICH, Denise. **Estabilidade de taludes**. 2ª edição. Oficina de Textos: São Paulo, 2010.

IPEA. **Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos**. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf>. Acesso em: 16 mai. 2018.

KANAAN, Saed Hassan Husein. **Análise da resistência a compressão de um solo arenoso com a adição de fibras provenientes de garrafas PET**. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Pampa, 2018.

KARPINSK, Luisete Andreis. **Gestão diferenciada de resíduos da construção civil – Uma abordagem ambiental**. 2009. EDIPUCRS. Disponível

em:<<http://www.sinduscondf.org.br/portal/arquivos/GestaodeResiduosPUCRS.pdf> >. Acesso em: 11 mai. 2018.

LEITE, Fabiana da Conceição. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

LUCHEZZI, Celso. **Logística reversa na construção civil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo, 2014.

MARANGON, M. **Tópicos em geotecnia e obras de terra**. – Universidade Federal de Juiz de Fora. Material didático ou instrucional. Juiz de Fora, 2004.

MARCONDES, Fábica Cristina Segatto. **Sistemas logísticos reversos na indústria da construção civil – Estudo da cadeia produtiva de chapas de gesso acartonado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de São Paulo. São Paulo, 2007.

OLIVEIRA, Maria Elane Dias DE. **Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/CE**. 2011. Disponível em:<<http://www.scielo.br/pdf/esa/v16n3/v16n3a03>>. Acesso em: 08 mai. 2018.

PEREIRA, Tonismar Dos Santos. **Avaliação do desempenho de diferentes métodos de análise de estabilidade de taludes em barragens de terra**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2013.

SABBATINI, Fernando Henrique. **Desenvolvimento de métodos, processos e sistemas construtivos – Formulação e aplicação de uma metodologia**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Paulo. São Paulo, 1989.

SANTOS, Eder Carlos Guedes dos. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD–R) em estruturas de solo reforçado**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de São Paulo. São Carlos, 2007.

SILVA, Apolino José Nogueira da. **Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um solo latossolo amarelo de tabuleiro costeiro.** 2007. Disponível em:<
<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v31n5/a03v31n5>>. Acesso em: 13 jun. 2019.

SINISTERRA, Ferney Quiñones. **Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas.** Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília. Brasília, 2014.

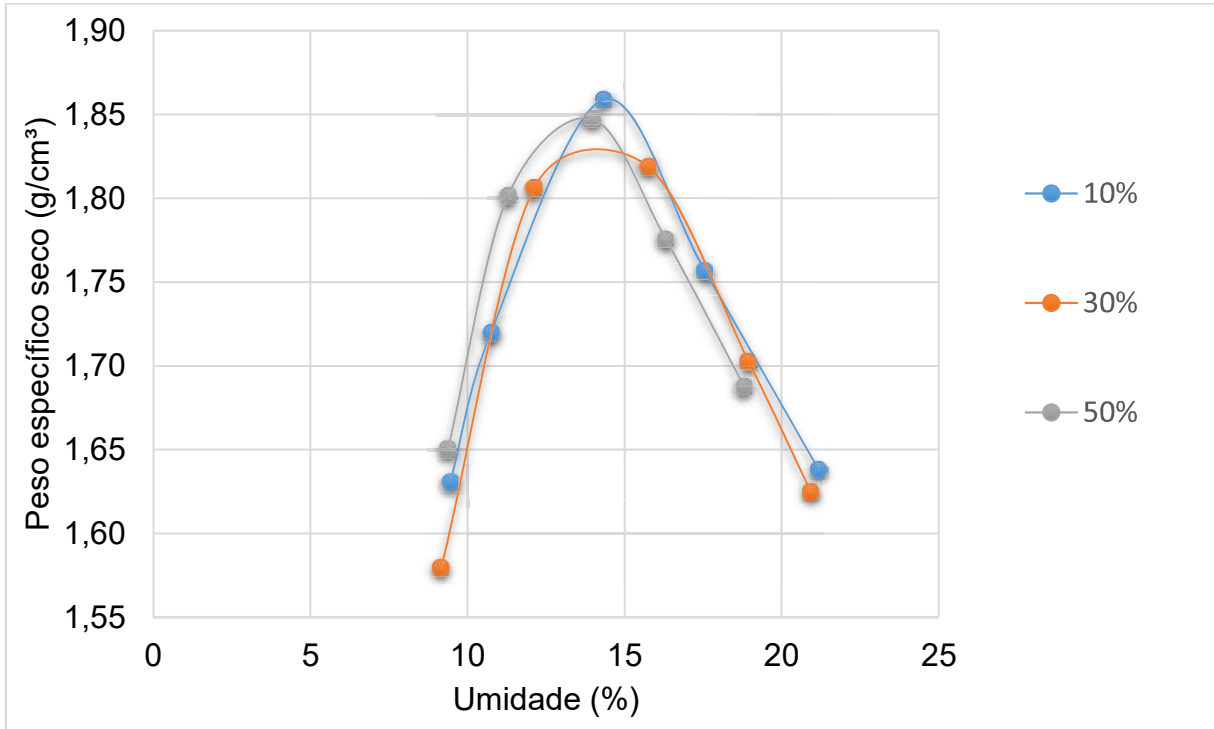
SOUZA, Carla Adriana de. **Utilização de resíduo de concreto como agregado miúdo para argamassa de concretos estruturais convencionais.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

