

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

**Gabriel Grassioli Schreinert**

**RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE  
CIMENTO: COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS  
CONTENDO FRESADO ALFÁLTICO E SOLO LATERÍTICO**

Porto Alegre  
julho 2017

**GABRIEL GRASSIOLI SCHREINERT**

**RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE  
CIMENTO: COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS  
CONTENDO FRESADO ALFÁTICO E SOLO LATERÍTICO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de  
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal  
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Engenheiro Civil

**Orientador: Washington Peres Núñez**  
**Coorientadora: Thaís Radünz Kleinert**

Porto Alegre  
julho 2017

**GABRIEL GRASSIOLI SCHREINERT**

**RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE  
CIMENTO: COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS  
CONTENDO FRESADO ASFÁLTICO E SOLO LATERÍTICO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pelo Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2017

Prof. Washington Peres Núñez  
Dr. pelo PPGEC/UFRGS  
Orientador

Thaís Radünz Kleinert  
Ma. pelo PPGEC/UFRGS, Brasil  
Coorientadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)**  
Dr. pelo PPGEC/UFRGS, Brasil

**Prof.<sup>a</sup> Ângela Gaio Graeff (UFRGS)**  
PhD pela University of Sheffield, Reino Unido

**Thaís Radünz Kleinert (UFRGS)**  
Ma. pelo PPGEC/UFRGS, Brasil

**Matheus Ferreira Matuella (UFRGS)**  
Me. pelo PPGEC/UFRGS, Brasil

Dedico este trabalho aos meus pais e ao meu irmão, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço aos meus pais pela educação recebida, pelo carinho, suporte e incentivo que fizeram com que este momento fosse possível.

Agradeço ao Professor Washington Peres Núñez, orientador deste trabalho e quem cultivou meu interesse na área de Pavimentação ao longo do curso de graduação. Fico lisonjeado em ter sido seu aluno, sempre me proporcionando grandes aprendizados que, com certeza, levarei para o resto da minha vida profissional.

Sou imensamente agradecido à Thaís Radünz Kleinert, coorientadora deste trabalho, e ao William Fedrigo, que foram meus guias durante todo o percurso. Seus ensinamentos e disposição para ajudar foram essenciais no desenvolvimento desta pesquisa. Do mesmo modo, agradeço aos bolsistas, Lucas Marin Malabarba e Mateus César Colussi da Silva, pelo auxílio e parceria na realização dos ensaios.

Agradeço à equipe do Laboratório de Pavimentação (LAPAV) por toda infraestrutura disponibilizada e pelo atendimento, sempre que possível, durante a realização desta pesquisa. Obrigado, em especial, à Larissa Montagner pela paciência e auxílio com os ensaios de laboratório. Da mesma forma, agradeço à Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC) por ceder um de seus laboratórios com equipamentos que garantiram rapidez e confiabilidade na moldagem de parte dos corpos de prova.

Sou agradecido também aos amigos do Laboratório de Geotecnia (LAGEOTEC): Daniel Pinheiro Fernandes, Gabriela Viapiana, Helena Lunkes Strieder, Jair Silva, Matheus Ferreira Matuella e Victor Manfio, por estarem sempre prontos para ajudar e pelos eventos gastronômicos.

Por fim, sou grato aos meus amigos, muitos considerados como irmãos, que estiveram sempre presentes, independente da distância física, e são essenciais em minha vida.

Seja a mudança que você quer ver no mundo.

*Mahatma Gandhi*

## RESUMO

A reciclagem profunda com adição de cimento Portland é uma técnica de reabilitação de pavimentos que apresenta vantagens do ponto de vista técnico, econômico e ambiental e que já vem sendo aplicada no país há algumas décadas. Entretanto, ainda são poucas as normas brasileiras que abordam a técnica, sendo que as existentes são limitadas em diversos fatores como, por exemplo, na inexistência de procedimentos adequados de dosagem dos materiais e de dimensionamento da estrutura. Desse modo, a fim de contribuir para estudos nesta área, o presente trabalho contempla a análise do comportamento mecânico (resistência e rigidez) de misturas contendo fresado asfáltico, solo laterítico (material de base) e cimento. Analisaram-se os efeitos da porcentagem de fresado, do teor de cimento e do tempo de cura no comportamento das misturas, compactadas na energia Modificada, em ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RCD), de módulo de resiliência diametral (MRD) e resistência à tração na flexão (RTF). Foram elaborados dois planejamentos experimentais distintos, definidos conforme a propriedade estudada. Para os ensaios de RCD e de MRD, o planejamento experimental utilizado abrangeu diversos níveis para as variáveis (teores de cimento entre 1% e 7%, e porcentagens de fresado entre 8% e 92%, aproximadamente), empregando-se, em ambos, tempos de cura de 3, 7 e 14 dias para geração dos modelos estatísticos, e ainda de 28 dias para a RCD, visando-se uma comparação com os resultados de RTF. Já para os ensaios de RTF, nos quais mediu-se a resistência e a deformação na ruptura dos corpos de prova, foram estudadas nove composições, com três níveis para a porcentagem de material fresado (20%, 50% e 70%) e para o teor de cimento (2%, 4% e 6%), empregando-se um tempo de cura único de 28 dias. Em síntese, as misturas estudadas apresentaram resistências à tração (RCD e RTF) satisfatórias, não apenas considerando-se os valores mínimos adotados pela normatização nacional, no caso da RCD, mas também quando comparadas com resultados obtidos em misturas recicladas com cimento contendo outros materiais de base. Quanto aos resultados de MRD, o amplo intervalo de valores obtido demonstrou que as misturas podem gerar camadas recicladas com diferentes níveis de rigidez. Por fim, ressalta-se que ambas as propriedades mecânicas analisadas (resistência e rigidez) apresentaram aumento tanto com o acréscimo do teor de cimento quanto com a elevação da porcentagem de fresado.

Palavras-chave: pavimentação. reciclagem de pavimentos com cimento. solo laterítico. comportamento mecânico.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas da pesquisa global com destaque para o enfoque deste trabalho .....	15
Figura 2 – Etapas da trabalho .....	17
Figura 3 – Estrutura-tipo de um pavimento flexível .....	19
Figura 4 – Estrutura-tipo de um pavimento rígido .....	20
Figura 5 – Ocorrência de solos de comportamento laterítico em território brasileiro ....	23
Figura 6 – Comparação do consumo entre a técnica de reciclagem profunda e a execução de uma nova base .....	31
Figura 7 – Fluxograma para avaliação estrutural do pavimento para fins de reciclagem	34
Figura 8 – Representação em 2D das variáveis analisadas nos ensaios de RCD e MRD ..	46
Figura 9 – Esquema do programa experimental para os ensaios de RFT .....	50
Figura 10 – Fresado asfáltico utilizado nos ensaios .....	53
Figura 11 – Solo laterítico utilizado nos ensaios .....	53
Figura 12 – Curva granulométrica obtida por peneiramento do solo laterítico .....	55
Figura 13 – Curva granulométrica obtida por peneiramento do fresado asfáltico .....	55
Figura 14 – Curvas granulométricas das misturas enquadradas nos limites da Wirtgen .	56
Figura 15 – (a) Equipamentos do ensaio de compactação mini-MCV e (b) corpos de prova durante o ensaio de perda de massa por imersão .....	60
Figura 16 – Gráfico de classificação MCT .....	60
Figura 17 – Mistura SL 6-80 pronta para a realização da moldagem .....	62
Figura 18 – Procedimentos de (a) moldagem e (b) desmoldagem dos corpos de prova para o ensaio de RCD .....	65
Figura 19 – (a) Prensa utilizada para ruptura dos corpos de prova e (b) corpo de prova após ruptura .....	66
Figura 20 – Realização do (a) preparo do corpo de prova e fixação do LVDT e (b) equipamento pronto para realização do ensaio de MRD .....	68
Figura 21 – Moldagem dos corpos de prova para RFT: (a) moldes metálicos utilizados e (b) processo de compactação por meio de prensa hidráulica .....	70
Figura 22 – Modelo 3D do suporte para o ensaio de RTF .....	71
Figura 23 – Vigota após marcação e fixação do suporte tipo <i>yoke</i> e da placa de referência .....	71
Figura 24 – Vigota posicionada no pórtico para a realização do ensaio .....	72
Figura 25 – Vigota após ruptura por flexão .....	73
Figura 26 – Curva granulométrica do solo laterítico obtida por sedimentação e peneiramento .....	76
Figura 27 – Curvas granulométricas das misturas corrigidas e limites definidos pela Wirtgen .....	77

Figura 28 – Gráfico de efeitos principais para RCD: avaliação da influência da porcentagem de fresado e do teor de cimento .....	82
Figura 29 – Gráfico de contorno de RCD com 7 dias de cura .....	82
Figura 30 – Gráfico de contorno de RCD considerando um intervalo específico de resistência para as misturas .....	83
Figura 31 – Gráfico de efeitos principais para MRD: avaliação da influência da porcentagem de fresado e do teor de cimento .....	86
Figura 32 – Gráfico de contorno de MRD com 7 dias de cura .....	88
Figura 33 – Relação entre o teor de cimento e a resistência à tração na flexão .....	90
Figura 34 – Relação entre a porcentagem de fresado e a resistência à tração na flexão .	90
Figura 35 – Relação entre o teor de cimento e a deformação na ruptura .....	91
Figura 36 – Relação entre a porcentagem de fresado e a deformação na ruptura .....	91
Figura 37 – Correlação entre RTF e RCD aos 28 dias de cura .....	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos métodos de reciclagem .....	26
Tabela 2 – Vantagens e desvantagens da utilização de cimento Portland como estabilizante .....	32
Tabela 3 – Comparativo entre as especificações de serviço nacionais .....	36
Tabela 4 – Limites das faixas granulométricas propostas pelas especificações de serviço nacionais .....	37
Tabela 5 – Limites granulométricos citados pelos métodos de dosagem internacionais .	38
Tabela 6 – Comparação entre os métodos de dosagem internacionais citados .....	39
Tabela 7 – Descrição das misturas analisadas nos ensaios de RCD e MRD .....	47
Tabela 8 – Tempos de cura para os ensaios de RCD e MRD .....	47
Tabela 9 – Classificação de materiais estabilizados com cimento .....	50
Tabela 10 – Descrição das misturas analisadas nos ensaios de RTF .....	51
Tabela 11 – Parâmetros obtidos a partir dos ensaios de compactação para as misturas estudadas nos ensaios de RCD e MRD .....	57
Tabela 12 – Parâmetros obtidos a partir dos ensaios de compactação para as misturas estudadas nos ensaios de RTF .....	57
Tabela 13 – Características de moldagem dos corpos de prova para cada ensaio .....	63
Tabela 14 – Quantificação dos corpos de prova moldados .....	63
Tabela 15 – Limites de consistência e índice de plasticidade do solo laterítico empregado no estudo .....	76
Tabela 16 – Coeficientes e valores-p do modelo de regressão para RCD .....	79
Tabela 17 – Resultados de RCD das misturas analisadas .....	80
Tabela 18 – Coeficientes e valores-p do modelo de regressão para MRD .....	85
Tabela 19 – Resultados de MRD das misturas analisadas .....	87
Tabela 20 – Resultados dos ensaios de RTF .....	89
Tabela 21 – Resultados de RCD aos 28 dias de cura das misturas analisadas .....	92
Tabela 22 – Comparação entre os resultados de RCD e RTF .....	93

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

2D – Duas Dimensões

3D – Três Dimensões

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres

ARRA – *Asphalt Recycling and Reclaiming Association*

BGS – Brita Graduada Simples

BGTC – Brita Graduada Tratada com Cimento

CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

CV – Coeficiente de Variação

DEINFRA-SC – Departamento Estadual de Infra-estrutura de Santa Catarina

DER-PR – Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná

DER-SP – Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

$\gamma_{sm\acute{a}x}$  – massa específica aparente seca máxima

IECA – *Instituto Español Del Cemento y sus Aplicaciones*

LAGEOTEC – Laboratório de Geotecnologia da UFRGS

LAPAV – Laboratório de Pavimentação da UFRGS

LEME – Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais da UFRGS

LVDT – *Linear Variable Differential Transducer*

$\mu$  – Coeficiente de Poisson

MRD – Módulo de Resiliência Diametral

MTS – *Material Testing System*

NCHRP – *National Cooperative Highway Research Program*

PCA – *Portland Cement Association*

PCSO – Projeto Composto de Segunda Ordem

PMPA – Prefeitura Municipal de Porto Alegre

RCD – Resistência à tração por compressão diametral

RCS – Resistência à compressão simples

RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement*

RTF – Resistência à tração na flexão

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

$\omega_{ót}$  – Teor de umidade ótimo

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA .....	13
1.2 OBJETIVOS .....	16
<b>1.2.1 Objetivo geral</b> .....	16
<b>1.2.2 Objetivos específicos</b> .....	16
1.3 DELINEAMENTO E ESTRUTURA DO TRABALHO .....	16
<b>2 PAVIMENTAÇÃO</b> .....	18
2.1 TIPOS DE PAVIMENTOS E CAMADAS CONSTITUINTES .....	18
2.2 CAMADA DE BASE E MATERIAIS EMPREGADOS .....	21
2.3 SOLOS TROPICAIS LATERÍTICOS E CLASSIFICAÇÃO MCT .....	22
<b>3 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS</b> .....	25
3.1 CONCEITO .....	25
3.2 TIPOS DE RECICLAGEM E AGENTES ESTABILIZADORES .....	26
3.3 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE CIMENTO .....	29
<b>3.3.1 Vantagens e desvantagens</b> .....	29
<b>3.3.2 Viabilidade técnica</b> .....	33
<b>3.3.3 Normas técnicas nacionais</b> .....	34
<b>3.3.4 Dosagem de misturas recicladas com cimento</b> .....	37
<b>3.3.5 Resultados parciais da pesquisa “Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland”</b> .....	40
3.3.5.1 Pesquisa de Fedrigo (2015) .....	40
3.3.5.2 Pesquisa de Ely (2014) .....	41
3.3.5.3 Pesquisa de Kleinert (2016) .....	41
3.3.5.4 Pesquisa de Ramos (2016) .....	42
3.3.5.5 Pesquisa de D’Avila (2015) .....	42
3.3.5.6 Pesquisa de López (2016) .....	43
<b>4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	44
4.1 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL E DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA DIAMETRAL .....	44
<b>4.1.1 Matriz experimental</b> .....	45
<b>4.1.2 Análise dos resultados</b> .....	47
4.1.2.1 Verificação de dados atípicos .....	48
4.1.2.2 Identificação dos termos significativos .....	48

4.1.2.3 Utilização dos resultados .....	48
4.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO .....	49
<b>4.2.1 Matriz experimental .....</b>	<b>50</b>
<b>4.2.2 Análise dos resultados .....</b>	<b>51</b>
<b>5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>52</b>
5.1 MATERIAIS .....	52
<b>5.1.1 Fresado asfáltico .....</b>	<b>52</b>
<b>5.1.2 Solo laterítico .....</b>	<b>53</b>
<b>5.1.3 Cimento .....</b>	<b>54</b>
<b>5.1.4 Caracterização dos materiais e das misturas .....</b>	<b>54</b>
5.1.4.1 Granulometria .....	54
5.1.4.2 Compactação .....	56
5.2 MÉTODOS .....	58
<b>5.2.1 Caracterização complementar do solo laterítico .....</b>	<b>58</b>
5.2.1.1 Determinação do peso específico real dos grãos .....	58
5.2.1.2 Determinação dos limites de consistência .....	58
5.2.1.3 Classificação MCT .....	59
5.2.1.4 Análise granulométrica .....	61
<b>5.2.2 Determinação do teor de ligante do fresado asfáltico .....</b>	<b>61</b>
<b>5.2.3 Moldagem dos corpos de prova .....</b>	<b>62</b>
<b>5.2.4 Resistência à tração por compressão diametral .....</b>	<b>64</b>
<b>5.2.5 Módulo de resiliência diametral .....</b>	<b>66</b>
<b>5.2.6 Resistência à tração na flexão .....</b>	<b>68</b>
<b>6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>75</b>
6.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO LATERÍTICO .....	75
<b>6.1.1 Peso específico real dos grãos .....</b>	<b>75</b>
<b>6.1.2 Limites de consistência .....</b>	<b>75</b>
<b>6.1.3 Classificação MCT .....</b>	<b>76</b>
<b>6.1.4 Análise granulométrica .....</b>	<b>76</b>
6.2 TEOR DE LIGANTE DO FRESADO ASFÁLTICO .....	77
6.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	78
6.4 MÓDULO DE RESILIÊNCIA DIAMETRAL .....	84
6.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO .....	88
6.6 CORRELAÇÃO ENTRE RCD E RTF .....	92
<b>7 CONCLUSÕES .....</b>	<b>95</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se uma contextualização do problema de pesquisa, explicitando as razões que motivaram o desenvolvimento do estudo. Além disso, são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos do presente trabalho, assim como o seu delineamento e estrutura.

### 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA

O transporte rodoviário é o principal sistema logístico do país, sendo o responsável por mais da metade das cargas movimentadas no território nacional e o modal que mais recebe investimentos nas últimas décadas por parte do governo brasileiro. Apesar disso, segundo a Confederação Nacional do Transporte (2016), aproximadamente 48% dos 103.259 quilômetros de rodovias pavimentadas levantados na pesquisa apresentam algum tipo de deficiência no pavimento, demonstrando a necessidade de mais investimentos em reabilitações e restaurações da malha viária.

As possíveis intervenções para solucionar os problemas existentes nos pavimentos são diversas, desde a simples recuperação ou manutenção até a reconstrução total de trechos da rodovia. Entretanto, a maioria das opções apresenta elevado custo, não apenas monetário, mas também ambiental, relacionado ao consumo de matéria-prima não renovável, ao transporte de material e à necessidade de espaços específicos para depositar os resíduos provenientes das obras.

Nesse contexto, a técnica de reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland surge como uma opção mais econômica e ambientalmente sustentável do que as práticas comumente aplicadas. Essas vantagens são obtidas a partir do reaproveitamento do material removido do pavimento pré-existente com a adição do aglomerante hidráulico, possibilitando a execução rápida de uma nova base rígida, uniforme, resistente e durável.

A técnica vem sendo utilizada como solução na restauração de pavimentos há décadas em muitos países, incluindo o Brasil. Apesar disso, ainda são poucas as normas brasileiras abordando este tipo de serviço e as existentes são incompletas em diversos fatores como, por

exemplo, na inexistência de procedimentos adequados de dosagem e de dimensionamento. Esta escassez de referências resulta na utilização de diferentes métodos e critérios nos projetos de reciclagem, comprometendo, muitas vezes, sua eficácia. Logo, fica clara a necessidade de propiciar ao meio técnico metodologias que sejam, ao mesmo tempo, exequíveis e qualificadas.

Considerando esta questão, o presente trabalho tem como objetivo auxiliar na elaboração de métodos de dosagem e dimensionamento para a execução da reciclagem com adição de cimento, mais especificamente em pavimentos com base constituída de solo laterítico. Esse propósito será alcançado a partir do estudo do comportamento mecânico de misturas contendo fresado asfáltico, solo laterítico e cimento.

É importante destacar que este trabalho integra uma pesquisa que está em fase avançada e vem sendo desenvolvida pelo LAPAV (Laboratório de Pavimentação) da UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), em parceria com o LAGEOTEC (Laboratório de Geotecnologia) da UFRGS, o LEME (Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais) da UFRGS, a ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), a ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres), o DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), concessionárias de rodovias, empresas que praticam a técnica de reciclagem de pavimentos e produtoras de equipamentos relacionados.

Na etapa de moldagem e preparação de parte dos corpos de prova contou-se ainda com o apoio da CIENTEC (Fundação de Ciência e Tecnologia), do governo do Estado do Rio Grande do Sul, que disponibilizou espaço, equipamentos e materiais em laboratório.

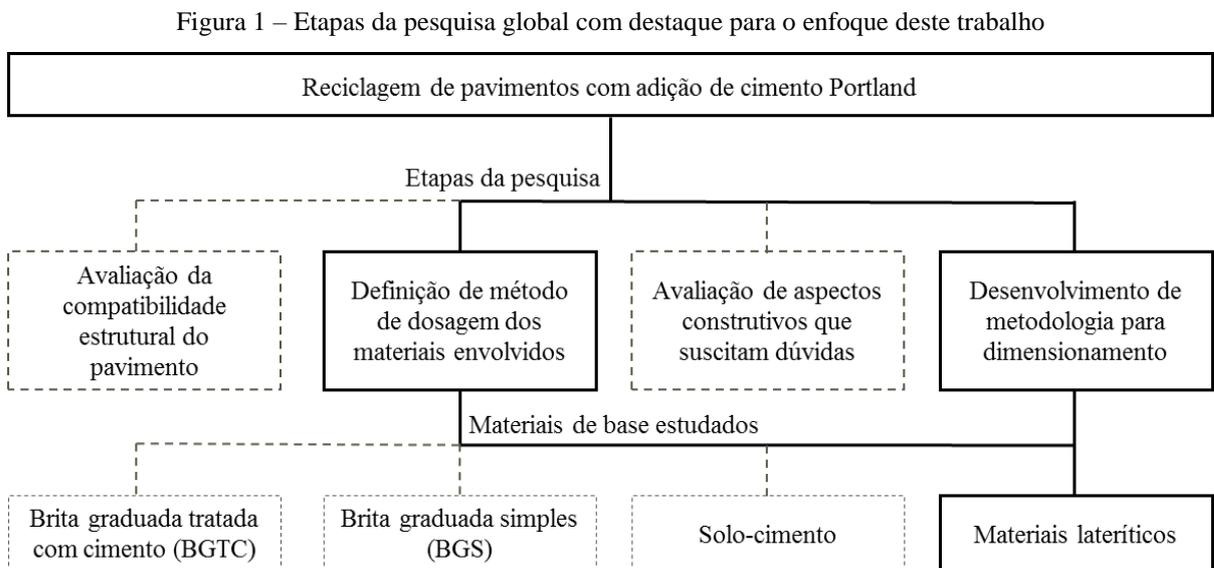
A ampla pesquisa sobre reciclagem de pavimentos com adição de cimento foi iniciada por Fedrigo (2015), trabalhando na etapa de definição de métodos de dosagem dos materiais envolvidos na técnica por meio de estudos experimentais de misturas contendo fresado asfáltico, cimento e brita graduada simples (BGS) como material de base. Ely (2014) realizou um trabalho complementar ao de Fedrigo (2015), a partir da análise do comportamento mecânico dos mesmos materiais, porém com elevação da porcentagem de fresado.

