

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Dissertação de Mestrado

COMPORTAMENTO DE UMA MISTURA DE SOLO, CAL
DE CARBURETO E CINZA DA CASCA DE AVEIA COM
ADIÇÃO DE FIBRAS

Claudio Luiz Queiroz

Passo Fundo

2020



Claudio Luiz Queiroz

COMPORTAMENTO DE UMA MISTURA DE SOLO, CAL DE
CARBURETO E CINZA DA CASCA DE AVEIA COM ADIÇÃO
DE FIBRAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia, sob a orientação do Prof. Dr. Pedro Domingos Marques Prietto e coorientação do Prof. Dr. Luizmar da Silva Lopes Junior.

Passo Fundo

2020

CIP – Catalogação na Publicação

Q3c Queiroz, Claudio Luiz
Comportamento de uma mistura de solo, cal de carbureto e cinza da casca de aveia com adição de fibras / Claudio Luiz Queiroz. – 2020.
103 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Domingos Marques Prietto.
Coorientador: Prof. Dr. Luizmar da Silva Lopes Junior.
Dissertação (Mestre em Engenharia) – Universidade de Passo Fundo, 2020.

1. Pavimentos. 2. Mecânica do solo. 3. Resistência de materiais. 4. Solos - Testes. I. Prietto, Pedro Domingos Marques, orientador. II. Lopes Junior, Luizmar da Silva, coorientador. III. Título.

CDU: 625.8

Claudio Luiz Queiroz

COMPORTAMENTO DE UMA MISTURA DE SOLO, CAL DE
CARBURETO E CINZA DA CASCA DE AVEIA COM ADIÇÃO
DE FIBRAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Data de aprovação: 07 de maio de 2020

Membros componentes da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Washington Peres Núñez
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa
Universidade de Passo Fundo - UPF

Prof. Dr. Márcio Felipe Floss
Universidade de Passo Fundo - UPF

Prof. Dr. Pedro Domingos Marques Prietto
Orientador

Prof. Dr. Luizmar da Silva Lopes Junior
Coorientador

Passo Fundo

2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais Claudemir Ribeiro Queiroz e Maria Marlei Leite Queiroz e à minha irmã Sabrina Natali Queiroz, pelo apoio e suporte durante todos os anos de formação acadêmica.

À empresa Saboreal pelo fornecimento da cinza de casca de aveia e à empresa White Martins pela disponibilização da cal de carbureto. Ao Laboratório de Geotecnia da UPF, em especial aos laboratoristas Leunir, Mateus e Pedro, pelo tempo e atenção dedicados auxiliando na realização dos ensaios laboratoriais e na análise dos resultados; ao Laboratório de Materiais de Construção, em especial ao Nilton e ao Hamilton. À Cris e à Juliana por sempre estarem disponíveis para ajudar quando necessário.

À todos que de alguma forma me orientaram durante este estudo, em especial aos professores Pedro Prietto e Luizmar Lopes Junior. Estendendo aos professores Francisco Dalla Rosa, Márcio Floss e Washington Núñez que contribuíram de forma muito significativa para o aperfeiçoamento desse trabalho.

Aos meus amigos e colegas que deram apoio emocional, intelectual ou braçal, Ana Carla Zen, Tainara Kuyven, Bruna Uhde, Bruna Koppe, Bruna Diniz, Eduardo Andreghetto, Gabriele Caus e Felipe Salomão. E em especial à minha colega e amiga Joice Moura pelo compartilhamento de conhecimento, dúvidas e anseios dessa pesquisa.

E por fim, a todos os familiares, colegas e amigos que estiveram ao meu lado durante este período, ou mesmo os que estiveram distantes torcendo pelo êxito desta etapa da minha vida, muito obrigado a todos.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar,
não seremos capazes de resolver os problemas causados
pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”

Albert Einstein

RESUMO

O baixo crescimento e os altos índices de deterioração da malha rodoviária nos últimos anos são fatores que ajudam a explicar a importância de buscar novos materiais e desenvolver tecnologias voltadas à pavimentação no Brasil. Concomitante à isso, a grande geração de resíduos industriais no país e a busca pelo desenvolvimento sustentável trazem a necessidade de minimizar, reaproveitar ou destinar corretamente esses resíduos. Com o intuito de encontrar uma alternativa de material para uso em pavimentos e buscar destinação para resíduos gerados na indústria, foi estudado um solo tratado com cinza da casca de aveia e cal de carbureto e reforçado com fibras de polipropileno. A primeira etapa do programa experimental foi focada na caracterização dos materiais. A segunda etapa foi de caráter exploratório, tendo como objetivo a definição de algumas das variáveis fixas teor de cal (10%), tempo de cura (7 dias) e temperatura de cura (40°C) e a avaliação da influência dos teores de cinza (10, 20 e 30%) e de fibra (0 e 0,5%), quando inseridos na matriz solo-cal, a partir dos ensaios de resistência à compressão simples (RCS) e resistência à tração por compressão diametral (RCD). A terceira etapa teve como objetivo avaliar a degradação do módulo resiliente flexural (MRF) e deformação de tração a partir do ensaio de fadiga em quatro pontos, verificando o comportamento das misturas à três níveis de tensão diferentes. Os ensaios de RCS apresentaram valores entre 0,99 e 1,44 MPa e mostraram a influência do teor de fibra e cinza na redução da resistência. Para a RCD os resultados variaram entre 0,10 e 0,21 MPa. O aumento do teor de cinza causou redução e a inserção de fibras causou aumento da resistência. As misturas de melhor desempenho foram as de solo-cal com e sem fibra e as misturas com 10% de cinza com e sem fibra. No ensaio de fadiga os valores iniciais de MRF variaram de 206 MPa à 1540 MPa e apresentaram dependência do nível de tensão aplicado. As deformações iniciais registradas ficaram entre 40 e 330 *microstrains*, algumas acima do intervalo recomendado pela Austroads. Por fim, avaliando-se as principais variáveis estudadas, evidenciou-se que a cinza utilizada não se mostrou efetiva como material pozolânico ou filler, pois causou perda de resistência. Já a fibra mostrou-se uma variável importante no comportamento das misturas, aumentando a resistência, reduzindo o MRF e retardando a ruptura por fadiga dos corpos de prova.

Palavras-chave: Tratamento de solos. Misturas solo-cinza-cal. Fibra de polipropileno. Pavimentos. Comportamento mecânico.

ABSTRACT

The low growth and the high rates of deterioration of the road network in recent years are factors that help explain the importance of seeking new materials and developing pavement technologies in Brazil. Concomitant to this, a large generation of industrial waste in the country and the search for sustainable development brings the need to reduce, reuse, or correctly dispose of this waste. In order to find an alternative material for use in pavements and seek the destination for residues generated in the industry, a soil stabilized with oat husk ash and carbide lime, reinforced with polypropylene fibers was studied. The first stage of the experimental program was focused on the characterization of materials. The second stage was exploratory, with the objective of defining the fixed variables lime content (10%), curing time (7 days) and curing temperature (40°C) and assessing the influence of ash content (10, 20, and 30%) and fiber (0 and 0.5%), when inserted in the soil matrix, from unconfined compression tests (UC) and Brazilian tensile tests (BT). The third step aimed to evaluate the degradation of the flexible resilient module and the tensile deformation from fatigue test at four points, verifying the behavior of the mixtures at three different stress levels. The UC tests showed values between 0.99 and 1.44 MPa and evidenced the influence of fiber and ash content in the reduction of strength. For the BT tests, the results ranged between 0.10 and 0.21 MPa, the ash content caused a reduction and the insertion of fibers caused an increase in resistance. The best performing mixtures were soil-lime with and without fiber and mixtures with 10% ash with and without fiber. In the fatigue test, the initial MRF values ranged from 206 MPa to 1540 MPa and depended on the applied stress level. The initial deformations recorded were between 40 and 330 *microstrains*, some above the range recommended by Austroads. Finally, evaluating the main variables studied in all stages of the research, it was evident that the ash used was not effective as a pozzolanic or filler material, as it caused loss of resistance. The fiber used in the study was shown to be an important variable in the behavior of the mixtures, increasing the resistance, reducing the flexible resilient modulus and delaying the rupture of the specimens.

Keywords: Treatment of soils. Soil-ash-lime mixtures. Polypropylene fibers. Pavements. Mechanical behavior.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas.....	21
Figura 2: Delineamento do programa experimental.....	41
Figura 3: Solo do Campo Experimental de Geotecnia da UPF.....	42
Figura 4: Cinza da casca de aveia.....	43
Figura 5: Cal de carbureto.....	43
Figura 6: Fibra de polipropileno.....	44
Figura 7: Corpos de prova cilíndricos durante (a) cura na câmara úmida; (b) imersão em água.....	47
Figura 8: Corpos de prova prismáticos durante (a) cura em estufa; (b) imersão em água.....	47
Figura 9: Ruptura do corpo de prova à compressão simples.....	48
Figura 10: Ruptura à tração por compressão diametral.....	49
Figura 11: Suporte de quatro pontos.....	50
Figura 12: Exemplo de carregamento <i>haversine</i> com frequência de 2 Hz.....	51
Figura 13: Posicionamento dos LVDTs.....	52
Figura 14: (a) Equipamento montado para iniciar o ensaio; (b) Corpo de prova após a ruptura.....	52
Figura 15: Tela inicial com os dados de entrada do LabView.....	53
Figura 16: Aba de acompanhamento do MR no LabVIEW.....	53
Figura 17: Pulso de carga ideal e obtido.....	54
Figura 18: Exemplo de relatório de dados gerados pelo LabVIEW.....	55
Figura 19: Difratoograma da cal.....	57
Figura 20: Difratoograma da cinza.....	58
Figura 21: Índice de atividade pozolânica com cal.....	59
Figura 22: Difratoograma do solo.....	60
Figura 23: Curvas granulométricas do solo natural e da mistura solo-cinza.....	61
Figura 24: (a) Dosagem da cal com o solo puro; (b) Dosagem da cal com mistura solo-cinza.....	62
Figura 25: Curvas de compactação na energia normal.....	63
Figura 26: Evolução da RCS com o teor de cal.....	65
Figura 27: Evolução da RCS com o tempo e temperatura.....	66
Figura 28: Evolução da RCS com o aumento dos teores de cinza e fibra.....	69

Figura 29: Evolução da RCD com o aumento do teor de cinza	71
Figura 30: Relação entre RCD e RCS	73
Figura 31: Módulo de resiliência flexural da mistura Sc10	75
Figura 32: Módulo de resiliência flexural da mistura Sc10F	76
Figura 33: Módulo de resiliência flexural da mistura SC10c10.....	77
Figura 34: Módulo de resiliência flexural da mistura SC10c10F.....	78
Figura 35: Deformação da mistura Sc10	79
Figura 36: Deformação da mistura Sc10F.....	80
Figura 37: Deformação da mistura SC10c10	81
Figura 38: Deformação da mistura SC10c10F	82
Figura 39: Relação entre o nº de ciclos e razão de tensões para a mistura Sc10.....	83
Figura 40: Relação entre o nº de ciclos e razão de tensões para a mistura Sc10F	84
Figura 41: Relação entre o nº de ciclos e razão de tensões para a mistura SC10c10 ...	84
Figura 42: Relação entre o nº de ciclos e razão de tensões para a mistura SC10c10F.	85
Figura 43: Comparação da relação para todas as misturas	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros para cada nível de cimentação	27
Tabela 2: Variáveis investigadas e código de referência das misturas	40
Tabela 3: Propriedades da fibra de polipropileno.....	44
Tabela 4: Ensaios de caracterização e respectivas normas.....	45
Tabela 5: Procedimentos e parâmetros de moldagem	46
Tabela 6: Caracterização química da cal	56
Tabela 7: Parâmetros de caracterização da cinza	57
Tabela 8: Caracterização química da cinza	58
Tabela 9: Caracterização química do solo	60
Tabela 10: Características geotécnicas do solo e da mistura solo-cinza	61
Tabela 11: Resultados dos ensaios de compactação.....	64
Tabela 12: Resultados da RCS avaliando a influência do teor de cal	65
Tabela 13: Resultados da RCS avaliando o teor de cinza, o tempo e a temperatura de cura	66
Tabela 14: Aumento da RCS com o tempo e temperatura de cura.....	67
Tabela 15: Redução percentual da RCS com teor de cinza.....	67
Tabela 16: Resultados da RCS avaliando a influência dos teores de cinza e fibra	69
Tabela 17: Redução da RCS com teor de cinza.....	70
Tabela 18: Redução da RCS com teor de fibra	70
Tabela 19: Resultados da RCD aos 7 dias à 40°C	71
Tabela 20: Redução da RCD com teor de cinza.....	72
Tabela 21: Aumento da RCD com teor de fibra.....	72
Tabela 22: Resultados médios de MRF inicial	74
Tabela 23: Número de ciclos atingidos para cada nível de tensão	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway Transportation Officials</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AUSTROADS	<i>Association of Australasian Road Transport and Traffic Agencies</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EMATER	Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural
HRB	<i>Highway Research Board</i>
IG	Índice de Grupo
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LSPA	Levantamento Sistemático da Produção Agrícola
MME	Ministério de Minas e Energia
MRF	Módulo de Resiliência Flexural
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
RCD	Resistência à tração por Compressão Diametral
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
UPF	Universidade de Passo Fundo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo geral.....	18
1.1.2	Objetivos específicos	18
1.2	Estrutura da dissertação	18
2	REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1	O pavimento e sua estrutura	20
2.1.1	Classificação dos pavimentos	21
2.1.2	Fadiga em pavimentos.....	22
2.2	O solo como material de construção	22
2.2.1	Estabilização de solos	23
2.2.1.1	<i>Estabilização granulométrica</i>	24
2.2.1.2	<i>Estabilização química</i>	24
2.2.2	Estabilização de solos com cal.....	25
2.2.2.1	<i>Dosagem solo-cal</i>	26
2.2.2.2	<i>Parâmetros de dosagem para materiais estabilizados segundo a Austroads (2002)</i>	26
2.3	Reforço de solos	27
2.3.1	Utilização de fibras no reforço de solos	27
2.3.1.1	<i>Tipos de fibras utilizadas no reforço de solos</i>	28
2.4	Geração de resíduos sólidos industriais no Brasil	30
2.4.1	Cinza da casca de aveia.....	31
2.4.2	Cal de carbureto	32
2.5	Estabilização e reforço de solos: estudos experimentais	33
2.5.1	Solos reforçados com fibras	33
2.5.2	Solos estabilizados com cal e cinzas	35

2.5.3	Materiais cimentados reforçados com fibras.....	36
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	39
3.1	Planejamento da pesquisa	39
3.1.1	1ª Etapa.....	39
3.1.2	2ª Etapa.....	39
3.1.3	3ª Etapa.....	40
3.2	Materiais	41
3.2.1	Solo	41
3.2.2	Cinza da casca de aveia	42
3.2.3	Cal de carbureto	43
3.2.4	Fibras de polipropileno	44
3.3	Ensaio laboratoriais	44
3.3.1	Ensaio de caracterização	45
3.3.2	Moldagem e cura dos corpos de prova.....	45
3.3.3	Ensaio de resistência à compressão simples	47
3.3.4	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	48
3.3.5	Ensaio de vida de fadiga em quatro pontos.....	49
3.3.5.1	<i>Suporte de ensaio e corpos de prova</i>	49
3.3.5.2	<i>Controle do carregamento</i>	50
3.3.5.3	<i>Pulso de carga</i>	51
3.3.5.4	<i>Equipamento utilizado</i>	51
3.3.5.5	<i>Software</i>	52
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	56
4.1	Caracterização dos materiais	56
4.1.1	Cal de carbureto	56
4.1.2	Cinza de casca de aveia.....	57
4.1.3	Solo	59

4.2	Definição de variáveis fixas	62
4.2.1	Dosagem do teor de cal	62
4.2.2	Definição dos parâmetros de compactação	63
4.3	Resistência à Compressão Simples	64
4.3.1	Influência do teor de cal	64
4.3.2	Influência do teor de cinza, do tempo de cura e da temperatura de cura	65
4.3.2.1	<i>Análise estatística da influência do teor de cinza, do tempo e temperatura de cura na RCS</i>	68
4.3.3	Influência da inserção de fibras.....	68
4.3.3.1	<i>Análise estatística da influência da fibra na RCS</i>	70
4.4	Resistência à Tração por Compressão Diametral	70
4.4.1	Análise estatística dos resultados de RCD	72
4.5	Relação entre RCD e RCS	72
4.6	Fadiga em quatro pontos	73
4.6.1	Módulo de Resiliência Flexural	73
4.6.2	Curvas de degradação: módulo de resiliência flexural	74
4.6.3	Curvas de degradação: deformação x n° de ciclos.....	79
4.6.4	Relação entre o número de ciclos e a razão de tensões	82
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
5.1	Conclusões	86
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	88
	REFERÊNCIAS	90
	APÊNDICE A – GRANULOMETRIA COMPLETA DA CINZA DA CASCA DE AVEIA	99

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos 10 anos, as rodovias federais pavimentadas cresceram 6,7% no Brasil, um acréscimo pequeno para um modal que corresponde a mais de 61% das movimentações de carga e a mais de 95% dos deslocamentos de passageiros (CNT, 2019). Segundo a última Pesquisa CNT de Rodovias, de 2019, 59% do pavimento da extensão avaliada apresenta algum tipo de problema, tendo classificação regular, ruim ou péssimo, percebendo-se uma ausência de melhora em relação aos últimos anos, que foram de 57% em 2018, 61,8% em 2017 e 58,2% em 2016. Observando o cenário atual da malha rodoviária brasileira, percebe-se o quanto se faz necessário investir em pesquisas e tecnologias voltadas para a área de pavimentação, principalmente focando em pavimentos de baixo custo e sua implantação em estradas vicinais. Isto, porque conforme o Sistema Nacional de Viação (2017), apenas 2% das estradas municipais são pavimentadas, 5,8% tem a sua pavimentação planejada, e 92,2% não são pavimentadas, um número alarmante para um total de cerca de 1,34 milhões de km. Em contraponto à essa situação estão as estradas federais, embora com seus poucos 120 mil km, possuem cerca de 54% de vias pavimentadas. Em uma esfera geral, de um total de mais de 1,72 milhões de km de rodovias brasileiras, apenas 12,4% são pavimentadas, 9,1% tem previsão de pavimentação e 78,5% delas não são pavimentadas.

Concomitante à essa situação da malha rodoviária brasileira, há outra questão de fundamental importância para o desenvolvimento do país, pelo ponto de vista da sustentabilidade, que é a necessidade de minimizar, reaproveitar ou destinar corretamente o grande volume de resíduos sólidos gerados nas indústrias, seja na construção civil, na indústria automobilística, nas siderurgias ou na geração de energia elétrica. No Brasil, certas atividades industriais produzem grandes quantidades de resíduos que são frequentemente descartados sem o devido tratamento. Dentre os resíduos gerados em grande escala, encontram-se as cinzas, provenientes da queima de diversos materiais, como do carvão mineral em usinas termelétricas, de materiais orgânicos utilizados como biomassa, ou de resíduos sólidos urbanos em usinas incineradoras (SANTOS, 2015). Outro resíduo em situação semelhante é a cal de carbureto, gerada na produção do gás acetileno e que possui alto potencial poluidor devido à alcalinidade. Sua destinação final costuma ser os aterros industriais, no entanto, sua capacidade de reação em misturas com materiais pozzolânicos, como as diversas cinzas, faz com que a associação destes dois resíduos possa ser utilizada como agente cimentante (THOMÉ, 1999).

Materiais como a cinza volante de carvão mineral e as cinzas da casca de arroz e do bagaço de cana possuem pozolanicidade estudada e comprovada e são comumente utilizadas em pesquisas de melhoramento de solos. A cinza da casca de aveia utilizada nesta pesquisa ainda possui poucos estudos quanto a sua atividade pozolânica e possível aplicação em melhoramento de solos, mas chama a atenção pelo crescimento da sua geração em razão de que grandes empresas do ramo cerealista utilizam a casca de aveia como biomassa na produção de energia. Aliado a isso, tem-se o fato de que a região sul do Brasil é responsável por mais de 90% da produção de aveia do país, que por consequência acarreta em um grande volume de resíduos de casca, que são reaproveitados na produção de energia, gerando as cinzas.

Diversos estudos buscam compreender a influência das cinzas como agente melhorador de solos, destacando o emprego dos materiais tratados em aplicações como bases para pavimentos ou na produção de materiais destinados à construção civil (SANTOS, 2015). Em contrapartida, Sharma et al. (2008) destacam que o efeito da adição de cinzas apenas, em relação à resistência do solo, não é suficiente a ponto de ser considerado como um bom material de estabilização e por esta razão, a adição de cal em conjunto com cinzas geralmente é empregada para melhorar o resultado dessa técnica. Saldanha (2014) destaca que as reações pozolânicas que ocorrem na mistura da cinza com a cal são função da reação da sílica ativa da primeira com o hidróxido de cálcio em presença de água da segunda. Bottin et al. (1995 *apud* CARRARO, 1997) analisaram a influência da adição de cinzas de cascas de arroz na resistência à compressão simples de um solo argiloso, tratado com cal hidratada e observaram que a quantidade de cal necessária para o desenvolvimento de reações pozolânicas é reduzida em função da percentagem de cinza de casca de arroz adicionada à mistura.

No entanto, em muitos casos realizar um melhoramento físico-químico nas propriedades de um solo ocasiona problemas na sua rigidez e apesar de aumentar a sua resistência, também aumenta a sua fragilidade. Feuerharmel (2000) constatou que a forma de ruptura de um solo é alterada pela inclusão de fibras e com isso tem a sua capacidade de deformação aumentada. Além disso, Kumar et al. (2007) observaram que a adição de pequenas quantidades de fibras de polipropileno em misturas de solo-cinza-cal acarretou aumentos na resistência à compressão e na resistência à tração.

À vista disso, este estudo, o qual enquadra-se na linha de pesquisa Infraestrutura Sustentável do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGEng da

Universidade de Passo Fundo – UPF, buscou responder a seguinte questão norteadora da pesquisa: qual a influência da incorporação de cinza de casca de aveia, cal de carbureto e fibra de polipropileno na resposta mecânica de um solo de textura argilosa?

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar o comportamento de misturas de solo estabilizadas através da adição de cal de carbureto e cinza da casca de aveia e reforçadas com fibras de polipropileno em ensaios estáticos e dinâmicos, em função dos teores de cinza e fibra empregados nas misturas.

1.1.2 Objetivos específicos

Caracterizar e avaliar as características físicas e químicas do solo e dos resíduos;

- a) Analisar a influência da porcentagem de cinza e da inserção de fibras na resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral das misturas e selecionar as misturas de melhor desempenho para a sequência da pesquisa;
- b) Avaliar o comportamento das misturas selecionadas no ensaio de fadiga em quatro pontos, analisando a degradação do módulo de resiliência flexural e a deformação dos corpos de prova, para três níveis de tensão controlada.

1.2 Estrutura da dissertação

A dissertação está dividida em cinco capítulos, sendo o primeiro capítulo responsável por introduzir o tema central abordado no estudo, apontar as problemáticas envolvidas, as justificativas para a resolução destas questões e os principais objetivos a serem alcançados por essa pesquisa. No segundo capítulo, tem-se uma revisão bibliográfica com os principais temas envolvidos na temática do trabalho, trazendo conceitos necessários para o seu entendimento e estudos que embasaram a metodologia e a análise dos resultados obtidos. No terceiro capítulo, apresenta-se a metodologia empregada no decorrer da pesquisa, desde os materiais e equipamentos utilizados até os métodos e especificações que foram tomadas como referência.

A apresentação e discussão dos resultados, estão colocadas no capítulo quatro, que através de tabelas, gráficos e análises, traz os resultados obtidos com a realização dos ensaios laboratoriais citados na metodologia. Por fim, o capítulo cinco traz as considerações finais, que

engloba um resumo de todas as análises realizadas a partir dos resultados obtidos e responde à questão da pesquisa e ao cumprimento dos objetivos traçados. Este capítulo final também apresenta sugestões para trabalhos futuros, estabelecidas através de dificuldades encontradas e falhas observadas no decorrer da aplicação da metodologia e da análise dos resultados, com o objetivo de complementar este estudo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo aborda os assuntos de principal relevância para o embasamento da pesquisa e foi dividido em quatro grandes temas. Primeiramente são apresentados o conceito básico de pavimento, a classificação de um pavimento rodoviário e uma introdução ao fenômeno de fadiga em pavimentos; em seguida, tem-se o solo como principal assunto, abordando sua aplicação como material de construção, suas classificações e métodos de melhoramento; na sequência, o estudo traz uma breve revisão sobre a situação atual dos resíduos sólidos no Brasil, focando nos resíduos industriais e abordando especificamente os resíduos estudados nessa pesquisa. Por fim, o capítulo apresenta alguns trabalhos que utilizaram os mesmos resíduos e metodologias no melhoramento de solos para fins de pavimentação.

2.1 O pavimento e sua estrutura

Pavimento é definido por Senço (2001) como uma estrutura construída sobre a terraplanagem final e destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos do tráfego e também resistir aos esforços horizontais de desgaste. Além disso, tem como função melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança do usuário, tornando mais durável a superfície de rolamento. Balbo (2007) acrescenta que essa estrutura é composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito do corpo estradal, adequada para atender o tráfego de maneira durável e ao menor custo possível.

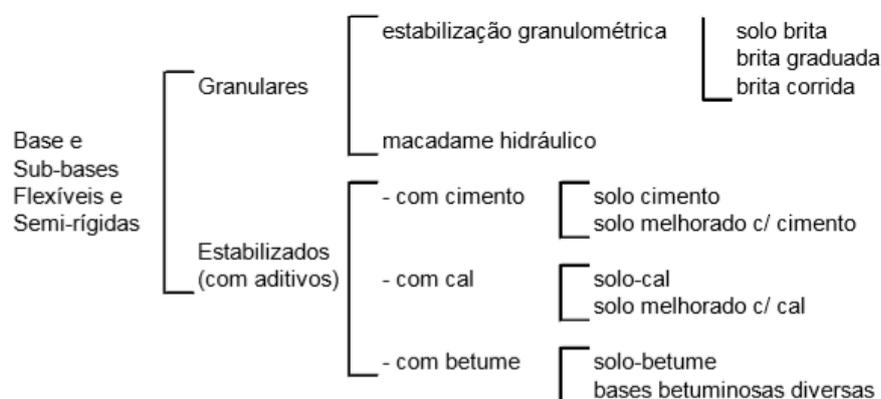
A estrutura de um pavimento é projetada para receber e transmitir esforços, aliviando as pressões sobre as camadas inferiores. Cada uma dessas camadas possui funções que devem proporcionar aos veículos condições adequadas de suporte e rolamento (BALBO, 2007). Essa estrutura deve ser composta por materiais de boa qualidade e de espessura suficiente de modo a suportar as cargas nele aplicadas. A nível funcional, o pavimento deve manter a sua integridade resistindo às tensões de superfície horizontais e verticais. Além disso, para a construção de um pavimento, também são levados em consideração fatores como o ambiente, custo de ciclo de vida e trânsito, no que toca à estrutura do pavimento e metodologia de projeto. (AASHTO, 2001). Senço (2001) retrata que uma seção transversal típica de um pavimento com todas as camadas possíveis consta de uma fundação e de camadas com espessuras e materiais determinados por métodos de dimensionamento.

2.1.1 Classificação dos pavimentos

Conforme se passou a analisar o pavimento como um sistema em camadas e a calcular tensões e deformações, começou-se a considerar a absorção dos esforços de tração pelas camadas superficiais dotadas de rigidez (MEDINA; MOTTA, 2015). O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) apresenta que, de forma geral, a estrutura de um pavimento pode ser subdividida de acordo com a sua rigidez, podendo ser classificada como flexível, semirrígida ou rígida.

Um pavimento flexível é aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica sob o carregamento aplicado, sendo a carga distribuída em parcelas equivalentes entre as camadas. Pode ser constituído por um revestimento asfáltico sobre uma base granular ou de solo estabilizado. Por sua vez, um pavimento designado como semirrígido caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias, como por exemplo uma camada de solo-cimento revestida por uma camada asfáltica. Já um pavimento rígido é aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e portanto absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado, caracterizado por placas de concreto assentadas sobre o solo de fundação ou sub-base (DNIT, 2006). É possível analisar a classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas de forma esquemática na Figura 1.