TERZAGUI, K. **Mecanismo dos escorregamentos de terra.** Revista politécnica: São Paulo, 1952.

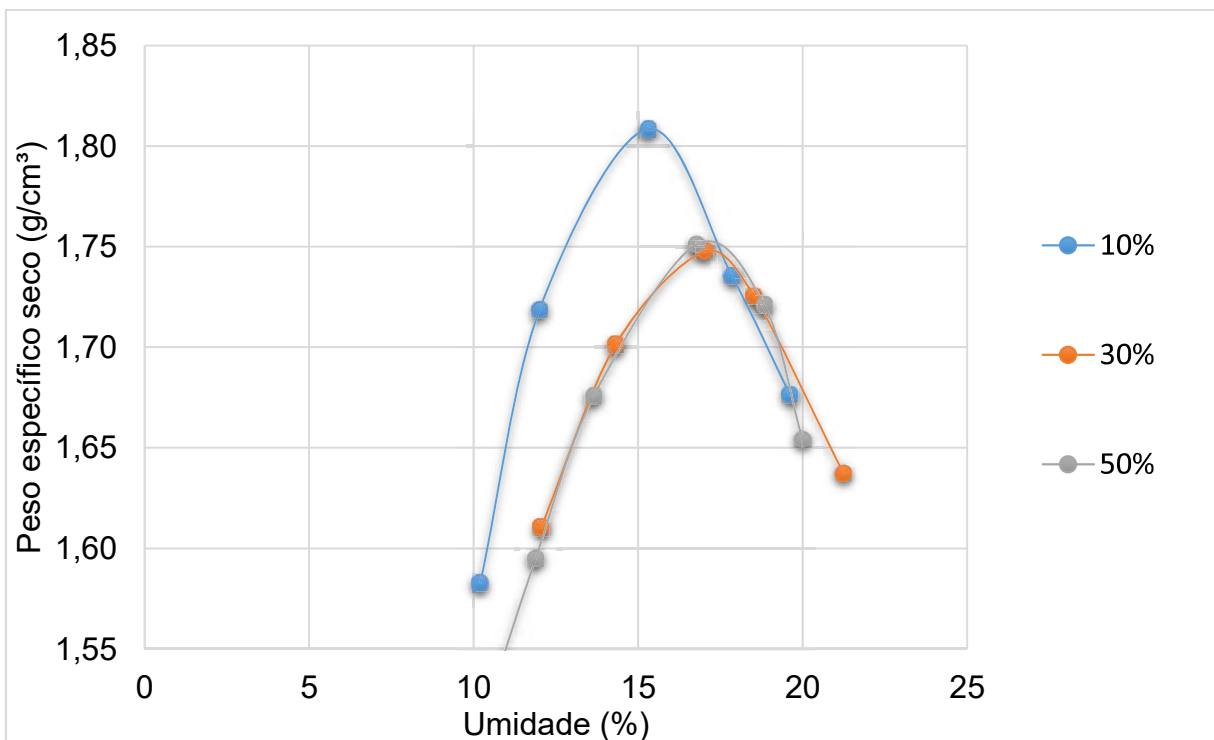
ZORDAN, Sergio Eduardo. **A utilização do entulho como agregado na confecção de concreto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1997.

ANEXOS

Anexo A – Curvas de compactação de solo natural + RCD cimentício



Anexo B – Curvas de compactação de solo natural + RCD cerâmico



Anexo C – Curvas de compactação de solo natural + RCD cimentício + RCD cerâmico