Kleinert (2016) deu sequência à essa etapa da pesquisa, a partir da análise do comportamento de misturas contendo, porém, materiais de base cimentados, sendo esses o solo-cimento e a brita graduada tratada com cimento (BGTC).

López (2016) e D’Avila (2015) realizaram estudos que integram outra etapa da pesquisa, a qual está relacionada com o desenvolvimento de um método de dimensionamento para a técnica. López (2016) avaliou o comportamento à fadiga de diferentes misturas resultantes da reciclagem de pavimentos flexíveis (fresado asfáltico, base de BGS e cimento). Já D’Avila (2015) realizou a análise da resistência à tração na flexão (RTF) e deformação à tração na ruptura de misturas contendo BGTC como material de base.

Por fim, o presente trabalho integra, conforme já citado, a análise de misturas recicladas contendo solo laterítico como material constituinte de base, complementando os estudos necessários à definição de parâmetros para desenvolvimento de métodos de dosagem e dimensionamento. Ramos (2016) já abordou o assunto, a partir da análise do comportamento das misturas quanto à resistência à compressão simples.

A figura 1 apresenta um esquema no qual são demonstradas as etapas da pesquisa global, destacando-se (linha contínua) o enfoque deste trabalho.



(fonte: adaptado de FEDRIGO, 2015)

## 1.2 OBJETIVOS

Os objetivos da pesquisa estão classificados em geral e específicos e são descritos a seguir.

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo principal do trabalho é estudar o comportamento mecânico de misturas resultantes da reciclagem de pavimentos, compostas por fresado asfáltico, solo laterítico e cimento Portland, a fim de auxiliar no desenvolvimento de métodos de dosagem e dimensionamento para a técnica.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho foram:

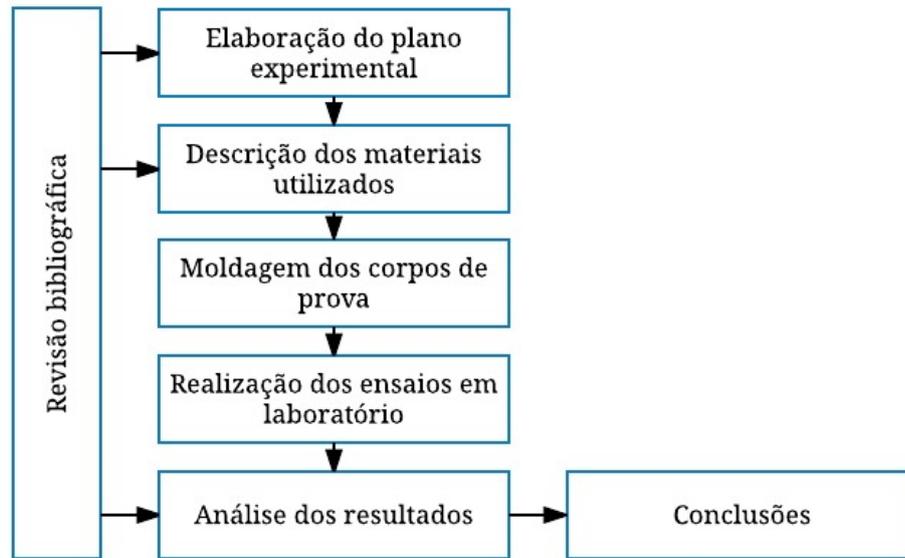
- a) complementar a caracterização física dos materiais empregados no estudo;
- b) verificar a influência da porcentagem de fresado, do teor de cimento e do tempo de cura nas propriedades mecânicas das misturas estudadas;
- c) analisar os resultados obtidos por meio de procedimentos estatísticos.

## 1.3 DELINEAMENTO E ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho foi realizado conforme as etapas apresentadas na figura 2, sendo dividido em sete capítulos, cujos conteúdos são descritos resumidamente a seguir. Nesse primeiro capítulo foram apresentados o problema de pesquisa, a relevância do estudo e os objetivos que se visou alcançar por meio da realização do trabalho.

O segundo capítulo apresenta uma breve revisão bibliográfica acerca da pavimentação, definindo os principais conceitos, os tipos de pavimentos e camadas constituintes e, por fim, os materiais empregados na camada de base de pavimentos, com enfoque na descrição do solo laterítico, a fim de relacionar com o tema abordado no trabalho.

Figura 2 – Etapas do trabalho



(fonte: elaborada pelo autor)

O terceiro capítulo apresenta uma compilação sobre a técnica de reciclagem de pavimentos e os tipos existentes, mais especificamente sobre a reciclagem profunda com adição de cimento Portland, assunto principal desta pesquisa, incluindo sua conceituação, as propriedades de camadas recicladas, vantagens e desvantagens da técnica, a normatização nacional e internacional acerca da dosagem e um relato sobre pesquisas recentemente realizadas.

No capítulo 4 disserta-se sobre os dois planejamentos experimentais adotados neste trabalho, relatando-se suas fundamentações e definindo-se os ensaios, as dosagens e os tempos de cura a serem considerados em cada um. Além disso, relata-se o tipo de análise estatística utilizada para verificar a relevância dos resultados experimentais.

Os materiais empregados na pesquisa são apresentados detalhadamente no capítulo 5. Além disso, nesse capítulo descrevem-se os métodos de ensaios, dando ênfase aos documentos utilizados, parâmetros adotados e limitações encontradas.

Os resultados dos ensaios, as análises realizadas, assim como as comparações com resultados obtidos por outros pesquisadores, estão apresentadas no capítulo 6. Para finalizar, no capítulo 7 são feitas algumas considerações finais a respeito da pesquisa, explicitando as conclusões obtidas.

## 2 PAVIMENTAÇÃO

O processo de pavimentação de uma via de circulação de veículos é uma obra civil que enseja, primeiramente, a melhoria operacional para o tráfego, a partir da criação de uma superfície mais regular, mais aderente e menos ruidosa, garantindo conforto e segurança ao usuário. Por conseguinte, gerando-se condições para uma via de melhor qualidade de rolamento, proporciona-se também uma expressiva redução nos custos de operação e manutenção dos veículos (BALBO, 2007).

Além dos requisitos desejáveis aos usuários e veículos, a pavimentação tem como objetivo propiciar, sob o ponto de vista da engenharia, a execução de estruturas com as seguintes competências, segundo Melo<sup>1</sup> (apud PINTO e PREUSSLER, 2002):

- a) suportar os esforços verticais oriundos do tráfego para os quais foi projetado e distribuí-los ao terreno sobre o qual se assenta;
- b) resistir, sem desgaste demasiado, aos esforços horizontais produzidos pelo tráfego;
- c) conservar suas qualidades, sem que apresente deterioração de modo prematuro, sob a ação dos agentes intempéricos e do clima.

Em síntese, o pavimento pode ser definido como uma estrutura não perene, composta por múltiplas camadas de diferentes materiais compactados a partir da superfície final de terraplenagem, chamada subleito. Para que essa estrutura seja eficaz, todas as partes que a compõem devem trabalhar a deformações compatíveis com sua natureza e capacidade portante, de modo que não ocorram processos de ruptura ou danificação prematura (BALBO, 2007).

### 2.1 TIPOS DE PAVIMENTOS E CAMADAS CONSTITUINTES

O comportamento estrutural de um pavimento depende da espessura de cada uma de suas camadas, das características mecânicas destas e do subleito, assim como da interação entre as mesmas. Sendo assim, a engenharia rodoviária classifica as estruturas de pavimentos segundo

---

<sup>1</sup> MELO, A. L. Apostilas de pavimentação e notas de aula, UFPE.

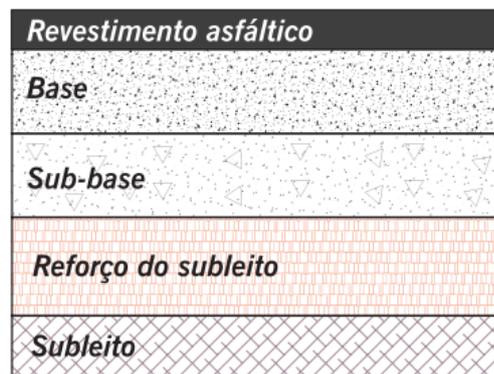
a rigidez do conjunto: em um extremo, têm-se os pavimentos flexíveis e, no outro, os rígidos. Diversos autores têm empregado ainda mais uma subdivisão, representada pelos pavimentos semirrígidos (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Pinto e Preussler (2002) apresentam as seguintes definições para os tipos de pavimentos citados:

- a) flexível: aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas;
- b) rígido: 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;
- c) semirrígido: caracteriza-se por uma base cimentada quimicamente.

Quanto à constituição, os pavimentos flexíveis são geralmente compostos por uma camada superficial asfáltica, denominada revestimento, apoiada sobre camadas de base, sub-base e reforço do subleito, formadas por materiais granulares, solos ou mistura de solos (BERNUCCI *et al.*, 2008). São dimensionados normalmente à compressão vertical e à tração na flexão, que podem levar à ocorrência de deformações permanentes e ao rompimento por fadiga, respectivamente (SENÇO, 2007). A figura 3 apresenta a estrutura típica encontrada em um pavimento flexível.

Figura 3 – Estrutura-tipo de um pavimento flexível

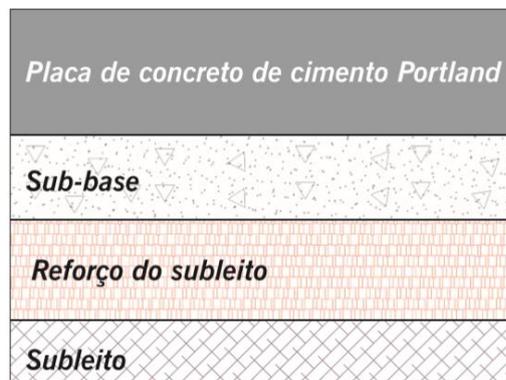


(fonte: BERNUCCI *et al.*, 2008)

Já os pavimentos rígidos são compostos basicamente por uma camada superficial de concreto de cimento Portland apoiada, geralmente, sobre uma camada de material granular ou de material estabilizado com cimento (chamada sub-base), assentada sobre o subleito ou sobre um reforço

do subleito quando necessário (BERNUCCI *et al.*, 2008). Esses pavimentos são pouco deformáveis e rompem normalmente por tração na flexão, quando sujeitos a solicitações excessivas (SENÇO, 2007). A figura 4 apresenta a configuração usual de um pavimento rígido.

Figura 4 – Estrutura-tipo de um pavimento rígido



(fonte: BERNUCCI *et al.*, 2008)

Por fim, os pavimentos semirrígidos possuem uma estrutura semelhante aos flexíveis, mas têm como diferencial o emprego de material estabilizado ou tratado com ligante hidráulico na camada de base, conforme já citado. Essa característica confere um comportamento diferenciado com relação à distribuição de tensões sobre o subleito. Isso ocorre porque, ao adicionar um ligante hidráulico a um material de pavimentação, esse passa a resistir a esforços de tração na flexão, além de ter ganhos evidentes de resistência à compressão. (BALBO, 2007).

Por outro lado, os pavimentos semirrígidos estão sujeitos a tensões que, aplicadas de modo repetitivo, alteram sua estrutura interna, a partir da intensa fissuração e decorrente perda de rigidez. De acordo com Balbo<sup>2</sup> (2005 apud BALBO, 2007):

[...] misturas estabilizadas com ligantes hidráulicos sofrem um intenso e rápido processo de fadiga, em comparação aos concretos, devido à sua natureza quase frágil, sujeita à fluência ao longo de ciclos repetidos de carregamento e com tenacidade sofrível, características bastante associadas às matrizes muito heterogêneas dos materiais tratados com cimento. [...] Assim, um pavimento semirrígido hoje, quando construído, será um pavimento com respostas flexíveis dentro de algum tempo.

Importante salientar que a reciclagem profunda de pavimentos com adição de cimento, tema abordado no presente trabalho, é uma técnica de reabilitação na qual o revestimento asfáltico e

<sup>2</sup> BALBO, J. T. Pavimentos asfálticos híbrido-rígidos: perspectivas para baixos e elevados volumes de tráfego. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 36., 2005, Curitiba. Anais... Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2005. Não paginado. 1 CD.

determinada parte dos materiais subjacentes são fragmentados e misturados com cimento e água, gerando, após devida compactação, uma nova base estabilizada quimicamente e mais rígida. Desse modo, após a execução de uma nova camada de revestimento asfáltico, o resultado final é um pavimento de caracterização semirrígida, com as propriedades acima citadas.

## 2.2 CAMADA DE BASE E MATERIAIS EMPREGADOS

A camada de base tem como objetivo aliviar as pressões sobre as camadas inferiores e sobre o subleito, podendo desempenhar também papel importante na drenagem superficial dos pavimentos. Quando a camada de base é muito espessa, procura-se, por razões de natureza construtiva e econômica, dividi-la em duas camadas, criando-se, assim, uma sub-base, geralmente de menor custo (BALBO, 2007).

Para a escolha dos materiais a serem utilizados na base, assim como na sub-base e no reforço do subleito, empregam-se métodos de seleção e de caracterização de propriedades. A seleção é uma etapa preliminar que consiste em analisar os materiais disponíveis quanto às características de natureza, as quais interferem nas propriedades geotécnicas no estado compactado. De modo geral, os materiais de pavimentação compactados devem apresentar-se resistentes, pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com sua função na estrutura (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Segundo Balbo (2007), as bases podem ser constituídas de solo estabilizado naturalmente, misturas de solos e agregados (solo-brita), brita graduada, brita graduada tratada com cimento, solo estabilizado quimicamente com ligante hidráulico ou asfáltico, concretos, etc. Um exemplo de solo empregado na camada de base de pavimentos em diversas regiões do país é o solo laterítico, sendo por isso o material de base utilizado neste estudo. O item a seguir apresenta detalhes de suas características e propriedades.

## 2.3 SOLOS TROPICAIS LATERÍTIOS E CLASSIFICAÇÃO MCT

Solo tropical é aquele que apresenta particularidades em suas propriedades e em seu comportamento quando comparado aos solos não tropicais, resultante da ação de processos geológicos e/ou pedológicos característicos das regiões tropicais úmidas. Dentre os solos tropicais se destacam duas grandes classes: os solos lateríticos e os solos saprolíticos (VILLIBOR e NOGAMI, 2009).

Os solos lateríticos são solos superficiais, característicos de partes bem drenadas das regiões tropicais úmidas. São resultantes do processo denominado laterização, que consiste em uma transformação na parte superior do subsolo pela atuação do intemperismo (VILLIBOR *et al.*, 2009).

Villibor *et al.* (2009) citam que:

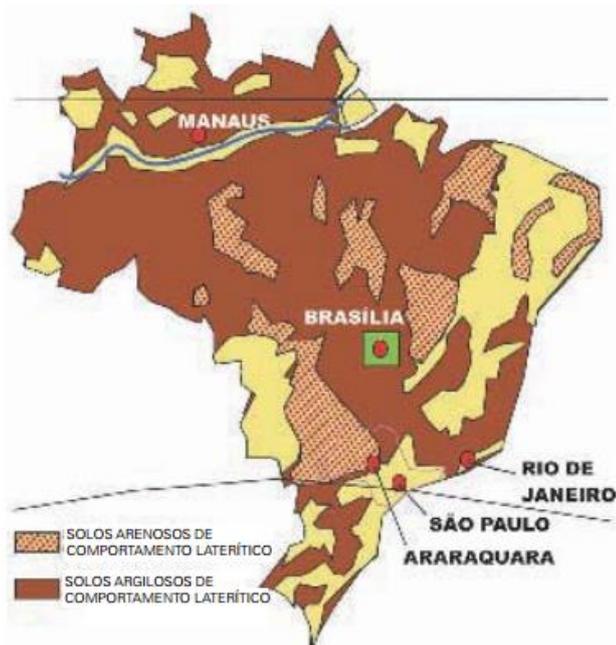
Várias peculiaridades associam-se ao processo de laterização sendo, as mais importantes do ponto de vista tecnológico, o enriquecimento de óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio e a permanência da caulinita como argilo-mineral predominante e quase sempre exclusivo. Estes minerais conferem aos solos de comportamento laterítico coloração típica: vermelho, amarelo, marrom e alaranjado.

Na natureza, os solos lateríticos se apresentam, geralmente, não saturados, com índice de vazios elevado, explicando sua baixa capacidade de suporte. No entanto, quando bem compactados, sua capacidade de suporte é elevada, sendo empregados por essa razão em obras de pavimentação e aterros. Além do mais, o solo laterítico compactado apresenta contração se ocorrer uma redução no teor de umidade, porém não apresenta expansão na presença de água (PINTO, 2006).

Bernucci (1987) destaca que, entre outros fatores, a intensa cimentação e a elevada tensão de sucção por secagem são responsáveis, em conjunto, pelo melhoramento das características de resistência e permeabilidade dos solos tropicais lateríticos.

Segundo Villibor e Nogami (2009), a ocorrência deste tipo de solo é bastante dispersa, perfazendo 65 % do território nacional, conforme apresentado na figura 5.

Figura 5 – Ocorrência de solos de comportamento laterítico em território brasileiro



(fonte: VILLIBOR e NOGAMI, 2009)

Quanto ao seu emprego, o solo laterítico é comumente utilizado como material de base na execução de pavimentos econômicos, geralmente em vias brasileiras de tráfego muito leve, leve e médio. A utilização deste tipo de solo na camada de base, quando comparado ao uso de bases tradicionais, apresenta vantagens não apenas econômicas, a partir da redução do custo de execução por m<sup>2</sup>, mas também ambientais, ligadas ao fato de suas jazidas serem ocorrências naturais (VILLIBOR e NOGAMI, 2009).

Em relação à sua caracterização, a prática da engenharia revelou que as técnicas tradicionais de classificação e hierarquização quando aplicadas aos solos tropicais lateríticos e saprolíticos eram ineficientes e inadequadas, não inferindo corretamente as suas propriedades (BERNUCCI *et al.*, 2008). Visando essa questão, os professores e engenheiros Nogami e Villibor (1981) publicaram uma metodologia de classificação de solos tropicais aplicável a obras viárias, conhecida como classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical).

A metodologia MCT tem como principal finalidade separar solos de comportamento laterítico (representados pela letra L) daqueles de comportamento não-laterítico (representados pela letra N), uma vez que os lateríticos exibem propriedades particulares já citadas, como elevada resistência, baixa expansibilidade apesar de serem plásticos, e baixa deformabilidade (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A classificação é dependente de ensaios que tem em vista a determinação de parâmetros relacionados a propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos finos tropicais, quando compactados, e foi concebida para solos que passam integralmente ou em grande porcentagem na peneira N° 10 (2,00mm). Os ensaios caracterizam-se pela utilização de corpos de prova cilíndricos, de dimensões reduzidas, com diâmetro de 50 mm e de altura igual ou próxima dessa medida, sendo por isso designados de “Miniatura” (VILLIBOR e NOGAMI, 2009).

### 3 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

Neste capítulo são apresentadas definições relacionadas à reciclagem de pavimentos, procurando-se explicar os diferentes tipos e classificações às quais a técnica pode se enquadrar, assim como os estabilizantes comumente utilizados. Posteriormente, são apresentados alguns conceitos, vantagens e desvantagens, viabilidade, normatização e outros aspectos relativos à técnica de reciclagem profunda de pavimentos com adição de cimento Portland.

#### 3.1 CONCEITO

A reciclagem de pavimentos é uma técnica que consiste na reconstrução total ou parcial da estrutura por meio do reaproveitamento dos materiais existentes, possibilitando a execução de uma nova camada homogênea. Pode-se incorporar à mistura, caso necessário, agentes rejuvenescedores e/ou ligantes asfálticos novos, ou ainda agregados para correção granulométrica, espuma de asfalto, emulsões asfálticas, cimento Portland e outros aditivos químicos (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), os principais benefícios oferecidos pela reciclagem de pavimentos são a conservação de agregados, de ligantes e de energia, a preservação do meio ambiente, a rapidez executiva e a possibilidade de restauração das condições geométricas existentes. Além disso, a diminuição da demanda de novos materiais e das respectivas distâncias de transporte são vantagens importantes devido as restrições impostas pela legislação de proteção ao meio ambiente e pela crescente valorização dos sítios de ocorrências de jazidas.

A *Asphalt Recycling and Reclaiming Association* (ARRA, 2001) relata que a reciclagem de pavimentos não é uma técnica recente. Existem relatos do uso de reciclagem a frio na década de 1900, enquanto que o primeiro caso documentado de reciclagem a quente *in situ* data da década de 1930. Entretanto, foi apenas na década de 1970 que houve um grande avanço desta tecnologia, isso devido à crise do petróleo, que incentivou o interesse em operações

sustentáveis, e ao desenvolvimento em larga escala de equipamentos de fresagem. Desde então, os métodos e equipamentos envolvidos na reciclagem se desenvolveram exponencialmente.