Figura 1: Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas



Fonte: Manual de Pavimentação do DNIT (2006, p. 96)

2.1.2 Fadiga em pavimentos

O fenômeno da fadiga em pavimentos é o processo de mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material submetido à um estado de tensões e deformações repetidas, que produzem fissuras e levam à falha após um determinado número de ciclos (ASTM, 1979). Neste sentido, as mudanças estruturais de materiais cimentados associadas à fadiga são resultado do surgimento e propagação de trincas que são consideradas como mecanismo primário de ruptura de pavimentos com camadas de materiais cimentados (BEHAK, 2013).

Os materiais de pavimentação não possuem comportamento puramente elástico, pois acumulam deformações plásticas após cada ciclo de carregamento. A principal propriedade que determina esse comportamento é a resiliência, definida como a capacidade de um corpo carregado elasticamente dissipar a energia armazenada, ou potencial, quando o carregamento é cessado, sendo possível assim, avaliar o processo de degradação por fadiga em função da redução dessa propriedade (ASTM, 1979).

A Austroads (2012) relata um comportamento característico das curvas de módulo de resiliência flexural (MRF) de materiais cimentados, que consiste em três fases de danos. A fase inicial (*bedding-phase*) é caracterizada pela formação de microfissuras nos primeiros ciclos, onde o valor do MRF diminui rapidamente desde o início do carregamento. Em seguida, o MRF diminui a uma taxa constante até um ponto denominado *turning point*, quando inicia-se uma redução acelerada do módulo até a ruptura do material. A Austroads (2012) não determina um critério para definir o limite da *bedding-phase*, mas indica que o *turning point* se encontra a aproximadamente 80% do MRF inicial, indicando também que a ruptura do corpo de prova acontece perto de uma redução de 50% do MRF inicial.

2.2 O solo como material de construção

Os solos são materiais que tem origem no intemperismo ou meteorização das rochas, por desintegração mecânica através de agentes como água, temperatura, vegetação e vento ou por decomposição química e mineralógica (CAPUTO, 1988a).

Sob o ponto de vista da Engenharia Civil, Vargas (1977) define solo como um material que serve de suporte, são arrimados, escavados ou perfurados para sua utilização em obras. O autor conclui que o solo influencia o direcionamento das obras de acordo com suas propriedades e comportamento sob fundações, aterros e taludes. Balbo (2007) explana que o estudo de solos

para fins de pavimentação é fundamental tanto para a escolha de materiais como para a análise de projetos nesta área. Na engenharia rodoviária, considera-se solo todo tipo de material não consolidado ou parcialmente cimentado, encontrado na superfície da terra e que possa ser escavado com pá, picareta, escavadeiras, sem necessidade de explosivos (DNIT, 2006).

2.2.1 Estabilização de solos

O solo natural é um material de características complexas e variáveis, mas que por se apresentar de forma abundante na natureza e com baixo custo de aquisição, torna-se oportuno o seu uso pela engenharia. Diante disso, deve-se definir o modo como esse material será trabalhado, podendo utilizá-lo em sua forma natural e conseqüentemente aceitar as restrições inerentes às suas características, ou então realizar a formulação de um novo material com as propriedades solicitantes do projeto, podendo ser aplicada a prática de estabilização de solos (INGLES; METCALF, 1972).

De acordo com Caputo (1988b), em geral o termo estabilização designa qualquer processo ou tratamento capaz de melhorar a estabilidade de um maciço terroso ou rochoso. Vargas (1977) complementa que é chamado de estabilização do solo, o processo que confere ao solo uma maior resistência, por meio de compactação, correção da sua plasticidade e granulometria ou adição de substâncias que aumentem sua coesão. Villibor (1982) acrescenta que a estabilização tem como finalidade melhorar as propriedades geotécnicas do solo, como aumentar a resistência, reduzir a compressibilidade e a sensibilidade à umidade e alterar os parâmetros de permeabilidade, além de garantir a permanência dessas propriedades no decorrer do tempo e sob ação de cargas.

O solo na maior parte das vezes é visto apenas como o suporte de uma obra, entretanto deve ser visto também como material de construção, pois é utilizado com essa finalidade diversas vezes, como na construção de barragens, aterros e na pavimentação de rodovias. Nesse casos, o solo deverá atender alguns parâmetros para que possa ser utilizado e quando isso não acontecer, deverá ser submetido a um tratamento adequado para que assim venha a satisfazer as exigências e adquirir as propriedades que permitam sua utilização como material de construção (CAPUTO, 1988b). O caso mais recorrente do emprego da estabilização é quando não se dispõe de material com resistência adequada para ser usado como base de pavimentos (VARGAS, 1977).

A escolha de um tipo de estabilização não é simples, devido aos vários fatores a serem considerados, desde as propriedades dos solos empregados, até as condições de clima, de

drenagem, de tráfego e também as condições econômicas (CAPUTO, 1988b). O autor ainda fala que quando trata-se de estabilização na pavimentação, pode-se agrupar os principais tipos em duas categorias, sendo elas a estabilização granulométrica e a estabilização por adição de aglutinantes, também conhecida como estabilização química.

2.2.1.1 Estabilização granulométrica

Para um solo ser estabilizado granulometricamente, ele deverá ter sua granulometria e sua plasticidade corrigida, alterando quantidades de suas frações constituintes (VARGAS, 1977). Caputo (1988b) complementa que a granulometria do solo é conservada ou corrigida pela mistura com um ou mais solos, antes da compactação, procurando-se assim aumentar a coesão e o ângulo de atrito interno. Esse tipo de estabilização é recomendável desde que o solo apresentado ao longo do trecho que se deseja pavimentar, possua características exigidas pelas especificações, seja ele natural ou misturado com algum outro material. Caso isso não seja possível, deve-se estudar possibilidade de estabilização com cimento. Villibor (1982) ainda fala que esse tipo de estabilização ocorre através da combinação e manipulação de solos, em proporções adequadas, de forma a obter um produto com maior estabilidade e adequado para a aplicação em cada caso.

Santanna (1998) complementa que há uma intensa relação entre granulometria e estabilidade, pois a estabilidade é superior para solos com granulometria que lhe confirmam alta densidade, onde as porções finas do solo preenchem os vazios entre as porções maiores, permitindo que haja maior atrito entre elas.

2.2.1.2 Estabilização química

Quando não se é possível dosar as frações para a estabilização granulométrica, recorre-se à adição de substâncias que confirmam ao solo resistência permanente, em geral por meio da cimentação dos grãos ou aumento das forças coloidais que unem os grãos (VARGAS, 1977).

A estabilização química tem como base as reações químicas entre as partículas de solo, a água e os materiais adicionados, que funcionam como agentes estabilizadores, o que permite obter um solo com características mais próximas daquelas que se pretendem para a sua utilização (CRUZ, 2004). Caputo (1988b) relata ainda que neste tipo de estabilização ocorre a junção do solo a uma substância que aumente a sua coesão ou então que o impermeabilize impedindo a diminuição da sua resistência pela ação da água, como o cimento, a cal, pozolanas ou produtos betuminosos.

2.2.2 Estabilização de solos com cal

No processo de estabilização de solos com cal, inicialmente ocorre a hidratação da cal, o que modifica o pH do solo e provoca a floculação das argilas em função das reações de troca de cátions. Após essa etapa inicial, o material sofre uma redução de expansão e retração, o que ocasiona a melhora da sua plasticidade. No decorrer do tempo, ocorrem reações pozolânicas, proporcionando ao material melhores características geomecânicas (SILVA, 2007).

Como exposto em Lovato (2004), a adição de cal ao solo pode ser tratada de duas formas. Quando se deseja apenas alterar algumas propriedades do solo, é feita uma modificação das suas características através de uma baixa adição da cal, apenas o suficiente para desenvolver as reações da fase rápida para que ocorram melhorias na trabalhabilidade e na textura do solo, mas sem a formação de produtos cimentantes. Por outro lado, se a intenção for obter reações pozolânicas, a adição da cal deve ser em maiores quantidades, realizando uma estabilização do solo que ocorre através das reações lentas e que oferece ao solo ganho de resistência, estabilidade e durabilidade. Cristelo (2001) enfatiza que o teor de cal a ser utilizado depende do objetivo específico do processo que pode ser dado por modificação ou estabilização do solo. Sendo assim, o teor ótimo depende dos critérios técnicos, caracterizados pela resistência e durabilidade que se pretende alcançar. Em geral, para as mais diversas finalidades tanto em nível experimental quanto em aplicações, utilizam-se teores que variam de 4 a 10% (BERNUCCI et al., 2008).

As principais características do solo capazes de influenciar as reações de misturas solo cal são o seu pH, o teor de matéria orgânica, a drenagem natural e presença excessiva de solo permutável, mineralogia da fração argilosa, grau de intemperismo e a presença de carbonatos ou sulfatos (LIMA et al., 1993). Ao se adicionar cal em um solo argiloso, consegue-se alterar suas propriedades físicas, obtendo-se uma melhora na plasticidade, na trabalhabilidade e nas características de resistência, tensão-deformação e fadiga. Para tanto, essas alterações dependem de diversos fatores como tipo e teor de cal, energia de compactação, tempo e temperatura de cura, que são parâmetros de grande influência (LOVATO, 2004). Segundo estudos realizados por Dias (2004) de um modo geral todo solo que contém argila pode ser estabilizado com cal. Geralmente se o índice de plasticidade for maior ou igual a 10%, a estabilização com cal é mais econômica do que com o cimento.

De acordo com Little (1999), a estabilização de solos com cal normalmente acarreta em um aumento de mais de 10 vezes no módulo de resiliência e em uma redução significativa na deformação de ruptura, quando comparado com solos não estabilizados. Ainda segundo o autor, à medida em que ocorrem as reações pozolânicas, o solo tem um ganho de resistência e concomitantemente ocorre um processo de enrijecimento, desta forma, misturas solo-cal geralmente são de 10 a 25 vezes mais rígidas do que solos não estabilizados.

2.2.2.1 *Dosagem solo-cal*

A dosagem de uma mistura solo-cal tem como finalidade obter a quantidade de cal à ser adicionada ao solo para fornecer durabilidade e resistência adequadas ao emprego que o material se destina (INGLES; METCALF, 1972). Sendo assim, existem inúmeros métodos de dosagem que são realizados a partir de testes laboratoriais, dentre eles destacam-se:

- Método do pH: desenvolvido por Eades e Grim (1966), consiste na determinação do teor mínimo de cal que produza um aumento no valor do pH para 12,4;
- Método do ICL (*Initial Consumption of Lime*): é uma variação do método do pH proposta por Rogers et al. (1997), onde o teor mínimo de cal é aquele onde o pH atinge um valor constante e máximo;
- Método *Lime Fixation Point*: proposto por Hilt e Davidson (1960), o método é baseado no limite de plasticidade, que determina o teor de cal máximo que proporciona uma melhoria na trabalhabilidade do material mas sem ganhos expressivos de resistência.
- Método de Thompson (1966): define como reativo um solo que apresente um aumento de resistência à compressão de pelo menos 345 kPa quando estabilizado com cal.

2.2.2.2 *Parâmetros de dosagem para materiais estabilizados segundo a Austroads (2002)*

A Austroads (2002) classifica os materiais que podem ser gerados a partir do tratamento com diversos agentes estabilizantes, quanto a sua resistência à compressão simples e módulo de resiliência flexural aos 28 dias de cura convencional, como mostrado na Tabela 1. A especificação também indica que a cura dos corpos de prova pode ser realizada tanto convencionalmente quanto através de processo acelerado em estufa. Além disso, recomenda a verificação da taxa de ganho de resistência entre corpos de prova ensaiados aos 7 dias e aos 28 dias de cura convencional.

Tabela 1: Parâmetros para cada nível de cimentação

Nível de cimentação do material	RCS (MPa)	MRF (MPa)
Modificado	< 1,00	< 1000
Levemente cimentado	1,00 - 4,00	1500 - 3000
Fortemente cimentado	> 4,00	> 5000

Fonte: Adaptado de Austroads (2002)

2.3 Reforço de solos

Assim como a estabilização, a técnica de reforço de solo tem como objetivo o melhoramento das propriedades do solo, como o aumento da resistência e diminuição da sua compressibilidade e permeabilidade. Essas melhorias são buscadas através da incorporação de elementos que possuam elevada resistência à tração (CASAGRANDE, 2001).

Parte dos reforços utilizados em solos é de origem polimérica, devido ao grande avanço da indústria do petróleo e ao desenvolvimento de polímeros como plásticos, fibras, borrachas e adesivos (ILLSTON, 1994). A técnica de reforçar solos com fibras encontra-se inserida na tecnologia dos materiais compósitos, que são originados da combinação de dois ou mais materiais que juntos apresentam propriedades que não são encontradas nos materiais originais, quando avaliados separadamente. De acordo com Budinski (1996), um material compósito é constituído por uma matriz e um elemento de reforço e são desenvolvidos para otimizar os pontos fortes de cada uma destas duas fases.

2.3.1 Utilização de fibras no reforço de solos

A inclusão de fibras gera um compósito bastante interessante para a engenharia geotécnica, o fibrossolo, que consiste na mistura de solo e fibras para utilização em pavimentos e aterros. Dessa forma os solos reforçados com determinados tipos de fibras podem apresentar melhorias em muitos parâmetros de engenharia, tornando-se aptos a desempenhar determinadas funções que anteriormente não poderiam (TRINDADE et al., 2004).

Segundo Higgins (1994), as fibras atuam controlando a abertura e o espaçamento entre as fissuras do solo, distribuindo de forma mais uniforme as tensões. De acordo com Taylor (1994), o maior potencial dos materiais compósitos fibrosos está no estado pós-fissuração, onde as fibras contribuem de forma mais efetiva na resistência do material, o que por consequência aumenta a sua capacidade de absorção de energia, isso porque a deformação necessária para

causar fissuras a uma mistura cimentada é inferior à elongação das fibras, onde não é esperado aumento de tensão de fissuração.

As fibras quando adicionadas à uma matriz cimentada, tendem a reforçar o compósito sobre todos os modos de carregamento de tensões de tração e ainda melhoram a ductilidade e tenacidade (JOHNSTON, 1994). As fibras não impedem a formação de fissuras, no entanto aumentam a resistência à tração do material através do controle da propagação das fissuras (TAYLOR, 1994).

2.3.1.1 Tipos de fibras utilizadas no reforço de solos

A eficiência da adição de fibras à um material depende muito das suas características, processo de fabricação e material pela qual é composta. Dessa forma, a definição do tipo de fibra a ser utilizada deve-se basear pelas características da matriz que vai receber a adição e das propriedades que desejam ser melhoradas. Existe uma ampla variedade de fibras disponíveis e que podem ser utilizadas em compósitos fibrosos, sendo elas naturais, poliméricas, minerais ou metálicas.

a) Fibras naturais

Hannant (1994) cita como exemplos deste tipo de fibra, materiais derivados do bambu, juta, capim elefante, malva, coco, piaçava, sisal e cana-de-açúcar. Uma das desvantagens encontradas com o uso de fibras naturais se dá pelo fato destas serem oriundas de matéria orgânica. Isso contribui para o ataque de fungos e insetos que associado ao efeito alcalino do cimento, interfere decisivamente na vida útil do compósito (AGOPYAN, 1987). Dessa forma, o problema principal a ser analisado quando utilizadas fibras vegetais é a durabilidade dos compostos que serão formados. Como vantagens podem ser citadas a sua abundância, baixo custo, não prejudicial à saúde e meio ambiente (SILVA, 2007).

b) Fibras poliméricas

As fibras provenientes de polímeros apresentam diferentes denominações e comportamentos, que de acordo com a sua estrutura química dão origem aos diferentes tipos de fibras. Dentre essa classe se destacam as fibras de polipropileno, de polietileno e de poliéster que possuem alta resistência e fibras de poliamida (CASAGRANDE, 2001).

A fibra de polipropileno é uma das mais utilizada em estudos de novos materiais geotécnicos. O polipropileno é constituído por um material polimérico que é o termoplástico, que consiste em uma série de longas cadeias de moléculas polimerizadas, as quais podem deslizar umas sobre as outras. Dessa forma, possuem grande flexibilidade e tenacidade além de propiciarem aumento da resistência ao impacto aos materiais a que é incorporada (SPECHT, 2000). Sua utilização no solo proporciona um aumento na resistência e na ductilidade do mesmo. Essa inclusão, em muitos estudos, mostrou uma mudança no comportamento tensão-deformação para grandes deformações e apresentou um acréscimo de resistência (CASAGRANDE et al, 2002).

c) Fibras metálicas

As fibras metálicas de maior utilização são as fibras de aço, que possuem alta resistência e são relativamente grossas, com aproximadamente 300 µm por exemplo. A ruptura de um compósito com este tipo de fibra geralmente está associada ao arrancamento da fibra e não a sua ruptura (SPECHT, 2000). Esse tipo de fibra possui grande variedade de formatos, o que aumenta sua resistência ao arranchamento e sua aderência à matriz (HANNANT, 1994). Uma desvantagem é que dependendo do meio em que estão inseridas, podem apresentar problemas de corrosão, necessitando de um banho de técnicas para minimizar tal problema (TAYLOR, 1994).

d) Fibras minerais

As principais fibras minerais mais encontradas são provenientes: do vidro geralmente na forma de fios compostos por centenas de filamentos e que em sua maioria é susceptível ao ataque dos álcalis; do carbono que apresentam alta resistência à tração e grande aderência à matriz; e do amianto que apesar de também apresentar boa resistência à tração e aderência à matriz, tem sua utilização proibida na construção civil de muitos países, devido a liberação de partículas que danificam os alvéolos pulmonares se aspiradas (TAYLOR, 1994).

Na utilização de fibras como reforço de compósitos na construção civil, a escolha do tipo de fibra é de fundamental importância, tendo em vista as várias opções existentes no mercado. Como por exemplo, deve-se levar em conta que as fibras naturais sofrem decomposição, tendo uma vida útil menor em relação às sintéticas. Contudo, para o uso de

forma correta, deve-se levar em consideração fatores como a durabilidade, a vida útil e os agentes e mecanismos de degradação que possam atingir o material (JOHN, 1999).

2.4 Geração de resíduos sólidos industriais no Brasil

O aumento do consumo por parte da população, seja em qualquer setor da indústria, eleva a demanda pela extração de matéria-prima, seu processamento, produção, distribuição, geração de resíduos, tratamento e disposição final. Neste contexto, os resíduos industriais vêm sendo depositados, historicamente, de maneira inadequada no Brasil, muitas vezes, sem separação. Além disso, a ausência de programas eficazes de gestão de resíduos faz com que cada vez mais resíduos sejam gerados sem que haja uma correta utilização ou deposição destes, proporcionando um passivo ambiental que compromete a qualidade de vida. Uma boa parte destes resíduos é perigosa e contém elementos que podem prejudicar a saúde humana, bem como contaminar o solo e os lençóis freáticos (RIBEIRO; MORELLI, 2009)

Para que esses resíduos possam ser gerenciados e obter uma disposição final de forma adequada, a NBR 10004 (ABNT, 2004) separa esses materiais em categorias e classifica-os quanto aos seus potenciais riscos ao meio ambiente e à saúde pública. A classificação desses resíduos ocorre através da identificação do processo ou atividade lhes deu origem, do reconhecimento das suas características e materiais constituintes e por fim da comparação desses constituintes com substâncias já conhecidas pelo seu impacto à saúde e ao meio ambiente. Essa identificação se dá através dos ensaios de lixiviação pela NBR 10005 (ABNT, 2004) e solubilização pela NBR 10006 (ABNT, 2004) e resulta nas seguintes classificações:

- a) Resíduos classe I – Perigosos: são materiais que apresentam periculosidade, podendo ser inflamável, corrosivo, reativo, tóxico ou patogênico. Esses resíduos constam nos anexos A e B da referida norma;
- b) Resíduos classe II – Perigosos: os resíduos classificados nesta classe estão listados no anexo H da norma e dividem-se em duas subclasses:
 - Resíduos classe II A – Não inertes: esses resíduos podem conter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
 - Resíduos classe II B – Inertes: são materiais que mesmo em contato dinâmico ou estático com a água não tem seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões apresentados no anexo G da norma.

2.4.1 Cinza da casca de aveia

A aveia branca cultivada no Brasil tem os estados do Rio Grande do Sul e do Paraná como os seus principais produtores, revezando-se ano a ano quanto a ser o maior produtor. No Rio Grande do Sul, a área de cultivo da aveia branca vem em constante crescimento, ampliando sua implantação ano a ano devido ao aumento da demanda no decorrer dos últimos períodos, especialmente como cobertura de solo. Das cidades gaúchas destacam-se Ijuí, Santa Rosa, Frederico Westphalen e Passo Fundo como os municípios com maior área de cultivo e maior produção do estado (EMATER, 2019).

Em 2019 a safra brasileira de aveia branca foi de 809,9 mil toneladas, sendo 94% deste montante produzidos na região sul e 71% apenas no Rio Grande do Sul. No mesmo ano a área de cultivo no país alcançou cerca de 398 mil hectares, sendo mais de 90% destas localizadas na região sul e 75% no estado gaúcho (CONAB, 2020). Em 2019 estima-se que a área de cultivo do Rio Grande do Sul tenha chegado à 299 mil hectares, a maior implantada até hoje nos últimos dez anos (EMATER, 2019).

A produção de aveia traz consigo vários subprodutos do grão, que são beneficiados de acordo com a demanda de mercado, geralmente divididos em flocos, flocos finos, farinhas e farelos, assim como a própria casca que vem sendo reaproveitada no processo industrial como biomassa. Dados de setembro de 2018 mostram que a biomassa é a maior fonte da matriz térmica de energia em capacidade instalada com 9,1% do total, sendo esse valor superior até à outras matrizes como a eólica e a solar, ficando atrás apenas da matriz hidráulica. Já na produção de energia a biomassa é a segunda maior da matriz térmica com 7,2% estando atrás do gás natural que possui 8,8% (MME, 2018).

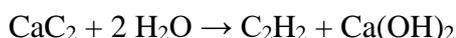
No ano de 2013 a fábrica de Porto Alegre da PepsiCo, recebeu o Prêmio ECO concebido pela Amcham Brasil (Câmara Americana de Comércio), pela iniciativa de utilização da casca de aveia, que era resíduo do processo produtivo, em substituição ao gás natural como fonte de energia na caldeira de vapor que abastece suas linhas de produção. Com o projeto pioneiro na PepsiCo e no Brasil e em atividade desde 2011, foi possível reduzir em 38% o consumo de energia por quilo de aveia produzido localmente, além da redução de 1.042 toneladas nas emissões de gases de efeito estufa. A iniciativa reutiliza 1.440 toneladas de casca de aveia por ano, o que representa a redução de 20% deste resíduo, além disso também ocorreu a diminuição

do consumo de 43.000 m³/mês de gás natural, um combustível de origem fóssil não renovável (SIMABESP, 2013).

A utilização de materiais orgânicos como biomassa tal como o bagaço de cana-de-açúcar e as cascas de arroz e aveia é uma forma de reaproveitar esses subprodutos agrícolas, mas que acaba gerando cinzas residuais da queima, sendo necessário buscar uma destinação também para estes materiais. A cinza do bagaço de cana por exemplo é utilizada como adubo nas próprias lavouras de cana-de-açúcar, apesar de ser um material de difícil degradação e que apresenta poucos nutrientes minerais, por este fato tem-se buscado aplicações que possam agregar maior valor ao subproduto, como o emprego como aditivo mineral em materiais cimentícios (CORDEIRO, 2006). Já a cinza da casca de arroz tem sido visada para utilização como pozolana em concretos e até mesmo como agente estabilizante de solos quando combinada com cal ou cimento Portland, para pavimentação de baixo tráfego (BEHAK, 2007). Enquanto isso, a cinza da casca de aveia não tem um destino consolidado para o seu reaproveitamento e acaba sendo descartada em aterros ou utilizada para compostagem, com o risco deste descarte ocorrer de forma inadequada.

2.4.2 Cal de carbureto

A cal de carbureto é um rejeito industrial gerado através da produção do gás acetileno, onde a cada 100 m³/h de acetileno produzido são geradas cerca de 12 toneladas de cal de carbureto (RAMASAMY et al., 2002). A formação desse resíduo provém da seguinte reação química entre o carbureto de cálcio (CaC₂) e a água (H₂O):



Desta reação química é formado o gás acetileno e gerado um resíduo, que apresenta em sua composição química básica o hidróxido de cálcio. O resíduo cal de carbureto é obtido na forma líquida, por isso após a reação esse material é transportado para tanques de decantação e para acelerar a perda de umidade é submetido a um equipamento à vácuo onde é obtido na forma sólida, com teor de umidade de aproximadamente 50%. Este resíduo é colocado à disposição para comercialização ou colocado em aterros para resíduos sólidos (THOMÉ, 2008).

A cal de carbureto apresenta características semelhantes às cales comercializadas, uma vez que é composta por óxido de cálcio hidratado e possui alto potencial para ser utilizado como aglutinante na estabilização de solos. No entanto, devido ao teor de umidade e baixa finura, possui algumas restrições técnicas (Consoli, 2003). Além disso, seu uso pode ser restringido

pelas propriedades físicas que apresenta, como a cor cinza com tom azulado em função da presença de carbono, o que compromete sua aceitação no mercado. Entre outras desvantagens pode-se citar também o maior diâmetro das partículas, que diminui a sua reatividade e aumenta a sua velocidade de deposição, que quando dispersa em um meio líquido apresenta uma velocidade de deposição 8 vezes maior que a cal calcítica (BORGES, 1979).

No entanto, o emprego da cal de carbureto se apoia na vantagem econômica para obras em regiões que possuem unidades produtoras e na necessidade de aproveitamento dos rejeitos industriais, podendo ser empregada para melhoria do subleito, estabilização de sub-bases e até bases de estradas de tráfego leve, além de acostamentos e obras de manutenção (BORGES, 1979). Outro fator relevante para sua utilização é a afinidade com os silicatos e aluminatos, importantes para a formação das reações pozolânicas, que auxiliam no melhoramento das propriedades das partículas de solo. Recentemente, em 2012, a cal de carbureto teve sua classificação alterada, passando de resíduo perigoso para resíduo não perigoso. Essa alteração se deu devido às grandes oportunidades de seu reaproveitamento como subproduto (WHITE MARTINS, 2012).

2.5 Estabilização e reforço de solos: estudos experimentais

Nesta seção serão citados alguns estudos que trabalharam com a adição de fibras, cinzas e/ou cal para melhoramento de solos e que foram analisados e considerados em algumas definições da metodologia deste trabalho.

2.5.1 Solos reforçados com fibras

Ahmed (1993) avaliou as características de compressibilidade de misturas de solos com chips de pneu com tamanhos entre 12mm e 25mm. A partir dos resultados obtidos, foi observado que a compressão total das amostras aumenta com o incremento da porcentagem de chips de pneu, obtendo-se os mais altos valores de compressão nas amostras contendo uma maior quantidade de resíduo.

Casagrande (2001) através da adição de fibras de polipropileno a um solo residual de arenito percebeu que a mistura formada possuía um comportamento elasto-plástico de enrijecimento, sendo que um acréscimo de resistência do material foi percebido em aproximadamente 2,5% de deformação axial. A autora também conclui que em uma etapa inicial o comportamento resistente é controlado pela matriz de solo, em uma etapa intermediária o comportamento é comandado conjuntamente pela matriz e pelas fibras e uma etapa final, esse

comportamento do material é comandado essencialmente pelas fibras. Isso se deve ao fato de as fibras proporcionarem um emaranhado que envolve e ancora os grãos do solo, o que aumenta a coesão do solo residual. Além disso, verificou-se que quanto maior for o comprimento das fibras, maior o ganho de resistência.

A inclusão de fibras de vidro em solos arenosos tratados com cimento foi estudada Consoli et al. (2004) e acarreta um aumento considerável da tensão desvio e reduz a fragilidade deste tipo de mistura. Maher e Ho (1994) também analisaram esse tipo de mistura e verificaram que a adição de 1% a 4% de fibra de vidro a areia tratada com cimento resultou em um aumento de resistência à compressão simples de 50% em comparação com amostras não reforçadas.