### 3.2 TIPOS DE RECICLAGEM E AGENTES ESTABILIZADORES

Os métodos empregados na execução da reciclagem de pavimentos variam em diferentes aspectos, cujos principais são o local (em usina ou *in situ*) e a temperatura (quente ou frio), nos quais o processamento do material é feito. Bonfim (2007) comenta que a constante evolução dos equipamentos envolvidos e das usinas de reciclagem tem ampliado o número de opções quanto à aplicabilidade da técnica. Neste enfoque, o autor exhibe uma classificação mais ampla considerando diversos critérios, conforme apresentado na tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos métodos de reciclagem

<b>Critério</b>	<b>Classificação</b>	<b>Observações</b>
<b>Geometria original</b>	Sem modificação	Quando se mantêm as cotas do greide
	Com modificação	Quando o greide é alterado
<b>Local de processamento</b>	Em usina	Fixa ou móvel, a quente ou a frio
	<i>In situ</i>	A quente ou a frio
	Mista	Reciclagem <i>in situ</i> da base e aplicação de reciclagem a quente, processada em usina com material fresado
<b>Fresagem do material</b>	A frio	Realizada na temperatura ambiente
	A quente	Realizada com pré-aquecimento do pavimento
<b>Profundidade de corte</b>	Superficial	Somente da camada de revestimento
	Profunda	Camada de revestimento, base e/ou sub-base
<b>Mistura reciclada</b>	Mistura a frio	Pré-misturado a frio
	Mistura a quente	Concreto betuminoso usinado a quente, pré-misturado a quente
<b>Uso da mistura</b>	Como base	
	Como camada de ligação	
	Como revestimento	
<b>Materiais adicionados</b>	Agregados	Correção granulométrica
	Cimento Portland e cal	Aumento da capacidade estrutural
	Emulsão asfáltica, CAP e polímeros	Rejuvenescimento
	Mistura asfáltica	Adição de material fresado

(fonte: BONFIM, 2007)

Já a ARRA (2001) divide a abrangente área da reciclagem de pavimentos em cinco grandes grupos, descritos a seguir:

- a) **fresagem a frio:** remoção controlada da superfície do pavimento sem adição de calor, sendo geralmente utilizada como preparação da área para outras técnicas de restauração. O processo consiste no corte e trituração da camada deteriorada por uma fresadora com cilindro de corte rotativo. O material gerado, denominado por RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) ou, na prática brasileira, por fresado, é removido do local e reciclado por meio de outros processos;
- b) **reciclagem a quente em usina:** processo de combinação do RAP com agregados virgens e ligante asfáltico com acréscimo de calor para gerar, em uma unidade central, uma mistura reciclada. Uma vez produzida, essa mistura é transportada até o campo, assentada e compactada por equipamentos tradicionais da pavimentação asfáltica;
- c) **reciclagem a quente *in situ*:** método que consiste em aquecer e, conseqüentemente, amolecer o revestimento existente no local para que este seja escarificado até uma profundidade pré-estabelecida. Após isso, com adição, ou não, de agregados virgens e ligante asfáltico, a camada é misturada e assentada com auxílio de uma pavimentadora;
- d) **reciclagem a frio:** técnica que não utiliza calor na sua execução podendo ser executada *in situ* ou em usina. No caso de ser realizada diretamente no local, faz-se o uso do chamado “trem” de reciclagem, composto por vários equipamentos que, encarrilhados, realizam os processos desde a fresagem do revestimento antigo até a compactação da camada nova. A reciclagem em usina, embora similar, é caracterizada pela produção da mistura ser realizada em local estacionário e, então, transportada para o pavimento a ser restaurado;
- e) **reciclagem profunda:** procedimento, sem adição de calor, que engloba a remoção total do revestimento asfáltico e partes pré-determinadas da base, sub-base e/ou subleito. Estes materiais são triturados e misturados, podendo receber acréscimo de agregados ou estabilizantes (cimento, cal, cinzas volantes, etc.), com objetivo de formar uma nova camada homogênea. Possui, da mesma forma, a característica de execução por meio do “trem” de reciclagem.

Na reciclagem profunda, a presença de material fresado asfáltico na nova camada executada, que servirá de base ou sub-base, reduz a capacidade de suporte do pavimento e dificulta o alcance da resistência exigida pelas autoridades rodoviárias (ISOLA<sup>3</sup> *et al.*, 2013 apud KLEINERT, 2016).

Dellabianca (2004), a partir de seu estudo envolvendo a incorporação de fresado (com e sem ligante asfáltico) em um cascalho laterítico para utilização em base de pavimentos, confirmou

---

<sup>3</sup> ISOLA, M. et al. Evaluation of cement treated mixtures with high percentage of reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, Vol. 48, p. 238-247, 2013.

que a película de betume influencia na redução das características mecânicas das misturas, já que a sua presença reduz o atrito entre os grãos e dificulta o arranjo entre eles. Com isso, a compactabilidade da mistura é afetada, causando a diminuição da resistência à compressão simples e da rigidez. Surge então a necessidade da adição de algum agente estabilizador com o objetivo de elevar a resistência da camada resultante.

Nesse contexto, a Wirtgen (2012) cita que:

Todos os agentes estabilizadores têm como objetivo a ligação de partículas de agregados individuais para aumentar a resistência e a rigidez e/ou aumentar a impermeabilidade e durabilidade dos materiais. Alguns agentes são mais eficazes que outros quando empregados com materiais específicos e alguns apresentam claras vantagens econômicas. Porém, todos têm o seu lugar no mercado e a maioria apresenta melhor desempenho de aplicação com recicladoras modernas.

De acordo com a ARRA (2001), existem quatro tipos diferentes de estabilização:

- a) **mecânica:** obtida pela adição de materiais granulares, tais como agregados novos, material fresado ou concreto de cimento Portland britado;
- b) **química:** a partir da incorporação de cal, cimento Portland, cinza volante, cloreto de cálcio ou de magnésio ou ainda com outros produtos químicos patenteados;
- c) **betuminosa:** obtida com o uso de emulsão de asfalto ou ainda com espuma de asfalto;
- d) **combinada:** combinação entre mais de um tipo de estabilização.

Dentre todos os possíveis métodos de reciclagem e agentes estabilizadores citados, a reciclagem profunda com incorporação de cimento, *in situ* ou em usina, é o enfoque da ampla pesquisa desenvolvida pelo LAPAV, assim como deste trabalho. Apesar da técnica ser cada vez mais utilizada e estudada no Brasil, ainda há questionamentos a serem esclarecidos envolvendo dosagem, dimensionamento e execução. A prática e os aspectos relacionados são abordados a seguir.

### 3.3 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE CIMENTO

Segundo o *Instituto Español Del Cemento y sus Aplicaciones* (IECA, 2013), a reciclagem profunda de pavimentos com adição cimento é uma técnica de reabilitação de rodovias na qual se consegue transformar um pavimento deteriorado, sem a adição de calor, em uma nova camada de base com considerável capacidade estrutural, reaproveitando o mesmo pavimento como fonte de materiais.

O processo executivo da técnica consiste em triturar a estrutura existente até profundidade pré-definida, misturar o material resultante com cimento, água e, se necessário, com agregados, e compactá-lo na superfície. Sobre a nova base é feita então a aplicação de um revestimento asfáltico para finalização do procedimento (IECA, 2013).

Comparada a outras soluções de reabilitação, a reciclagem de pavimentos com adição de cimento permite o reaproveitamento das camadas deterioradas, visando recuperar a capacidade de suporte e características físico-mecânicas de acordo com os requerimentos necessários para permitir um adequado nível de serviço. Tecnicamente, consegue-se um pavimento muito mais durável, com menor suscetibilidade à água e maior resistência à erosão (MINGUELA, 2011).

Quanto à estabilização química com cimento, a Wirtgen (2012) cita que a principal função é aumentar a resistência ao carregamento, fato que é alcançado com o aumento significativo da resistência à tração e à compressão do material ou com a redução de sua plasticidade. Entretanto, ocorre também o aumento da fragilidade da camada estabilizada, reduzindo então sua flexibilidade. Níveis mais altos de resistência atraem tensões da carga mais elevadas geradas pelo tráfego, o que pode levar a uma proliferação acelerada de trincas mediante cargas repetidas, comprometendo então o desempenho estrutural.

#### 3.3.1 Vantagens e desvantagens

O IECA (2013) descreve, conforme apresentado a seguir, as principais vantagens da reciclagem de pavimentos com cimento levando em consideração aspectos ambientais, técnicos e econômicos:

## a) vantagens ambientais:

- a reutilização de materiais do pavimento contribui para que não seja necessária a abertura de novas jazidas de agregados ou o consumo de reservas existentes. A economia de agregados ao se utilizar a técnica pode ser estimada em 3.000 - 4.000 t/km (comparando à necessidade de agregados para a construção de um novo pavimento similar);
- diminui-se a necessidade de aterros (bota-foras) para descarte dos materiais provenientes da obra;
- reduz-se a necessidade de transportes (no caso da execução *in situ*), diminuindo consequentemente as emissões de CO<sub>2</sub> e outros poluentes, assim como os impactos colaterais em áreas e flora adjacentes;
- trata-se de uma técnica especialmente adaptada ao emprego de cimento com aditivos. Isso se traduz em uma redução de emissões durante a fabricação, ao diminuir a quantidade necessária de clínquer e incorporar subprodutos industriais, como escórias e cinzas volantes, o que contribui com os compromissos de sustentabilidade;
- por se tratar de ser uma técnica a frio, consome pouca energia, reduzindo também a poluição e a emissão de gases nocivos.

## b) vantagens técnicas:

- permite reabilitar um pavimento deteriorado, transformando-o em uma nova camada homogênea com melhores características mecânicas e com capacidade de suporte maior;
- diminui-se as tensões que chegam no subleito e as que se produzem no revestimento;
- reduz-se a suscetibilidade do pavimento a mudanças de umidade;
- o volume de material a ser transportado é reduzido (principalmente na execução *in situ*), permitindo uma diminuição dos transtornos causados pelo tráfego da obra e dos danos a vias adjacentes;
- permite a reabilitação de faixas individuais de trânsito, fato muito importante em rodovias de duas ou mais faixas, não sendo necessária a interrupção total da via ou de um sentido;
- possibilita a manutenção das condições geométricas existentes, não alterando a cota e o gabarito da rodovia e não produzindo degraus no acostamento;
- a reciclagem pode ser executada simultaneamente com uma ampliação da via, utilizando-se os mesmos equipamentos. A escolha adequada dos materiais para a expansão permite a obtenção, após o seu processamento, de uma mistura com características similares ao pavimento reciclado.

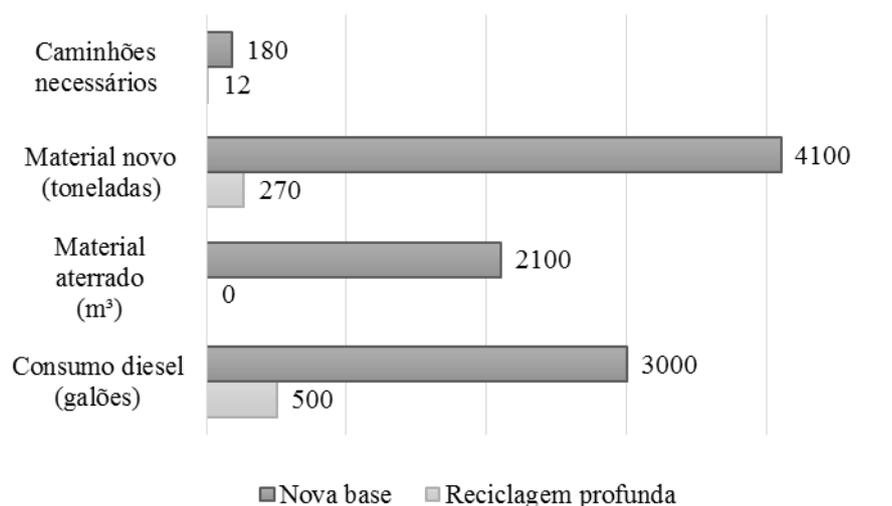
## c) vantagens econômicas:

- reduz-se a necessidade de novos agregados para a obra e o custo de transporte associado, representando uma economia significativa;

- quando a reciclagem é realizada *in situ*, não é necessária a instalação de uma usina de dosagem;
- a técnica permite alcançar elevados rendimentos.

Segundo a *Portland Cement Association* (PCA, 2008), a utilização da reciclagem profunda com cimento pode reduzir o custo de restauração de rodovias em até 60 %, permitindo a reabilitação de uma extensão maior. Na figura 6 é apresentada uma comparação do consumo de energia e material entre a realização da reciclagem profunda e a execução de uma base nova, considerando um trecho de rodovia de pista simples com 1,6 km de extensão, 7,3 m de largura e 15 cm de base.

Figura 6 – Comparação de consumo entre a técnica de reciclagem profunda e a execução de uma nova base



(fonte: adaptado de PCA, 2008)

A Wirtgen<sup>4</sup> (1998 apud OLIVEIRA, 2003) cita as principais vantagens e desvantagens na utilização de cimento Portland como agente estabilizador em relação a outras opções presentes no mercado, conforme apresentado na tabela 2.

<sup>4</sup> WIRTGEN GmbH. Manual Wirtgen de Reciclagem a Frio – Windhagen, Alemanha: 1998.

Tabela 2 – Vantagens e desvantagens da utilização de cimento Portland como estabilizante

<b>Cimento Portland</b>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Disponibilidade: O cimento pode ser obtido em todo o mundo, ensacado ou a granel.	O trincamento por contração é inevitável, porém pode ser minimizado.
Custo: Comparado com o asfalto, o cimento é normalmente barato.	Aumenta a rigidez, o que reduz as características de fadiga.
Facilidade de aplicação: O cimento pode sempre ser espalhado à mão, na falta de espalhadores e misturadores de suspensão.	Requer cura adequada. O tráfego prematuro pode causar danos à superfície.
Aceitação: O cimento é bem conhecido na indústria da construção. Geralmente acham-se disponíveis métodos de testes padrões e especificações.	
Melhoria significativa das propriedades de resistência à compressão com a maioria dos materiais.	
Melhora a resistência do material à água.	

(fonte: WIRGEN, 1998 apud OLIVEIRA, 2003)

Quanto às desvantagens e limitações da reciclagem de pavimentos com cimento, além das citadas na tabela 2, pode-se ressaltar:

- a) caso o pavimento existente tenha uma estrutura muito heterogênea em sua extensão, é provável que a reciclagem do material gere uma estrutura mais heterogênea do que a execução de uma nova camada (MINGUELA, 2011);
- b) a reciclagem de faixas individuais pode, ocasionalmente, causar o aparecimento de trincas longitudinais, caso precauções não sejam adotadas para garantir uma ligação adequada entre os materiais de vias adjacentes (MINGUELA, 2011);
- c) exige a realização de ensaios de laboratório no estágio inicial para assegurar a viabilidade da técnica (JANIENSKI e RENS, 2002).

Quanto à desvantagem relacionada ao aumento da rigidez, a PCA (2005) ressalta que os efeitos podem ser minimizados executando-se camadas mais espessas e com baixos teores de cimento ao invés de camadas esbeltas estabilizadas com elevados teores. Já quanto ao trincamento por retração, Oliveira (2003) relata que o problema pode ser administrado com a utilização de baixos teores de cimento ou, ainda, com a aplicação de asfaltos modificados, mantas geossintéticas ou camadas granulares acima da camada reciclada com o intuito de impedir a propagação das trincas para o revestimento.

### 3.3.2 Viabilidade técnica

No processo de escolha da técnica mais adequada na reabilitação de um pavimento, a origem do problema deve ser minuciosamente estudada. Essa investigação preliminar é crucial para garantir que a técnica selecionada tratará adequadamente as causas da deterioração de forma viável sob o ponto de vista técnico e financeiro (OLIVEIRA, 2003).

Oliveira (2003) cita ainda que:

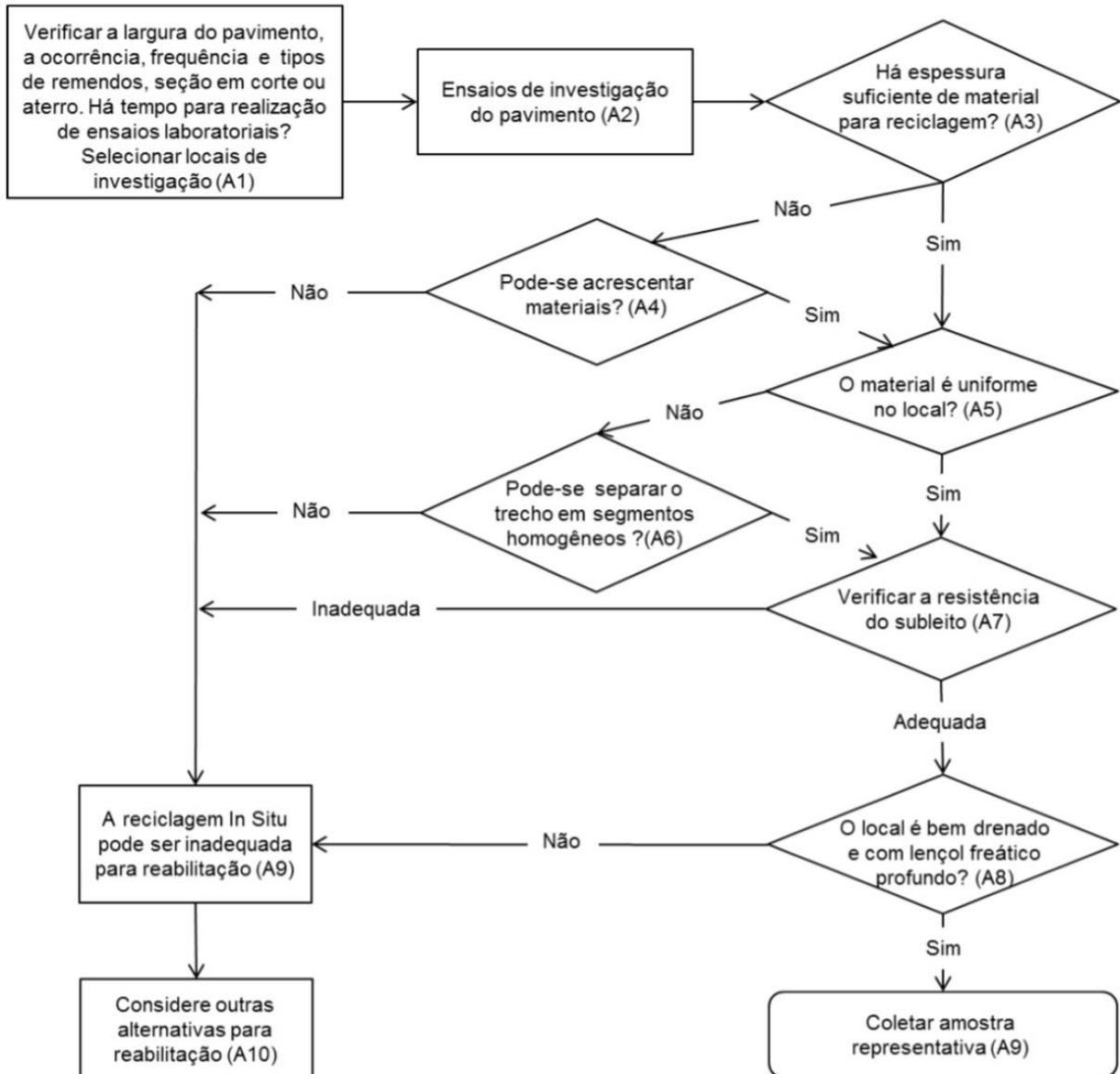
A reciclagem profunda pode ser usada numa grande variedade de pavimentos deteriorados. Como outros métodos de reabilitação de pavimentos, o sucesso da técnica dependerá do conhecimento do desempenho do pavimento, do exame detalhado das condições existentes e de todas informações disponíveis e de um projeto de mistura adequado. Esses fatores são essenciais para alcançar os resultados previstos.

Segundo a PCA (2010), a aplicação da técnica de reciclagem com adição de cimento é mais apropriada para as seguintes situações:

- a) o pavimento existente está seriamente degradado e não pode ser reabilitado com um simples recapeamento;
- b) os defeitos no pavimento indicam que o problema está provavelmente localizado na base ou na sub-base;
- c) os defeitos existentes no pavimento requerem remendos profundos em mais de 15% a 20% da área do pavimento;
- d) a estrutura do pavimento não é adequada para o tráfego atual ou futuro.

A Austroads (2002 apud FEDRIGO, 2015) apresenta, conforme a figura 7, uma sistemática em forma de fluxograma, visando a avaliação da compatibilidade estrutural de pavimentos para fins de estabilização reciclagem.

Figura 7 – Fluxograma para avaliação estrutural do pavimento para fins de reciclagem



(fonte: AUSTROADS, 2002 apud FEDRIGO, 2015)

### 3.3.3 Normas técnicas nacionais

A documentação técnica nacional acerca da reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland é composta basicamente por especificações de serviço elaboradas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), pelo Departamento Estadual de Infraestrutura de Santa Catarina (DEINFRA-SC) e pelos Departamentos de Estradas de Rodagem (DER) dos estados do Paraná e de São Paulo, conforme listado abaixo:

- a) DNIT 167/2013-ES – Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos *in situ* com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço (DNIT, 2013a);

- b) DEINFRA-SC ES-P 09/16 – Pavimentação: Reciclagem profunda de pavimentos (DEINFRA-SC, 2016);
- c) DER-PR ES-P 33/05 – Pavimentação: Reciclagem de pavimento *in situ* com adição de cimento (DER-PR, 2005);
- d) DER-SP ET-DE-P00/035 – Reciclagem de pavimento asfáltico *in situ* com cimento e brita (DER-SP, 2006).

Os documentos apresentam divergências nos diversos critérios e condições relativos à dosagem e à execução da técnica, havendo apenas algumas similaridades. Os itens mais importantes são apresentados na tabela 3, por meio de um comparativo entre as quatro especificações.

Além dos itens apresentados na tabela 3, ainda existem divergências nas faixas granulométricas de trabalho às quais deve ser enquadrada a composição granulométrica do material reciclado. Os Departamentos de Estradas de Rodagem de São Paulo e do Paraná utilizam os mesmos limites para a faixa granulométrica. Já o DNIT e o DEINFRA-SC trabalham com duas faixas granulométricas distintas. Os limites para as faixas granulométricas citadas são apresentados na tabela 4.

Tabela 3 – Comparativo entre as especificações de serviço nacionais

Item analisado	Especificações de serviço			
	DNIT 167/2013-ES	DEINFRA-SC ES-P 09/16	DER-PR ES-P 33/05	DER-SP ET-DE- P00/035
<b>Teor máximo recomendado de fresado asfáltico na mistura reciclada (%)</b>	50	50	Não definido	Não definido
<b>Teor máximo recomendado de cimento na mistura reciclada (%)</b>	Não definido	3	Não definido	Não definido
<b>Energia de compactação</b>	Modificada	Modificada	Intermediária	Intermediária
<b>Resistência à compressão simples aos 7 dias de cura (MPa)</b>	Entre 2,1 e 2,5	Superior a 2,1	Entre 3,5 e 8	Não definido
<b>Resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias de cura (MPa)</b>	Entre 0,25 e 0,35	Superior a 0,25	Não definido	Não definido
<b>Grau de compactação mínimo em campo (%)</b>	98	100 na superfície e 98 no meio da camada	100	100
<b>Tolerância da umidade ótima em campo (%)</b>	Não definido	Não definido	Entre -1 e +1	Entre -2 e +1
<b>Profundidade de corte mínima atingida pela recicladora (cm)</b>	30	30	Não definido	12
<b>Liberação para o tráfego da camada reciclada</b>	Após salgamento, durante 3 a 7 dias, para que eventuais deficiências possam ser verificadas e sanadas	Período de 3 a 7 dias, para que eventuais deficiências possam ser verificadas e sanadas	Após 7 dias de cura	Após salgamento, desde que a camada apresente resistência compatível com as solicitações impostas

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 4 – Limites das faixas granulométricas propostas pelas especificações de serviço nacionais

Peneira (mm)	Limites DNIT				Limites DEINFRA-SC				Limites DER-PR e DER-SP	
	Faixa I (%)		Faixa II (%)		Faixa I (%)		Faixa II (%)		Mín.	Máx.
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.		
<b>50,8</b>	100	100	100	100	96	100	100	100	-	-
<b>38,1</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	100	100
<b>25,4</b>	75	90	100	100	75	90	97	100	-	-
<b>9,5</b>	40	75	50	85	45	73	60	85	-	-
<b>4,75</b>	30	60	35	65	35	60	40	72	50	100
<b>2,0</b>	20	45	25	50	25	47	30	57	-	-
<b>0,425</b>	15	30	15	30	15	30	15	35	15	100
<b>0,075</b>	5	15	5	15	3	15	3	15	5	100

(fonte: elaborado pelo autor)

### 3.3.4 Dosagem de misturas recicladas com cimento

A documentação nacional acerca da reciclagem de pavimentos com cimento é representada pelas especificações de serviço citadas no item anterior. Apesar de apresentarem alguns critérios e orientações, se desconhece um procedimento bem definido para dosagem de misturas recicladas com adição de cimento Portland.

As especificações de serviço do DEINFRA-SC (2016), DER-PR (2005) e DNIT (2013a) estabelecem, de maneira simplificada, as seguintes indicações quanto à dosagem:

- a) a coleta de amostras deve ser feita por meio da recicladora utilizada nos serviços, devendo ser efetuada para cada segmento homogêneo da rodovia, elaborando-se então, um projeto de dosagem específico para cada variabilidade encontrada;
- b) os projetos de dosagem devem conter no mínimo as seguintes informações: composição granulométrica da mistura e enquadramento na faixa de trabalho, teor de cimento e tipo empregado, umidade ótima e massa específica aparente seca máxima da mistura reciclada, energia de compactação empregada e resistência à compressão simples aos 7 dias.

Pelo motivo da carência de documentos normativos mais precisos no atual cenário nacional, a pesquisa tem como referência os métodos de dosagem internacionais descritos nos estudos de Fedrigo (2015) e Kleinert (2016). No âmbito internacional existem diversos procedimentos de dosagem de para a técnica de reciclagem com cimento definidos por diferentes associações e empresas.

Fedrigo (2015) compilou em seu trabalho as características dos diferentes métodos definidos pela ARRA (2001), pela Austroads (2002), pelo IECA (2013), pela PCA (2005) e pela Wirtgen (2012), conforme apresentado nas tabelas 5 e 6 a seguir.

Tabela 5 – Limites granulométricos citados pelos métodos de dosagem internacionais

Peneira (mm)	Limites Witgen (%)		Limites Austroads (%)		Limites PCA (%)
	Grossa	Fina	Grossa	Fina	Mínimo Passante
<b>76,2</b>	-	-	-	-	100
<b>50,8</b>	100	100	-	-	95
<b>38,1</b>	85	100	-	-	-
<b>25,4</b>	72	100	73	100	-
<b>19</b>	60	100	64	100	-
<b>12,7</b>	50	100	-	-	-
<b>9,5</b>	42	90	44	75	-
<b>6,3</b>	35	80	-	-	-
<b>4,75</b>	30	72	29	55	55
<b>2,36</b>	21	56	23	45	-
<b>1,18</b>	14	44	18	38	-
<b>0,6</b>	9	35	14	31	-
<b>0,425</b>	7	31	-	-	-
<b>0,3</b>	5	27	10	27	-
<b>0,15</b>	3	21	8	24	-
<b>0,075</b>	2	18	5	20	-

(fonte: FEDRIGO, 2015)

Tabela 6 – Comparação entre os métodos de dosagem internacionais citados

Característica	Método de dosagem				
	PCA (2005)	IECA (2013)	Wirtgen (2012)	ARRA (2001)	Austroroads (2002)
Ensaios preliminares	Análises granulométrica	Análise granulométrica; Limites de Atterberg	Análise granulométrica; Limites de Atterberg	Análise granulométrica; Limites de Atterberg	Análise granulométrica; Limites de Atterberg
Controle da granulometria	Tabela 5	Não estabelece	Tabela 5	Não estabelece	Tabela 5
Teor máximo de fresado asfáltico (%)	50	Não estabelece	Não estabelece	Não estabelece	Não estabelece
Energia de compactação	Normal	Modificada	Modificada	Normal ou Modificada	Normal ou Modificada
Principal parâmetro para dosagem	RCS	RCS	RCS	RCS	RCS
Dimensões dos corpos de prova para RCS	CPs cilíndricos (10,16 cm x 11,64 cm)	Não estabelece	Cilindro de Proctor grande (ISC)	Não estabelece	Não estabelece
Teores típicos de cimento	Não estabelece	4% (mínimo sugerido)	2% a 4%	Não estabelece	1% a 5,5%
Número de teores de cimento para RCS	3	Não estabelece	3	Não estabelece	Teores crescentes até que se atinja a RCS
Número de corpos de prova para RCS	2	3	2	3	Não estabelece
Tipo de cura	Convencional	Convencional	Convencional ou acelerada em estufa	Convencional	Convencional ou acelerada em estufa
Período de cura para RCS (dias)	7	7	7	7	7 (com opção para 28 dias)
RCS (MPa)	2,1 a 2,8	> 2,5 MPa	Não estabelece	Não estabelece	Tabela 9
Ensaios adicionais indicados	Não estabelece	Sensibilidade do grau de compactação; Prazo de trabalhabilidade	Resistência à tração por compressão diametral	Durabilidade; Sensibilidade à umidade	Ascensão capilar, absorção e expansão; Retração; Erodibilidade

(fonte: adaptado de FEDRIGO, 2015)

### **3.3.5 Resultados parciais da pesquisa “Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland”**

O presente trabalho é parte integrante de uma pesquisa global a respeito da reciclagem de pavimentos com adição de cimento, conforme relatado no item 1.1 e apresentado na figura 1. Para fins de comparação e contextualização, estão expostos na sequência, os parâmetros adotados e os resultados alcançados pelos demais pesquisadores do projeto com enfoque apenas nos valores encontrados quanto ao comportamento mecânico (RCS, RCD, MRD e RTF) das misturas estudadas.

#### **3.3.5.1 Pesquisa de Fedrigo (2015)**

Fedrigo (2015) iniciou os estudos da pesquisa, com enfoque no desenvolvimento de um método de dosagem de camadas recicladas com cimento, a partir de ensaios para determinação do comportamento mecânico e volumétrico de misturas recicladas, compostas por BGS, fresado asfáltico e cimento. Verificou-se a influência do teor de cimento (2, 4 e 6%), da porcentagem de material fresado (20 e 50%) e da variação da energia de compactação (Intermediária e Modificada). Os ensaios para constatação do comportamento mecânico levaram em consideração o tempo de cura (3, 7 e 14 dias), sendo essa realizada em câmara úmida mantida a temperatura próxima de 23°C e umidade relativa maior que 90%

Os resultados obtidos por Fedrigo (2015) demonstraram que as misturas recicladas com cimento são bastante resistentes, alcançando valores de RCS entre 1,61 e 6,08 MPa e valores de RCD entre 0,29 e 1,11 MPa, e rígidas, apresentando uma variação de MRD entre 10.390 e 25.719 MPa. Essas apresentaram também um bom comportamento frente à ação da água (erodibilidade, ascensão capilar, expansão e absorção) e não demonstraram ter problemas de retração por secagem.

Para a maior parte dos ensaios, o teor de cimento se mostrou a variável mais importante considerando os materiais estudados. Além do mais, a utilização da energia Modificada apresentou resultados superiores àqueles obtidos a partir da compactação na energia Intermediária em grande parte dos ensaios, o que parece compensar o emprego de menores teores de cimento, fato que é bastante interessante já que auxilia na redução de problemas de retração e também minimiza os custos.

### 3.3.5.2 Pesquisa de Ely (2014)

Ely (2014) realizou uma pesquisa complementar à de Fedrigo (2015), a partir da análise do comportamento mecânico dos mesmos materiais, porém com elevação da porcentagem de fresado (70%). A principal variável analisada foi a energia de compactação, sendo empregadas as energias Intermediária e Modificada. O teor de cimento utilizado foi igual a 4% e os ensaios foram realizados a 3, 7 e 14 dias de cura.

Os resultados de RCS apresentaram variação entre 1,29 MPa e 2,72 MPa, assim como a RCD variou de 0,19 a 0,45 MPa e o MRD entre 3.825 e 8.420 MPa, valores considerados bons, em decorrência da quantidade elevada de fresado. Como era de se esperar, os resultados foram afetados de maneira positiva pelo tempo de cura e energia de compactação.

### 3.3.5.3 Pesquisa de Kleinert (2016)

Kleinert (2016) deu sequência a esta etapa da pesquisa, acerca do desenvolvimento de um método de dosagem de camadas recicladas com cimento, a partir de um programa experimental contemplando a caracterização mecânica (resistência e rigidez), a variação volumétrica e a erodibilidade de misturas contendo fresado asfáltico, materiais de bases rígidas (brita graduada tratada com cimento e solo-cimento) e cimento Portland. Foram analisados os efeitos da porcentagem de fresado, do teor de cimento e do tempo de cura, compactando-se os corpos de prova na energia Modificada.

Com auxílio de um *software* estatístico (*Minitab*), foi elaborado um planejamento experimental para definição das misturas analisadas, contemplando-se diversos níveis para as variáveis independentes (teores de cimento entre 1% e 7%, e porcentagens de fresado variando entre 8% e 92%, aproximadamente). Os tempos de cura considerados variaram de acordo com o ensaio, sendo de 3, 7 e 14 dias para os ensaios de comportamento mecânico. O processo de cura foi realizado a partir da imersão dos corpos de prova (dentro de sacos plásticos) em água, em local com temperatura constante.

Kleinert (2016) verificou que todas as variáveis afetam as propriedades analisadas, sendo que o teor de cimento demonstrou maior efeito e sua adição melhora consideravelmente o comportamento das misturas estudadas. Foram alcançados resultados bastante elevados de resistência à compressão simples (1,00 MPa a 6,49 MPa) e resistência à tração na compressão

diametral (0,17 MPa a 1,22 MPa), enquanto que a rigidez das misturas apresentou uma ampla variação de resultados (484 MPa a 20.031 MPa).

#### 3.3.5.4 Pesquisa de Ramos (2016)

Ramos (2016) iniciou o estudo de misturas recicladas contendo solo laterítico como material de base, mesmo assunto abordado no presente trabalho, mas a partir da análise do comportamento quanto à resistência à compressão simples. O planejamento experimental foi o mesmo elaborado por Kleinert (2016), contemplando-se diversos níveis para as variáveis independentes (teores de cimento entre 1% e 7%, e porcentagens de fresado variando entre 8% e 92%, aproximadamente).

Quanto ao processo de cura, os tempos considerados foram de 3, 7 e 14 dias. Uma cura úmida não pode ser realizada, já que os corpos de prova, quando submetidos a um ambiente com umidade elevada, desagregavam. A partir do momento em que foi detectado esse problema, decidiu-se mudar o método de cura para preservar os corpos de prova restantes, sendo que a solução foi o armazenamento desses em sacos plásticos, evitando o contato com a umidade externa, até o momento do ensaio.

Os resultados de RCS apresentaram variação entre 0,46 MPa e 3,92 MPa e mostraram que a resistência aumentou tanto com a elevação do teor de cimento quanto com a elevação da porcentagem de fresado. Além do mais, os problemas enfrentados na cura evidenciaram que a reciclagem em pavimentos com base de solo laterítico deve abranger um estudo mais detalhado, visto que as misturas se mostraram fortemente afetadas pela umidade.

#### 3.3.5.5 Pesquisa de D'Avila (2015)

A pesquisa realizada por D'Avila (2015), visando contribuir para o desenvolvimento de um método de dimensionamento para a técnica, englobou a análise da resistência à tração na flexão (RTF) e deformação à tração na ruptura de misturas compostas por BGTC, cimento e fresado asfáltico com adição de polímero. D'Avila (2015) verificou a influência da taxa de incorporação de cimento (2, 4 e 6%) e da adição de material fresado (20, 50 e 70%). O tempo de cura empregado nos ensaios foi de 28 dias e a energia de compactação utilizada foi a Modificada. O processo de cura dos corpos de prova foi realizado em câmara úmida, com temperatura controlada de 23 °C e umidade relativa de 90%.

Os resultados de RTF alcançados variaram entre 0,32 e 1,34 MPa, enquanto que a deformação na ruptura apresentou valores que foram de 165 a 1200  $\mu\epsilon$ . D'Avila (2015) observou que o aumento da porcentagem de fresado não interferiu no ganho de resistência à flexão das misturas para qualquer teor de cimento utilizado, apresentando resultados muito próximos entre si. Já o teor de cimento influenciou nos resultados obtidos, pois sua adição aumentou significativamente a resistência à flexão.

Quanto aos resultados de deformação na ruptura, foi constatado que elevadas quantidades de fresado, que é o caso das misturas compostas por 70% desse material, apresentaram resultados bem consideráveis. Com relação à incorporação de cimento, verificou-se que o acréscimo em sua utilização não influenciou na deformação na ruptura em misturas com porcentagem de fresado baixa. Porém, com a elevação da quantidade do material fresado, foram verificadas variações significativas.

#### 3.3.5.6 Pesquisa de López (2016)

Com o mesmo intuito de contribuir no desenvolvimento de um método de dimensionamento de pavimentos com camadas recicladas com adição de cimento, a pesquisa de López (2016) teve como objetivo principal o estudo laboratorial do comportamento a fadiga de misturas constituídas por fresado asfáltico (20%, 50% e 70%), BGS e cimento Portland (teores de 2% e 4%). O tempo de cura empregado nos ensaios foi de 28 dias e a energia de compactação utilizada foi a Modificada. O processo de cura foi realizado sob condições controladas de temperatura e umidade relativa ( $21 \pm 2$  °C e 90 %, respectivamente) em câmara úmida.

Foram obtidos modelos de fadiga em função da tensão de tração atuante, da deformação inicial e da energia dissipada inicial. Os resultados dos ensaios estáticos indicam a predominante influência do teor cimento na RTF das misturas (valores entre 0,21 MPa e 1,53 MPa), enquanto a porcentagem de fresado tem efeito significativo na deformação de ruptura (valores entre 117  $\mu\epsilon$  e 566  $\mu\epsilon$ ), tornando as misturas mais dúcteis.

## **4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL**

O planejamento experimental representa um conjunto de ensaios estabelecidos com critérios científicos e estatísticos, com o objetivo de determinar a influência de diversas variáveis nos resultados de um dado sistema ou processo (BUTTON, 2016).

Button (2016) salienta que um aspecto muito importante no planejamento é o delineamento dos experimentos, que visa a definição do número ideal de ensaios que leve à obtenção de resultados com um dado grau de confiabilidade. Essa etapa é fundamental em frente às diversas restrições e limitações que são confrontadas em laboratório.

No presente trabalho, foram definidos dois programas experimentais distintos, dependendo dos ensaios realizados, com base nos planejamentos já desenvolvidos por Fedrigo (2015), López (2016) e Kleinert (2016) em suas respectivas pesquisas, visto que esse estudo tem como objetivo a contribuição para a pesquisa global, sobre reciclagem de pavimentos com adição de cimento, e deve possibilitar também uma comparação com os resultados obtidos com outros materiais de base.

Importante ressaltar que Fedrigo (2015), a partir dos resultados obtidos em seu estudo, no qual foram usadas diferentes energias de compactação na moldagem dos corpos de prova, verificou que seria mais importante analisar a variação do teor de cimento e da porcentagem de fresado nas misturas, mantendo constante a energia de compactação modificada, conforme foi feito neste trabalho.

### **4.1 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL E DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA DIAMETRAL**

Para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral e de módulo de resiliência diametral, definiu-se um programa experimental baseado nos estudos de Kleinert (2016), que empregou técnicas estatísticas no delineamento da matriz experimental em sua dissertação de mestrado, alcançando, com isso, os seguintes benefícios, citados por Button (2016):

- a) redução do número de ensaios sem prejuízo da qualidade da informação;

- b) estudo simultâneo de diversas variáveis, separando seus efeitos;
- c) determinação da confiabilidade dos resultados;
- d) realização da pesquisa em etapas, num processo iterativo de acréscimo de novos ensaios;
- e) seleção das variáveis que influem num processo com número reduzido de ensaios;
- f) representação do processo estudado através de expressões matemáticas;
- g) elaboração de conclusões a partir de resultados qualitativos.

Kleinert (2016) optou pela utilização de um Projeto Composto de Segunda Ordem (PCSO), que é recomendado por Ribeiro e Caten (2014) para pesquisas onde pretende-se estudar uma quantidade de níveis superior a dois e também realizar o ajuste de modelos quadráticos.

O PCSO consiste na soma de um experimento  $2^k$ , mais uma estrela ( $2*k$ ), mais um ponto central, sendo por isso denominado de projeto composto. Os pontos da parte fatorial ( $2^k$ ) possibilitam a estimativa de termos lineares e interações, os pontos da estrela permitem a estimativa de efeitos quadráticos puros, e o ponto central, executado com réplicas, fornece uma estimativa interna do erro puro (RIBEIRO e CATEN, 2014).

#### **4.1.1 Matriz experimental**

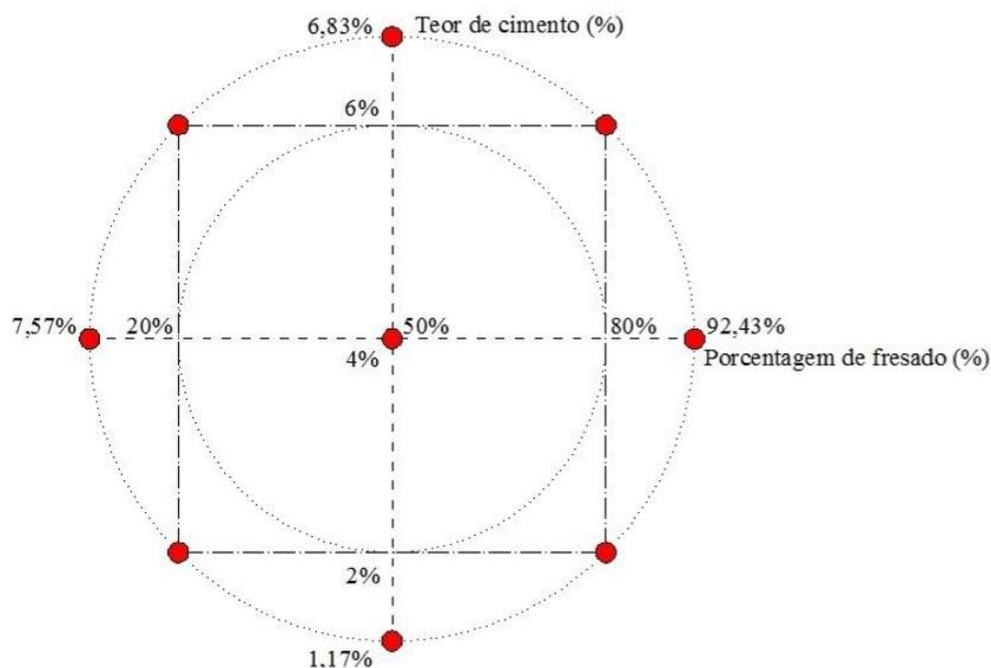
Seguindo as diretrizes adotadas por Kleinert (2016), a matriz experimental definida neste trabalho, para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral e de módulo de resiliência, foi então um PCSO composto por dois fatores quantitativos (A: porcentagem de fresado e B: teor de cimento).

O intervalo de investigação do primeiro fator (porcentagem de fresado), considerando a parte fatorial (-1 e +1), foi de 20 a 80%, sendo que a parte da estrela (-1,41 e +1,41) foi extrapolada para 7,57 e 92,43%. Da mesma maneira, para o segundo fator (teor de cimento), considerou-se como parte fatorial (-1 e +1) o intervalo de 2 a 6% e a parte da estrela (-1,41 e +1,41) foi extrapolada para 1,17 e 6,83%.

Na figura 8 pode ser verificada a representação das variáveis, sendo que as misturas analisadas correspondem aos pontos em vermelho. Os níveis utilizados para os dois fatores são

apresentados de maneira codificada e real na tabela 7, sendo possível identificar todas as composições empregadas, assim como a nomenclatura utilizada neste trabalho para cada uma dessas.