Cetin et al. (2006) realizaram um estudo experimental, através de uma série de ensaios mecânicos, em argila reforçada com frações de pneu grossas (entre 2mm e 4,75mm) e finas (<0,425mm), utilizando teores de 10, 20, 30, 40 e 50%. Os resultados mostram que as misturas com até 20% de chips de pneu grosso e com até 30% de chips de pneu fino, apresentaram um considerável ganho de resistência ao cisalhamento.

Silva (2007) avaliou o reforço de solos siltosos com fibras de PET, sisal, polipropileno e raspas de pneu, este último com teores de 5 e 7,5% e ainda o melhoramento desses solos com aditivos químicos e orgânicos, sendo um deles a cal com teores de 2 e 4%. A adição de 5% de raspas de pneu diminuiu a expansibilidade do solo e apresentou aumento de resistência ao cisalhamento em tensões acima de 120kPa. Com relação aos aditivos o teor de 4% de cal apresentou desempenho satisfatório na resistência proporcionada ao solo.

Edinçliler et al. (2010), executaram ensaios de compressão triaxial drenados e não drenados para determinar a resistência ao cisalhamento de uma areia siltosa e misturas com resíduos de pneu. Foram utilizadas borracha de forma granular e fibras de pneu (<5,8mm), nos teores de 5, 10, 20, 30 e 40% em relação ao peso do solo. Os resultados indicaram que a máxima resistência foi obtida com a adição de 5% de fibras de pneu.

Jaramillo (2016) avaliou a adição de fibras de borracha pneu de dois tamanhos (2mm e 4,6mm) e em três teores (5, 10% e 15%) no comportamento mecânico de um solo argiloso e outro arenoso. Os resultados mostraram que ambos os tamanhos de fibras usadas contribuem no aumento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de ambos os solos e aumentam a energia de deformação absorvida durante o cisalhamento, sendo a porcentagem de 10% de fibras de borracha de pneu a mais efetiva.

2.5.2 Solos estabilizados com cal e cinzas

O estudo de Núñez (1991) verificou a influência da adição de cal nos teores de 3, 5, 7 e 9% à um solo residual de arenito Botucatu, em diferentes períodos de cura. Para os corpos de prova curados por 28 dias, o aumento na porcentagem de cal na mistura não influenciou consideravelmente na resistência à compressão simples, entretanto, para os corpos de prova curados por 90 dias, constatou-se uma grande influência do teor de cal no aumento da resistência.

Carraro (1997) estudou a estabilização de um solo residual de arenito utilizando cinza volante (25%) e cal de carbureto (4%, 7% e 10%), buscando a avaliação da deformação e resistência. A utilização dos resíduos acarretou uma mudança positiva em relação ao comportamento mecânico do solo, apresentando desempenho bastante superior em termos de resistência ao cisalhamento e deformabilidade. Apesar do solo já apresentar uma certa reatividade à cal de carbureto, a adição de cinza volante propiciou uma melhora substancial na reatividade pozolânica da mistura contendo os dois resíduos.

Thomé (1999) trabalhou com os resíduos cinza pesada (0%, 20%, 33%, 50% e 100%) e cal de carbureto (1%, 3% e 5%) na estabilização de um solo residual de arenito. O autor observou que o teor de 1% de cal de carbureto já satisfaz as reações iniciais da mistura solo-cinza, ainda assim foi definido um teor de 5% para todas as misturas. Também se verificou que os diferentes teores de cal adotados não influenciaram nos parâmetros de compactação. Ainda foi constatado que o aumento do teor de cinza na mistura ocasionou redução do peso específico seco máximo e crescimento da umidade ótima, assim como um crescimento da resistência à compressão simples aos 28 dias de cura. Por fim, definiu-se como mistura ótima os teores de 50% de solo, 50% de cinza pesada e 5% de cal de carbureto e com essa mistura foi possível verificar que os valores de resistência cresceram com o tempo de cura, mas cessaram aos 120 dias, possivelmente pela ausência de reações pozolânicas após esse período.

Behak (2007) analisou a estabilização de um solo sedimentar arenoso utilizando cinza de casca de arroz e cal. As misturas solo-cinza-cal apresentaram ruptura frágil no ensaio de resistência à compressão simples e um comportamento tensão-deformação mais rígido do que o solo natural. A melhor mistura para a resistência à tração por compressão diametral foi a com 20% de cinza e 10% de cal, assim como no ensaio de durabilidade, onde essa mesma mistura apresentou o quociente de resistência mais elevado. Diante disso, o autor concluiu que a

associação de cinza de casca de arroz e cal ao solo produz um material mais resistente, durável e menos deformável que o solo natural.

Dalla Rosa (2009) estudou a estabilização de um solo residual arenito utilizando cal (3%, 5%, 7% e 9%) e cinza volante (0%, 12,5% e 25%), avaliando as principais variáveis envolvidas no ganho de resistência dessas misturas. Observou-se que a resistência aumentou linearmente com o aumento da quantidade de cal, essa relação também foi constatada com o aumento do teor de cinza na mistura. Outra variável importante para o ganho de resistência foi o tempo de cura, onde o crescimento também foi proporcional. Além disso, verificou-se que a resistência aumentou exponencialmente com a redução da porosidade do material, devido a uma cimentação mais efetiva do material possibilitada pelo maior intertravamento entre as partículas.

Toohey et al. (2013), estudaram o comportamento tensão-deformação e a resistência de quatro solos estabilizados com cal e submetidos à cura normal com temperatura de 23°C e à cura acelerada com temperatura de 41°C. Foi possível constatar que o comportamento das misturas é semelhante em ambos tempos de cura, havendo apenas uma aceleração causada pela cura à 41°C, mas com as mesmas reações químicas influentes presentes na cura à 23°C. Os resultados de resistência mostraram que as amostras curadas por até 6 dias à 41°C, atingem valores de resistência equivalentes a cura de 28 dias à 23°C.

Santos (2015) buscou identificar o efeito da adição de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cinza de casca de arroz, nas propriedades de resistência e deformabilidade de um solo arenoso e de um solo argiloso. Para tal, foram variadas as porcentagens da cinza de bagaço de cana em 5%, 10% e 20% no solo arenoso e 10% e 20% no solo argiloso. Já para a cinza de casca de arroz, a variação foi de 10% e 20% para ambos os solos estudados. Pelos resultados, verificou-se que inserção de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em ambos os solos se mostrou viável, resultando em melhoria dos parâmetros de resistência. Já para a cinza de casca de arroz, a aplicação mostrou-se viável apenas para o solo. Constatou-se também que o melhor comportamento obtido foi com o teor de 20%, para as misturas com ambas as cinzas.

2.5.3 Materiais cimentados reforçados com fibras

Specht (2000) avaliou o efeito da inclusão de fibras de polipropileno de diferentes comprimentos (12 e 36mm), tipos (uma em pequenos filamentos e a outra fibrilada) e proporções (0,25%, 0,5% e 0,75%) em um solo residual cimentado com 3,5% e 7% de cimento,

sobre as propriedades de resistência e deformabilidade. Com os resultados observou-se que as fibras em pequenos filamentos, que apresentam maior capacidade de absorção de energia, suportaram a mais ciclos de carga após fissuração da matriz no ensaio de vida de fadiga. Esse mesmo tipo de fibra ocasionou maior redução do módulo de resiliência e alterou o comportamento do material na ruptura, que era frágil, tornou-se dúctil. Quanto à resistência, observou-se de maneira geral uma queda nos valores de compressão diametral.

Outros autores verificaram a eficácia das fibras sintéticas em misturas de solo-cinza-cal, como Kumar *et al.* (2007) que adicionaram quatro tipos de fibras de poliéster a um solo expansivo estabilizado com cinza volante e cal. Os pesquisadores observaram que pequenas quantidades dessas fibras (1,0% a 1,5%) poderiam aumentar a resistência à compressão não confinada em até 100% e a resistência à tração em até 135%.

Festugato (2008) verificou que sob condições de compressão triaxial no interior de uma massa de solo, as fibras não rompem por tração e que quando a ruptura do compósito ocorre no trecho inicial da envoltória de resistência, a interação entre a matriz de solo e as fibras se dá através do deslizamento e do alongamento das fibras. Alguns anos depois, o autor analisou a rigidez de misturas de resíduos de mineração cimentados com reforço de fibras e percebeu que a evolução da rigidez inicial (G_0) segue tendência logarítmica com o tempo, sendo que a inclusão de fibras não afeta a rigidez inicial das misturas. O pesquisador também constatou que a incorporação de fibras ao resíduo de mineração cimentado conferiu ao material um comportamento de endurecimento, pois a desestruturação da matriz cimentada é compensada pela existência das fibras que absorvem e redistribuem os esforços. Em comparação ao material não reforçado, a inclusão de fibras proporciona o aumento da capacidade do compósito de resistir a ciclos de esforços (FESTUGATO, 2011).

Bianchini (2013) analisou o comportamento tensão-deformação de misturas reforçadas com fibras de polipropileno, considerando os efeitos do comprimento (6, 12 e 24mm) e porcentagem (0,25, 0,5 e 0,75%) no comportamento do solo natural quando submetido a ensaios de cisalhamento direto. Foi possível verificar que a adição de fibras influenciou no aumento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de pico e pós-pico, além disso o efeito da inclusão de fibras foi mais evidente para fibra com 12 mm de comprimento, visto que a fibra com 24mm apresentou problemas na homogeneidade da mistura e acarretou valores inferiores

de resistência. A porcentagem de adição ótima foi de 0,5%, corroborando com resultados vistos em AHMAD et al. 2010e FESTUGATO et al. 2017.

Bhattacharya et al. (2016) realizaram ensaios de resistência à flexão e fadiga para misturas solo-cal e solo-cal-fibras. Os autores utilizaram teor de cal de 5% para as misturas e um teor de 0,6% de fibras, melhorando substancialmente a resistência do solo laterítico. Além disso, foi observado que módulo de ruptura e a resistência à flexão aumentam com a densidade seca. Observou-se correlação entre a vida de fadiga por flexão e a razão da densidade seca para repetidos esforços de flexão e entre a deflexão e o estresse flexural repetido de amostras curadas.

Lima (2017) por sua vez, avaliou o comportamento mecânico a partir de um ensaio a quatro pontos de corpos prismáticos com solo e com as composições solo-cal, solo-fibra e solo-cal-fibra, nas proporções de 2% de cal e 1,5% de fibra, em relação à massa seca do solo. Tanto a adição da cal de carbureto ao solo quanto a inserção do resíduo de fibra do curauá produziram acréscimo no valor do módulo de rigidez das misturas, demonstrando valores que tendem a ser maiores, conforme o aumento do tempo de cura.

Godoy (2018) estudou a resistência, rigidez e durabilidade de misturas com 25% de cinza volante e 75% de areia, comparando-se ciclos de molhagem-secagem com ciclos de congelamento-degelo. Para isso variou o teor de cal hidratada (3%, 5%, 7%) e fez adições de 0,5% de NaCl como catalisador e de 0,5% de fibras de polipropileno, chegando à conclusão de que a adição de NaCl e fibras de polipropileno ocasionou ganhos de durabilidade por congelamento e degelo, resistência e rigidez.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo será exposto o planejamento da pesquisa, abordando as variáveis estudadas e as etapas seguidas. Além disso, serão apresentados os materiais utilizados na pesquisa e os ensaios laboratoriais realizados para a obtenção dos resultados.

3.1 Planejamento da pesquisa

O estudo foi dividido em três etapas, sendo a primeira dedicada à obtenção e caracterização dos materiais. A segunda parte do estudo foi de caráter exploratório, no qual realizaram-se ensaios piloto para definição de algumas variáveis fixas e a partir de ensaios resistência foram definidas misturas com teores ótimos de cinza e cal. A terceira e última etapa foi destinada ao ensaio de fadiga em quatro pontos, onde foram ensaiadas misturas escolhidas na etapa anterior, verificando também a influência da adição das fibras.

3.1.1 1ª Etapa

A primeira etapa do programa experimental compreendeu a coleta e caracterização dos materiais, mediante análises das características físicas e químicas de cada material individualmente. Também foi caracterizada uma mistura solo-cinza, já que essa associação foi a principal matriz utilizada nos ensaios, com o teor médio de cinza estudado (20%). Através do método ICL, avaliou-se o teor mínimo de cal a ser utilizado na mistura solo-cinza para que ocorressem as trocas catiônicas. Também foi realizado o ensaio de compactação Proctor na energia normal para o solo natural, para uma mistura solo-cal e para as misturas solo-cinza-cal, afim de obter as características teor de umidade ótimo e o peso específico aparente seco máximo a serem utilizados nas etapas seguintes do estudo.

3.1.2 2ª Etapa

Esta segunda parte da pesquisa foi inicialmente dedicada à investigação e definição de algumas variáveis fixas do estudo, como o teor de cal, o tempo de cura e a temperatura de cura. Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral em triplicada, que serviram de parâmetro para a definição das misturas utilizadas na sequência do programa experimental. Nesta etapa foi analisada a influência de diferentes teores de cinza na resistência da mistura, assim como avaliada o comportamento causado pela inserção da fibra. A Tabela 2 apresenta os teores de cinza e fibra utilizados, assim

como o código de cada mistura, onde o “S” aparece apenas de forma representativa à presença de solo na mistura. Na sequência, um “C” maiúsculo que representa a cinza, seguido pelo valor do respectivo teor aplicado (10, 20 ou 30). Logo após o “c” minúsculo representa a cal e o número em seguida o seu respectivo teor (x), a ser definido. Por fim, o “F” está presente no código das misturas que apresentam fibra na composição. A ausência de alguma letra no código, significa a ausência do respectivo material na mistura.

Tabela 2: Variáveis investigadas e código de referência das misturas

Cinza (%)	Fibra (%)	Código
0	0	Sc(x)
0	0,5	Sc(x)F
10	0	SC10c(x)
10	0,5	SC10c(x)F
20	0	SC20c(x)
20	0,5	SC20c(x)F
30	0	SC30c(x)
30	0,5	SC30c(x)F

Fonte: Autoria própria (2019)

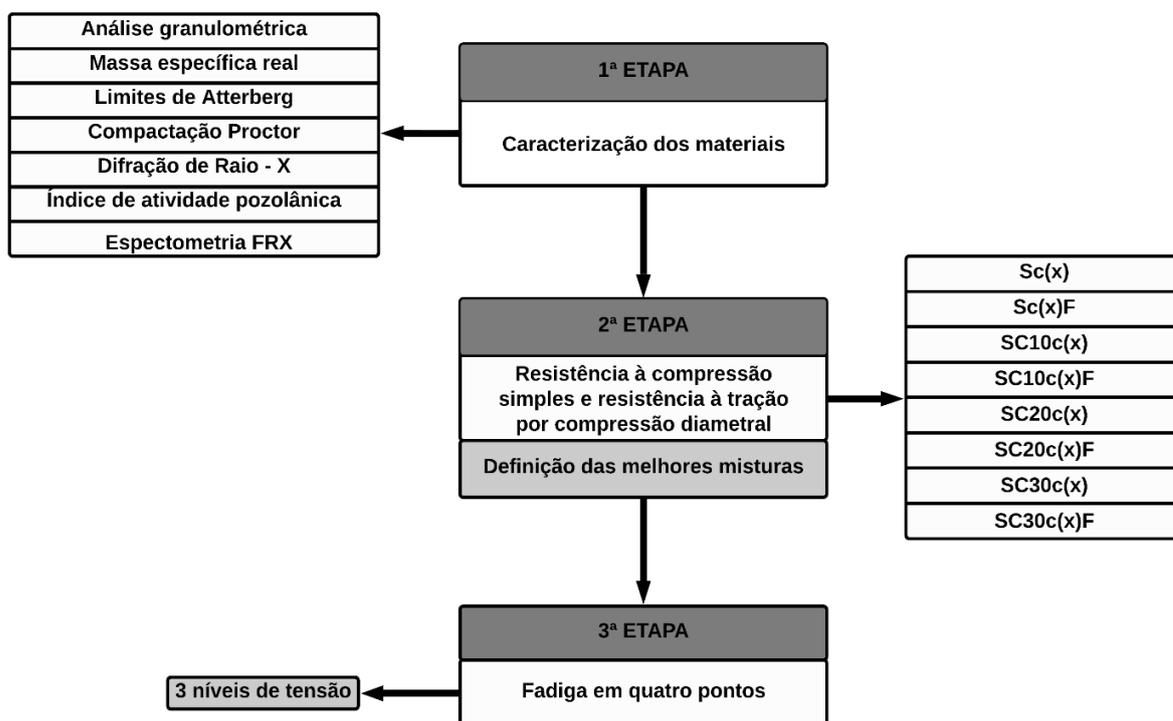
Outros fatores também possuem influência sobre o comportamento de compósitos, principalmente quanto à sua resistência. No entanto, pela necessidade de delimitar este estudo alguns parâmetros foram mantidos fixos, definidos com base na literatura, como o comprimento da fibra de 12mm, que é citado por Bianchini (2013) como a fibra de melhor desempenho no seu estudo, assim como em trabalhos anteriores de Festugato (2008; 2011), nos quais, apesar de não ter sido a fibra de melhor desempenho, apresentou melhoria no comportamento do material. Além disso, foi definida a realização da moldagem dos corpos de prova com a energia de compactação Normal.

3.1.3 3ª Etapa

A terceira etapa ocorreu a partir da definição da melhor dosagem da mistura solo-cinza-cal obtida na etapa anterior. Com a dosagem ótima definida, foram realizados os ensaios de fadiga em quatro pontos, testando as misturas com e sem a adição de fibras e utilizando três diferentes níveis de tensão controlada. Para esta etapa foram mantidas as variáveis fixas da etapa anterior.

Na Figura 2 é possível observar o delineamento do programa experimental apresentando as três etapas de forma sintética.

Figura 2: Delineamento do programa experimental



Fonte: Autoria própria (2019)

3.2 Materiais

Nesta seção são abordados os materiais utilizados na pesquisa, apresentando sua origem e as suas características conhecidas.

3.2.1 Solo

O solo estudado é um solo argiloso residual, coletado do Campo Experimental de Geotecnia da Universidade de Passo Fundo/RS, a uma profundidade de aproximadamente 1,5m, onde localiza-se o horizonte B do perfil. A classificação pedológica segundo Streck et al. (2008) é de um Latossolo vermelho Distrófico húmico (unidade de Passo Fundo). Na Figura 3 pode-se observar o solo coletado já seco e peneirado.

A escolha do solo se deu pela sua grande parcela no território do Rio Grande do Sul, contemplando regiões de relevante importância econômica, além de ter origem das rochas da Formação Serra Geral, que representa um dos maiores derrames vulcânicos do planeta.

Figura 3: Solo do Campo Experimental de Geotecnia da UPF



Fonte: Autoria própria (2019)

3.2.2 Cinza da casca de aveia

A cinza utilizada é proveniente da empresa Saboreal Cereais localizada na cidade de Ajuricaba/RS, que atua na industrialização de grãos e tem como seu principal produto a aveia em flocos. Para o máximo aproveitamento da matéria-prima, a empresa utiliza as cascas de aveia como biomassa nos processos industriais de beneficiamento dos grãos e a partir da queima dessas cascas são geradas as cinzas empregadas nesse estudo. São consumidas em torno de 16 t/mês de casca de aveia para geração de energia, sem controle de queima. A queima das cascas gera aproximadamente 25% de cinzas, resultando em um montante de cerca 4 t/mês de resíduo gerado, que atualmente não tem um reaproveitamento e é descartado.

Após a coleta do material, ele foi seco em estufa por 24 horas à uma temperatura de cerca de 110°C. Após a secagem, realizou-se a moagem das cinzas segundo a metodologia apresentada em Rêgo (2004), utilizando o moinho de bolas especificado para o ensaio de Abrasão Los Angeles empregado em agregados graúdos. O período de moagem foi de 5 horas e a carga empregada foi de 6kg de esferas moedoras para 2,5kg de cinzas. Em sequência da moagem do material, prosseguiu-se com o peneiramento utilizando a peneira nº 200 a fim de obter um material pulverulento com objetivo de aumentar a superfície de contato e maximizar as reações pozolânicas. Cerca de 70% do material passou pela malha da peneira.

A Figura 4 mostra a cinza da casca da aveia após todo o processo de beneficiamento realizado em laboratório.

Figura 4: Cinza da casca de aveia



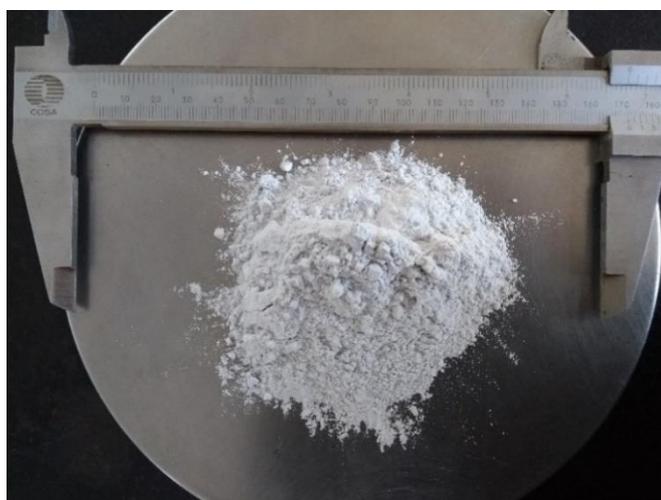
Fonte: Autorial própria (2018)

3.2.3 Cal de carbureto

A cal de carbureto utilizada neste trabalho foi fornecida pela empresa White Martins Gases Industriais S.A., com unidades industriais em quatro municípios do Rio Grande do Sul. Na unidade de Sapucaia do Sul são produzidas em torno de 2160 t/ano de cal de carbureto úmida. Esse resíduo possui 96% de óxido de cálcio, tendo pureza de cálcio maior do que a cal dolomítica comercializada no estado (GODOY, 2018).

Na Figura 5 é possível observar a cal de carbureto após ter passado pelo processo de secagem em estufa durante 24 horas por 110°C, ser destorroada e peneirada na peneira nº 100.

Figura 5: Cal de carbureto



Fonte: Autorial própria (2019)

3.2.4 Fibras de polipropileno

As fibras de polipropileno utilizadas são do tipo FibroMac 12 provenientes da empresa Maccaferri. Os filamentos são quimicamente inertes, estáveis e resistentes ao meio alcalino, além de não absorver água e não oxidar. São indicadas para aplicação em concreto projetado, pré-fabricados, pavimentos, pisos, revestimentos. A Tabela 3 apresenta as especificações técnicas da fibra fornecidas pela empresa e a Figura 6 ilustra uma foto da fibra.

Figura 6: Fibra de polipropileno



Fonte: Autoria própria (2018)

Tabela 3: Propriedades da fibra de polipropileno

Propriedades Físicas	
Diâmetro	18 μ m
Seção	Circular
Comprimento	12mm
Alongamento	80%
Matéria-prima	Polipropileno
Peso Específico	0,91 g/cm ³
Área superficial específica	244 m ² /kg
Propriedades Mecânicas	
Temperatura de fusão	160°C
Temperatura de Ignição	365°C
Resistência à tração	300 MPa
Módulo de Young	3000 MPa

Fonte: Autoria própria (2018).

3.3 Ensaios laboratoriais

Nesta seção são apresentados os ensaios de caracterização e detalhados os ensaios mecânicos especificando as metodologias e normas seguidas. Além dos ensaios especificados,

também foi realizada a análise do solo e dos resíduos através dos ensaios de Difração de Raio-X e Espectrometria de Fluorescência de Raio-X, a fim de identificar e quantificar os compostos e minerais presentes nos materiais. Todos os ensaios foram realizados nos laboratórios da UPF.

3.3.1 Ensaios de caracterização

A Tabela 4 apresenta os ensaios que foram realizados na caracterização dos materiais e suas respectivas normas.

Tabela 4: Ensaios de caracterização e respectivas normas

Ensaios de caracterização	Normas
Preparação das amostras	ABNT NBR 6457/2016
Análise granulométrica	ABNT NBR 7181/2016
Massa específica real	ABNT NBR 6508/2016
Limite de liquidez	ABNT NBR 6459/2016
Limite de plasticidade	ABNT NBR 7180/2016
Compactação Proctor	ABNT NBR 7182/2016
Ensaio de matéria orgânica	ABNT NBR 13600/1996
Índice de atividade pozolânica com cal	ABNT NBR 5751/2015

Fonte: Autoria própria (2018)

3.3.2 Moldagem e cura dos corpos de prova

Os corpos de prova foram moldados através da compactação em camadas, buscando reproduzir o peso específico aparente seco máximo obtido através dos ensaios de compactação na energia Proctor Normal, sendo a quantidade de material por camada e o número de golpes dados ajustados de forma à atender esse parâmetro. Durante o processo de moldagem houve controle de umidade do material, com tolerância de 1%, para mais ou para menos, em relação à umidade ótima. Após a moldagem, foram realizados os procedimentos de pesagem e medição das dimensões dos corpos de prova, a fim de obter um controle adequado sobre a densidade e as dimensões. Caso a massa específica de um corpo de prova diferisse em mais de 30 g/cm³ da massa específica aparente seca máxima nominal, ele seria descartado. Na sequência, os corpos de prova foram identificados e vedados com filme plástico e acondicionados em sacos plásticos, de forma a manter a umidade durante o processo de cura.

Tabela 5 apresenta alguns detalhes da moldagem, como os moldes utilizados e o número de camadas, além dos tempos e temperaturas de cura utilizados em cada ensaio. Após a moldagem, foram realizados os procedimentos de pesagem e medição das dimensões dos corpos de prova, a fim de obter um controle adequado sobre a densidade e as dimensões. Caso

a massa específica de um corpo de prova diferisse em mais de 30 g/cm³ da massa específica aparente seca máxima nominal, ele seria descartado. Na sequência, os corpos de prova foram identificados e vedados com filme plástico e acondicionados em sacos plásticos, de forma a manter a umidade durante o processo de cura.

Tabela 5: Procedimentos e parâmetros de moldagem

Ensaio	Molde (cm)	Soquete	Camadas	Tempo de cura (dias)	Temperatura de cura (°C)
RCS	Cilíndrico (5x10)	Cilíndrico Ø 5cm	3	7, 28	23, 40
RCD	Cilíndrico (5x10)	Cilíndrico Ø 5cm	3	7	40
FQP	Prismático (15x15x50)	Marshall	5	7	40

Fonte: Autorial própria (2020)

Em ensaios preliminares de RCS, com a finalidade de definir parâmetros para a fase final do estudo, avaliou-se dois tempos e duas temperaturas de cura, como detalhado na Tabela 5, seguindo metodologia semelhante a apresentada em Toohey et al. (2013) citado no item 2.5.2, afim de verificar a influência dessas variáveis na resistência. Dessa forma, os corpos de prova a serem curados em temperatura de 23°C foram colocados em câmara climatizada e com umidade controlada não inferior à 95%. Já os corpos de prova curados à 40°C foram colocados em estufa umidificada com temperatura controlada.

Após o respectivo tempo de cura, os corpos de prova foram submetidos à imersão em água por 24 horas, visando aproximar a condição de saturação, minimizando assim os efeitos de sucção. As Figura 7 e 8 mostram os corpos de prova, cilíndricos e prismáticos, durante o processo de cura e a posterior imersão em água.

Figura 7: Corpos de prova cilíndricos durante (a) cura na câmara úmida; (b) imersão em água



Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 8: Corpos de prova prismáticos durante (a) cura em estufa; (b) imersão em água.



Fonte: Autoria própria (2020)

3.3.3 Ensaio de resistência à compressão simples

A resistência à compressão simples foi obtida pelo método DNER-ME 201 (DNIT, 1994) que define a execução do ensaio para misturas solo-cimento. Com a obtenção da carga de ruptura e das dimensões do corpo de prova é possível calcular a resistência à compressão simples. A prensa utilizada no rompimento dos corpos de prova possui capacidade máxima de 4000 kgf. A célula de carga utilizada apresenta capacidade nominal de 500 kgf e resolução de 0,1 kgf. A velocidade de deformação foi de 1,27 mm por minuto. A Figura 9 mostra um corpo de prova no momento da ruptura.