Figura 8 – Representação em 2D das variáveis analisadas nos ensaios de RCD e MRD



(fonte: KLEINERT, 2016)

Analisando a figura 8, é importante ressaltar que no ponto central as amostras são analisadas seis vezes e nos demais pontos apenas uma vez, totalizando 14 ensaios por tempo de cura. Esse fato é devido ao método de planejamento aplicado, o qual utiliza a parte central como parâmetro de confiabilidade.

Na tabela 7 é apresentada apenas a porcentagem de fresado utilizada em cada mistura, sendo que a quantidade de solo laterítico empregada é complementar a essa, isto é, a soma dos dois materiais é 100%. Nesse trabalho, as misturas são identificadas conforme a nomenclatura exposta, sendo que o primeiro valor refere-se ao teor de cimento (fator B) e o segundo à porcentagem de fresado adicionada (fator A).

Tabela 7 – Descrição das misturas analisadas nos ensaios de RCD e MRD

Níveis codificados		Níveis reais		Nomenclatura
A	B	Porcentagem de fresado (%)	Teor de cimento (%)	
0	-1,41	50	1,17	SL 1,17-50
-1	-1	20	2	SL 2-20
+1	-1	80	2	SL 2-80
-1,41	0	7,57	4	SL 4-7,57
0	0	50	4	SL 4-50
+1,41	0	92,43	4	SL 4-92,43
-1	+1	20	6	SL 6-20
+1	+1	80	6	SL 6-80
0	+1,41	50	6,83	SL 6,83-50

(fonte: elaborado pelo autor)

Com relação aos tempos de cura, esses variam de acordo com o ensaio analisado, conforme apresentado na tabela 8.

Tabela 8 - Tempos de cura para os ensaios de RCD e MRD

Ensaio	Tempo de cura (dias)
Resistência à tração por compressão diametral	3, 7, 14, 28
Módulo de resiliência diametral	3, 7, 14

(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.1.2 Análise dos resultados

A análise estatística dos resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais foram realizados utilizando-se o *software Minitab 17*. A partir do modelo elaborado no planejamento experimental, são fornecidos ao *software* os resultados obtidos para cada ensaio e, com isso, o

programa determina a influência de cada variável analisada pelo meio de parâmetros numéricos, modelos e gráficos. As etapas empregues nas análises são descritas nos itens a seguir.

#### 4.1.2.1 Verificação de dados atípicos

Em estudos experimentais, alguns dados coletados podem estar muito influenciados por fatores externos, ou podem ser provenientes de erros como, por exemplo, de leitura ou digitação, apresentando valores atípicos. Quando há desconfiança da presença destes dados, deve-se verificar a procedência dos mesmos e caso se confirme a hipótese, deverão ser retirados e uma nova regressão deve ser feita (RIBEIRO e CATEN, 2014).

Os critérios adotados na verificação dos valores considerados atípicos são descritos com mais detalhes no capítulo 6, a partir da análise dos resultados dos ensaios de RCD e MRD.

#### 4.1.2.2 Identificação dos termos significativos

Após análise dos valores considerados atípicos para o modelo, determinou-se quais os efeitos principais, quadráticos e interações entre os dois fatores, que apresentam influência significativa nos resultados, a partir da análise do valor-p (fornecido pelo *Minitab*), que consiste na probabilidade de erro na conclusão de que o fator controlável tem efeito significativo (RIBEIRO e CATEN, 2014).

Neste trabalho, levou-se em consideração o critério citado por Ribeiro e Caten (2014), o qual define que o efeito, para ser considerado significativo, precisa ter um valor-p inferior a 0,05, isto é, 5%. Os termos não considerados significativos não devem permanecer no modelo, devendo-se retirar um termo por vez e rodar novamente a rotina de regressão até a definição de um modelo constituído somente por termos significativos.

#### 4.1.2.3 Utilização dos resultados

Após a obtenção do modelo final, que é disponibilizado a partir da equação de regressão, verifica-se a interferência de cada variável analisada, possibilitando a determinação de qualquer parâmetro ou resultado, desde que se conheça os demais dados.

No relatório gerado pelo *Minitab* são disponibilizados os resultados estatísticos encontrados para cada ensaio, contendo a análise de variância, o sumário do modelo, os coeficientes

codificados, a equação de regressão em unidades não codificadas e indicações sobre valores considerados atípicos. Os coeficientes codificados possibilitam verificar os efeitos principais, dos termos quadráticos e das interações entre dois fatores a fim de quantificar a influência das variáveis analisadas.

O relatório apresenta, no sumário do modelo, o coeficiente de determinação  $R^2$ , o qual é uma medida da qualidade de adequação da equação de regressão aos dados amostrais, ou seja, esse coeficiente indica o percentual da variabilidade de “Y” que é explicado pelo modelo de regressão em função de “X”. Logo, quanto mais próximo de 100% for o  $R^2$  encontrado, mais o resultado fornecido pela equação é próximo daquele alcançado a partir de ensaios.

O *software* possibilita ainda, diversas opções de representação gráfica dos resultados. Com isso, verificou-se os gráficos que melhor representavam os resultados e as interações para cada ensaio, com o intuito de facilitar a análise dos mesmos. Esses, por sua vez, são apresentados e explicados no capítulo 6, a partir da análise dos resultados dos ensaios de RCD e MRD.

## 4.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Para os ensaios de resistência à tração na flexão, definiu-se um programa com base nas matrizes experimentais utilizadas por Fedrigo (2015) e López (2016) em suas respectivas pesquisas.

As variáveis de controle, conforme já citado, são a porcentagem de fresado e o teor de cimento. Para este último, a Austroads (2002) estabelece, para materiais cimentados, a classificação apresentada tabela 9.

Optou-se, por simplificação, por teores de 2%, 4% e 6% de cimento, em massa, visando analisar a influência do grau de cimentação da mistura em ensaios mecânicos. Quanto ao material fresado, optou-se por porcentagens equivalentes a 20%, 50% e 70% da mistura com solo laterítico. O primeiro valor (20%), foi adotado para que se pudesse reproduzir a reciclagem de um pavimento com uma camada pouco espessa de revestimento asfáltico, e o segundo (50%), é a quantidade sugerida por algumas especificações de serviço nacionais como limite de fresado a ser empregado nas misturas recicladas (DEINFRA-SC, 2016; DNIT, 2013; FEDRIGO, 2015).

Tabela 9 – Classificação de materiais estabilizados com cimento

Tipo de material	Teor de cimento (%)	
	Mínimo	Máximo
Modificado	2,0	3,0
Levemente cimentado	3,0	4,5
Fortemente cimentado	4,5	5,5

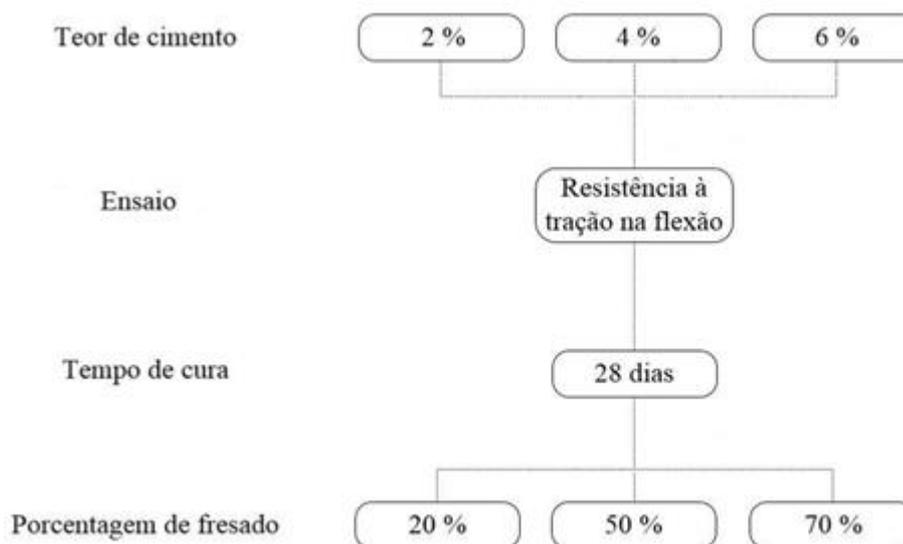
(fonte: adaptado de AUSTROADS, 2002)

A fração de 70% de material fresado foi acrescentada na pesquisa como verificação da influência desse material na reciclagem de pavimentos. A incorporação de uma maior quantidade de fresado, no caso de vias com revestimento asfáltico espesso, reduziria, principalmente, o custo de transporte e descarte destes resíduos (D'AVILA, 2015).

#### 4.2.1 Matriz experimental

Seguindo as mesmas diretrizes, o programa experimental definido neste trabalho, para os ensaios de resistência à tração na flexão, está esquematicamente representado na figura 9. O tempo de cura utilizado, conforme mostrado, é único de 28 dias.

Figura 9 – Esquema do programa experimental para os ensaios de RFT



(fonte: elaborado pelo autor)

A identificação das misturas estudadas segue o mesmo padrão de nomenclatura apresentado para os ensaios de RCD e MRD, na qual o primeiro valor refere-se ao teor de cimento e o segundo à porcentagem de fresado, conforme apresentado na tabela 10.

Tabela 10 - Descrição das misturas analisadas nos ensaios de RTF

Teor de cimento (%)	Porcentagem de fresado (%)	Nomenclatura
2	20	SL 2-20
2	50	SL 2-50
2	70	SL 2-70
4	20	SL 4-20
4	50	SL 4-50
4	70	SL 4-70
6	20	SL 6-20
6	50	SL 6-50
6	70	SL 6-70

(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.2.2 Análise dos resultados

Para os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração na flexão foi realizada uma análise estatística mais simplificada. Primeiramente, foram calculados e analisados os valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados de RTF e deformação na ruptura para cada mistura. A partir desses dados, gerou-se gráficos apresentando a relação entre as variáveis e as médias dos resultados, a fim de verificar a influência de cada material (teor de cimento e porcentagem de fresado) no comportamento da mistura reciclada.

## 5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados e os procedimentos e métodos adotados na realização dos experimentos. Primeiramente, são detalhados os ensaios realizados para complementar a caracterização do solo laterítico e do fresado asfáltico e, posteriormente, os ensaios necessários à verificação do comportamento mecânico das misturas estudadas.

### 5.1 MATERIAIS

A seguir são especificados os materiais empregados nas misturas, sendo esses o fresado asfáltico, o solo laterítico e o cimento. Após, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de granulometria e de compactação para os materiais e as misturas, realizados anteriormente a este trabalho pelo LAPAV da UFRGS.

#### 5.1.1 Fresado asfáltico

O fresado asfáltico utilizado neste trabalho, apresentado na figura 10, foi fornecido pela Prefeitura Municipal de Porto Alegre (PMPA), proveniente do processo de fresagem de vias degradadas. Além da armazenagem, este material não passou por nenhum processamento após sua retirada *in situ*, não apresentando nenhum diferencial relevante que possa impedir a replicabilidade desta pesquisa.

Figura 10 – Fresado asfáltico utilizado nos ensaios



(fonte: foto do autor)

### 5.1.2 Solo laterítico

O solo laterítico empregado neste estudo foi coletado na rodovia Assis Chateaubriand (SP-425), no município de Barretos, localizado ao norte do Estado de São Paulo. O solo possui as características citadas no item 2.3, apresentando uma coloração avermelhada, conforme mostrado na figura 11. O solo laterítico foi coletado na rodovia Assis Chateaubriand (SP-425), no município de Barretos.

Figura 11 – Solo laterítico utilizado nos ensaios



(fonte: foto do autor)

### 5.1.3 Cimento

Os cimentos compostos são os mais indicados para a aplicação na reciclagem de pavimentos, por apresentarem as seguintes características: prazo de trabalhabilidade compatível com o método construtivo, resistência mecânica intermediária e calor de hidratação moderado, importante para reduzir o aparecimento de trincas por retração (PAIVA *et al.*, 2013).

O cimento utilizado neste estudo foi o CP II-E-32, que é composto com escória e possui as características adequadas citadas por Paiva *et al.* (2013). Além do mais, é importante o fato deste tipo de cimento ser muito utilizado no país e de existirem diversas experiências de utilização do mesmo em serviços de reciclagem de pavimentos.

### 5.1.4 Caracterização dos materiais e das misturas

Parte da caracterização dos materiais e das misturas, por meio de ensaios de granulometria por peneiramento e ensaios de compactação, já havia sido previamente realizada pelo LAPAV, não fazendo parte dos métodos empregados no presente trabalho. A seguir, estão apresentados brevemente os métodos utilizados, conforme descritos por Ramos (2016) em seu trabalho, com enfoque nos resultados obtidos, divulgados por Núñez *et al.* (2016) em relatório da pesquisa elaborado para a ANTT.

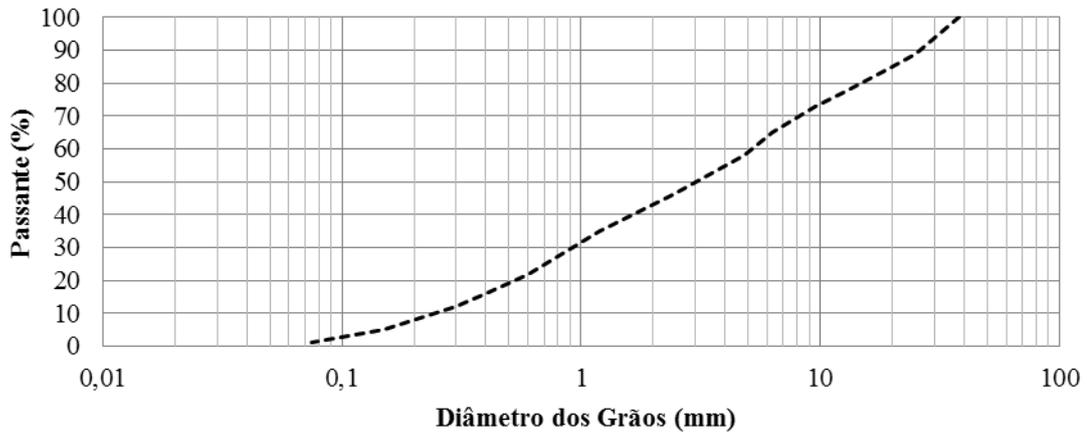
#### 5.1.4.1 Granulometria

Primeiramente, foi realizada a análise granulométrica por peneiramento manual do solo laterítico e do fresado asfáltico, de acordo com as recomendações e instrumentos propostos pela norma rodoviária DNER-ME 083/98 (DNER, 1998), elaborada para agregados graúdos e miúdos.

A partir da análise das curvas granulométricas obtidas para o solo laterítico e para o fresado asfáltico, chegou-se à conclusão que seria necessária uma correção granulométrica para enquadrar as misturas de acordo com os limites definidos pela Wirtgen (2012), apresentados na tabela 5. Para tanto, decidiu-se pela adição de uma fração mais fina oriunda do próprio solo laterítico, obtida através da desagregação de seus grumos por peneiramento mecânico.

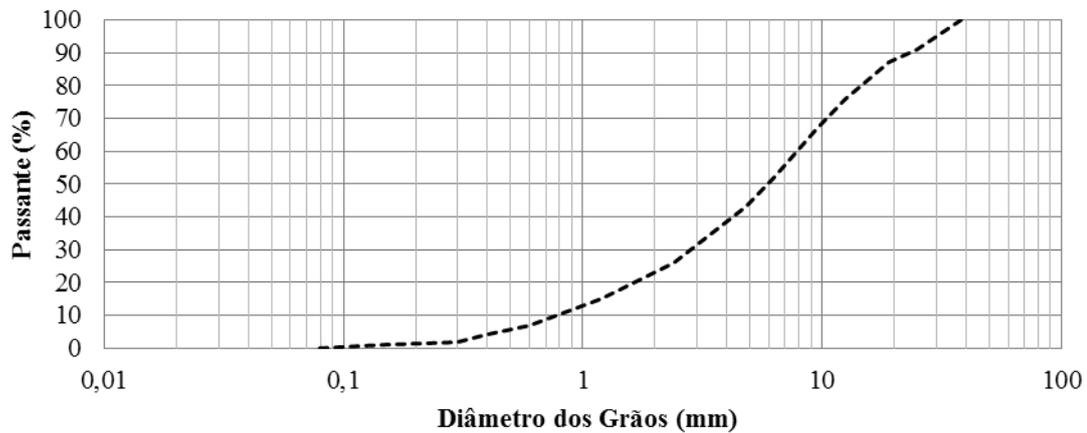
A curva granulométrica do solo laterítico é apresentada na figura 12, enquanto a curva resultante para o material fresado é apresentada na figura 13.

Figura 12 – Curva granulométrica obtida por peneiramento do solo laterítico



(fonte: NÚÑEZ *et al.*, 2016)

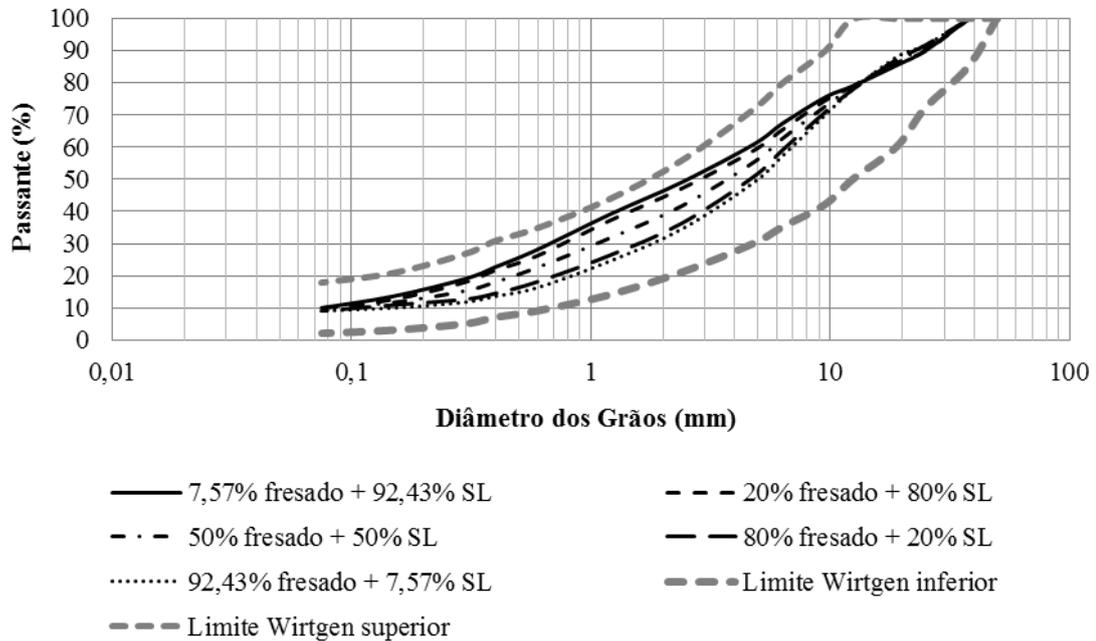
Figura 13 – Curva granulométrica obtida por peneiramento do fresado asfáltico



(fonte: NÚÑEZ *et al.*, 2016)

Por fim, a partir dos resultados obtidos por meio da análise granulométrica dos materiais, foi estimada a granulometria das misturas. As curvas encontradas são apresentadas na figura 14, bem como as faixas granulométricas estipuladas pela Wirtgen (2012), visando demonstrar que todas as misturas se enquadraram nos limites propostos. Ressalta-se que foi adicionado 10% de material passante na peneira de abertura de 1,2 mm para a correção granulométrica de todas as misturas estudadas, assim como realizado no presente trabalho.

Figura 14 – Curvas granulométricas das misturas enquadradas aos limites da Wirtgen



(fonte: NÚÑEZ *et al.*, 2016)

#### 5.1.4.2 Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados de acordo com o método descrito pela DNIT-ME 164/2013 (DNIT, 2013b), com o objetivo de obter-se a massa específica aparente seca máxima ( $\gamma_{sm\acute{a}x}$ ) e teor de umidade ótimo ( $\omega_{\acute{o}t}$ ) das misturas. Para isso, foram realizados no mínimo cinco ensaios para cada mistura, com diferentes teores de umidade. Os corpos de prova foram moldados em cinco camadas com aplicação de 55 golpes em cada, equivalente a energia modificada.

Com os resultados obtidos nesses ensaios, foram gerados gráficos ( $\gamma_s \times \omega$ ) para cada uma das misturas compostas por diferentes valores de porcentagem de fresado e teor de cimento, conforme definido no planejamento experimental. A partir destes gráficos, foram encontrados os valores de  $\gamma_{sm\acute{a}x}$  e  $\omega_{\acute{o}t}$ . Na tabela 11 são apresentados os parâmetros obtidos para as misturas estudadas nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e de módulo de resiliência diametral, enquanto na tabela 12 são apresentados os parâmetros encontrados para as misturas utilizadas nos ensaios de resistência à tração na flexão.

Tabela 11 – Parâmetros obtidos a partir dos ensaios de compactação para as misturas estudadas nos ensaios de RCD e MRD

<b>Mistura</b>	<b><math>\omega_{ót}</math> (%)</b>	<b><math>\gamma_{smáx}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>SL 1,17-50</b>	8,6	1,930
<b>SL 2-20</b>	14,2	1,710
<b>SL 2-80</b>	7,1	2,073
<b>SL 4-7,57</b>	18,0	1,757
<b>SL 4-50</b>	10,9	1,959
<b>SL 4-92,43</b>	5,8	2,164
<b>SL 6-20</b>	12,7	1,811
<b>SL 6-80</b>	8,2	2,103
<b>SL 6,83-50</b>	12,8	1,943

(fonte: NÚÑEZ *et al*, 2016)

Tabela 12 – Parâmetros obtidos a partir dos ensaios de compactação para as misturas estudadas nos ensaios de RTF

<b>Mistura</b>	<b><math>\omega_{ót}</math> (%)</b>	<b><math>\gamma_{smáx}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>SL 2-20</b>	14,2	1,710
<b>SL 2-50</b>	8,6	1,930
<b>SL 2-70</b>	7,1	2,073
<b>SL 4-20</b>	14,2	1,741
<b>SL 4-50</b>	10,9	1,959
<b>SL 4-70</b>	10,1	2,010
<b>SL 6-20</b>	12,7	1,811
<b>SL 6-50</b>	12,8	1,943
<b>SL 6-70</b>	8,2	2,103

(fonte: NÚÑEZ *et al*, 2016)

Para as misturas SL 2-50, SL 2-70, SL 6-50 e SL 6-70 optou-se por utilizar os valores encontrados nos ensaios de compactação das misturas SL 1,17-50, SL 2-80, SL 6,83-50 e SL 6-80, respectivamente, devido à proximidade dos teores de cimento e fresado asfáltico.

## 5.2 MÉTODOS

A seguir são apresentados os métodos utilizados no presente trabalho, incluindo os ensaios para complementar a caracterização física do solo laterítico e do fresado asfáltico, a moldagem dos corpos de prova e os experimentos para estudo do comportamento mecânico das misturas, sendo esses os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, de módulo de resiliência diametral e de resistência à tração na flexão.

### 5.2.1 Caracterização complementar do solo laterítico

Visando-se uma caracterização mais apurada das propriedades do solo laterítico empregado neste estudo, foram realizados os ensaios descritos a seguir.

#### 5.2.1.1 Determinação do peso específico real dos grãos

Para se obter o peso específico real dos grãos, foi realizado o ensaio por meio de picnômetro, conforme a metodologia definida pela norma rodoviária DNER-ME 093/94 (DNER, 1994).

#### 5.2.1.2 Determinação dos limites de consistência

Os limites de consistência, propostos pelo engenheiro sueco Atterberg, indicam a influência dos finos no comportamento do solo e baseiam-se na constatação de que um solo argiloso ocorre com aspectos bem distintos conforme seu teor de umidade, podendo apresentar comportamento líquido, plástico ou sólido (PINTO, 2006).

O limite de liquidez (LL) é o teor de umidade correspondente à transição entre o estado de consistência plástica e o estado de consistência líquida e foi obtido a partir do ensaio padronizado pela NBR 6459 (ABNT, 2016). Nesse ensaio, o limite de liquidez é definido como o teor de umidade do solo com o qual uma ranhura nele feita requer 25 golpes para se fechar

numa concha metálica. O processo foi realizado com diferentes umidades, anotando-se o número de golpes para fechar a ranhura e obteve-se o limite pela interpolação dos resultados.

O limite de plasticidade (LP) é o teor de umidade correspondente à transição entre o estado de consistência sólida e o estado de consistência plástica e foi encontrado por meio do ensaio padronizado pela NBR 7180 (ABNT, 2016). Nesse ensaio, o limite de plasticidade é definido como o menor teor de umidade com o qual se consegue moldar um cilindro com 3 mm de diâmetro, rolando-se com a palma da mão. O resultado foi obtido a partir da média dos teores de umidade encontrados em cinco amostras.

A partir dos resultados obtidos, calculou-se também o índice de plasticidade (IP), que é definido pela diferença entre os limites de liquidez e plasticidade.

#### 5.2.1.3 Classificação MCT

Conforme descrito no item 2.3, a classificação MCT, elaborada pelos professores e engenheiros Nogami e Villibor (1981), tem como principal objetivo a caracterização e hierarquização de solos tropicais, visando a aplicabilidade desses em obras viárias, a partir da determinação de parâmetros relacionados a propriedades mecânicas e hidráulicas.

Nesse contexto, com a finalidade de enquadrar o solo estudado nessa classificação e poder confirmar suas propriedades de natureza laterítica, foram realizados os ensaios de compactação mini-MCV (do inglês *moisture condition value*) e de perda de massa por imersão em água, normalizados pelas normas rodoviárias DNER-ME 258/94 (DNER, 1994) e DNER-ME 256/94 (DNER, 1994), respectivamente.

Esses ensaios são realizados com material passante na peneira de 2 mm, em cinco corpos de prova compactados com diferentes umidades em dimensão miniatura (50 mm de diâmetro) e os resultados são necessários para a obtenção dos parâmetros  $c'$  e  $e'$ , calculados conforme especificado pela DNER-CLA 259/96 (DNER, 1996). Os equipamentos utilizados no ensaio de compactação mini-MCV e a realização do ensaio de perda de massa por imersão são apresentados na figura 15.

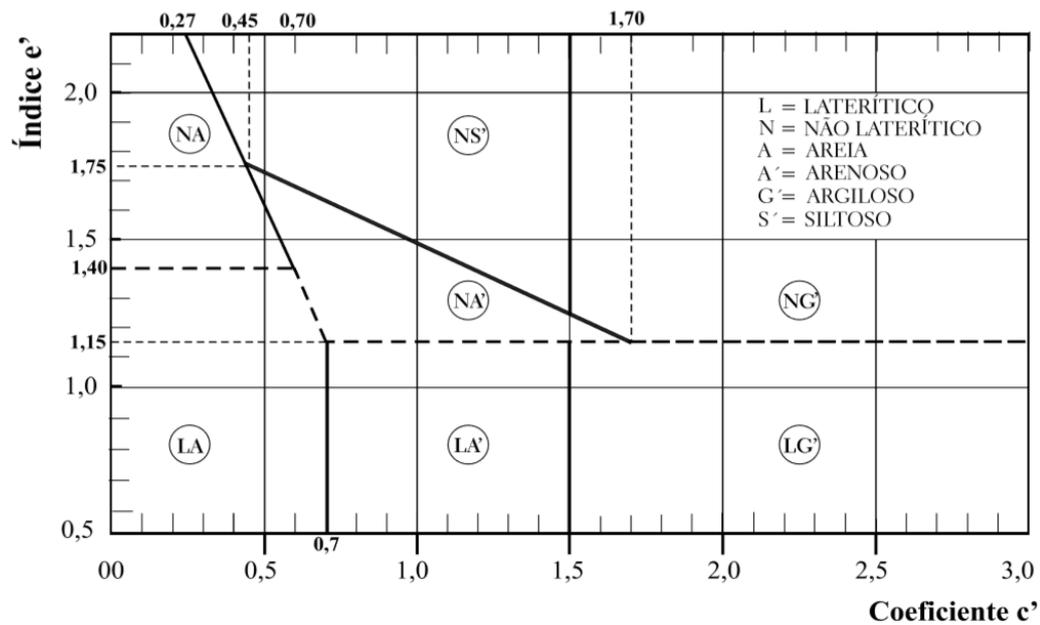
Figura 15 – (a) Equipamentos do ensaio de compactação mini-MCV e (b) corpos de prova durante o ensaio de perda de massa por imersão



(fonte: fotos do autor)

A partir dos parâmetros encontrados e da inserção desses no gráfico mostrado na figura 16, obtém-se a identificação do solo de acordo com a metodologia MCT. A classificação é constituída de 7 grupos, sendo três de comportamento laterítico (L) e quatro de comportamento não-laterítico (N).

Figura 16 – Gráfico de classificação MCT



(fonte: VILLIBOR e NOGAMI, 2009)

#### 5.2.1.4 Análise granulométrica

Após realizados os ensaios de classificação MCT, observou-se que o solo em estudo se trata de uma argila laterítica. Desse modo, foi constatado que o mesmo deveria ter um teor de argila maior do que o que foi verificado nos ensaios de análise granulométrica por peneiramento (item 5.1.4.1). Tal fato também foi corroborado pelos resultados dos ensaios de consistência, nos quais os valores de LL, LP e IP apresentados pelo solo são típicos de solos argilosos, segundo Pinto (2006).

Logo, a fim de se obter uma granulometria mais apurada quanto aos finos presentes no solo, decidiu-se pela realização dos ensaios de análise granulométrica por sedimentação com emprego de defloculante, conforme especificado pela DNER-ME 051/94 (DNER, 1994), elaborada para solos.

### **5.2.2 Determinação do teor de ligante do fresado asfáltico**

Com o objetivo de caracterizar o material fresado empregado nas misturas, realizou-se o ensaio de determinação do teor de ligante asfáltico pelo método da queima no forno de ignição (modelo Troxler), seguindo-se os procedimentos recomendados pela norma ASTM D6307-16 (ASTM, 2011). O processo de queima foi realizado em duas amostras, com aproximadamente 600 g cada, obtendo-se o teor em massa de ligante pela média dos resultados.

### 5.2.3 Moldagem dos corpos de prova

Os procedimentos apresentados neste item foram empregados para os três ensaios realizados neste estudo. Outros detalhes específicos relativos a moldagem e cura dos corpos de prova de cada ensaio são apresentados nos itens que tratam dos mesmos.

Foram realizadas a secagem, pesagem, separação e acondicionamento das quantidades específicas dos materiais (fresado asfáltico, solo laterítico e porcentagem de finos) em sacos plásticos, devidamente identificados e fechados, até a realização da moldagem dos corpos de prova, deixando-se a adição de cimento e de água para o momento da mistura.

O processo de moldagem dos corpos de prova foi iniciado com a mistura manual dos materiais secos e a adição do teor determinado de cimento, calculado sobre o peso seco dos constituintes, até se alcançar a homogeneidade adequada. Adicionou-se, então, a quantidade de água necessária para se obter a umidade ótima, misturando-se novamente. Como exemplo, a mistura SL 6-80, resultante desse processo, é apresentada na figura 17.

Figura 17 – Mistura SL 6-80 pronta para a realização da moldagem



(fonte: foto do autor)

Com a mistura finalizada, pesaram-se as quantidades necessárias para cada camada e se compactou até se atingir a altura desejada, a fim de alcançar a massa específica aparente seca

máxima obtida a partir dos ensaios de compactação. Após a execução de cada corpo de prova, coletou-se uma amostra de material para verificação da umidade.

Detalhes da moldagem, como o modo de compactação, os moldes utilizados e o número de camadas compactadas são apresentados na tabela 13. Já a tabela 14 apresenta o número de corpos de prova moldados por idade de cura e, por conseguinte, o número de corpos de prova moldados por ensaio. No total, para a realização de todos ensaios, foram moldados 125 corpos de prova.

Tabela 13 – Características de moldagem dos corpos de prova para cada ensaio

<b>Ensaio</b>	<b>Compactação</b>	<b>Molde</b>	<b>Número de camadas</b>
<b>Resistência à tração por compressão diametral</b>	Soquete Marshall automático	Cilíndrico / Marshall (10,2 x 6,5 cm)	1
<b>Módulo de resiliência diametral</b>	Soquete Marshall automático	Cilíndrico / Marshall (10,2 x 6,5 cm)	1
<b>Resistência à tração na flexão</b>	Prensa hidráulica	Prismático (10 x 10 x 40 cm)	3

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 14 – Quantificação dos corpos de prova moldados

<b>Ensaio</b>	<b>Idades de cura (dias)</b>	<b>CPs / Idade de cura</b>	<b>CPs / Ensaio</b>
<b>Resistência à tração por compressão diametral</b>	3, 7, 14	2	84
	28	1	14
<b>Módulo de resiliência diametral</b>	3, 7, 14	1	42*
<b>Resistência à tração na flexão</b>	28	3	27

\*Os corpos de prova ensaiados a módulo de resiliência foram reaproveitados para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral

(fonte: elaborado pelo autor)

#### 5.2.4 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência de um material diz respeito à medida do esforço solicitante que causa sua ruptura, ou seja, que impõe um nível de deformação de ruptura. A medida de resistência a ser empregada deve estar vinculada à forma de comportamento esperado para o material como camada de pavimento (BALBO, 2007).

Nesse contexto, a resistência à tração é um importante parâmetro para a caracterização de materiais utilizados em pavimentação, principalmente no estudo de camadas cimentadas, que trabalham em flexão e acabam rompendo por ação de tensões de tração nas fibras inferiores. Porém, devido à dificuldade de se obter essa resistência por tração direta ou por meio do ensaio de tração na flexão (também realizado neste trabalho), diversos métodos indiretos têm sido desenvolvidos para a sua determinação como, por exemplo, o ensaio por compressão diametral.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral, desenvolvido pelo prof. Lobo Carneiro, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, e empregado inicialmente em concreto de cimento Portland, consiste na aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que geram tensões de tração uniformes perpendiculares ao diâmetro solicitado. Desde 1972, esse ensaio passou a ser adotado para materiais de pavimentação, porém com a carga sendo aplicada por meio de frisos no corpo de prova cilíndrico Marshall convencional (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Conforme apresentado na tabela 13, a compactação dos corpos de prova foi realizada em uma única camada, compactada em suas duas faces, com um soquete Marshall mecânico automático (figura 18 – a), sendo então desmoldados ao término da moldagem com auxílio de um extrator (figura 18 – b).

Quanto ao período de cura, os corpos de prova foram colocados em sacos plásticos, evitando o contato com a umidade externa, e armazenados até o momento especificado para cada ensaio. Uma cura úmida não pode ser realizada, já que os corpos de prova, quando submetidos a um ambiente com umidade elevada, desagregavam, o que impossibilitava a realização do ensaio.

O ensaio foi realizado com base no método DNIT-ME 136 (DNIT, 2010a), elaborado originalmente para misturas asfálticas. Precedente à sua realização, aferiu-se o diâmetro e a altura de cada corpo de prova com um paquímetro.

Figura 18 – Procedimentos de (a) moldagem e (b) desmoldagem dos corpos de prova para o ensaio de RCD



(fonte: fotos do autor)

Na realização do ensaio, os corpos de prova foram posicionados na prensa com sua superfície cilíndrica entre os frisos metálicos e aplicou-se, na face inferior, a carga progressivamente, com velocidade constante de deslocamento de 0,8 mm/s (figura 19 – a). O ensaio era encerrado assim que ocorria a ruptura (figura 19 – b), anotando-se o valor da carga. A partir desse resultado e das medidas de diâmetro e altura do corpo de prova, determinou-se a resistência à tração por compressão diametral de cada amostra através da equação 1.

$$RCD = \frac{2 \times F}{100 \times \pi \times D \times H} \quad (1)$$

Onde:

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

F – carga de ruptura, em N;

D – diâmetro do corpo de prova, em cm;

H – altura do corpo de prova, em cm.

Figura 19 – (a) Prensa utilizada para ruptura dos corpos de prova e (b) corpo de prova após ruptura



(fonte: fotos do autor)

### 5.2.5 Módulo de resiliência diametral

A resiliência é definida, conforme Medina e Motta (2005), como a energia armazenada em um corpo deformado elasticamente e que é devolvida quando cessam as tensões responsáveis pelas deformações. Desse modo, o módulo de resiliência pode ser entendido como a capacidade de o material não resguardar deformações elásticas (BALBO, 2007).

O módulo de resiliência de materiais tem sido crescentemente empregado no país com o objetivo de aplicação de métodos mecanístico-empíricos no dimensionamento de pavimentos. Ressalta-se que os materiais de pavimentação não são elásticos, sendo o uso da teoria da elasticidade uma aproximação (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Neste trabalho, o módulo de resiliência foi determinado pela compressão diametral dos corpos de prova, conforme descrito no método de ensaio DNIT-ME 135 (DNIT, 2010b), originalmente elaborado para misturas asfálticas. Os procedimentos de moldagem, desmoldagem e cura dos corpos de prova foram os mesmos adotados para o ensaio de RCD. Do mesmo modo, precedente à realização do ensaio, aferiu-se o diâmetro e a altura de cada corpo de prova com um paquímetro.

Na realização do ensaio, primeiramente, colocaram-se os corpos de prova na base do pórtico e fixou-se um transdutor de deslocamentos do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*) no centro destes, por meio de duas garras presas nas faces externas. O LVDT foi ajustado para se obter os registros de deslocamentos horizontais através sistema de aquisição de dados. Em seguida, a parte superior do pórtico foi colocada sobre os corpos de prova e, sobre este conjunto, assentou-se o pistão de carga.

O ensaio foi realizado empregando-se cargas cíclicas com frequência de 1 Hz, sendo cada aplicação de carga equivalente a 30% da tensão de ruptura obtida no ensaio de RCD e com duração de 0,1 segundo. A preparação do corpo de prova e a configuração final do equipamento para a realização do ensaio são apresentadas na figura 20.

O programa computacional utilizado no ensaio, responsável por coletar as informações de comportamento do corpo de prova e fornecer os resultados, foi o *software Seepav*. A partir dos parâmetros registrados e da equação 2, o próprio *software* efetuou o cálculo dos módulos de resiliência.

$$MRD = \frac{Fd}{100 \times \Delta \times H} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (2)$$

Onde:

MRD – módulo de resiliência diametral, em MPa;

Fd – carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo de prova, em N;

$\Delta$  – deslocamento resiliente para aplicações de carga (F), em cm;

H – altura do corpo de prova, em cm;

$\mu$  – coeficiente de Poisson.

Como não foi realizada a determinação do coeficiente de Poisson para as misturas empregadas neste trabalho, adotou-se o valor de 0,17, equivalente ao resultado encontrado por Kleinert (2016) para misturas contendo fresado asfáltico, solo-cimento e cimento.

Cada ensaio realiza três leituras de deslocamento, resultando em três valores de módulo de resiliência. No presente trabalho, optou-se por ensaiar cada corpo de prova no mínimo duas vezes, alterando-se a posição do LVDT de forma a obter seis valores para cada corpo de prova.

Figura 20 – Realização do (a) preparo do corpo de prova e fixação do LVDT e (b) equipamento pronto para realização do ensaio de MRD



(fonte: fotos do autor)

Como se trata de um ensaio não destrutivo, depois de ser ensaiados a módulo de resiliência, os corpos de prova foram rompidos diametralmente, a fim de se obter mais um valor de resistência à tração por compressão diametral.

### 5.2.6 Resistência à tração na flexão

A medida de resistência à tração na flexão é um dos mais importantes ensaios para materiais de pavimentação cimentados, permitindo a verificação de um esforço semelhante ao qual a camada está submetida em campo, ainda que de forma simplificada, em uma direção apenas (BALBO, 2007).

Pinto (1991, p. 109), de maneira teórica, descreve o procedimento da seguinte forma:

[...] consiste em submeter uma vigota retangular simplesmente apoiada a duas cargas simétricas em relação ao centro da vigota, que produzem um estado de tração uniforme na parte central do bordo inferior da vigota, abaixo da linha neutra, entre os dois pontos da carga.

Solicitando o corpo de prova a esse tipo de carregamento, obtém-se uma região, entre os dois pontos de aplicação de carga, sob ação de um momento fletor máximo e constante, com esforços cortantes nulos. Deste modo, garante-se um ensaio adequado, induzindo uma ruptura exclusivamente por flexão (CERATTI, 1991).

A partir do ensaio de flexão de vigas se consegue estimar não apenas a resistência à flexão na ruptura, mas também o módulo flexural e a vida de fadiga das misturas. Para este trabalho, analisou-se apenas a resposta das misturas quanto à tração na flexão, medindo-se a resistência e também as deformações durante o ensaio, com enfoque no valor de deformação na ruptura. Os resultados obtidos definirão os níveis de tensão e deformação a serem utilizados em futuros ensaios de fadiga.

Primeiramente, todo o processo de moldagem, desmoldagem e cura dos corpos de prova (chamados também de vigas ou vigotas) foi realizado no laboratório disponibilizado pela CIENTEC. Foram utilizados moldes metálicos com seção 10x10 cm e 40 cm de comprimento (figura 21 – a), os quais receberam uma fina camada de óleo mineral para auxiliar na desforma.

A compactação foi realizada de forma estática por meio de uma prensa hidráulica com capacidade de aplicação de carga de 60 tf (figura 21 - b), em 3 camadas de mesma altura. Controlou-se a altura pré-estabelecida para cada camada, visando alcançar, no final da moldagem, a massa específica aparente seca máxima determinada nos ensaios de compactação. As duas primeiras camadas foram escarificadas, de modo a garantir uma melhor aderência nas interfaces.

A desmoldagem foi realizada entre 24 e 48 horas após a finalização da compactação. Quanto ao período de cura, os corpos de prova foram colocados sobre pequenos suportes de madeira e armazenados, à temperatura e umidade ambientes, durante os 28 dias, o que corresponde a uma cura “seca”.

Os ensaios de resistência à tração na flexão foram realizados no LAPAV, seguindo a metodologia adotada para materiais cimentados testados pela Austroads (2008) e estabelecendo critérios normativos prescritos na JSCE-SF4 (*JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS*, 1984), proposto para ensaios de resistência à flexão de concreto reforçado com fibras de aço.

Figura 21 – Moldagem dos corpos de prova para RFT: (a) moldes metálicos utilizados e (b) processo de compactação por meio de prensa hidráulica

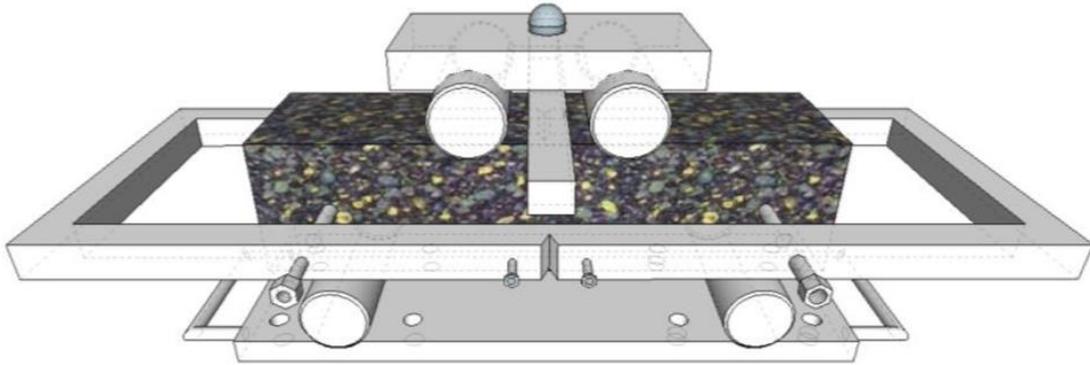


(fonte: fotos do autor)

A *Japan Society of Civil Engineers* (1984) estabelece uma configuração de aplicação de carga por meio de dois cutelos superiores, posicionados sobre o terço médio do corpo de prova simplesmente apoiado, composição essa que garante uma solicitação por flexão pura no terço central da vigota, que deverá romper nessa região para que o ensaio seja aceito. Realiza-se a leitura de deslocamentos com o posicionamento de um LVDT centralizado na face lateral do prisma, apoiado em um suporte alinhado à linha neutra do corpo de prova, possibilitando que apenas o deslocamento relativo da viga seja medido.