Figura 9: Ruptura do corpo de prova à compressão simples



Fonte: Autoria própria (2020)

3.3.4 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio para obtenção da resistência à tração por compressão diametral foi realizado de acordo com a especificação DNIT-ME 136 (DNIT, 2010b). Com a obtenção da carga de ruptura e das dimensões do corpo de prova é possível calcular a resistência à tração por compressão diametral através da Equação 1.

$$RCD = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (1)$$

Onde:

RCD: resistência à tração por compressão diametral, em MPa;

F: carga de ruptura, em N;

D: diâmetro de corpo de prova, em cm;

H: altura do corpo de prova, em cm.

A prensa utilizada para a ruptura dos corpos de prova à tração por compressão diametral foi a mesma usada na ruptura à compressão simples. No entanto, neste ensaio o corpo de prova é colocado com sua superfície cilíndrica entre dois frisos metálicos de 12 mm e ajustado entre os pratos da prensa. Este frisos são colocados para que o plano de ruptura concentre-se no centro do corpo de prova, o que pode ser observado na Figura 10.

Figura 10: Ruptura à tração por compressão diametral



Fonte: Autoria própria (2020)

3.3.5 Ensaio de vida de fadiga em quatro pontos

Os procedimentos do ensaio de fadiga em quatro pontos foram baseados no método australiano da AUSTROADS (2008; 2012; 2017), desenvolvido para misturas cimentadas e que consiste na aplicação de carregamentos cíclicos de magnitude constante e do registro de informação tanto dos ciclos de carga quanto dos deslocamentos. Além de ser capaz de registrar esses ciclos, o sistema de aquisição de dados deve calcular e gravar tensões e deformações de tração máxima e o módulo de resiliência flexural. Por esse método ser focado em uma abordagem tradicional, não se considera o cálculo de ângulo de fase e energia dissipada no ensaio (LÓPEZ, 2016).

3.3.5.1 Suporte de ensaio e corpos de prova

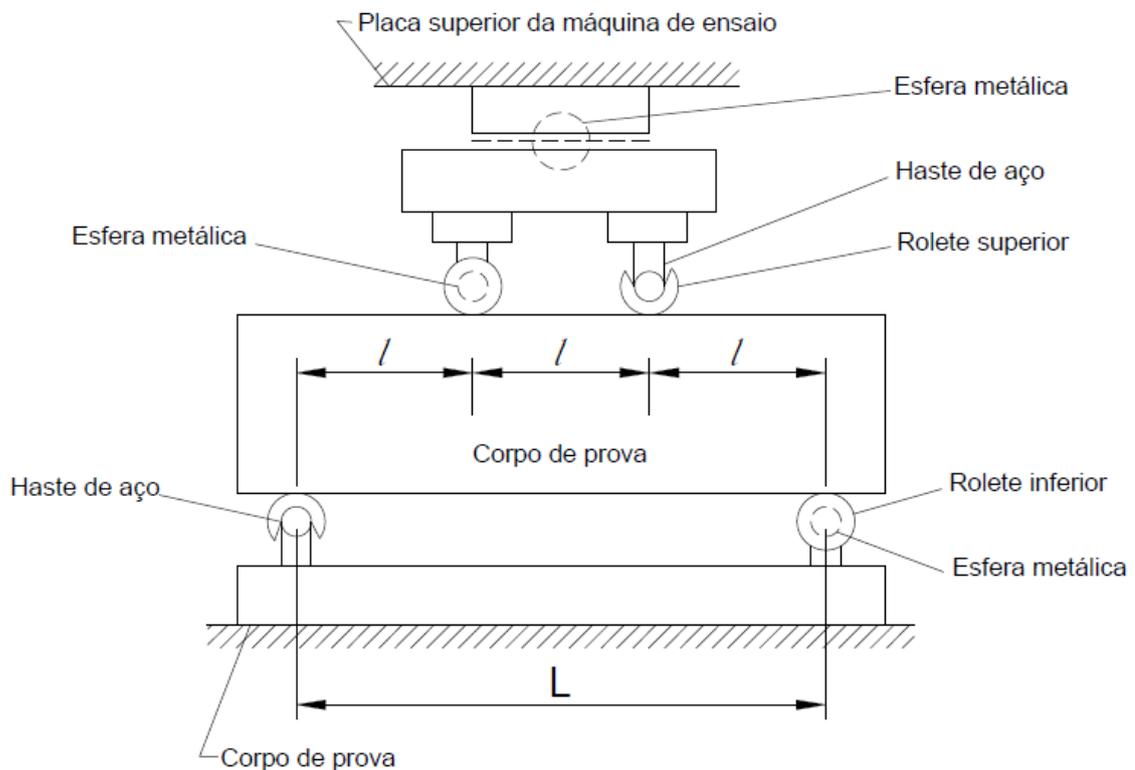
Os corpos de prova utilizados no ensaio de vida de fadiga em quatro pontos são de formato prismático e devem possuir dimensão mínima em função do diâmetro máximo das misturas, de acordo com a Equação 2, adotada de AUSTROADS (2008).

$$d \geq 3D_{m\acute{a}x} \quad (2)$$

Em função das dimensões do equipamento em que são realizados os ensaios, as dimensões dos corpos de prova foram definidas como sendo 150 x 150 x 500 mm, estando de acordo com a recomendação da normativa, já que o diâmetro dos materiais das misturas é

pequeno. Para a realização do ensaio, as vigotas são colocadas de forma biapoiadas e as cargas são localizadas no terço médio do vão, originando um estado de tração uniforme nessa região, zona onde o momento fletor é constante e as tensões cisalhantes são nulas, o que reduz a variação dos resultados. As deformações sofridas pelo corpo de prova são medidas por dois LVDTs, fixados na parte central da estrutura do equipamento. Na Figura 11 pode-se observar o corpo de prova prismático colocado sobre o suporte de quatro pontos.

Figura 11: Suporte de quatro pontos



Fonte: Adaptado de AUSTROADS (2008)

3.3.5.2 Controle do carregamento

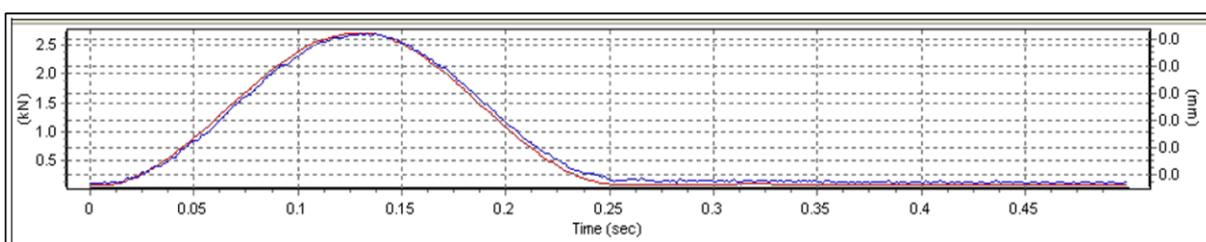
De acordo com Pinto (1991), os ensaios de fadiga podem ser sob tensão controlada (TC) ou deformação controlada (DC). Nos ensaios do tipo TC, a carga é mantida constante e as deformações aumentam no decorrer do ensaio, buscando simular a passagem da roda de um veículo em uma determinada seção do pavimento, através da frequência de aplicação de carga. Nesse tipo de carregamento utiliza-se como critério de término de ensaio o número de solicitações até a ruptura total da amostra. Já nos ensaios do tipo DC, as deformações são constantes ao longo do ensaio, levando à redução das cargas aplicadas.

Neste estudo, os ensaios foram realizados sob tensão controlada (TC) e em relação aos níveis de tensão aplicados, as normas australianas sugerem uma faixa de 60% a 90% do valor de resistência à tração, que gerem deformações de 50 a 100 *microstrains*, apontando para uma ruptura entre 10^3 e 10^6 ciclos. A AUSTROADS (2012) sugere que estes níveis de tensão sejam definidos tomando-se como referência os resultados da resistência à tração na flexão, no entanto devido às delimitações deste estudo, esse ensaio não foi realizado. Dessa forma, os valores dos níveis de tensão utilizados foram determinados a partir dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

3.3.5.3 Pulso de carga

Seguindo as recomendações da AUSTROADS (2008; 2012), o pulso de carga aplicado foi do tipo semi-seno-verso (*haversine*), com uma duração de carga aplicada de 0,25s e um descanso também de 0,25 s, caracterizando uma frequência de 2 Hz, conforme observado na Figura 12.

Figura 12: Exemplo de carregamento *haversine* com frequência de 2 Hz



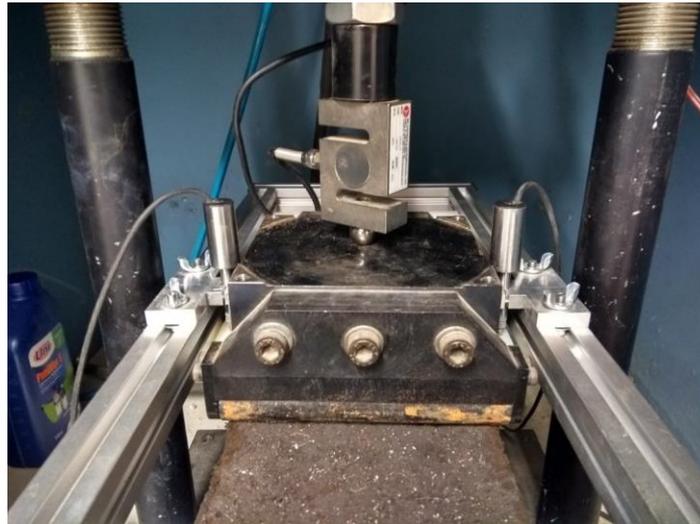
Fonte: AUSTROADS (2012)

3.3.5.4 Equipamento utilizado

As respostas de deslocamento dos corpos de prova foram medidas por dois LVDTs DG 2,5 mm, posicionados como ilustrado na Figura 13. Para avaliar a força aplicada cada pulso de carga, foi utilizada uma célula de carga do tipo S, com capacidade de 10kN, a qual foi acoplada a um condicionador de sinais. Para a aquisição de dados, o sistema utiliza uma placa de aquisição PCI-6224 / National Instruments, que possui 16 canais diferenciais com resolução A/D (Analógico/Digital) de 16 bits. Apesar do sistema de aquisição de dados ser capaz fazer leituras a uma taxa de 250 kS/s (250×10^3 amostras por segundo), foi utilizada a taxa de aquisição de 10 kS/s em função da demanda do tipo de ensaio realizado.

Para dar início ao ensaio, o corpo de prova é posicionado de forma simétrica no suporte inferior, são realizadas marcações no terço médio para posicionar o suporte superior, são ajustados os LVDTs de forma a possibilitar as leituras sem empencilhos, posicionada a célula de carga e ajustada a pressão a ser aplicada. Na Figura 14 é possível observar o equipamento montado para início do ensaio (a) e o corpo de prova rompido após o ensaio (b).

Figura 13: Posicionamento dos LVDTs



Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 14: (a) Equipamento montado para iniciar o ensaio; (b) Corpo de prova após a ruptura



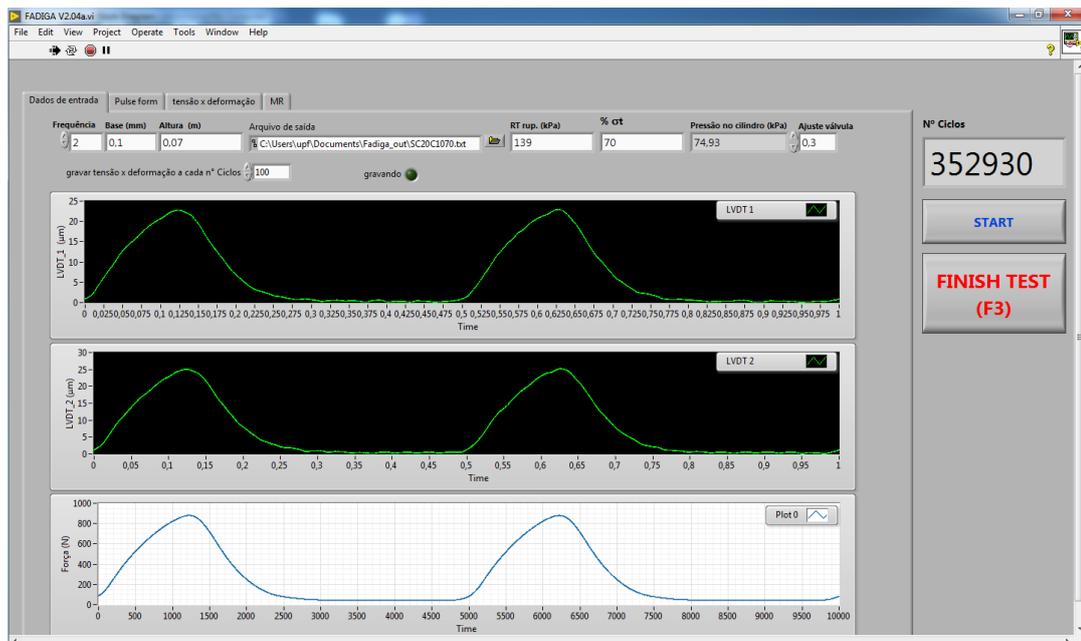
Fonte: Autoria própria (2020)

3.3.5.5 Software

O *software* utilizado para a aquisição de dados foi o LabVIEW, programado para utilização em ensaios de módulo de resiliência e fadiga. Logo na tela inicial do LabView para o ensaio de fadiga em quatro pontos, mostrada na Figura 15, são solicitados os parâmetros de

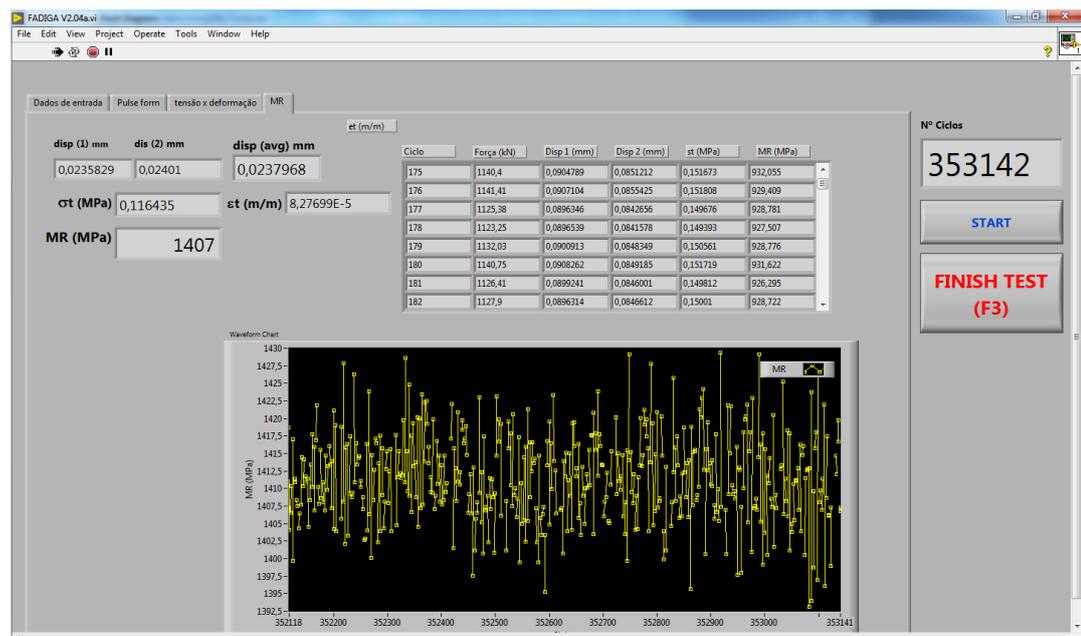
entrada, que são a frequência em Hz, o percentual da RCD aplicado, o número de ciclos a partir do ciclo inicial onde se inicia uma nova leitura, o ajuste da válvula de entrada de ar e o nome do arquivo de saída. Ainda na mesma tela é possível observar gráficos os valores das leituras feitas pelos LVDTs e da força sendo aplicada.

Figura 15: Tela inicial com os dados de entrada do LabVIEW



Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 16: Aba de acompanhamento do MR no LabVIEW

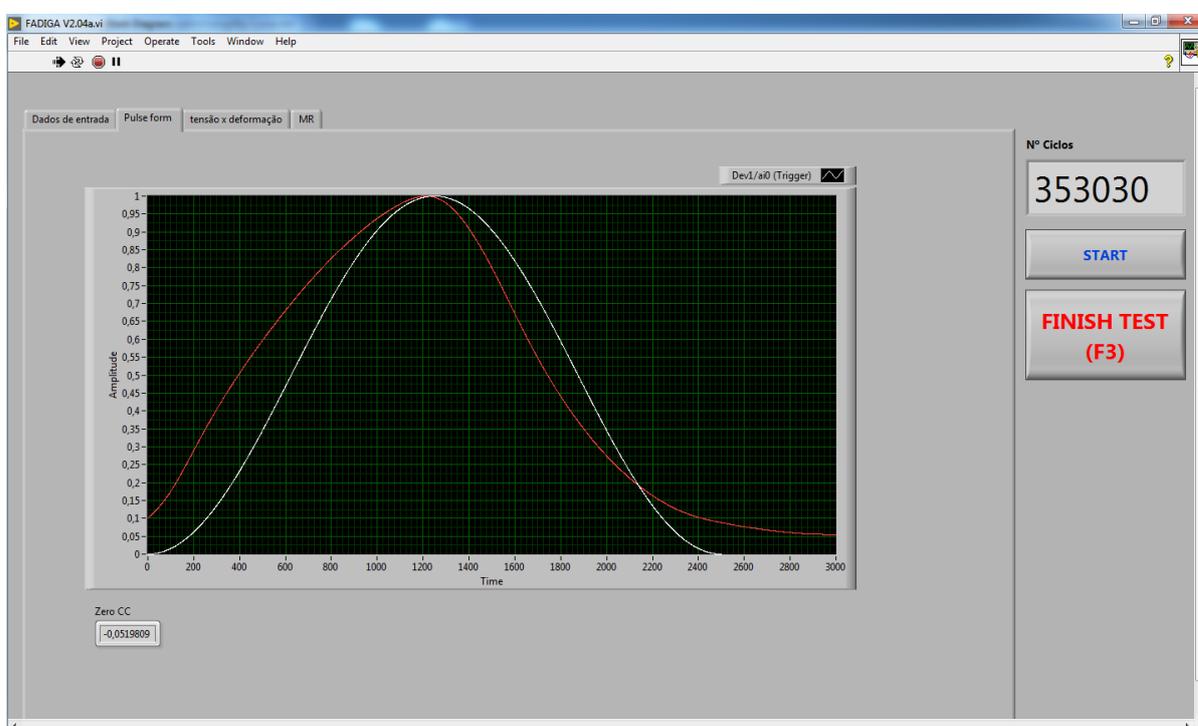


Fonte: Autoria própria (2020)

Ainda na interface do LabVIEW foi possível acompanhar, em uma das abas, a contagem do número de ciclos aplicados, assim como os deslocamentos, a pressão e o valor do módulo de resiliência flexural, registrados à cada ciclo. Também é possível acompanhar um gráfico relacionando o número de ciclos com o módulo de resiliência. Essa aba pode ser visualizada na Figura 16.

Outra informação que foi possível acompanhar durante o ensaio é o pulso de carga, que pode ser ajustado controlando tanto o tempo de abertura da válvula selenoide, quanto a forma com que o ar é injetado no sistema. A Figura 17 mostra o pulso ideal desenhado na cor branca e o pulso obtido desenhado na cor vermelha.

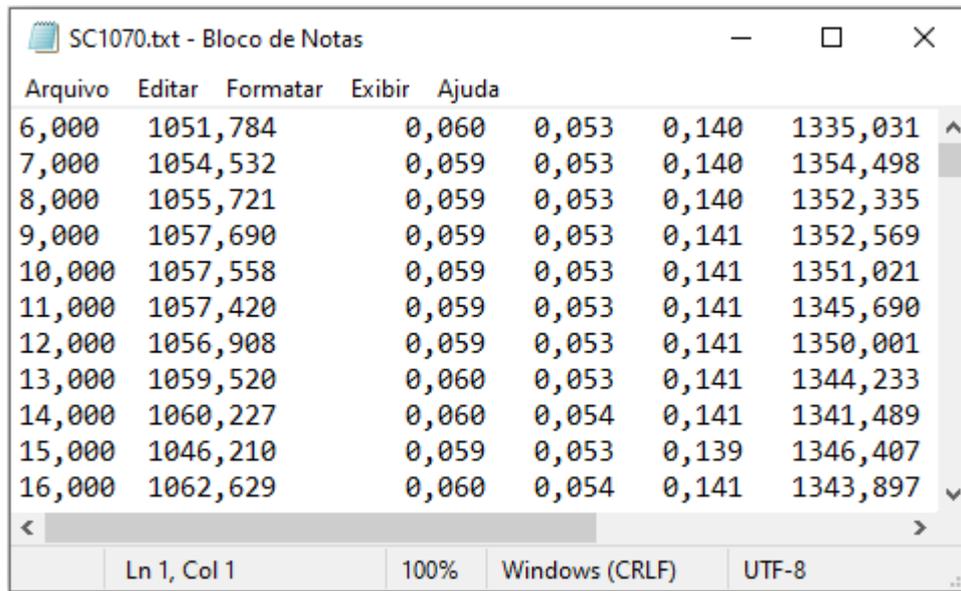
Figura 17: Pulso de carga ideal e obtido



Fonte: Autoria própria (2020)

A rotina de ensaio do LabVIEW gera um arquivo de saída do tipo .txt onde são registrados o número do ciclo, a força aplicada (N), o deslocamento medido pelo LVDT 1, o deslocamento medido pelo LVDT 2, a deformação medida na viga (mm) e o módulo de resiliência flexural (MPa). A forma com que esse relatório é gerado está exemplificada na Figura 18, que apresenta os valores dos parâmetros na ordem citada.

Figura 18: Exemplo de relatório de dados gerados pelo LabVIEW



Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda		
6,000	1051,784		0,060	0,053	0,140	1335,031
7,000	1054,532		0,059	0,053	0,140	1354,498
8,000	1055,721		0,059	0,053	0,140	1352,335
9,000	1057,690		0,059	0,053	0,141	1352,569
10,000	1057,558		0,059	0,053	0,141	1351,021
11,000	1057,420		0,059	0,053	0,141	1345,690
12,000	1056,908		0,059	0,053	0,141	1350,001
13,000	1059,520		0,060	0,053	0,141	1344,233
14,000	1060,227		0,060	0,054	0,141	1341,489
15,000	1046,210		0,059	0,053	0,139	1346,407
16,000	1062,629		0,060	0,054	0,141	1343,897

Fonte: Autoria própria (2020)

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados dos ensaios laboratoriais descritos no capítulo anterior.

4.1 Caracterização dos materiais

A caracterização é uma etapa importante para conhecer o comportamento e a composição dos materiais a serem trabalhados e pode evitar problemas de execução causados pelo desempenho inadequado de algum material. Nesta seção serão expostos os resultados dos ensaios de caracterização do solo natural, da cinza da casca de aveia e da cal de carbureto, assim como da mistura de solo e 20% de cinza.

4.1.1 Cal de carbureto

A cal de carbureto apresentou uma massa específica de 2,16 g/cm³, próximo do valor de 2,12g/cm³ obtido por Saldanha (2014) que coletou o material na mesma empresa. A partir do ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raio-X foi possível realizar a caracterização química da cal, sendo possível obter os compostos químicos presentes no material e suas respectivas porcentagens. A Tabela 6 mostra que mais de 95% da cal de carbureto é composta por Óxido de Cálcio, confirmando a pureza do material citada por GODOY (2018).

Tabela 6: Caracterização química da cal

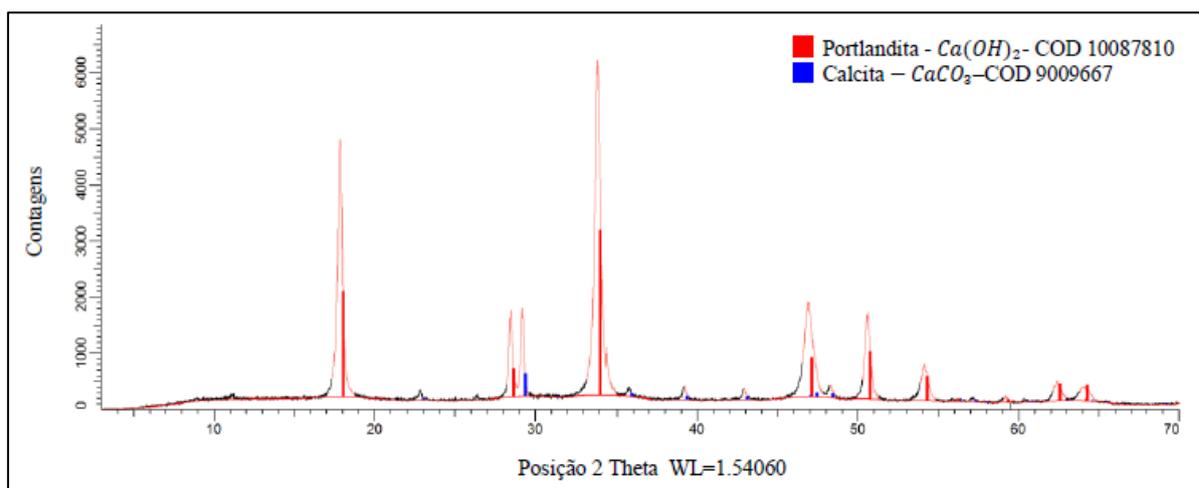
Fórmula	Concentração
CaO	95,22%
SiO ₂	2,60%
Al ₂ O ₃	0,71%
SO ₃	0,43%
SrO	0,39%
Fe ₂ O ₃	0,33%
K ₂ O	0,25%

Fonte: Autoria própria (2019)

Os resultados obtidos através da análise do material pela Difração de Raio-X estão expostos na Figura 19 e apontam a presença de dois principais minerais, sendo eles:

- Portlandita – $Ca(OH)_2$ com sistema cristalino trigonal;
- Calcita – $CaCO_3$ com sistema cristalino trigonal.

Figura 19: Difratoograma da cal



Fonte: A autoria própria (2019)

4.1.2 Cinza de casca de aveia

A Tabela 7 apresenta alguns parâmetros de caracterização obtidos para a cinza de casca de aveia através dos ensaios de massa específica, avaliação de matéria orgânica, limites de Atterberg e analisador de partículas à laser. Destaque-se a elevada quantidade de matéria orgânica presente na cinza (12,9%), possivelmente devido à queima insuficiente do material, o que pode ser um fator redutor da sua capacidade tanto pozolânica, quanto de fíler. A curva granulométrica da cinza está apresentada no Apêndice A.

Tabela 7: Parâmetros de caracterização da cinza

Parâmetro	Valor
Massa específica real (g/cm ³)	2,095
Matéria orgânica (%)	12,9
Índice de Plasticidade (%)	NP
Diâmetro médio, D50 (mm)	0,032
Diâmetro efetivo, D10 (mm)	0,003

Fonte: A autoria própria (2019)

A análise química da cinza de casca de aveia apresentou grande quantidade de sílica (SiO₂), representando mais da metade do material, como pode-se constatar na Tabela 8.