Seguindo os mesmos conceitos, o arranjo completo projetado no LAPAV e utilizado na realização dos ensaios de RTF é apresentado na figura 22, a partir de um modelo 3D. Foram projetados roletes livres, além de entalhes, para garantir um apoio do tipo simples de primeira ordem e eliminar possíveis componentes axiais. Já a excentricidade é descartada pela inclusão de uma esfera no topo da peça superior. O suporte empregado para fixação do LVDT é do tipo “yoke”, que fica em torno do corpo de prova e na altura da linha neutra, fixado diretamente acima dos suportes inferiores. Adicionalmente, utiliza-se uma chapa de referência para o LVDT, que é fixada na viga no centro do vão.

Figura 22 – Modelo 3D do suporte para o ensaio de RTF



(fonte: LÓPEZ, 2016)

Primeiramente, cada corpo de prova era medido nas suas três dimensões e, nele, marcava-se as posições necessárias para a fixação do suporte *yoke* e o posicionamento dos roletes. Realizadas as medições, o suporte e a placa de referência eram então acoplados à vigota (figura 23). Por fim, essa era posicionada no pórtico, onde fixava-se um LVDT em uma das faces laterais junto ao centro. A figura 24 apresenta a configuração do ensaio com a vigota preparada para o recebimento da carga.

Figura 23 – Vigota após marcação e fixação do suporte tipo *yoke* e da placa de referência

(fonte: foto do autor)

Figura 24 – Vigota posicionada no pórtico para a realização do ensaio



(fonte: foto do autor)

A máquina de ensaio utilizada foi uma prensa hidráulica da MTS, modelo *810 UTM Test System*, com capacidade de aplicação de carga de 25 tf, responsável por aplicar uma força única, gradual e normal à superfície, evitando excentricidades. Cuidou-se também o posicionamento do corpo de prova no equipamento, garantindo a ortogonalidade entre o elemento e a máquina.

Para o carregamento, seguiu-se a recomendação da *NCHRP Report 789* (UNITED STATES OF AMERICA, 2014) para camadas de pavimentos estabilizadas com cimento, aplicando-se uma taxa de  $690 \pm 39$  kPa/min até a ruptura do corpo de prova. Adaptando-se esse carregamento para a geometria dos corpos de prova deste trabalho, obtém-se uma taxa constante de 2,3 kN/min, valor de entrada utilizado no equipamento da MTS.

Durante o carregamento e após a ruptura do corpo de prova (figura 25), os dados são instantaneamente enviados ao sistema computacional do equipamento que extrai a relação de força e deslocamento atuantes ao longo do ensaio. Mediu-se também a distância entre o local de formação da trinca e a extremidade mais próxima da viga, sendo que a ruptura deve ocorrer no terço central da viga para que o corpo de prova não seja descartado.

Figura 25 – Vigota após ruptura por flexão



(fonte: foto do autor)

A resistência à tração na flexão é dada pela equação 3 apresentada a seguir.

$$RTF = \frac{P \times L \times 10^3}{W \times H^2} \quad (3)$$

Onde:

RTF – resistência à tração na flexão, em MPa;

P – força máxima aplicada, em kN;

L – comprimento entre eixos dos cilindros de apoio, em mm;

W – largura média da vigota, em mm;

H – altura da vigota, em mm.

Quanto à deformação na ruptura, essa é determinada a partir da equação 4, que utiliza o deslocamento medido pelos LVDT's no momento em que 95% da carga de ruptura é registrada. Esse nível de carga é recomendado pela Austroads (2010) que, em ensaios realizados, confirma que a variabilidade das deformações a 95% da carga máxima é menor do que quando se utiliza seu valor de pico. Assim, torna-se um parâmetro mais consistente para medir deformações na ruptura.

$$\varepsilon_r = \frac{(108 \times \delta \times H \times 10^6)}{(23 \times L^2)} \quad (4)$$

Onde:

$\varepsilon_r$  – deformação na ruptura, em  $\mu\text{s}$ ;

$\delta$  – deslocamento vertical no centro da viga com 95% da carga de ruptura, em mm;

H – altura da vigota, em mm;

L – comprimento entre eixos dos cilindros de apoio, em mm.

## **6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e são realizados comentários e discussões acerca destes. Além disso, são descritas as análises estatísticas realizadas nos ensaios de comportamento mecânico para fundamentar as discussões apresentadas. Destaca-se que para identificar as misturas estudadas são utilizadas as mesmas nomenclaturas definidas nas tabelas 7 e 10.

### **6.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO LATERÍTICO**

Os resultados encontrados nos ensaios de caracterização do solo laterítico empregado nesta pesquisa, proveniente da rodovia Assis Chateaubriand (SP-425) no Estado de São Paulo, são descritos a seguir. São definidos o peso específico real dos grãos, a granulometria e os limites de consistência do solo, assim como o seu enquadramento na classificação MCT.

#### **6.1.1 Peso específico real do grãos**

O peso específico real dos grãos obtido para o solo laterítico em estudo, calculado a partir da média de oito resultados, foi de 26,84 kN/m<sup>3</sup>.

#### **6.1.2 Limites de consistência**

Os resultados encontrados para os limites de consistência, assim como o índice de plasticidade correspondente, são indicados na tabela 15. Os valores obtidos, segundo Pinto (2006), são típicos de argilas e areais argilosas variegadas de São Paulo, algo esperado visto a origem e as características apresentadas pelo solo nos demais ensaios.

Tabela 15 – Limites de consistência e índice de plasticidade do solo laterítico empregado no estudo

Índice	Teor de umidade (%)
Limite de liquidez	44,3
Limite de plasticidade	31,9
Índice de plasticidade	12,4

(fonte: elaborado pelo autor)

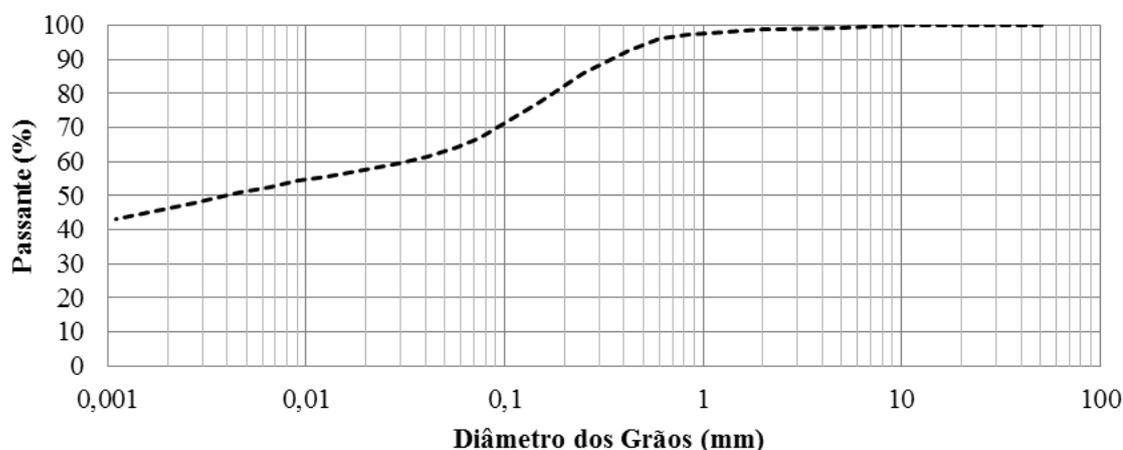
### 6.1.3 Classificação MCT

O solo em estudo foi classificado, a partir dos coeficientes  $c'$  e  $e'$  encontrados (2,4 e 0,654, respectivamente) e da inserção desses no gráfico apresentado na figura 16, como um solo laterítico argiloso (LG') segundo a metodologia MCT, confirmando suas propriedades de natureza laterítica.

### 6.1.4 Análise granulométrica

A figura 26 apresenta a curva granulométrica obtida por sedimentação e peneiramento com emprego de defloculante para o solo laterítico utilizado neste trabalho.

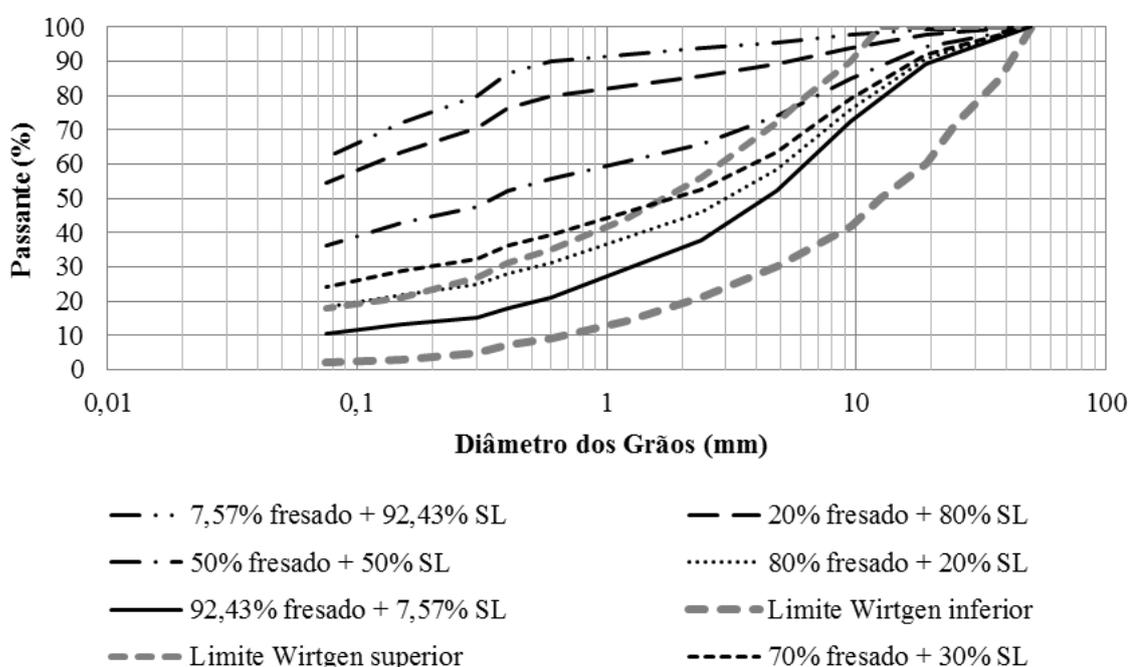
Figura 26 – Curva granulométrica do solo laterítico obtida por sedimentação e peneiramento



(fonte: elaborado pelo autor)

Verificou-se que o solo apresenta uma grande porcentagem de finos, diferente do observado na curva granulométrica mostrada na figura 12 do item 5.1.4.1, obtida apenas por peneiramento e sem emprego de defloculante. Deste modo, foi realizada uma nova estimativa da granulometria das misturas estudadas. As curvas obtidas são apresentadas na figura 27, bem como as faixas granulométricas estipuladas pela Wirtgen (2012). Em tais curvas já consta a adição de 10% de material passante na peneira de abertura de 1,2 mm. Destaca-se que apenas as misturas com 80% ou mais de fresado se enquadraram totalmente na faixa sugerida para reciclagem com cimento.

Figura 27 – Curvas granulométricas das misturas corrigidas e limites definidos pela Wirtgen



(fonte: elaborado pelo autor)

## 6.2 TEOR DE LIGANTE NO FRESADO ALFÁLTICO

A partir da realização do ensaio de determinação do teor de ligante pelo método da queima no forno de ignição, constatou-se que o material fresado empregado apresenta 5,71 % de ligante asfáltico em sua composição, obtido pela média dos teores de duas amostras.

### 6.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os ensaios de RCD foram realizados na sequência sugerida pelo *Minitab*, tomando-se os cuidados necessários com a moldagem, a cura e a realização do próprio ensaio.

É importante salientar que os resultados dos ensaios de RCD com tempo de cura de 28 dias não foram incluídos nesta análise e no modelo de regressão, já que foram realizados apenas com o objetivo de comparação com os resultados obtidos nos ensaios de RTF, para o mesmo tempo de cura. Logo, os resultados incluídos nesta análise foram os obtidos nos ensaios com tempo de cura de 3,7 e 14 dias. Como havia dois resultados para cada amostra, optou-se por utilizar todos na análise, totalizando em 84 dados.

Primeiramente, realizou-se uma análise estatística prévia dos resultados encontrados no ponto central (4-50), já que esses possuem outros valores representativos. Dados considerados muito atípicos foram substituídos pela média dos demais valores, visando-se a obtenção de um coeficiente de variação, equivalente à razão do desvio padrão pela média, inferior a 20% para cada tempo de cura.

Após a análise prévia, os dados foram então fornecidos ao *Minitab*, que gerou um relatório com os resultados estatísticos, contendo o modelo de regressão, a significância (valor-p) dos termos (lineares, quadráticos e interações), além de identificar dados atípicos e os valores ajustados para os mesmos, com base no modelo. O *software* considera atípicos valores que apresentem resíduos padronizados maiores que 2 ou menores que -2 (resíduo padronizado é igual a diferença entre um valor observado e seu valor ajustado dividida por uma estimativa de seu desvio padrão).

A partir da análise dos resultados, excluiu-se os termos considerados não significativos, quando necessário. Além disso, como havia dois resultados para cada amostra, os valores atípicos apontados no relatório foram substituídos pelo segundo resultado da amostra, quando o mesmo era próximo do valor de ajuste indicado pelo *software*. Finalizada essa análise, chegou-se a um modelo de regressão para previsão da resistência à tração por compressão diametral das misturas estudadas e outras semelhantes. A equação 5 representa matematicamente tal modelo em unidades não codificadas.

$$\begin{aligned} \text{RCD} = & 0,236 - 0,00453*fr + 0,1071*ci - 0,0013*tc - 0,01783*ci*ci - 0,002378*tc*tc \\ & + 0,001455*fr*ci + 0,000485*fr*tc + 0,00340*ci*tc \end{aligned} \quad (5)$$

Onde:

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

ci – teor de cimento, em %;

fr – porcentagem de fresado, em %;

tc – tempo de cura, em dias.

Para o modelo de RCD, obteve-se um coeficiente de determinação  $R^2$  de 76%, o que comprova a significância estatística dos resultados. Os coeficientes do modelo de regressão considerando os níveis codificados e seus respectivos valores-p são apresentados na tabela 16.

Tabela 16 - Coeficientes e valores-p do modelo de regressão para RCD

<b>Termo</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Valor-p</b>
<b>Constante</b>	0,5830	0,000
<b>Porcentagem de fresado (%)</b>	0,2295	0,000
<b>Teor de cimento (%)</b>	0,1870	0,000
<b>Tempo de cura (dias)</b>	-0,0211	0,146
<b>Teor de cimento (%) * Teor de cimento (%)</b>	-0,1426	0,000
<b>Tempo de cura (dias) * Tempo de cura (dias)</b>	-0,0719	0,010
<b>Porcentagem de fresado (%) * Teor de cimento (%)</b>	0,1746	0,000
<b>Porcentagem de fresado (%) * Tempo de cura (dias)</b>	0,1132	0,000
<b>Teor de cimento (%) * Tempo de cura (dias)</b>	0,0529	0,050

(fonte: elaborado pelo autor)

O único termo não foi considerado no modelo foi o quadrático da porcentagem de fresado, já que esse apresentou um valor-p de 0,535, muito superior ao nível de significância considerado, de 0,05 (item 4.1.2.2). A partir da tabela 16, observa-se que o termo linear do tempo de cura também não é significativo, com um valor-p de 0,146, porém, devido ao fato de ser uma variável

de entrada e dos efeitos quadráticos e interações terem se mostrado significativos, optou-se por não retirá-lo do modelo.

Considerando-se um tempo de cura igual a 7 dias, período indicado por especificações nacionais, e realizando a substituição na equação 5, obtém-se outro modelo, apresentado na equação 6.

$$\text{RCD} = 0,1104 - 0,00114*fr + 0,1309*ci - 0,01783*ci*ci + 0,001455*fr*ci \quad (6)$$

Onde:

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

ci – teor de cimento, em %;

fr – porcentagem de fresado, em %.

Na tabela 17 são apresentados os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, os quais foram obtidos a partir da média de doze amostras para os pontos centrais (4-50) e de dois valores para as demais misturas estudadas.

Tabela 17 – Resultados de RCD das misturas analisadas

Mistura	RCD		
	3 dias	7 dias	14 dias
SL 1,17-50	0,22	0,17	0,10
SL 2-20	0,34	0,26	0,18
SL 2-80	0,44	0,52	0,47
SL 4-7,57	0,38	0,42	0,26
SL 4-50	0,56	0,64	0,42
SL 4-92,43	0,48	0,72	0,85
SL 6-20	0,37	0,24	0,21
SL 6-80	0,71	0,81	0,98
SL 6,83-50	0,57	0,63	0,70

(fonte: elaborado pelo autor)

A partir da tabela 17, observa-se que os resultados obtidos variaram entre 0,10 MPa (SL 1,17-50 – 14 dias) e 0,98 MPa (SL 6-80 – 14 dias). Destaca-se que apenas as misturas com baixos teores de cimento e/ou baixas porcentagens de fresado (SL 1,17-50, SL 2-20, SL 4-7,57 e SL 6-20) apresentaram valores de RCD inferiores ou próximos a 0,25 MPa, que é o valor proposto pelo DNIT (2013a) e DEINFRA-SC (2016) como RCD mínimo aos 7 dias de cura.

O intervalo obtido, de variação dos resultados de RCD, é próximo aos valores encontrados por Fedrigo (2015) e Ely (2014), no estudo de misturas recicladas com BGS como material de base, e por Kleinert (2016), no estudo de misturas com materiais de bases cimentadas (BGTC e solo-cimento), conforme apresentado no item 3.3.5. Entretanto, ressalta-se que o procedimento de cura “seca”, utilizada neste trabalho, foi bem distinto das pesquisas citadas, nas quais foi empregada cura úmida. Tal modificação, muito provavelmente, pode ter interferido nos resultados.

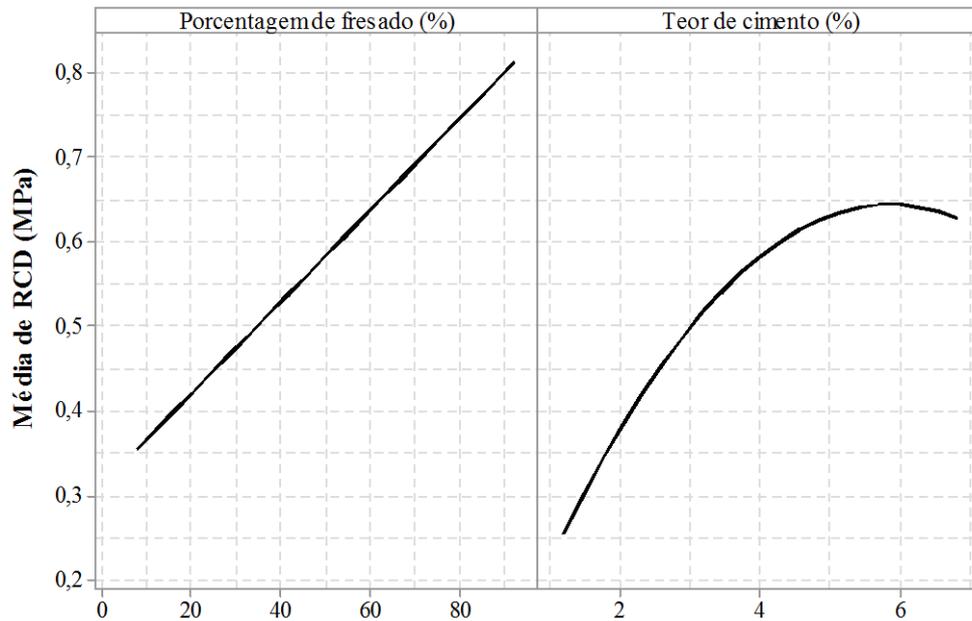
Por meio das equações fornecidas (modelo de regressão) pelo *Minitab*, é possível determinar o valor de qualquer variável para se alcançar uma determinada resistência, nos limites de validade do modelo. Do mesmo modo, pode-se também determinar a resistência a partir de níveis das variáveis independentes. Deve-se observar, contudo, que foram considerados os ensaios realizados em corpos de prova curados por 3, 7 e 14 dias e que as análises aqui feitas são válidas apenas nesses tempos.

Além disto, o *software* disponibiliza diversas opções de gráficos que facilitam a interpretação dos resultados. Na figura 28 são mostrados os efeitos das variáveis independentes (porcentagem de fresado e teor de cimento) na resistência à tração por compressão diametral. O tempo de cura não demonstrou importância significativa no modelo, não sendo apresentado.

A partir dos gráficos, nota-se que a RCD aumenta tanto com a elevação do teor de cimento quanto com a elevação da porcentagem de fresado, sendo que as duas variáveis apresentaram grande influência na determinação da RCD.

O comportamento apresentado, de elevação da resistência com o aumento da porcentagem de fresado asfáltico, é um diferencial quando comparado com outros estudos envolvendo misturas recicladas, nos quais a presença do material fresado afetou negativamente o comportamento mecânico das mesmas.