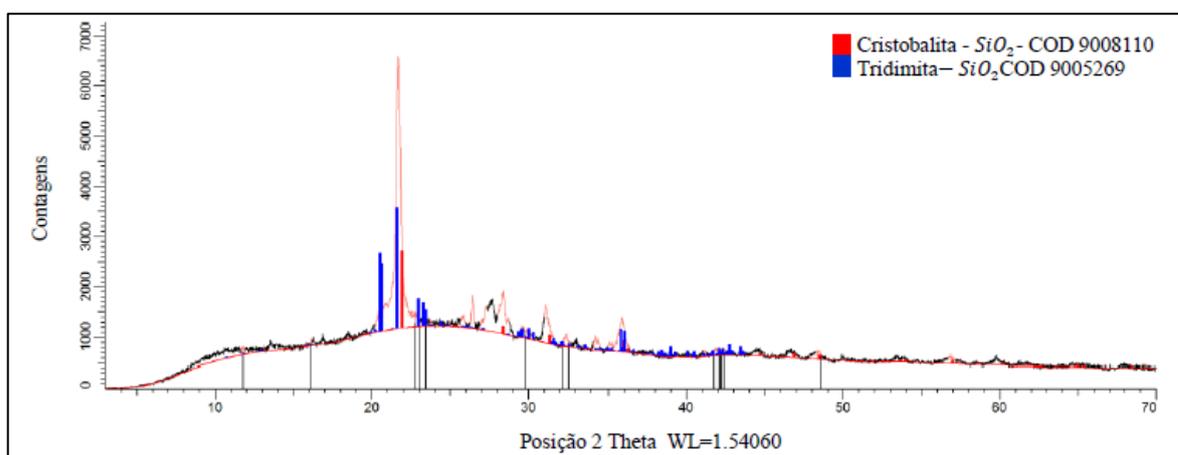
Tabela 8: Caracterização química da cinza

Fórmula	Concentração
SiO ₂	52,76%
K ₂ O	15,98%
P ₂ O ₅	12,59%
CaO	5,64%
MgO	4,80%
Fe ₂ O ₃	4,20%
Al ₂ O ₃	1,94%
TiO ₂	0,76%
So ₃	0,65%
MnO	0,39%
Cl	0,15%

Fonte: Autoria própria (2019)

A análise por Difração de Raio-X apontou a presença dos minerais Cristobalita (SiO₂) e Tridimita (SiO₂). Como é possível observar na Figura 20, o difratograma apresenta picos cristalinos característicos, indicando que a estrutura do material analisado não é amorfa. Conforme Dal Molin (2011), cinzas provenientes de queima não controlada possuem minerais de sílica não reativos (cristalinos) e que podem ter baixo valor pozolânico.

Figura 20: Difratograma da cinza

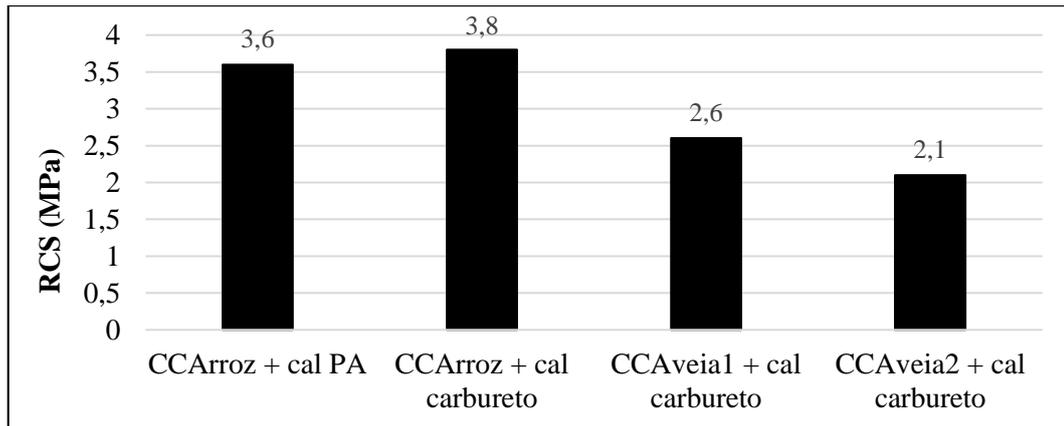


Fonte: Autoria própria (2019)

A Figura 21 apresenta os resultados do ensaio de atividade pozolânica com cal, onde a cinza da casca de aveia foi testada de duas formas: a primeira, após passar por uma queima à 600°C por 24h, adaptando a metodologia usada por Barbosa et al. (2006), (CCAveia 1), e a segunda na forma com que a cinza foi utilizada nesta pesquisa, isto é, “como coletada” (CCAveia2). A comparação entre essas duas cinzas tem como finalidade analisar se uma

queima mais completa do material coletado teria interferência nos resultados de resistência. Além disso, foi realizado um ensaio de referência com uma cinza de casca de arroz disponível comercialmente e já testada quanto à sua pozolanicidade, além de verificar a possibilidade da utilização da cal de carbureto em substituição ao hidróxido de cálcio PA (Pró Análise, com pureza de 99 à 100%), especificada pela norma de ensaio.

Figura 21: Índice de atividade pozolânica com cal



Fonte: Autoria própria (2019)

Primeiramente, foi possível constatar que não houve alterações de resistência significativas quando a cal PA foi substituída pela cal carbureto, desta forma resolveu-se seguir o ensaio utilizando a cal de carbureto por esta ser a cal utilizada no decorrer da pesquisa e também por se ter disponível grande quantidade desse material, diferentemente da cal PA.

Analisando os resultados dos traços com a cinza da casca de aveia foi possível perceber que a CCAveia1 apresentou resistência superior à CCAveia2, no entanto ambas as misturas com cinza de casca de aveia apresentaram valores próximos e abaixo dos 6 MPa especificados na norma para classificar o material como pozolânico. Apesar desses resultados, a incorporação da cal de carbureto em misturas com solo ainda pode ser benéfica se ela apresentar comportamento de fíler.

4.1.3 Solo

A Tabela 9 apresenta os compostos químicos presentes no solo, onde é possível observar a predominância de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃.

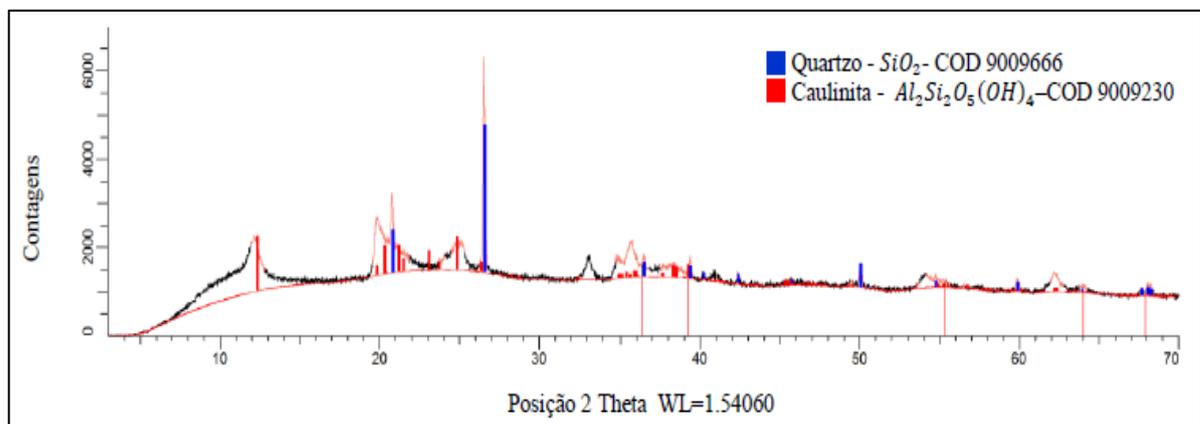
Tabela 9: Caracterização química do solo

Fórmula	Concentração
SiO ₂	46,03%
Al ₂ O ₃	34,37%
Fe ₂ O ₃	14,94%
TiO ₂	2,30%
MgO	1,10%
K ₂ O	0,61%
ZrO ₂	0,16%
CeO ₂	0,09%
La ₂ O ₃	0,08%
CaO	0,08%
SO ₃	0,07%
MnO	0,06%

Fonte: Autoria própria (2019)

Com a realização do ensaio de Difração de Raio-X constatou-se os minerais presentes no solo, sendo eles predominantemente Quartzo (SiO₂) e Caulinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄), como é possível observar na Figura 22.

Figura 22: Difratoograma do solo

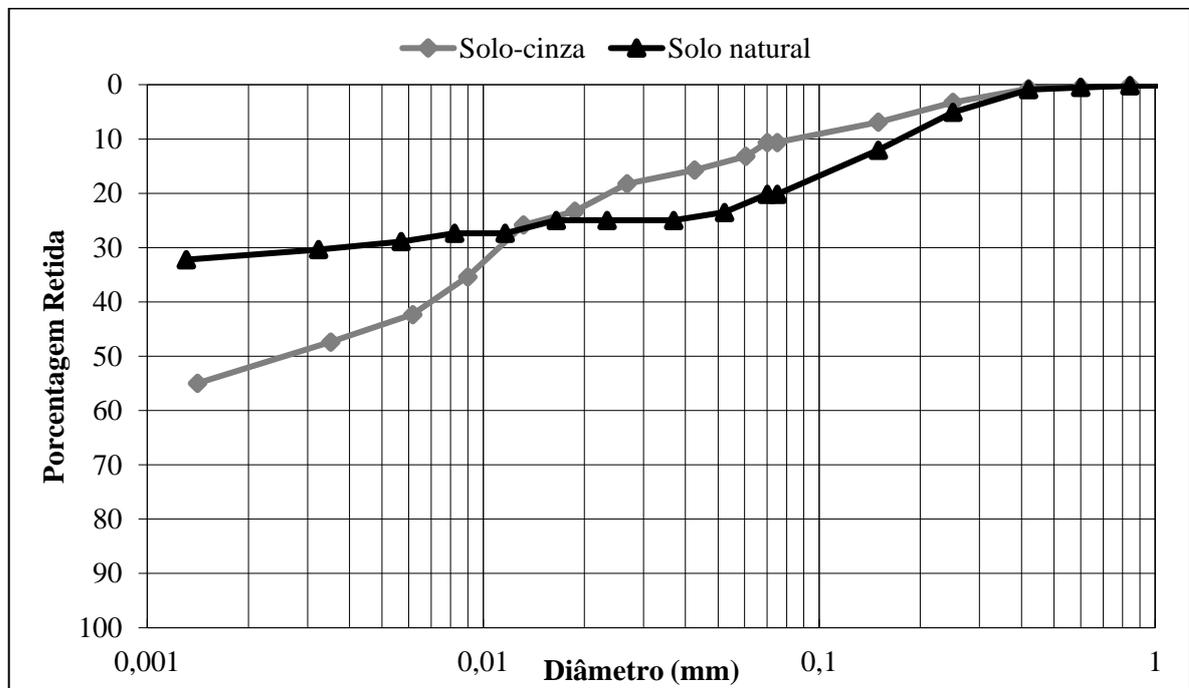


Fonte: Autoria própria (2019)

Na Figura 23 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de análise granulométrica por peneiramento e sedimentação. Pode-se perceber que a granulometria tanto do solo natural quanto da mistura solo-cinza é equivalente a um solo extremamente fino, com cerca de 75% e 85% de material passante na peneira n° 200, respectivamente. O aumento na porcentagem de material passante na peneira n° 200 da mistura solo-cinza em relação ao solo

natural, se deve à granulometria extremamente fina da cinza, que tem 100% dos seus grãos passantes na referida peneira.

Figura 23: Curvas granulométricas do solo natural e da mistura solo-cinza



Fonte: Autoria própria (2019)

A Tabela 10 apresenta as características geotécnicas do solo natural e da mistura estudada de solo-cinza. Para o solo natural é possível observar um alto teor de argila na sua composição e um nível de pH relativamente ácido, características essas que são típicas de um solo com predomínio de caulinita (Streck et al. 2008).

Tabela 10: Características geotécnicas do solo e da mistura solo-cinza

Parâmetro (unidade)	Solo natural	Solo-cinza
Argila (%)	70	53
Silte (%)	5	32
Areia (%)	25	15
Limite de liquidez (%)	51	42
Limite de plasticidade (%)	39	39
Índice de plasticidade (%)	12	3
Massa específica real (g/cm ³)	2,66	2,43
pH	4,2	8,34
SUCS	CH	CL
HRB AASHTO	A-7-6	A-5

Fonte: Autoria própria (2019)

Para a mistura solo-cinza foi possível observar uma diminuição da porcentagem de argila e um aumento considerável de silte, possivelmente pela granulometria da cinza se encaixar predominantemente na faixa granulométrica desse tipo de solo e também pelas reações de floculação e aglomeração. Além disso pode-se destacar a diminuição do Índice de Plasticidade e o aumento do pH.

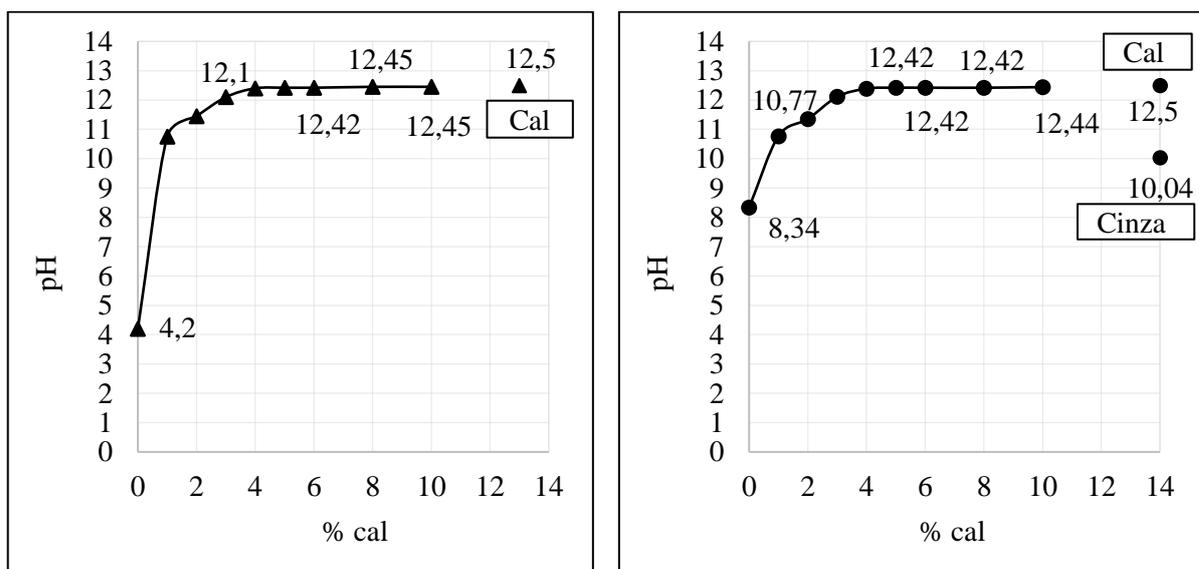
4.2 Definição de variáveis fixas

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios de dosagem da cal de carbureto e da compactação Proctor.

4.2.1 Dosagem do teor de cal

Os teores de cal aplicados às misturas foram baseados nas experiências anteriores de diversos autores, como Núñez (1991), Rogers et al. (1997), Thomé (1999), Dalla Rosa (2009), Saldanha (2014), Novaes (2016) e Godoy (2018), todos se basearam no método ICL (*Initial Consumption of Lime*) citado no item 2.2.2.1. Na Figura 24 (a) é possível observar que com a adição de 4% de cal, a mistura com o solo natural já atingiu um pH de 12,4 e se manteve estável até a adição de 10%, não havendo grande variação. O mesmo comportamento pode ser observado na Figura 24 (b), para o ensaio realizado com a mistura de solo-cinza e também com a adição de 4% de cal, no qual se obteve um pH muito próximo de 12,4, mantendo-se estável até o máximo de cal adicionado.

Figura 24: (a) Dosagem da cal com o solo puro; (b) Dosagem da cal com mistura solo-cinza



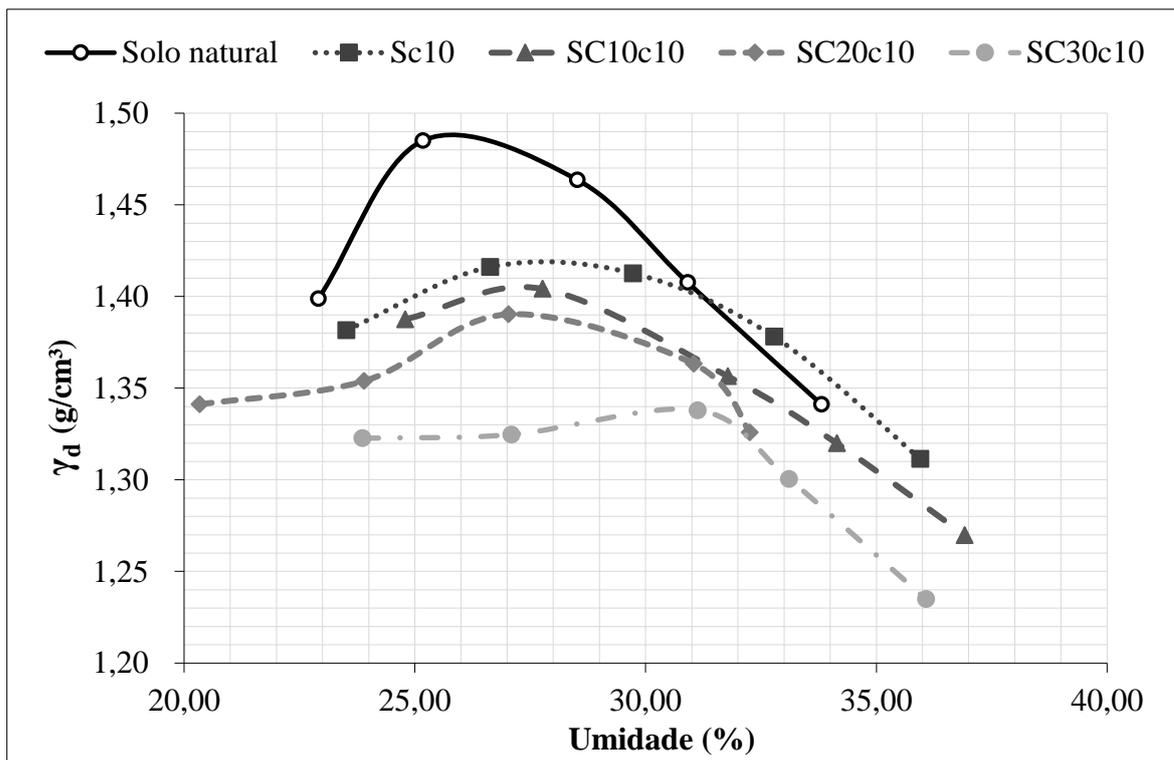
Fonte: Autoria própria (2019)

Dessa forma, foi possível constatar que o teor de 4% de cal é o mínimo necessário para que ocorram as trocas catiônicas. A partir disso, com o objetivo de confirmar e complementar essa constatação, foram realizados ensaios de resistência à compressão simples avaliando-se a influência do teor cal nos resultados apresentados no item 4.3.1.

4.2.2 Definição dos parâmetros de compactação

A Figura 25 apresenta as curvas de compactação obtidas através do ensaio de Proctor na energia normal para o solo no estado natural e para as misturas Sc10, SC10c10, SC20c10 e SC30c10. A porcentagem de cal utilizada foi de 10%, buscando-se observar a influência da adição desse material sobre a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima (γ_d) das misturas.

Figura 25: Curvas de compactação na energia normal



Fonte: Autoria própria (2019)

Na Tabela 11 é possível observar que o solo natural obteve uma massa específica de 1,49 g/cm³ e uma umidade ótima de 25,7%. No ensaio com adição de cal de carbureto ao solo pôde-se constatar uma redução da massa específica e um aumento da umidade ótima, quando comparado ao resultado com solo natural, essa tendência repetiu-se nos ensaios com adição de

cinza: quanto mais elevado o teor de cinza na mistura, menor a massa específica e maior a umidade ótima do material.

Tabela 11: Resultados dos ensaios de compactação

Material	γ_d (g/cm³)	Umidade ótima (%)
Solo natural	1,49	25,7
Sc10	1,42	27,3
SC10c10	1,41	27,8
SC20c10	1,39	28,4
SC30c10	1,34	30,8

Fonte: Autorial própria (2020)

4.3 Resistência à Compressão Simples

Neste item são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios de resistência à compressão simples. Foram realizados ensaios preliminares, em triplicata, com o objetivo de avaliar a influência do teor de cal, do tempo de cura e da temperatura de cura, a fim de fixar essas variáveis. Com essas variáveis fixas definidas, realizaram-se os ensaios para analisar a influência do acréscimo de cinza e fibras nas misturas e definir as misturas que foram submetidas aos ensaios de fadiga em quatro pontos.

4.3.1 Influência do teor de cal

Para analisar o efeito do aumento do teor de cal na resistência do material, foram realizados ensaios com misturas solo-cal, com teores de cal definidos a partir dos resultados do método de dosagem apresentado no item 4.2.1 (4%, 7% e 10%). Também foi utilizado um teor 20%, para melhor avaliar a amplitude do efeito do teor de cal. Os corpos de prova foram curados à 40°C durante 7 dias.

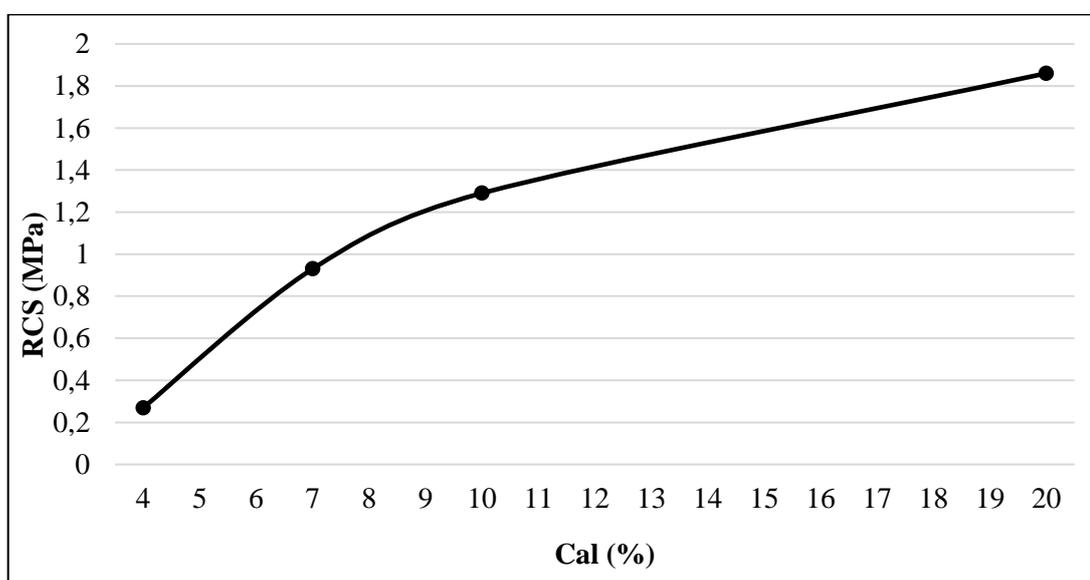
A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos em MPa e a evolução da RCS com o aumento do teor de cal. É possível constatar um aumento de 200% no primeiro acréscimo de cal. Nos dois acréscimos seguintes verifica-se ganhos menores, em torno de 40%, percebendo-se uma tendência de estabilização da RCS. Esse comportamento também pode ser observado na Figura 26. Além disso, a tabela também traz os valores de desvio padrão e do coeficiente de variação, que apresentou valores abaixo de 10%.

Tabela 12: Resultados da RCS avaliando a influência do teor de cal

Mistura	RCS (MPa)	Aumento (%)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Sc4	0,27	-	0,024	8,9
Sc7	0,93	244	0,035	3,8
Sc10	1,29	39	0,037	2,9
Sc20	1,77	37	0,07	3,8

Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 26: Evolução da RCS com o teor de cal



Fonte: Autoria própria (2020)

A partir disso, optou-se por seguir a pesquisa utilizando o teor de 10% de cal, pois se percebeu ainda ganho de resistência em relação ao teor de 7%. Além disso, notou-se dobrando o teor de cal (20%), que os ganhos de resistência mostraram certa tendência de estabilização, tornando-se, portanto, inviáveis.

4.3.2 Influência do teor de cinza, do tempo de cura e da temperatura de cura

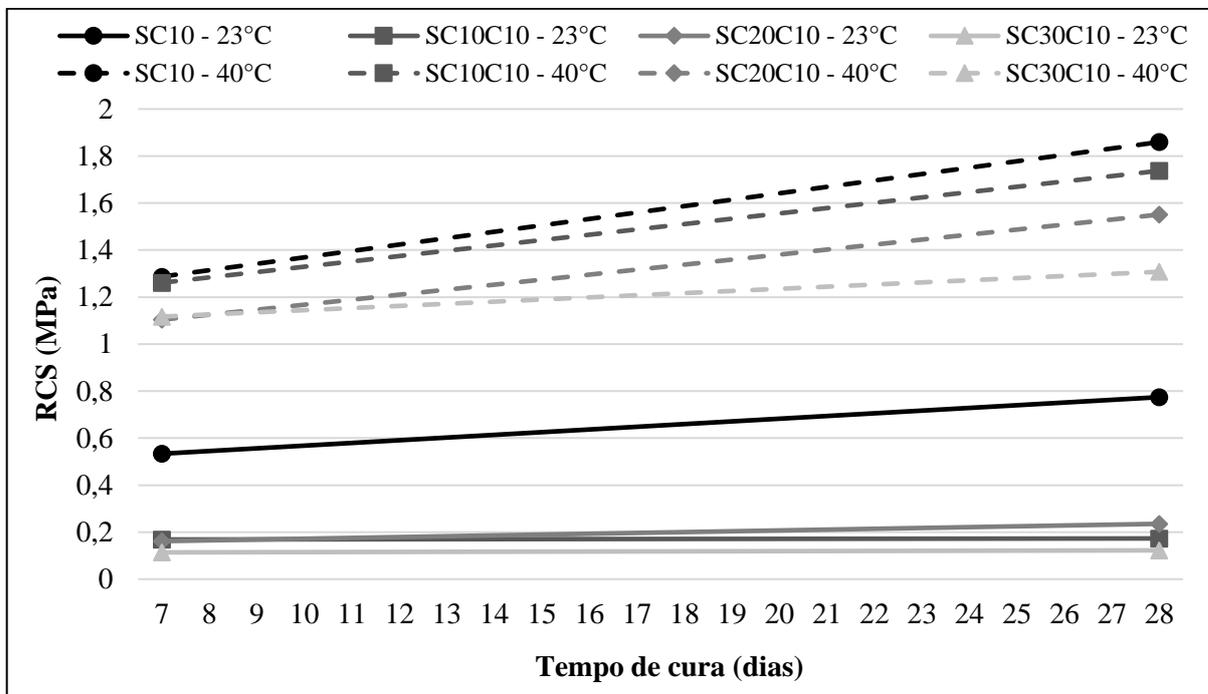
Com o teor de cal fixado e, 10%, estudou-se a influência do tempo e da temperatura de cura na resistência dos corpos de prova em misturas de solo-cinza-cal, além da mistura solo-cal, conforme indicado no item 3.1.2. A Tabela 13 apresenta as médias dos resultados de cada mistura para os diferentes tempos de cura (7 e 28 dias) e temperaturas (23°C e 40°C) estudados, além dos desvios padrão e dos coeficientes de variação, que apresentaram valores abaixo de 20%. Na Figura 27 é possível observar a evolução da RCS com o tempo e temperatura de cura.

Tabela 13: Resultados da RCS avaliando o teor de cinza, o tempo e a temperatura de cura

Mistura	Tempo de cura (dias)	RCS (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Sc10 - 23°C	7	0,53	0,075	14,1
	28	0,77	0,036	4,7
Sc10 - 40°C	7	1,29	0,037	2,9
	28	1,86	0,153	8,2
SC10c10 - 23°C	7	0,17	0,021	12,4
	28	0,17	0,005	2,7
SC10c10 - 40°C	7	1,26	0,242	19,2
	28	1,74	0,108	6,2
SC20c10 - 23°C	7	0,16	0,019	11,9
	28	0,24	0,008	3,4
SC20c10 - 40°C	7	1,10	0,094	8,5
	28	1,55	0,023	1,5
SC30c10 - 23°C	7	0,11	0,008	6,9
	28	0,12	0,023	19,1
SC30c10 - 40°C	7	1,12	0,037	3,3
	28	1,31	0,064	4,9

Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 27: Evolução da RCS com o tempo e temperatura



Fonte: Autoria própria (2020)

A partir dos resultados, pode-se observar que o aumento do tempo de cura ocasionou em uma elevação de até 50% nos valores de RCS, com exceção da mistura SC10c10 à 23°C que manteve a resistência. Além disso, percebeu-se que o aumento da temperatura de cura

determinou grandes ganhos de resistência para todas as misturas, variando de 140% a 990%. Esse comportamento pode ser observado na Tabela 14.

Tabela 14: Aumento da RCS com o tempo e temperatura de cura

Mistura	Aumento com o tempo (%)		Aumento com a temperatura (%)	
	à 23°C	à 40°C	aos 7	aos 28
Sc10	45	44	143	142
SC10c10	0	38	641	924
SC20c10	50	41	588	546
SC30c10	9	17	918	992

Fonte: Autoria própria (2020)

Com a realização desses ensaios também foi possível observar a influência dos teores de cinza na resistência das misturas. De acordo com o apresentado na Tabela 15 pode-se constatar que o acréscimo de cinza nas misturas ocasionou em redução da RCS, com exceção de duas misturas: a SC30c10 de 7 dias à 40°C que apresentou um ganho insignificante de 2% em relação à SC20c10; e a mistura SC20c10 de 28 dias à 23°C que apresentou um ganho de 41% em relação à SC10c10.

Além disso, para as misturas curadas à 23°C, em ambos tempos de cura, as perdas de resistência que o acréscimo de cinza causou chegaram até 78% para as misturas SC10c10 em relação às misturas Sc10, possivelmente pela elevada porcentagem de matéria orgânica presente na cinza. Já para os corpos de provas curados à 40°C as reduções na resistência foram menores, chegando no máximo até 16%, o que traz indícios de que em uma condição de cura acelerada, as misturas com a cinza desenvolvem reações próximas às da mistura solo-cal, não trazendo grandes prejuízos à resistência do material, apesar de ainda assim haver reduções.

Tabela 15: Redução percentual da RCS com teor de cinza

Mistura	Redução aos 7 dias		Redução aos 28 dias	
	à 23°C	à 40°C	à 23°C	à 40°C
Sc10 - SC10c10	68	2	78	7
SC10c10 - SC20c10	6	13	-41	11
SC20c10 - SC30c10	31	-2	50	16

Fonte: Autoria própria (2020)

Com a finalização dessa etapa de ensaios e com a análise dos resultados foi possível definir as variáveis a serem mantidas fixas no processo de cura dos corpos de prova, para a sequência do estudo. A temperatura de cura se mostrou a variável de maior influência no processo de cura. Deste modo, optou-se por seguir a realização dos ensaios com a temperatura de 40°C, que acelerou o processo de cura e tornou possível observar as perspectivas de aumento da resistência do material à prazos mais longos sem necessariamente aguardar longos períodos.

Da mesma forma, o tempo de cura, nos períodos estudados, mostrou-se uma variável determinante para o aumento da resistência, embora com ganhos menos significativos que a temperatura. Deste modo, por conveniência, definiu-se o tempo de cura de 7 dias para a sequência dos ensaios.

Em relação aos teores de cinza, apesar de ser possível observar a sua influência na redução da resistência, optou-se por continuar utilizando todos os teores nos corpos de prova com fibra de polipropileno, para observar o comportamento nas misturas com e sem a inserção de fibras.

4.3.2.1 Análise estatística da influência do teor de cinza, do tempo e temperatura de cura na RCS

Através da análise de variância dos resultados (ANOVA), constatou-se que tanto o teor de cinza quanto o tempo e a temperatura de cura, assim como as interações de segunda ordem apresentaram significância estatística, com valores p inferiores ao nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$), corroborando as análises anteriores, indicando que um aumento no teor de cinza causa uma redução da RCS, independente do tempo e temperatura de cura. O coeficiente de determinação (R^2) obtido foi bastante próximo à 1, com valor igual a 0,99. Além disso, confirmou-se que com o aumento do tempo e da temperatura de cura há um aumento na RCS, sendo essa segunda a variável a mais significativa.

4.3.3 Influência da inserção de fibras

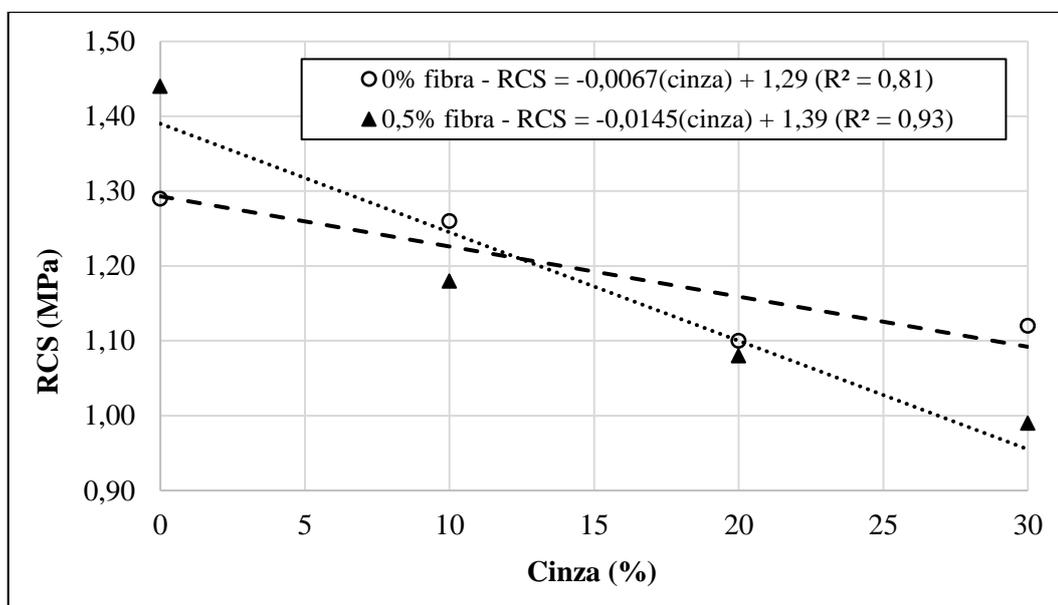
Este item traz os resultados do ensaio de resistência à compressão simples aos 7 dias de cura com temperatura de 40°C, das misturas com 0 e 0,5% de fibra de polipropileno. A Tabela 16 apresenta os valores das resistências em MPa, além do desvio padrão e do coeficiente de variação, que apresentou valores abaixo de 12%. A Figura 28 apresenta graficamente os resultados, sendo possível observar o comportamento das misturas de acordo com a sua composição.

Tabela 16: Resultados da RCS avaliando a influência dos teores de cinza e fibra

Mistura	RCS (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Sc10	1,29	0,04	2,8
SC10c10	1,26	0,00	0,3
SC20c10	1,10	0,09	8,5
SC30c10	1,12	0,04	3,3
Sc10F	1,44	0,17	11,7
SC10c10F	1,18	0,07	5,5
SC20c10F	1,08	0,03	3,0
SC30c10F	0,99	0,02	2,5

Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 28: Evolução da RCS com o aumento dos teores de cinza e fibra



Fonte: Autoria própria (2020)

É possível observar na Tabela 17 que o acréscimo de cinza nas misturas ocasionou uma redução nos valores RCS, tanto para as misturas sem fibra (salvo exceção da SC30c10) quanto para as misturas com fibra, corroborando com os resultados obtidos no item 4.3.2. Também constatou-se que a inserção de fibras não ocasionou aumento na resistência à compressão simples das misturas, com exceção da mistura Sc10F, como pode ser constatado na Tabela 18, esse comportamento era esperado já que o uso das fibras tem como objetivo apresentar efeito na resistência à tração do material.

Tabela 17: Redução da RCS com teor de cinza

Mistura	Redução (%)	Mistura	Redução (%)
Sc10 - SC10c10	3	Sc10F - SC10c10F	18
SC10c10 - SC20c10	13	SC10c10F - SC20c10F	9
SC20c10 - SC30c10	-2	SC20c10F - SC30c10F	9

Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 18: Redução da RCS com teor de fibra

Mistura	Redução (%)
Sc10 - Sc10F	-12
SC10c10 - SC10c10F	7
SC20c10 - SC20c10F	2
SC30c10 - SC30c10F	12

Fonte: Autoria própria (2020)

A partir disso, foi possível verificar que as misturas sem a presença de cinza foram as que atingiram os maiores valores de RCS (Sc10 e Sc10F), seguidas pelas misturas com 10% de cinza (SC10c10 e SC10c10F).

4.3.3.1 *Análise estatística da influência da fibra na RCS*

Analisando estatisticamente os resultados dessa etapa de ensaios, através da ANOVA, verifica-se que tanto o teor de cinza quanto o teor de fibra apresentaram significância estatística, com valor p inferior ao nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$), no entanto a interação entre estas variáveis não foi significativa. O coeficiente de determinação (R^2) obtido foi próximo a 1, com valor igual a 0,87. Esta análise confirma, como já evidenciado, que tanto o aumento no teor de cinza quanto a inserção da fibra reduziram a RCS.

4.4 Resistência à Tração por Compressão Diametral

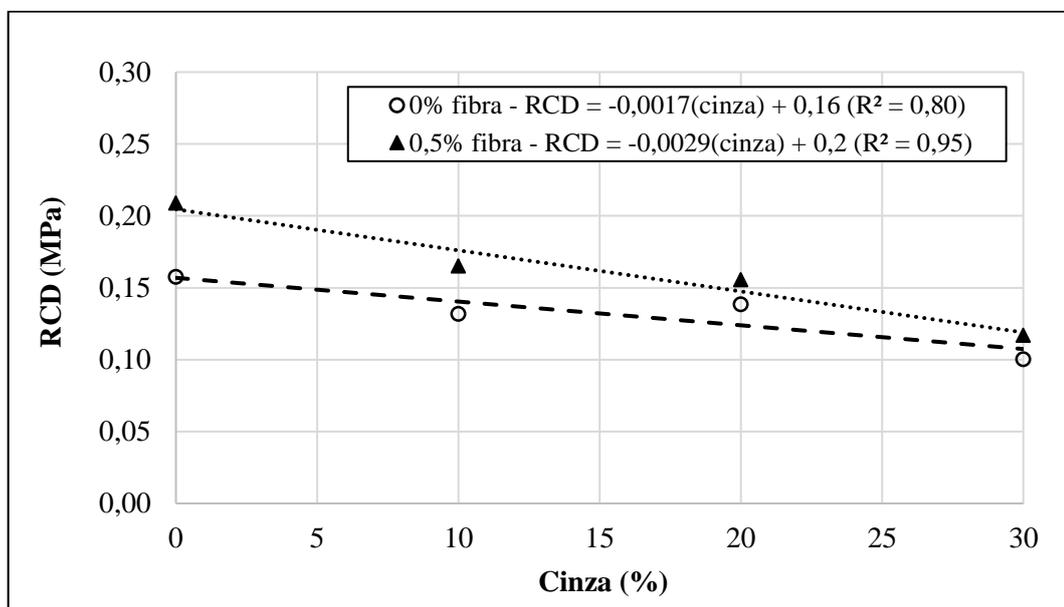
Para os ensaios de RCD utilizaram-se todos os teores de cinza estudados, com o intuito de avaliar o comportamento das misturas nas condições específicas desse ensaio e possibilitar uma comparação com os resultados de RCS. Os teores de fibra, o tempo de cura e a temperatura de cura foram mantidos igualmente fixos. A Tabela 19 apresenta as médias obtidas para os corpos de prova ensaiados em triplicada, além do desvio padrão e do coeficiente de variação, que apresentou valores abaixo de 20%. Estes resultados também podem ser visualizados na Figura 29.

Tabela 19: Resultados da RCD aos 7 dias à 40°C

Mistura	RCD (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Sc10	0,16	0,03	16,0
SC10c10	0,13	0,003	2,2
SC20c10	0,14	0,003	1,8
SC30c10	0,10	0,01	5,7
Sc10F	0,21	0,02	11,7
SC10c10F	0,17	0,02	11,2
SC20c10F	0,16	0,01	3,4
SC30c10F	0,12	0,02	19,5

Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 29: Evolução da RCD com o aumento do teor de cinza



Fonte: Autoria própria (2020)

Da mesma forma que para os ensaios de RCS, é possível observar na Tabela 20 uma tendência de redução da RCD conforme o aumento do teor de cinza, com exceção da mistura SC20c10 (com 20% de cinza) que apresentou um aumento de 8% em relação à mistura SC10c10 (com 10% de cinza). Além disso, diferentemente da RCS, nos ensaios de RCD todas as misturas com a presença de fibras apresentaram resistência superior às respectivas misturas sem fibra, apresentando ganhos de resistência entre 14 e 31%, como pode-se verificar na Tabela 21.

Tabela 20: Redução da RCD com teor de cinza

Mistura	Redução (%)	Mistura	Redução (%)
Sc10 - SC10c10	19	Sc10F - SC10c10F	19
SC10c10 - SC20c10	-8	SC10c10F - SC20c10F	6
SC20c10 - SC30c10	29	SC20c10F - SC30c10F	25

Fonte: A autoria própria (2020)

Tabela 21: Aumento da RCD com teor de fibra

Mistura	Aumento (%)
Sc10 - Sc10F	31
SC10c10 - SC10c10F	31
SC20c10 - SC20c10F	14
SC30c10 - SC30c10F	20

Fonte: A autoria própria (2020)

A partir destes resultados é possível constatar que as misturas que obtiveram melhor desempenho nos ensaios de RCD foram Sc10F e SC10c10F, seguidas pelas misturas Sc10 e SC20c10F.

Desta forma, alinhando os resultados obtidos nos ensaios de RCS e RCD, definiu-se para a sequência do estudo as misturas Sc10, Sc10F, SC10c10 e SC10c10F, que além de estarem entre as misturas de melhor desempenho, também possibilitam a análise e comparação dos efeitos tanto do teor de cinza quanto do teor de fibra.

4.4.1 Análise estatística dos resultados de RCD

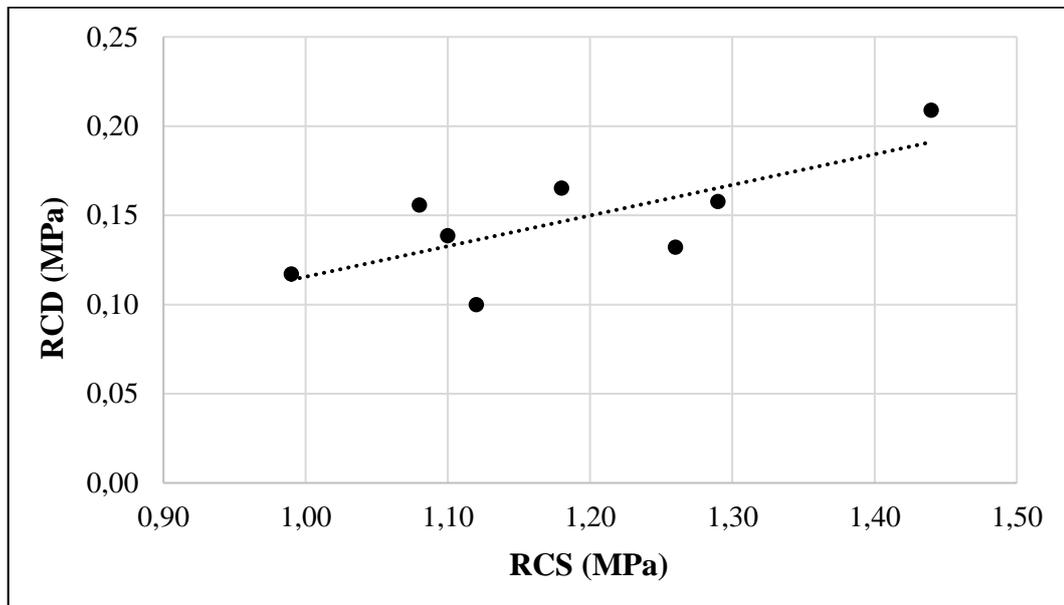
Através da análise estatística dos resultados de RCD, com a realização da ANOVA, constatou-se que tanto o teor de cinza quanto o teor de fibra e a interação entre eles apresentaram significância estatística, com valores p inferiores ao nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$), confirmando que o aumento no teor de cinza reduz a RCD e que, como evidenciado anteriormente, a RCD aumenta com a inserção de fibras. O coeficiente de determinação (R^2) obtido foi próximo a 1, com valor igual a 0,84.

4.5 Relação entre RCD e RCS

A Figura 30 apresenta a relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão simples. Verificou-se que em média a RCD representa aproximadamente 0,12 da RCS, com um limite inferior igual à 0,09 e superior igual à 0,15. O

valor médio obtido está dentro da faixa de relações geralmente encontradas para misturas solo-cal, como as obtidas por Thompson (1965) entre 0,11 e 0,15, próximo também ao valor médio de 0,135 obtido por Núñez (1991).

Figura 30: Relação entre RCD e RCS



Fonte: Autoria própria (2020)

4.6 Fadiga em quatro pontos

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios de fadiga em quatro pontos, analisando a degradação das misturas e os danos causados durante os ensaios em termos de módulo de resiliência flexural e de deformações no decorrer dos ciclos registrados, em três diferentes níveis de tensão aplicados, 70%, 80% e 90% em relação à tensão de ruptura obtida nos ensaios de RCD.

4.6.1 Módulo de Resiliência Flexural

No estudo de Lopez (2016), constatou-se que o critério da Austroads para definir o nível de tensão de 40% da resistência à tração para estimativa do MRF levou, em alguns casos, à degradações precoces que não puderam ser consideradas para estimação da capacidade resiliente do material. Ainda, os resultados dos ensaios indicaram que o ensaio de fadiga em quatro pontos permite realizar uma avaliação do MRF, mesmo que de forma preliminar. A partir disso, seguindo a metodologia empregada por Lopez (2016), foi definido como MRF inicial a

média obtida dos ciclos 50 a 99. A Tabela 22 apresenta os valores médios de MRF inicial, o desvio padrão e o coeficiente de variação, que apresentou valores abaixo de 12%.

Tabela 22: Resultados médios de MRF inicial

Mistura	Nível de tensão (%)	Média MRF inicial (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Sc10	70	1540	9	0,6
	80	1383	11	0,8
	90	*	*	*
Sc10F	70	947	4	0,4
	80	591	46	7,8
	90	1245	3	0,2
SC10c10	70	1490	13	0,9
	80	955	8	0,8
	90	**	**	**
SC10c10F	70	1129	4	0,4
	80	605	26	4,4
	90	206	24	11,5

* O CP Sc10 90% rompeu antes de registrar os primeiros valores de MRF
 ** O CP SC10c10 não chegou ao ciclo 99, não sendo possível aplicar a média

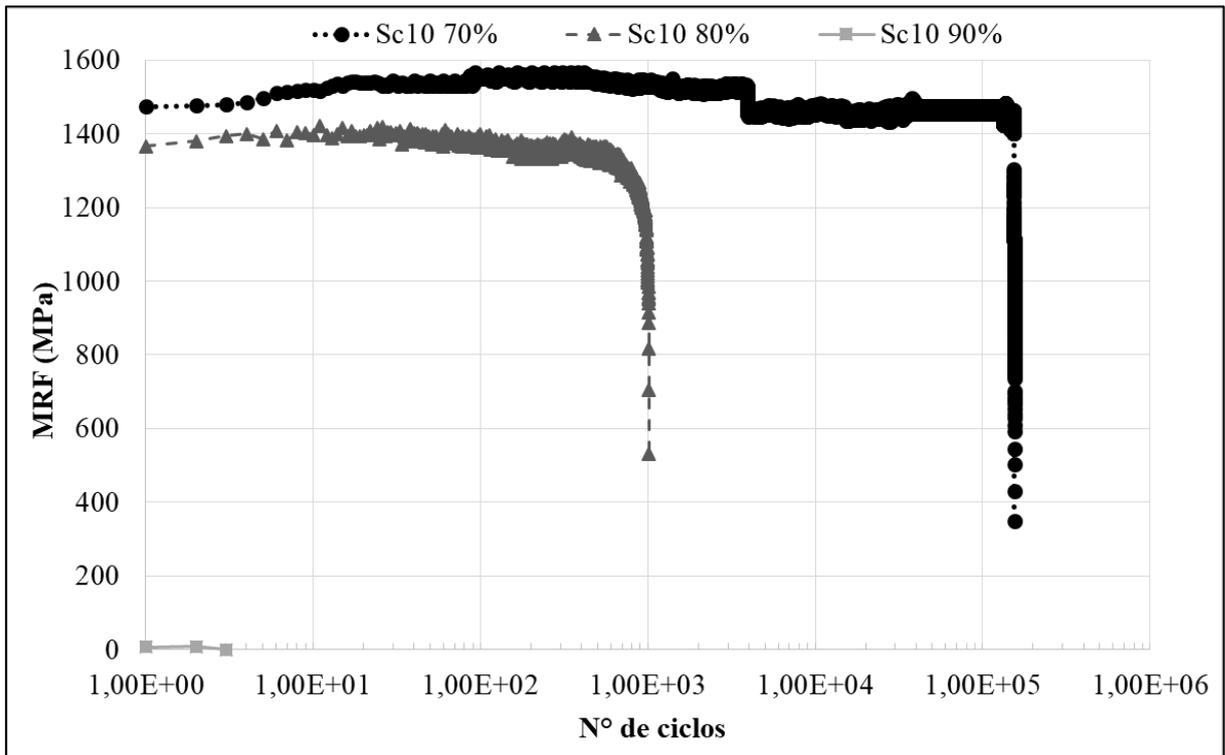
Fonte: Autoria própria (2020)

4.6.2 Curvas de degradação: módulo de resiliência flexural

A Figura 31 apresenta a curva de degradação da mistura Sc10, que corresponde aos corpos de prova de solo-cal sem inserção de fibra, relacionando os valores de módulo de resiliência registrados ao longo dos ciclos. É possível observar que os valores iniciais de módulo dos corpos de prova com 70 e 80% de tensão de ruptura ficaram próximos de 1400 MPa, sendo o CP com tensão de 70% o que registrou os valores superiores, enquanto o corpo de prova com 90% da tensão não suportou os primeiros ciclos de aplicação de carga e rompeu antes mesmo de registrar os valores iniciais de módulo de resiliência.

Além disso, é possível observar uma certa constância nos valores de MRF até o momento em que inicia uma queda brusca que resulta no rompimento dos corpos de prova, comportamento característico de materiais cimentados, segundo a Austroads (2012). Constatou-se também que quanto maior a razão de tensões aplicada, menores são os valores iniciais de MRF e menor é o número de ciclos registrados até o rompimento.

Figura 31: Módulo de resiliência flexural da mistura Sc10

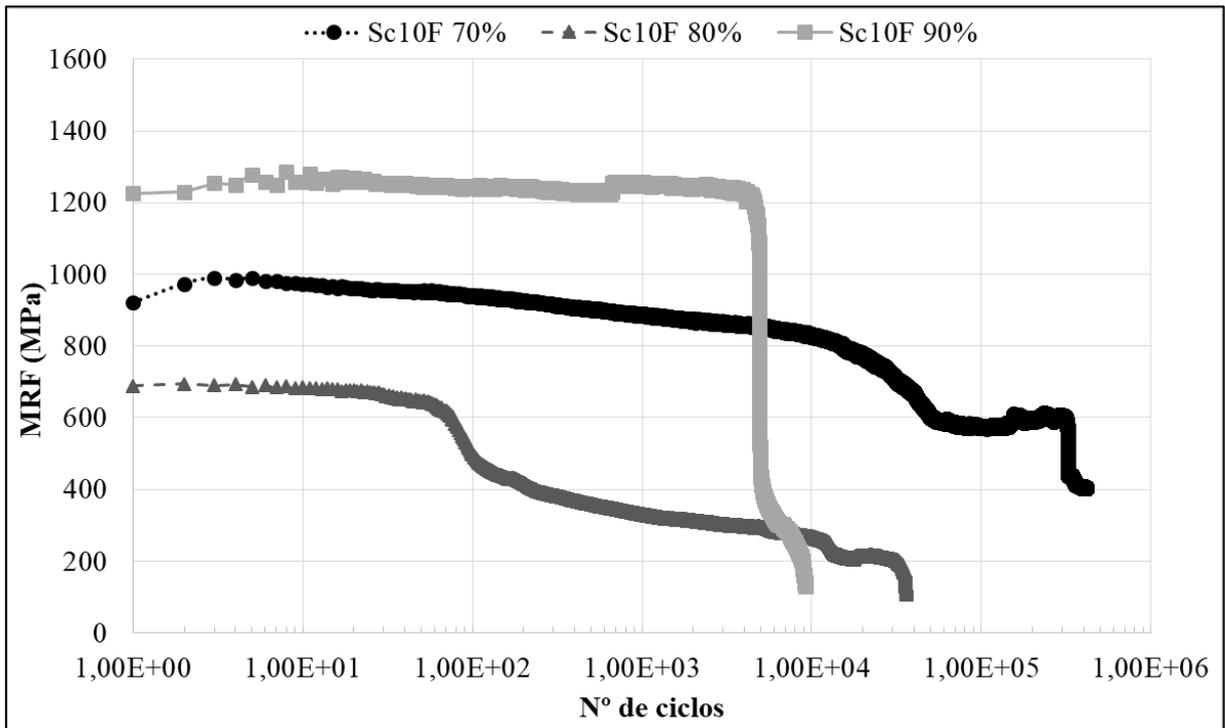


Fonte: Autoria própria (2020)

Na Figura 32 são mostradas as curvas da mistura Sc10F, referente aos corpos de prova de solo-cal com inserção de fibra. É possível observar que para esta mistura não há relação clara entre o nível de tensão aplicada e os valores iniciais de módulo de resiliência, que variaram de 700 a 1200 MPa. Além disso, pode-se observar uma relação entre o nível de tensão e o número de ciclos até a ruptura, quanto maior a tensão aplicada, menor foi o número de ciclos registrados.

Os CPs ensaiados com as tensões de 70 e 80% mostraram um alongamento da curva em comparação com a mistura Sc10, não registrando uma queda brusca antes do rompimento, também foi possível perceber que a inserção da fibra na mistura ocasionou em redução dos valores de MRF iniciais, com exceção da mistura com 90% que não seguiu esse comportamento. No entanto, todas as misturas Sc10F atingiram um número de ciclos maiores em relação às misturas Sc10, o que evidencia o efeito da adição de fibras no retardamento da ruptura.

Figura 32: Módulo de resiliência flexural da mistura Sc10F

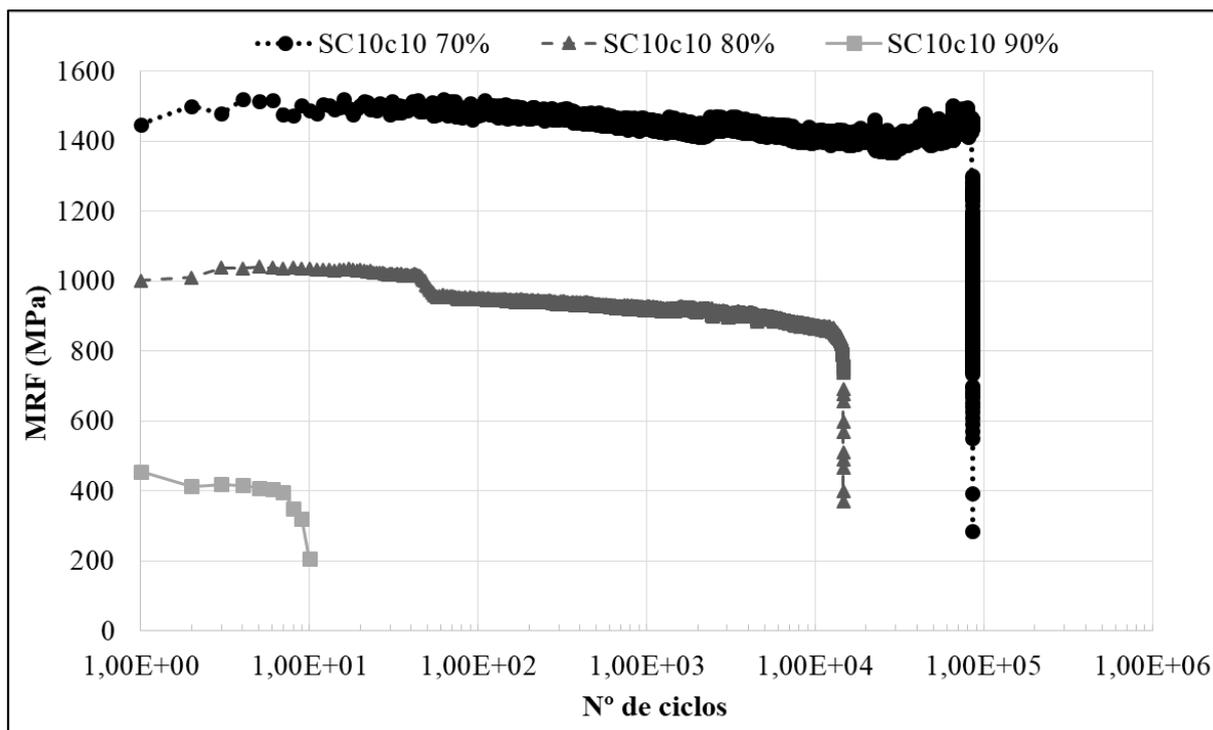


Fonte: Autoria própria (2020)

Na Figura 33 é possível verificar as curvas de degradação do módulo de resiliência flexural para as misturas SC10c10 (10% de cinza e 0% de fibra). Observa-se que os valores iniciais de MRF variam de 400 a 1400 MPa e da mesma forma que foi observado nas misturas Sc10, após grande parte do ensaio registrar valores constantes, há uma queda brusca que leva ao rompimento dos corpos de prova.

Novamente é possível perceber uma relação direta entre o nível de tensão aplicado e o MRF inicial, onde quanto maior o nível de tensão, menores os valores de MRF. O nível de tensão também apresenta influência no número de ciclos atingidos até a ruptura, sendo quanto maior o nível de tensão, menor o número de ciclos até a ruptura. O teor de cinza inserido na mistura reduziu o MRF inicial dos corpos de prova com tensões de 70% e 80%, quando comparados com as misturas Sc10.

Figura 33: Módulo de resiliência flexural da mistura SC10c10

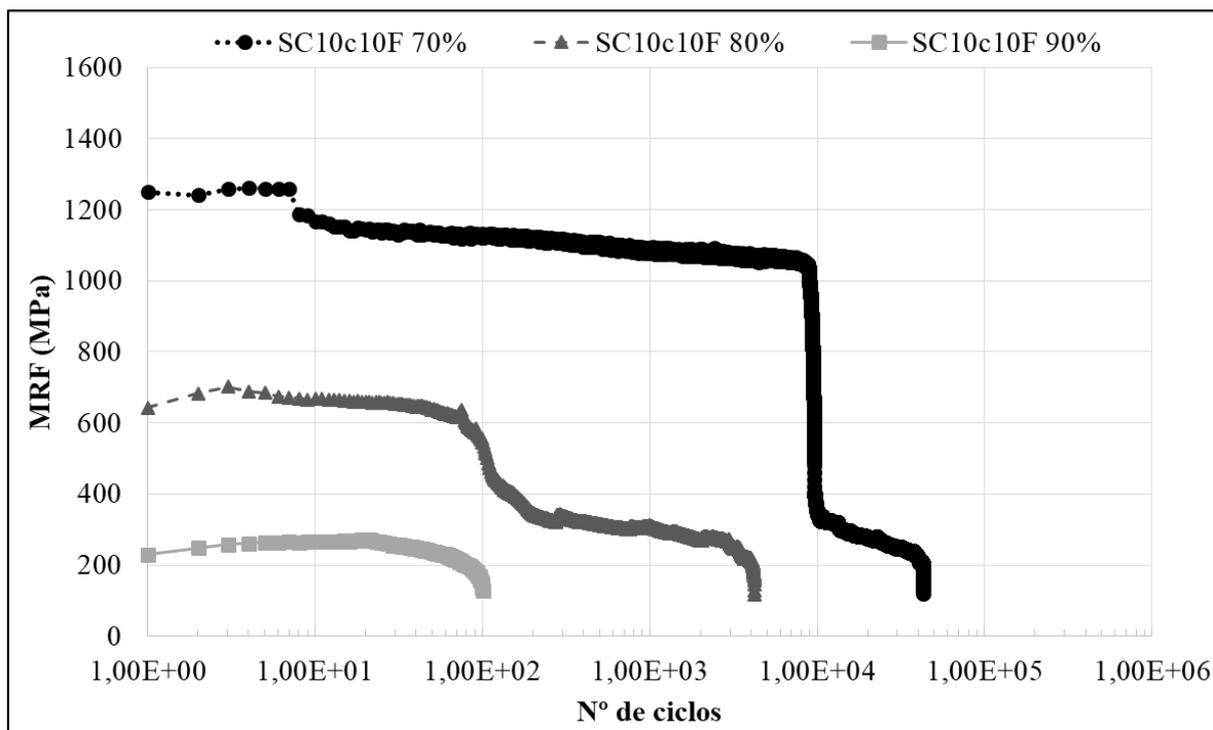


Fonte: Autoria própria (2020)

A Figura 34 apresenta as curvas de degradação para as misturas SC10c10F (com 10% de cinza e 0,5% de fibra). Percebe-se mais uma vez que quanto maior o nível de tensão utilizado, menores são os valores iniciais de MRF registrados, comportamento este que foi possível observar em todas as misturas, com exceção da mistura Sc10F que não apresentou esse padrão. Outro comportamento observado em todas as misturas, sem exceção, é a relação direta entre o nível de tensão aplicado e o número de ciclos atingidos até a ruptura.

Nessa mistura também é possível observar mais uma vez o efeito da fibra na redução do MRF e no alongamento das curvas antes de ocorrer a ruptura, até mesmo na mistura com 70% de tensão que apresentou uma queda brusca do módulo em determinado momento, mas que voltou a registrar valores constantes antes de ocorrer a ruptura. No entanto, diferentemente do que se observou em relação às misturas Sc10 e Sc10F, a inserção da fibra não levou ao aumento do número de ciclos até a ruptura para os corpos de prova ensaiados com as tensões de 70% e 80%. Já o corpo de prova ensaiado com 90% apresentou esse comportamento. O teor de cinza inserido na mistura aumentou o MRF inicial dos corpos de prova com tensões de 70% e 80%, quando comparados com as misturas Sc10F, efeito contrário ao observado em relação às misturas Sc10 e SC10c10.

Figura 34: Módulo de resiliência flexural da mistura SC10c10F



Fonte: Autoria própria (2020)

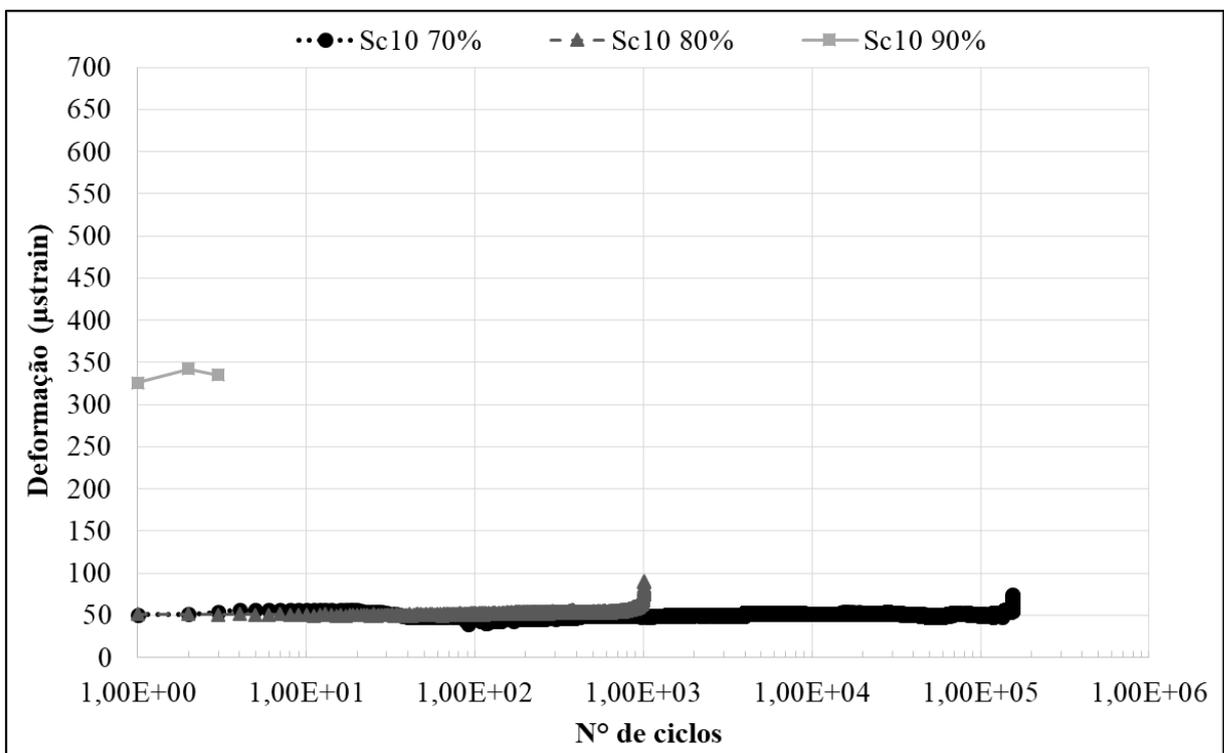
Analisando de forma geral o comportamento das misturas estudadas quanto à degradação do MRF e a influência das variáveis, percebe-se que a fibra teve papel importante na redução do MRF inicial e evitou quedas bruscas do MRF, ocasionando um alongamento das curvas e na maioria das amostras, absorvendo a energia de deformação após ruptura. Já a cinza não apresentou influência clara, reduzindo o MRF inicial de algumas misturas e aumentando para outras.

Conforme citado no item 2.1.2, a Austroads (2012) define um comportamento característico de materiais cimentados a partir do formato das curvas de MRF, onde próximo de 80% do valor do MRF inicial, ocorre uma queda brusca do MRF, que leva à ruptura próximo de 50% do valor do MRF inicial. Esse comportamento pôde ser observado nas misturas sem fibra, onde a queda brusca do MRF realmente ocorreu para valores próximos de 80% do MRF inicial. Contudo, a ruptura de algumas amostras ocorreu para valores próximos até de 30% do valor inicial do MRF. Apesar disso, o critério que aponta a ruptura aos 50% parece razoável para as misturas sem fibra, que apresentam essa queda brusca do MRF até a ruptura. Já para as misturas com fibra, esse comportamento não se confirmou, pois com exceção da mistura Sc10F (90%), as curvas não apresentaram uma queda brusca do MRF até a ruptura, e, para algumas amostras, a ruptura ocorreu próximo a 10% do MRF inicial.

4.6.3 Curvas de degradação: deformação x n° de ciclos

Na Figura 35 pode-se observar as curvas que relacionam a deformação registrada com o número de ciclos da mistura Sc10. Para as amostras com níveis de tensão de 70 e 80%, as deformações iniciais ficaram próximas a 50 *microstrains*, dentro do intervalo recomendado (50 a 100 *microstrains*) pela Austroads (2008), no entanto a amostra com 80% rompeu antes de 10^4 ciclos, o que é inesperado de acordo com a especificação. Para a amostra com 90% da tensão aplicada foram registrados apenas três incrementos de deformação antes da sua ruptura, que ocorreu logo nas primeiras aplicações de carga como já citado anteriormente na análise do MRF dessa mistura. A deformação registrada ficou acima de 300 *microstrains*. Diferentemente do observado nas curvas de degradação do MRF para a mistura Sc10, nas curvas de deformação não é possível verificar uma relação direta entre os níveis de tensão aplicados e os valores de deformação registrados, já que as curvas permaneceram constantes e com valores finais de deformação próximos e abaixo de 100 *microstrains* (desconsiderando a amostra com 90% da tensão).

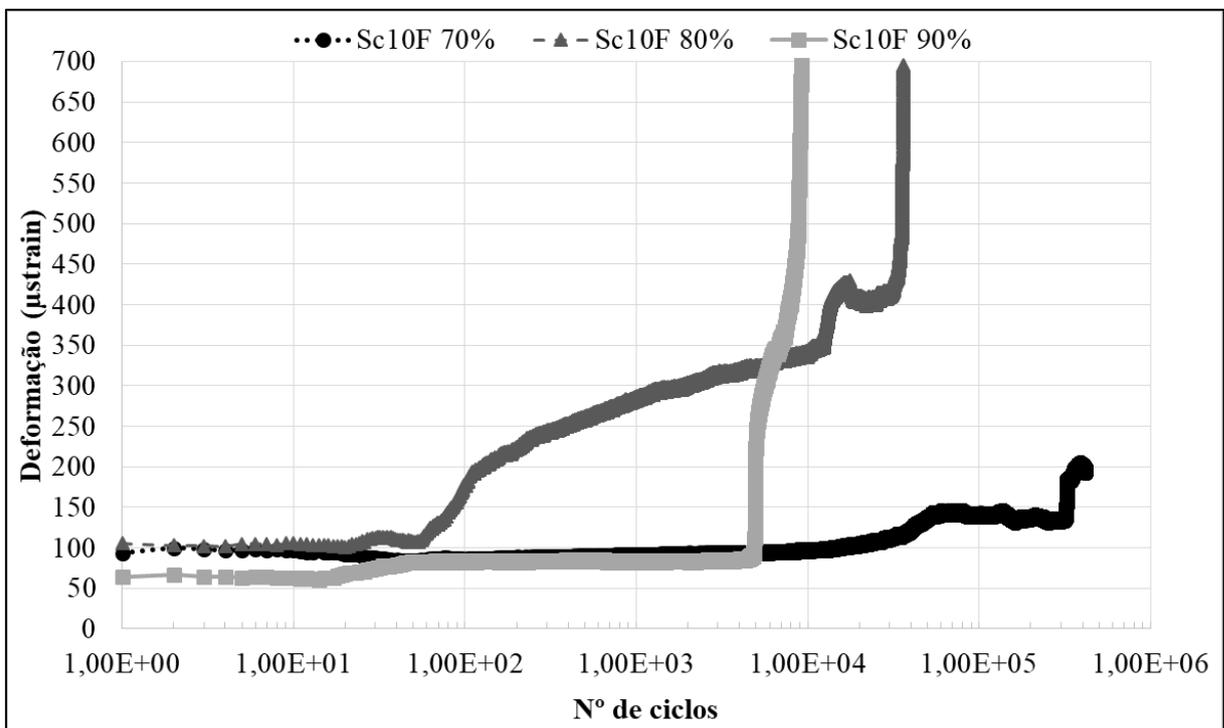
Figura 35: Deformação da mistura Sc10



Fonte: Autoria própria (2020)

A Figura 36 apresenta as curvas para a mistura Sc10F, onde primeiramente é possível perceber que as deformações iniciais registradas para os três níveis de tensão ficaram próximas, variando entre 65 e 100 *microstrains*, dentro do intervalo recomendado pela Austroads (2008), e apresentaram a sua ruptura entre os ciclos 10^4 e 10^6 . Para essa mistura, a deformação na ruptura mostrou-se dependente dos níveis de tensão, já que quanto maior a tensão aplicada, maior a deformação registrada, o que não se observou nos valores iniciais de deformação. A deformação registrada na ruptura chegou a 700 *microstrains* para as amostras ensaiadas com 80% e 90% da tensão.

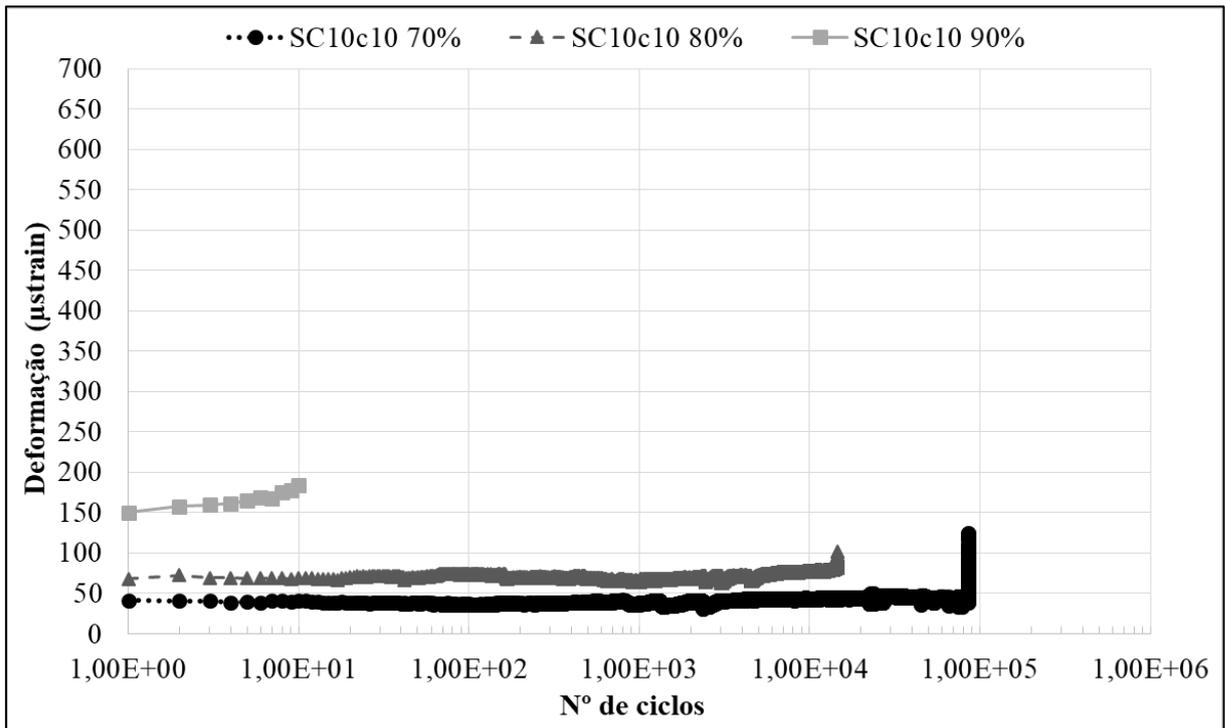
Figura 36: Deformação da mistura Sc10F



Fonte: Autoria própria (2020)

Para a mistura SC10c10, as curvas de deformação estão apresentadas na Figura 37 pode-se observar que os valores iniciais de deformação variaram entre 40 e 150 *microstrains*, mostrando dependência do nível de tensão aplicado, pois quanto maior o nível de tensão, maior foi a deformação registrada. A amostra ensaiada com nível de tensão de 70% apresentou deformações iniciais menores que 50 *microstrains*, abaixo do intervalo recomendado pela Austroads (2008), no entanto sua ruptura ocorreu em menos de 10^6 ciclos, diferentemente do que prevê a especificação. A amostra com 90% da tensão também apresentou deformação inicial fora do intervalo, acima do recomendado, e teve sua ruptura antes de 10^4 ciclos, como indica a norma. Os valores da deformação na ruptura variaram de 100 a 200 *microstrains*.

Figura 37: Deformação da mistura SC10c10

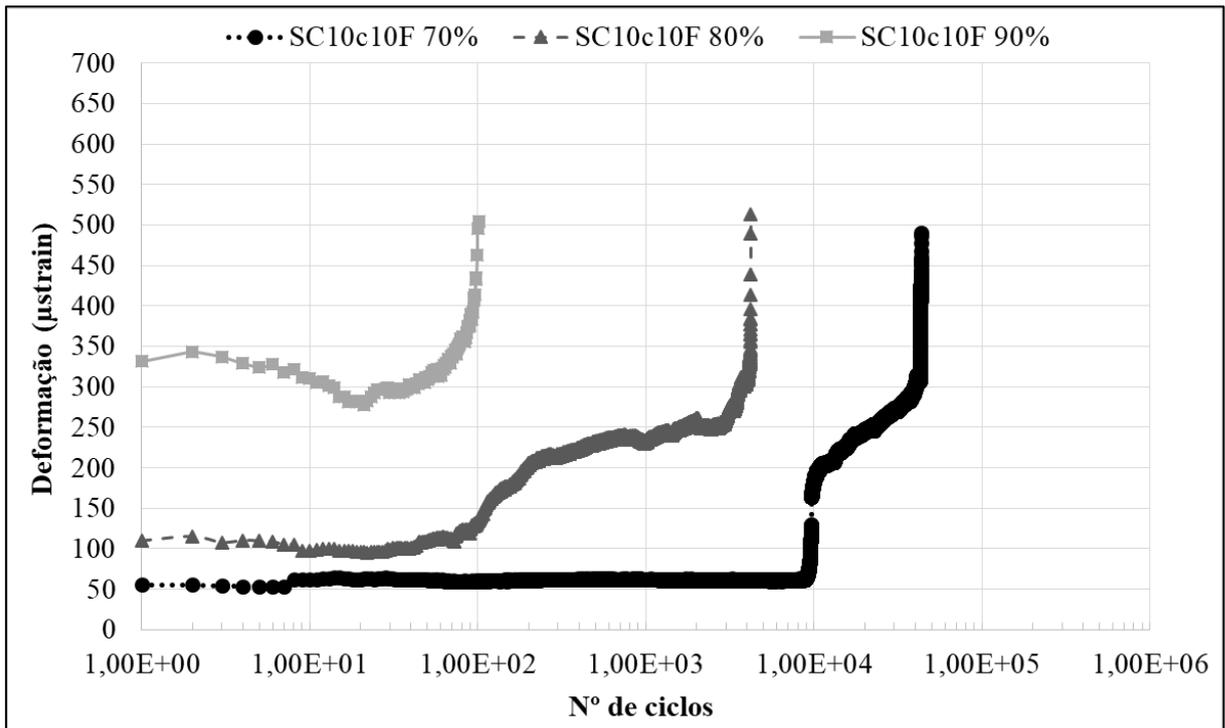


Fonte: Autoria própria (2020)

A Figura 38 mostra as curvas de deformação para a mistura SC10c10F, com valores iniciais variando entre 55 e 330 *microstrains* para os três níveis de tensão. As amostras ensaiadas com 80% e 90% da tensão, apresentaram deformações iniciais acima do recomendado pela Austroads (2008), e tiveram sua ruptura antes de 10^4 ciclos, como esperado. Para essa mistura foi possível perceber a relação entre o nível de tensão e a deformação, ou seja quanto maior o nível de tensão, maiores foram os valores iniciais de deformação registrados. Os valores de deformação na ruptura ficaram próximos a 500 *microstrains* para todas as amostras.

De forma geral, pode-se assumir que para as deformações iniciais registradas há uma influência direta do nível de tensão aplicado, ou seja, quanto maior o nível de tensão, maiores as deformações iniciais. Além disso, é possível afirmar que o critério definido pela Austroads (2008) de que as amostras com deformações iniciais entre 50 e 100 *microstrains* chegam à ruptura entre os ciclos 10^4 e 10^6 , é razoável para o material estudado.

Figura 38: Deformação da mistura SC10c10F



Fonte: Autoria própria (2020)

4.6.4 Relação entre o número de ciclos e a razão de tensões

A Tabela 23 apresenta o número de ciclos que foram atingidos até o rompimento dos corpos de prova para cada razão de tensões aplicada no ensaio, em cada mistura. É possível perceber que para as misturas de solo-cal (Sc10 e Sc10F), a inserção da fibra ocasionou em um aumento no número de ciclos, o que não aconteceu para as misturas de solo-cinza-cal (SC10c10 e SC10c10F). A incorporação de cinza nas misturas causou numa queda do número de ciclos, exceto para a amostra SC10c10 com 80% da tensão.

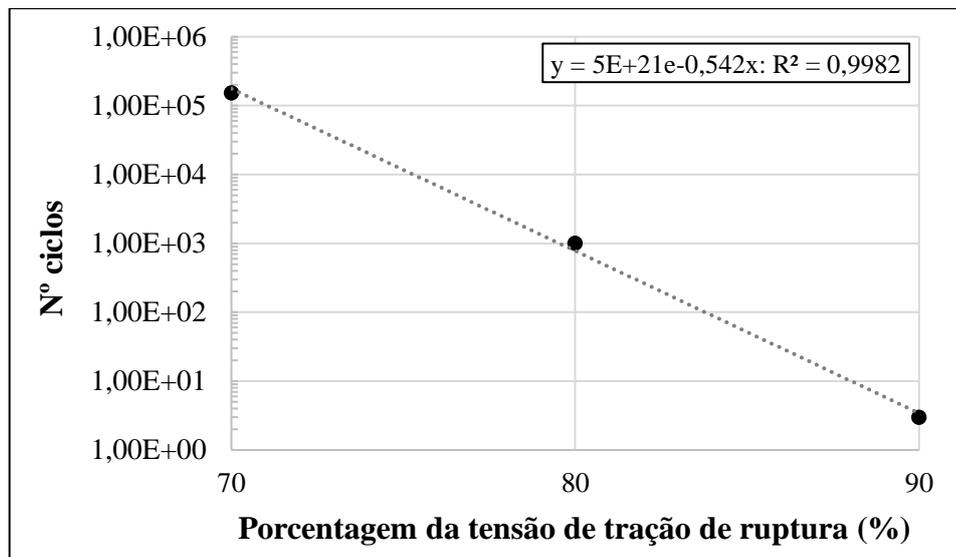
Além disso, como já foi apontado brevemente nas análises do módulo de resiliência flexural, a razão de tensões aplicada (70, 80 e 90%) teve influência direta no número de ciclos alcançados ao final do ensaio com o rompimento das amostras, quanto maior a razão de tensões aplicada no ensaio, menor o número de ciclos atingido e mais rápida a ruptura dos corpo de prova. É possível observar graficamente esse comportamento nas Figuras 39, 40, 41 e 42.

Tabela 23: Número de ciclos atingidos para cada nível de tensão

Mistura	Nível de tensão (%)	Tensão aplicada (MPa)	Nº de ciclos
Sc10	70	0,112	154471
	80	0,128	1013
	90	0,144	3
Sc10F	70	0,147	417173
	80	0,168	36133
	90	0,189	9212
SC10c10	70	0,091	85203
	80	0,104	14614
	90	0,117	11
SC10c10F	70	0,119	43097
	80	0,136	4190
	90	0,153	103

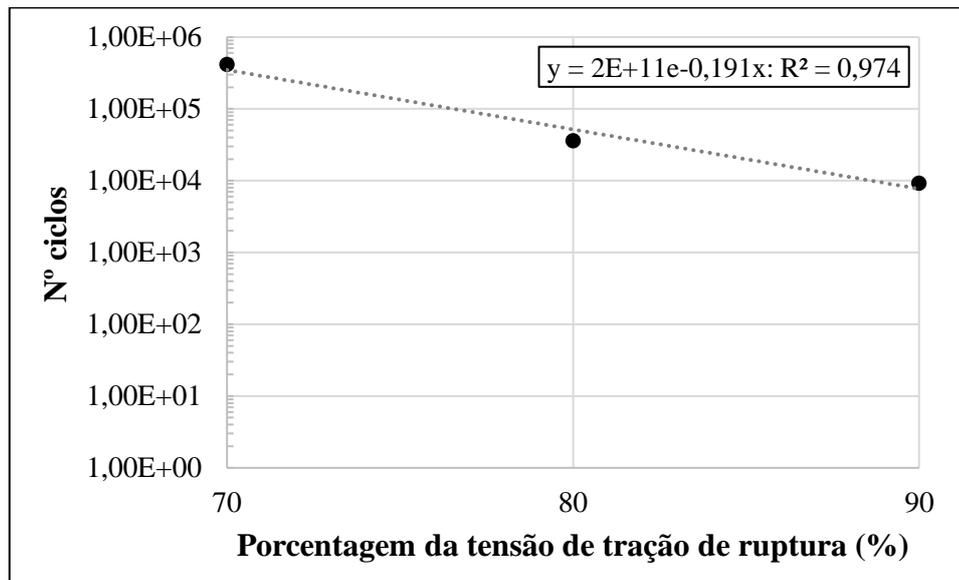
Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 39: Relação entre o nº de ciclos e razão de tensões para a mistura Sc10



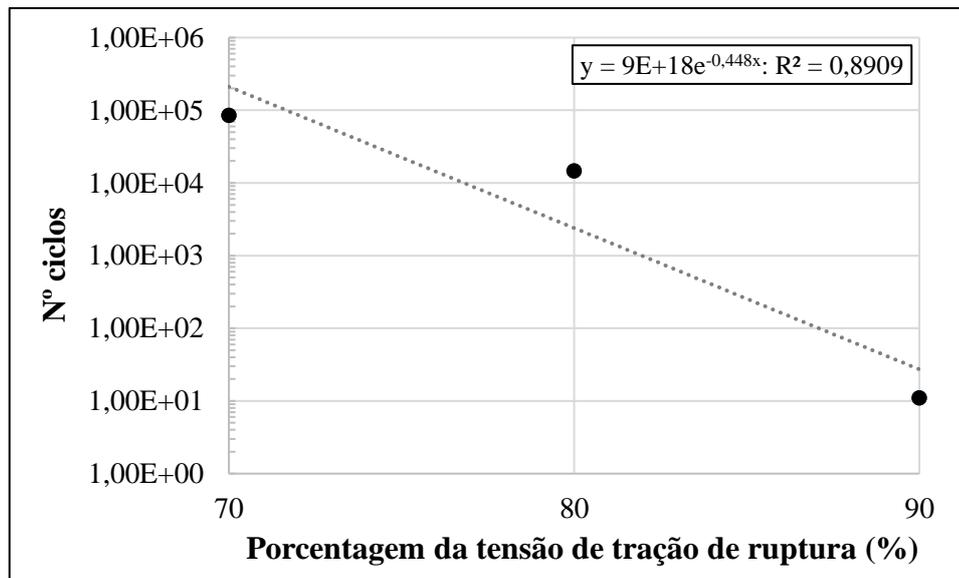
Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 40: Relação entre o nº de ciclos e razão de tensões para a mistura Sc10F



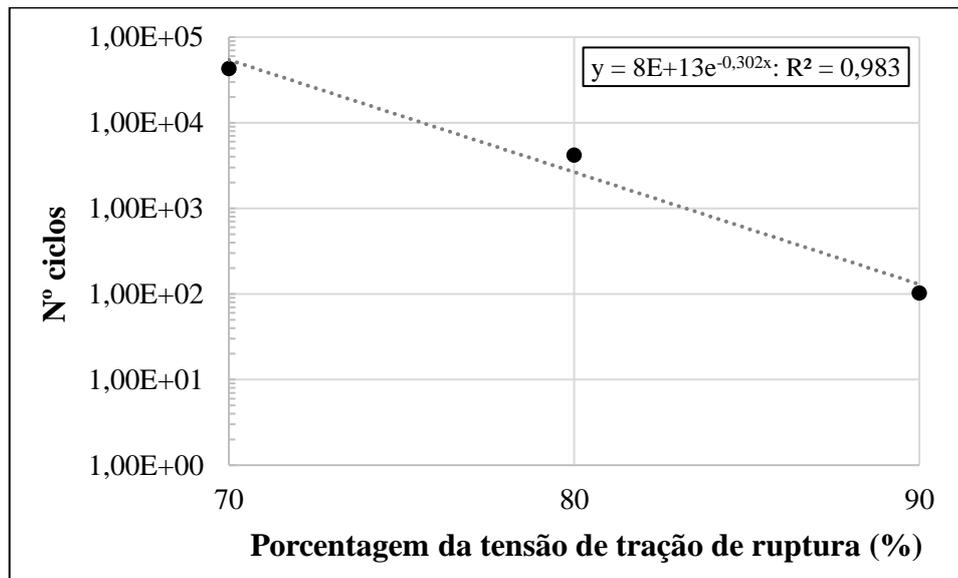
Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 41: Relação entre o nº de ciclos e razão de tensões para a mistura SC10c10



Fonte: Autoria própria (2020)

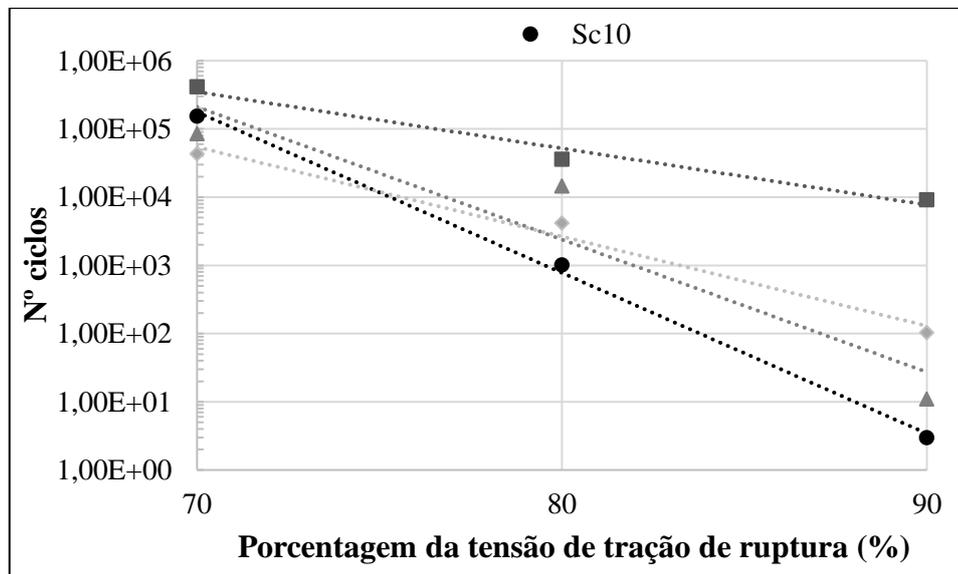
Figura 42: Relação entre o nº de ciclos e razão de tensões para a mistura SC10c10F



Fonte: Autoria própria (2020)

A Figura 43 apresenta uma comparação da relação para todas as misturas estudadas, onde é possível constatar que a amostra de solo-cal com fibra (Sc10F) foi a que alcançou o maior número de ciclos até a ruptura para todos os níveis de tensão.

Figura 43: Comparação da relação para todas as misturas



Fonte: Autoria própria (2020)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões estabelecidas a partir da análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados. Além disso, também são apresentadas algumas sugestões para pesquisas futuras, evidenciando pontos limitadores e imprevistos encontrados no estudo.

5.1 Conclusões

A partir da análise e discussão dos resultados, considerando as variáveis investigadas sobre o comportamento de misturas de solo estabilizadas com cal de carbureto e cinza de casca de aveia e reforçadas com fibra de polipropileno em ensaios estáticos e dinâmicos, foram estabelecidas dentro das circunstâncias e limitações específicas dessa pesquisa, as seguintes conclusões:

Quanto à resistência à compressão simples:

- O ensaio piloto realizado com misturas solo-cal a fim de definir um teor fixo de cal, apresentou valores de RCS entre 0,09 MPa e 1,86 MPa, mostrando ganhos consideráveis de até 300% e confirmando a influência do teor de cal no aumento da RCS.
- O ensaio preliminar de RCS com finalidade de definir um tempo e uma temperatura de cura fixos, apresentou valores de resistência entre 0,11 MPa e 1,86 MPa. Constatou-se que a temperatura de cura foi a variável que mais influenciou no aumento da resistência dos corpos de prova, chegando a aumentar em até 10 vezes os valores de RCS. O tempo de cura também demonstrou ter grande influência no aumento da resistência, chegando a elevar em até 50% os resultados de RCS. O teor de cinza demonstrou influenciar na redução da RCS, principalmente em temperaturas mais baixas.
- Para as misturas curadas aos 7 dias à 40°C os valores de resistência variaram entre 0,99 MPa e 1,44 MPa. Verificou-se que o aumento do teor de cinza ocasionou redução nos resultados da RCS. Além disso, a inserção de fibras também levou a reduções nos valores de RCS.

- Quando comparados com os valores de referência de RCS propostos pela Austroads (2002) e indicados na Tabela 1 as misturas se classificam como levemente cimentadas, com exceção da mistura SC30c10F que apresentou comportamento de material modificado.

Quanto à resistência à compressão diametral:

- O ensaio de RCD realizado aos 7 dias de cura à 40°C apresentou valores de resistência variando entre 0,10 MPa e 0,21 MPa. Da mesma forma em que ocorreu na RCS, o aumento do teor de cinza causou reduções nos valores de RCS. No entanto, diferentemente, a inserção de fibras ocasionou no aumento da RCD de todas as misturas.
- A relação média obtida entre a RCD e a RCS foi igual a 0,12, valor que se enquadra às relações geralmente encontradas para misturas solo-cal, como em Thompson (1965) entre 0,11 e 0,15 e em Nuñez (1991) com valor médio de 0,135.

Quanto aos ensaios de fadiga em quatro pontos:

- Constatou-se que a inserção de fibras teve influência na redução do MRF e no alongamento das curvas, absorvendo a energia de deformação após a ruptura do corpo de prova. O incremento no teor de cinza não mostrou grande influência nos resultados de MRF, não apresentando uma tendência clara;
- As deformações iniciais registradas variaram de 40 a 330 *microstrains* e apresentaram dependência direta do nível de tensão aplicado, ou seja, quanto maior o nível de tensão, maiores as deformações iniciais;
- O critério definido pela Austroads (2008) de que as amostras com deformações iniciais entre 50 e 100 *microstrains* chegam à ruptura entre os ciclos 10^4 e 10^6 , é razoável para o material estudado, apesar de algumas amostras não seguirem este critério;
- O número de ciclos atingidos na ruptura apresenta dependência do nível de tensão aplicado, quanto maior o nível de tensão, menor o número de ciclos e mais rápida a ruptura do corpo de prova.

Quanto à influência da cinza:

- A cinza de casca de aveia utilizada nesta pesquisa não se mostrou efetiva para o emprego como material pozolânico ou fíler em misturas solo-cal, muito provavelmente pela sua elevada quantidade de matéria orgânica. A sua inserção nas misturas ocasionou a perda de resistência desses materiais, apesar de os ensaios preliminares apontarem que para longos períodos de cura, essa perda é baixa. Estudos mais aprofundados sobre a influência do beneficiamento deste material nas suas propriedades fazem-se necessários para determinar de fato a indicação ou não se sua utilização.

Quanto à influência da fibra:

- A fibra de polipropileno empregada no estudo mostrou-se ser uma variável importante no comportamento das misturas, principalmente quando submetidas ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral, onde causou o aumento na resistência de todas as misturas, e também no ensaio de fadiga em quatro pontos, onde teve influência na redução do módulo de resiliência flexural e no alongamento das curvas, retardando a ruptura dos corpos de prova.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com o objetivo de complementar o estudo desta dissertação, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- No presente trabalho não houve tempo hábil e recursos suficientes para um estudo aprofundado da cinza utilizada e a mesma não apresentou as propriedades adequadas para sua utilização como material pozolânico, muito provavelmente pelas suas condições prévias. Diante disso, para a utilização desta cinza recomenda-se a realização de um estudo com diferentes tempos e temperaturas de queima e diferentes processos de moagem, analisando a influência destes fatores na pozolanicidade e propriedades da cinza;
- Devido a limitação de recursos deste estudo, não se realizou o ensaio de resistência à tração na flexão (RTF), mas sim ensaios de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral, que possibilitaram a utilização de quantidades menores de material por serem realizados em corpos

de provas de tamanho reduzido. No entanto, recomenda-se a realização de ensaios de RTF.

- Também pela limitação dos recursos, não se realizou repetições no ensaios de fadiga em quatro pontos, no entanto recomenda-se a moldagem dos corpos de prova em triplicata, possibilitando a realização de uma análise estatística dos resultados.
- Como citado no trabalho, algumas amostras apresentaram deformações iniciais acima do intervalo de 50 a 100 *microstrains*, provavelmente pelos níveis de tensão utilizados serem altos (apesar de estarem no intervalo recomendado) e causarem danos prematuros aos corpos de prova. No entanto, não foi possível a aplicação de níveis menores de tensão devido à limitação do cilindro de ar utilizado no equipamento de ensaio. Recomenda-se a utilização de tensões mais baixas para possibilitar uma melhor análise do MRF.
- Além da abordagem tradicional utilizada nesse estudo, considerando a degradação do MRF e as deformações de tração, recomenda-se também adicionalmente a realização de análises considerando a energia dissipada no ensaio de fadiga.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY & TRANSPORTATION OFFICIALS - AASHTO. **Guidelines for geometric design of very low-volume local roads**. 2001. ISBN Number: 978-1-56051-166-3. Washington, DC.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS - ASTM. E 206-72: standard definitions of terms relating to fatigue testing and statistical analysis of fatigue data. USA, 1979.

AGOPYAN, V. Materiais de construção reforçados por fibras. **A construção**, São Paulo, n. 2080/2081, P. 43, 1987.

AHMAD, F.; BATENI, F.; AZMI, M. Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, p. 93–99, 2010.

AHMED, I. **Laboratory study on properties of rubber soils**. 1993. Ph.D. Thesis, School of Civil Engineering, Purdue University, W. Lafayette, IN.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71p.

_____. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 20p.

_____. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 7p.

_____. **NBR 13600**: Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1996. 2p.

_____. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015. 4p.

_____. **NBR 6457**: Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a. 8p.

_____. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016b. 5p.

_____. **NBR 6508**: Grãos de Solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica, 2016c. 8p.

_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016d. 3p.

_____. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016e. 12p.

_____. **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação – Método de ensaio.** 2016f. 9 p.

ASSOCIATION OF AUSTRALASIAN ROAD TRANSPORT AND TRAFFIC AGENCIES - AUSTRROADS. **Guide to pavement technology part 2: pavement structural design: Austroads** Publication AGPT02-17. Sydney, 295p. 2017.

_____. **Mix design for stabilized pavement materials: Austroads** Publication AP-T16. Sydney, 43p. 2002.

_____. **Preliminary Investigation of the Influence of Micro-cracking on Fatigue Life of Cemented Materials: Austroads** Publication AP-T198. Sydney, 65p. 2012.

_____. **The Development and Evaluation of Protocols for the Laboratory Characterisation of Cemented Materials: Austroads** Publication AP 101/08. Sydney, 109p. 2008.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica – materiais, projeto e restauração.** São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2007.

BARBOSA, M. B. et al. Estudo comparativo das propriedades mecânicas do CAD com resíduos de borracha de pneu e cinza de casca de arroz de diferentes composições morfológicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 48., 2006. **Anais.** IBRACON, 2006.

BEHAK, L. **Análise estrutural de Pavimentos de Baixo Volume de Tráfego Revestidos com Solo Modificado com Cal Considerando Ensaio Laboratoriais e Monitoramento de Trechos Experimentais.** 2013. 298p. Tese de Doutorado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BEHAK, L. **Estabilização de um solo sedimentar arenoso do Uruguai com cinza de casca de arroz e cal.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 171p.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: PETROBRAS; ABEDA, 2008. 504p. II

BHATTACHARYA, P. G. et al. A Comparative Study of Flexural Fatigue Responses of Lime-Laterite and Lime-Fiber-Laterite Soil Mixtures at Different Densities. **Jordan Journal of Civil Engineering.** 2016. v.10. n.4.

BIANCHINI, M. K. **Estudo da Resistência ao Cisalhamento de um solo Argilo-Arenoso com a inclusão de fibras de polipropileno.** 2013. 92 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2013.

BORGES, H. F. **Estabilização de um solo argiloso com cal de carbureto.** 1979. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 105p.

BUDINSKI, K. G. **Engineering Materials: properties and selection**. 1996. New Jersey: Prentice Hall International. 5. ed. 653p.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 1988a. 6. ed. v. 1.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 1988b. 6. ed. v. 2.

CARRARO, J. A. H. **Utilização de resíduos industriais na estabilização de um solo residual de arenito**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 150p.

CASAGRANDE, M. D. T. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 109p.

CASAGRANDE, M. D. T.; CONSOLI, N.C.; THOMÉ, A.; PRIETTO, P. D. M. Comportamento em campo e laboratório de um solo reforçado com fibras. Artigo técnico. **Solos e Rochas**. São Paulo. 25. p. 247-255, 2002.

CETIN, H.; FENER, M.; GUNAYDIN, O. **Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material**. *Engineering Geology*, n.88, p. 110-120, 2006.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**. Brasília, 2020. 31p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. 2019. **Pesquisa CNT de Rodovias 2019: Relatório Gerencial**. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relatorio-gerencial/>>. Acesso em: 20 mar 2020.

CONSOLI, N. C.; CASAGRANDE, M. D. T.; PRIETTO, P. D. M.; THOMÉ, A. Plate Load Test on Fiber-Reinforced Soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York: ASCE, v.129, n.10, p. 951-955. 2003.

CONSOLI, N. C.; MONTARDO, P.; DONATO M.; DONATO, M., PRIETTO M. Effect of material properties on the behavior of sand–cement–fiber composites. **Ground Improvement** 8: pp 77–90, 2004.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 485p.

CRISTELO, N. C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. 2001. Dissertação. (Mestrado em Engenharia). Universidade do Minho. Braga, Portugal.

CRUZ, Maria. **Novas tecnologias da aplicação de solo cimento**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade do Minho. Braga, Portugal. 240p.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições Minerais. Concreto: Ciência e Tecnologia**. Ed. G.C. Isaia, 1ª ed. São Paulo, IBRACON, 2011, 2v, 1946p.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 200p.

D'ÁVILA, A. L. M. **Bases de um sistema de gerência de estradas municipais do estado do Rio Grande do Sul**. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade de São Paulo. São Carlos. 211p.

DNER. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Norma DNER-ME 201/1994**: Solo cimento - compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994. 4p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

_____. **Norma DNIT 136/2010 – ME**: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010. 6p.

_____. **SNV 2017 completo**. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/sistema-nacional-de-viacao/sistema-nacional-de-viacao>>. Acesso em: 19 out. 2018.

DIAS, C. R. C. **Estudo de misturas de areia asfalto e cinza-cal para emprego em pavimentação urbana**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 127p.

EADES, J. L.; GRIM, R. E. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. **Highway Research Record 139**. p. 61-72. National Research Council. Washington, US. 1966.

EDINCLILER, A.; CABALAR, F.; CAGATY, A. **Triaxial compression behavior of sand and tire wastes using neural network**. Neural computation and application, v.21, p.441-452, 2010.

EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL - EMATER/RS - ASCAR. **Safra de Inverno – 2019**: 2ª estimativa. 2019. Disponível em: <http://www.emater.tche.br/site/arquivos_pdf/safra/safraTabela_02122019.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2020.

ETHIOPIAN ROADS AUTHORITY - ERA. **Design manual for low volume roads, Part A, Part B and Part C**. 2011. Federal Democratic Republic of Ethiopia. Disponível em: <<https://www.gov.uk/dfid-research-outputs/design-manual-for-low-volume-roads-parts-a-g>>. Acesso em: 15 out. 2018.

FESTUGATO, L., **Análise do Comportamento Mecânico de um Solo Microreforçado com Fibras de Distintos Índice Aspecto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

FESTUGATO, L., **Comportamento de Hidratação e Resposta Cisalhante Cíclica de Resíduo de Mineração Cimentado Reforçado com Fibras**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

FEUERHARMEL, M. R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. Porto Alegre, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 131p.

GODOY, V. B. **Desempenho de misturas de distintos materiais com cinza volante e cal submetidas a condições climáticas severas**. Porto Alegre. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 166p.

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

HIGGINS, R. A. **Properties of engineering materials**. London: E. Arnold. 2. ed. 1994. 455p.

HILT, G. H; DAVIDSON, D. T. Lime Fixation in Clayey Soils. Highway Research Board, Washington, D. C., n. 262, p. 20-32. 1960.

ILLSTON, J. M. **Construction Materials: their nature and behavior**. London: E & FN Spon. 2. ed. 1994. 518p.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization principles and practice**. Melbourne: Butterworks. 1972. 374p.

JARAMILLO, N. A. D. **Comportamento mecânico de solos reforçados com borracha de pneus**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 112p.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V.; PRADO, T.A. Durabilidade de compósitos de cimentos e fibras vegetais. **Artigo técnico**. USP. 11p. 1999.

JOHNSTON, C. D. Fiber-reinforced cement and concrete. In: V. M. MALHORTA. **Advances in concrete technology**. 2. ed. Ottawa: V. M. Malhorta. 1994. p. 603-673.

JORGE L. **Constituição, dimensionamento e conservação de pavimentos para baixos volumes de tráfego**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Coimbra, Portugal.

KUMAR, A.; WALIA, B. S.; BAJAJ, A. Influence of Fly Ash, Lime, and Polyester Fibers on Compaction and Strength Properties of Expansive Soil. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 19(3), 242-248, 2007.

LIMA, C. A. P. **Comportamento mecânico com resíduos industriais, sob flexão a quatro pontos, para construção de pavimentos flexíveis**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Amazonas. Manaus. 123p.

LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; SILVA, C. H. C. **Estabilização de solos II – Técnicas e aplicações a solos da microrregião de Viçosa**. Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 1993. 32 p.

LITTLE, D. N. **Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates**. Volume 1: Summary of Findings. Prepared for The National Lime Association, 1999.

LOVATO, R. S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 164p.

LÓPEZ, M. A. C. **Reciclagem de pavimentos flexíveis com adição de cimento portland: estudo de fadiga através do ensaio de flexão em viga quatro pontos**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 163p.

MAHER, H., Ho, C. **Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite**. Journal Geotechnical Eng. 120:1381–93, 1994.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Ed. Interciência Ltda, 2015. 2. ed. 638 p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**. 2018. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/1138781/1435504/Boletim+de+Monitoramento+do+Sistema+El%C3%A9trico+-+Setembro+-+2018.pdf/cd310d24-c4ad-43ec-88b2-981375be0abc>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

MINISTRY OF TRANSPORT AND PUBLIC WORKS - MTPW. **Design manual for low volume sealed roads**. 2013. Republic of Malawi. Disponível em: <<https://www.gov.uk/dfid-research-outputs/design-manual-for-low-volume-sealed-roads-using-the-dcp-design-method>>. Acesso em: 15 out. 2018.

NOVAES, J. F. **Misturas cinza volante - cal de carbureto: Durabilidade, resistência à tração e compressão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

NÚÑEZ, W. P. **Estabilização Físico-química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, Visando seu Emprego na Pavimentação**. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicações na avaliação estrutural de pavimentos**. 1991. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 489p.

RAMASAMY, P.; PERIATHAMBY, A.; IBRAHIM, S. Carbide sludge management in acetylene producing plants by using vacuum filtration. 2002. **Waste management and research**, v. 20, n. 6, p. 536-540.

RÊGO, J. H. S. **As cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento – aspectos de microestrutura das pastas**. Brasília, 2004. 274p. Tese (Doutorado em Eng. Civil) Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília.

RIBEIRO, D. V.; MORELLI, M. R. **Resíduos sólidos: problema ou oportunidade?**. Rio de Janeiro: Interciência, 2009. 158p.

ROGERS, C. D. F., GLENDINNING, S., AND ROFF, T. E. J. **Lime modification of clay soils for construction expediency**. Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, v. 125, p. 242-249, 1997.

SALDANHA, R. B. **Misturas Cinza Volante e Cal de Carbureto: Comportamento da Resistência à Compressão Simples para Cura Acelerada**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 170p.

SANTANNA, J. A. **Estudo do comportamento de solos artificiais em função da variação das características de sua fração grossa**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de São Paulo. São Paulo. 100p.

SANTOS, S. H. T. **Análise do comportamento de misturas de solos com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e cinzas de casca de arroz**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 125p.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: Ed. Pini, 2001. v. 2, il.

SHARMA, R. S., PHANIKUMAR, B. R., and VARAPRASADA RAO, B. Engineering behavior of a remolded expansive clay blended with lime, calcium chloride and rice-husk ash. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 20(8), 509–515, 2008.

SILVA, C. C. **Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 170p.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DE MASSAS ALIMENTÍCIAS E BISCOITOS NO ESTADO DE SÃO PAULO – SIMABESP. **PepsiCo reduz em 30% o consumo de energia na fábrica de Quaker**. 2013. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/simabesp/noticias/pepsico-reduz-em-30-o-consumo-de-energia-na-fabrica-de-quaker/>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

SPECHT, L. P. **Comportamento de misturas Solo-cimento-fibras submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação**. Porto Alegre, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 130p.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre – RS: EMATER/RS, 2008. 222p.

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

THOMÉ, A. **Comportamento de fundações superficiais apoiadas em aterros estabilizados com resíduos industriais**. Porto Alegre, 1999. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 245p.

THOMÉ, A. Melhoria de Solos com Uso de Resíduos Industriais: A Experiência Brasileira. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2008, Buzios. **COBRAMSEG 2008**. Rio de Janeiro: ABMS, 2008. v. 1. p. 3-20.

THOMPSON, M. R. Split-Tensile Strength of Lime-Stabilized Soils. **Highway Research Record**, Washington, D.C. v.92, p.69-82. 1965.

THOMPSON, M. R. Lime Reactivity of Illinois Soils. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, ASCE, v.92, p.67-92. 1966.

TOOHEY, N. M.; MOONEY, M. A.; BEARCE, R. G. Stress-Strain-Strength Behavior of Lime-Stabilized Soils during Accelerated Curing. **Journal of Materials in Civil Engineering**. ASCE, 2013.

TRINDADE, T. P.; LASBIK, I.; LIMA, D. C.; SILVA, C. H. C.; BARBOSA, P. S. A. Latossolo vermelho – amarelo reforçado com fibras de polipropileno de distribuição aleatória: estudo em laboratório. Minas Gerais, 2004. **REM**. 6 p.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo: McGRAWHILL do Brasil Ltda, 1977. 509 p.

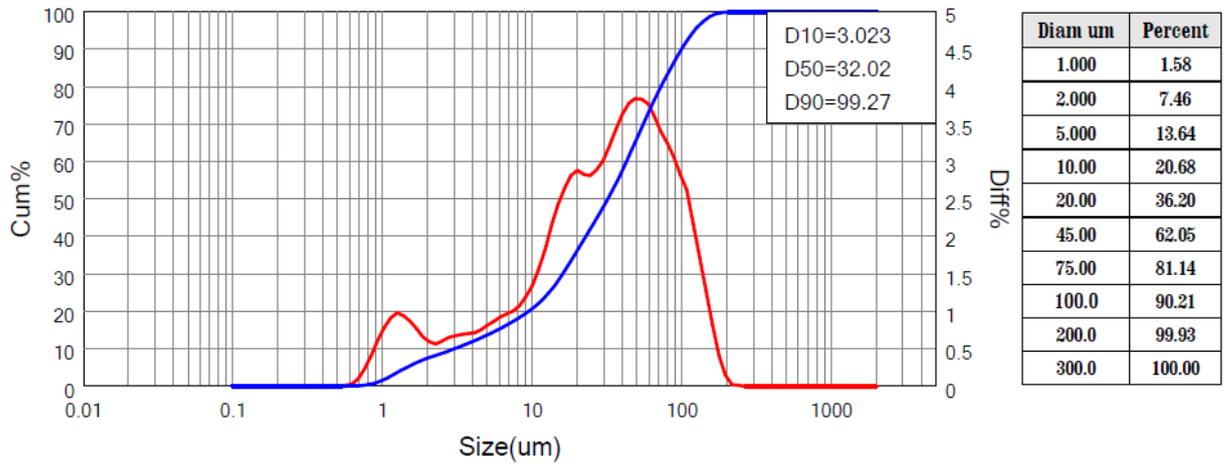
VILLIBOR, D. F. **Estabilização granulométrica ou mecânica**. 1982. 57 p. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1982.

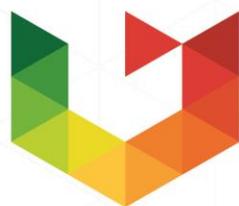
WHITE MARTINS. **Relatório de Sustentabilidade 2011-2012**. 2012. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.praxair.com.br/our-company/sustainable-development/reporting-center>>. Acesso em: 18 out. 2018.

APÊNDICE A – GRANULOMETRIA COMPLETA DA CINZA DA CASCA DE AVEIA

D[4,3]: 37.87 um	D[3,2]: 7.656 um	SSA : 0.284 m ² /g	OBS. : 11.24 %
D[2,1]: 1.605 um	D[1,0]: 1.036 um	SPAN : 3.005	Residual : 1.639 %

D03 = 1.176 um	D06 = 1.621 um	D10 = 3.023 um	D16 = 6.525 um	D25 = 12.94 um
D75 = 63.00 um	D50 = 32.02 um	D84 = 81.69 um	D90 = 99.27 um	D97 = 135.2 um





UPF

UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br