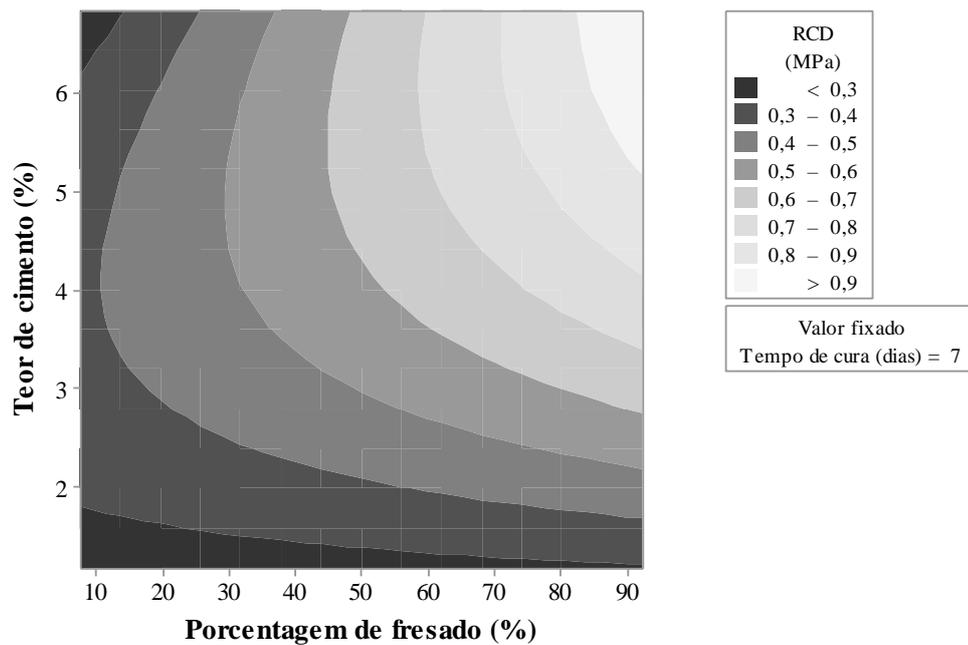
Figura 28 – Gráfico de efeitos principais para RCD: avaliação da influência da porcentagem de fresado e do teor de cimento



(fonte: elaborado pelo autor)

Outra maneira interessante de se observar o efeito de duas variáveis é através de gráficos de contorno, como o apresentado na figura 29, na qual se variam o teor de cimento e a porcentagem de fresado, para misturas ensaiadas aos 7 dias de cura.

Figura 29 – Gráfico de contorno de RCD com 7 dias de cura



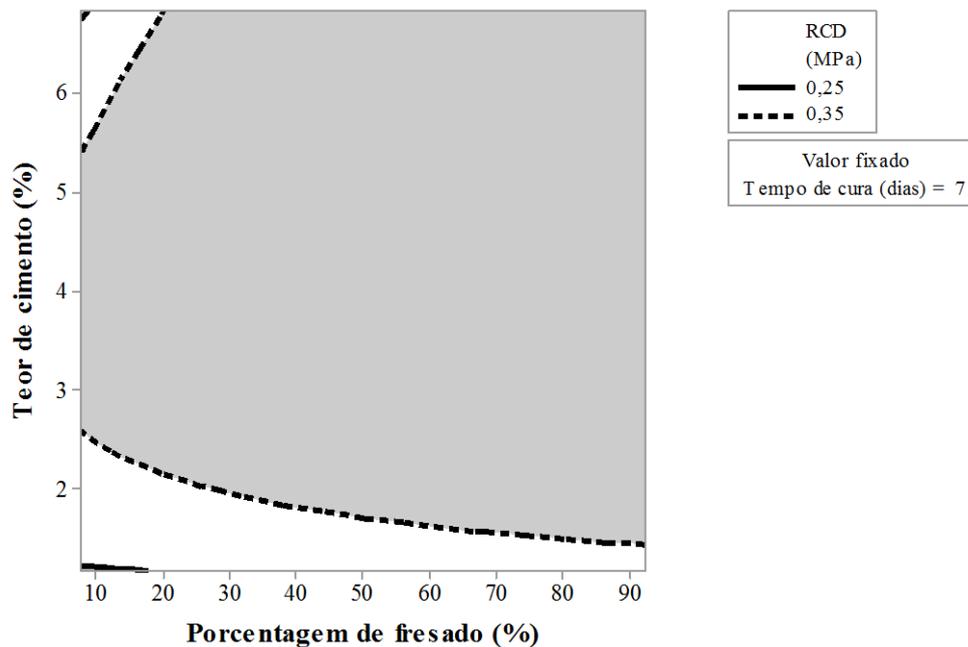
(fonte: elaborado pelo autor)

A partir desse gráfico, pode-se relacionar uma determinada porcentagem de fresado com um dado teor de cimento e encontrar a resistência aproximada que a mistura pode atingir. Ressalta-se que esses gráficos de contorno podem ser gerados pelo *Minitab* para qualquer tempo de cura entre 3 e 14 dias, considerados na análise, e que esses apresentaram a mesma tendência apresentada com 7 dias de cura.

Outra ferramenta muito útil que o *Minitab* oferece é a possibilidade de definir um intervalo de resultados com o objetivo de analisar quais valores das variáveis podem ser utilizados para alcançar um valor dentro desse intervalo proposto.

Como exemplo, optou-se por aplicar o intervalo de valores admissíveis de RCD definido pela especificação de serviço do DNIT (2013a), que é de 0,25 a 0,35 MPa aos 7 dias de cura. Na figura 30 encontra-se o resultado obtido.

Figura 30 – Gráfico de contorno de RCD considerando um intervalo específico de resistência para as misturas



(fonte: elaborado pelo autor)

Em síntese, observa-se que para se obter valores entre 0,25 e 0,35 MPa, independente da porcentagem de fresado empregada, o teor de cimento terá que ser inferior a aproximadamente 2%, o que pode comprometer o desempenho da camada, em termos de durabilidade. Misturas contendo teor de cimento próximo a 6% também estão dentro do intervalo, mas apenas se

utilizando uma baixa porcentagem de material fresado, de aproximadamente 20%, sendo viáveis apenas em pavimentos com camadas delgadas de revestimento.

Conclui-se, então, que o intervalo de resistência sugerido pelo DNIT (2013a) é muito restrito e não se recomenda sua aplicação para reciclagem de pavimentos com base de solo laterítico, já que reduz consideravelmente a gama de misturas que podem ser empregadas, sendo mais viável o critério definido pelo DEINFRA-SC (2016), que apenas define uma RCD mínima de 0,25 MPa.

Cabe lembrar, entretanto, que ambas as especificações sugerem uma porcentagem máxima de 50% de fresado asfáltico, e o DEINFRA-SC (2016) ainda define um teor máximo de cimento de 3%, limitando ainda mais a variedade de misturas possíveis.

#### 6.4 MÓDULO DE RESILIÊNCIA DIAMETRAL

Os ensaios de MRD também foram realizados na sequência determinada pelo *Minitab*, tendo-se os cuidados necessários com a moldagem, a cura e a execução dos experimentos. Para a realização da análise estatística, optou-se por utilizar os valores correspondentes às seis leituras representativas de cada amostra, totalizando 252 valores analisados.

Assim como realizado nos resultados de RCD, primeiramente, foi feita uma análise estatística prévia dos resultados de MRD encontrados no ponto central (4-50), já que esses possuem outros valores representativos. Dados considerados muito atípicos foram substituídos pela média dos demais valores, objetivando-se atingir um coeficiente de variação inferior a 20% para cada tempo de cura.

Os dados foram então fornecidos ao *Minitab*, que gerou um relatório com os resultados estatísticos, contendo o modelo de regressão e a significância (valor-p) dos termos (lineares, quadráticos e interações). Após a exclusão dos termos considerados não significativos, chegou-se a um modelo de regressão para previsão do módulo de resiliência diametral das misturas estudadas. A equação 7 representa matematicamente tal modelo em unidades não codificadas.

$$\text{MRD} = 8802 - 126,8*fr - 408*ci - 664*tc + 1,107*fr*fr + 16,49*fr*ci + 4,76*fr*tc + 72,5*ci*tc \quad (7)$$

Onde:

MRD – módulo de resiliência diametral, em MPa;

ci – teor de cimento, em %;

fr – porcentagem de fresado, em %;

tc – tempo de cura, em dias.

Tal modelo alcançou um R<sup>2</sup> de 62%, resultado não muito significativo, mas considerado aceitável em decorrência do tamanho da amostra e da variabilidade de dados encontrados nesse tipo de ensaio com esse material. Além disso, optou-se por não retirar os valores atípicos apontados pelo *software* do modelo, o que interfere no ajuste do mesmo.

Na tabela 18 são apresentados os coeficientes do modelo de regressão em nível codificado, assim como o valor-p referente a cada efeito analisado.

Tabela 18 - Coeficientes e valores-p do modelo de regressão para MRD

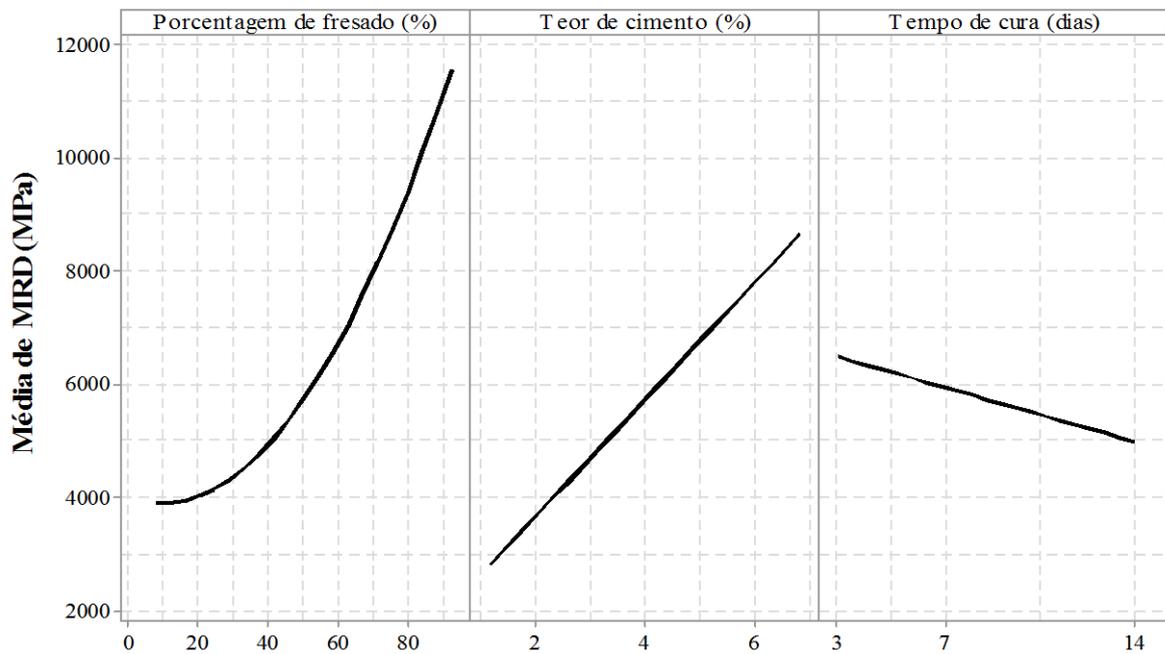
<b>Termo</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Valor-p</b>
<b>Constante</b>	5739	0,000
<b>Porcentagem de fresado (%)</b>	3831	0,000
<b>Teor de cimento (%)</b>	2920	0,000
<b>Tempo de cura (dias)</b>	-748	0,000
<b>Porcentagem de fresado (%) * Porcentagem de fresado (%)</b>	1993	0,000
<b>Porcentagem de fresado (%) * Teor de cimento (%)</b>	1978	0,000
<b>Porcentagem de fresado (%) * Tempo de cura (dias)</b>	1110	0,001
<b>Teor de cimento (%) * Tempo de cura (dias)</b>	1128	0,001

(fonte: elaborado pelo autor)

Os termos não considerados no modelo foram os efeitos quadráticos do teor de cimento e do tempo de cura, já que esses apresentaram valor-p de 0,451 e 0,227, respectivamente, muito superiores ao nível de significância considerado, de 0,05 (item 4.1.2.2).

Na figura 31 são apresentados os efeitos das variáveis independentes (porcentagem de fresado, teor de cimento e tempo de cura) no módulo de resiliência diametral.

Figura 31 – Gráfico de efeitos principais para MRD: avaliação da influência da porcentagem de fresado e do teor de cimento



(fonte: elaborado pelo autor)

A partir dos gráficos, nota-se que a rigidez, assim como observado para a resistência, aumenta tanto com a elevação do teor de cimento quanto com a elevação da porcentagem de fresado, sendo que essas duas variáveis também apresentam grande influência na determinação do MRD, enquanto o tempo de cura demonstra efeito menos relevante.

Para fins de quantificação, os resultados para o ensaio de módulo de resiliência estão expostos na tabela 19. Ressalta-se que os valores correspondem à média das seis leituras para cada CP ensaiado, com exceção dos pontos centrais, os quais correspondem à média de seis CPs.

Tabela 19 – Resultados de MRD das misturas analisadas

Mistura	MRD		
	3 dias	7 dias	14 dias
SL 1,17-50	3105	2670	860
SL 2-20	2946	4036	2928
SL 2-80	7285	5996	11118
SL 4-7,57	6647	5390	1725
SL 4-50	7272	7584	2292
SL 4-92,43	8343	10893	10399
SL 6-20	2577	3015	8294
SL 6-80	13233	10084	16927
SL 6,83-50	8884	6936	10614

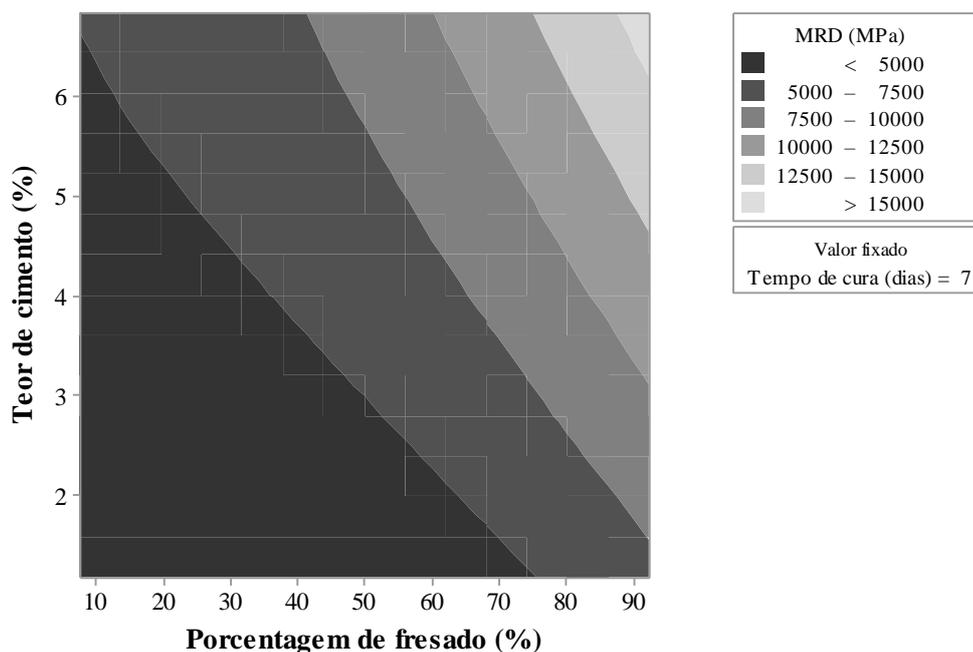
(fonte: elaborado pelo autor)

Na Tabela 19, observa-se que os resultados obtidos apresentaram uma amplitude de variação bastante elevada, com módulos de resiliência diametral entre 860 MPa (SL 1,17-50 – 14 dias) e 16.927 MPa (SL 6-80 – 14 dias).

Assim como realizado para os resultados de RCD, optou-se por expressar o efeito das variáveis nos valores de MRD a partir do gráfico de contorno, apresentado na figura 32, na qual se variam o teor de cimento e a porcentagem de fresado, para misturas ensaiadas após 7 dias de cura.

A partir desse gráfico, pode-se relacionar uma determinada porcentagem de fresado com um dado teor de cimento e encontrar o módulo de resiliência aproximado que a mistura pode atingir. Destaca-se novamente que esses gráficos de contorno podem ser gerados pelo *Minitab* para qualquer tempo de cura entre 3 e 14 dias, considerados na análise, e que os mesmos apresentaram a mesma tendência apresentada com 7 dias de cura.

Figura 32 – Gráfico de contorno de MRD com 7 dias de cura



(fonte: elaborado pelo autor)

## 6.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Neste item são apresentados os resultados gerados pelos ensaios de resistência à tração na flexão e, também, uma análise estatísticas destes dados. Um resumo dos resultados é apresentado na tabela 20, contendo os valores obtidos de RTF e de deformação na ruptura (95%) e suas respectivas médias e coeficientes de variação.

A partir da tabela 20, observa-se que as médias dos resultados de RTF variaram entre 0,28 MPa (SL 2-20) e 1,43 MPa (SL 6-70), apresentando coeficientes de variação aceitáveis. Já as médias de deformação na ruptura (95%) variaram entre 273  $\mu\epsilon$  (SL 4-20) e 1059  $\mu\epsilon$  (SL 2-70), mas apresentaram coeficientes de variação mais elevados, chegando a atingir 80% na mistura SL 2-20.

O intervalo de valores de RTF encontrado é próximo aos intervalos obtidos por López (2016) e D’Avila (2015) em estudos de misturas recicladas com cimento, porém contendo BGS e BGTC como materiais de base, respectivamente. Porém, destaca-se novamente que neste trabalho foi adotada uma cura “seca”, procedimento diferente do empregado nessas duas

pesquisas, onde a cura dos corpos de prova foi realizada em câmara úmida, podendo exercer grande influência nos resultados.

Tabela 20 – Resultados dos ensaios de RTF

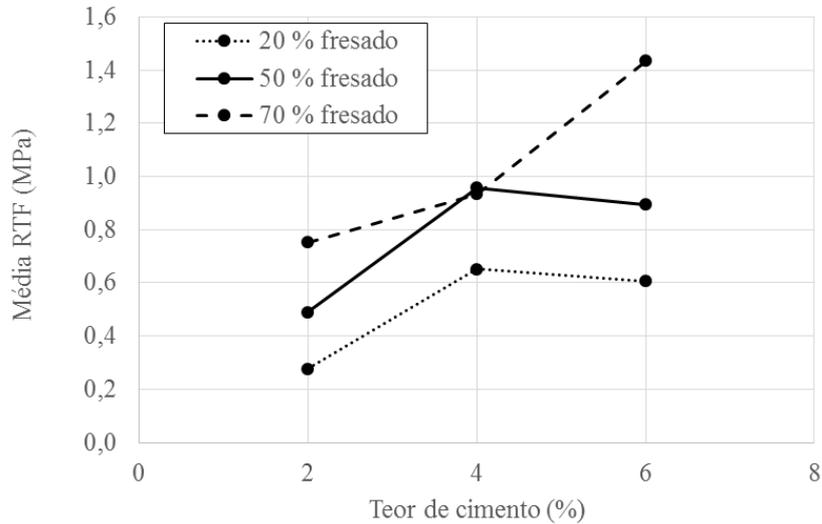
Mistura	CP	RTF (MPa)	Média (MPa)	CV (%)	Deformação na ruptura 95% ( $\mu\epsilon$ )	Média ( $\mu\epsilon$ )	CV (%)
<b>2-20</b>	1	0,312	0,28	18	797	508	80
	2*	-			-		
	3	0,243			219		
<b>2-50</b>	1	0,452	0,49	7	478	467	6
	2	0,516			485		
	3	0,501			437		
<b>2-70</b>	1*	-	0,75	27	-	1059	45
	2	0,610			724		
	3	0,894			1394		
<b>4-20</b>	1*	-	0,65	10	-	273	18
	2	0,606			238		
	3	0,697			307		
<b>4-50</b>	1	0,992	0,96	5	589	519	19
	2	0,921			450		
	3*	-			-		
<b>4-70</b>	1	0,919	0,93	10	646	596	16
	2	0,853			486		
	3	1,031			657		
<b>6-20</b>	1	0,658	0,61	12	604	463	43
	2	0,556			321		
	3*	-			-		
<b>6-50</b>	1	1,013	0,90	12	468	328	48
	2	0,874			156		
	3	0,799			360		
<b>6-70</b>	1	1,435	1,43	-	557	557	-
	2*	-			-		
	3*	-			-		

\*Corpos de prova que apresentaram problemas na moldagem ou na aquisição de dados durante o ensaio.

(fonte: elaborado pelo autor)

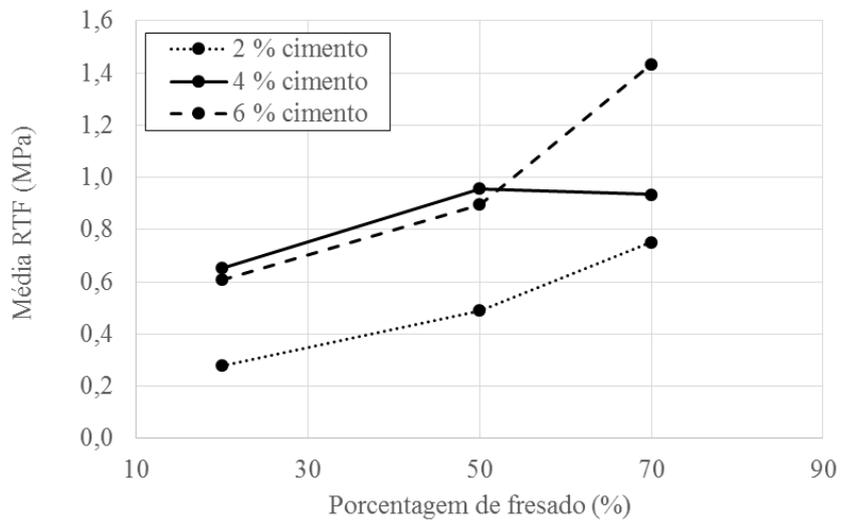
Os resultados dos ensaios foram cruzados com as variáveis de dosagem com o intuito de verificar a influência de cada material na mistura reciclada. As figuras 33 a 36 apresentam essas relações por meio de gráficos.

Figura 33 – Relação entre o teor de cimento e a resistência à tração na flexão



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 34 – Relação entre a porcentagem de fresado e a resistência à tração na flexão

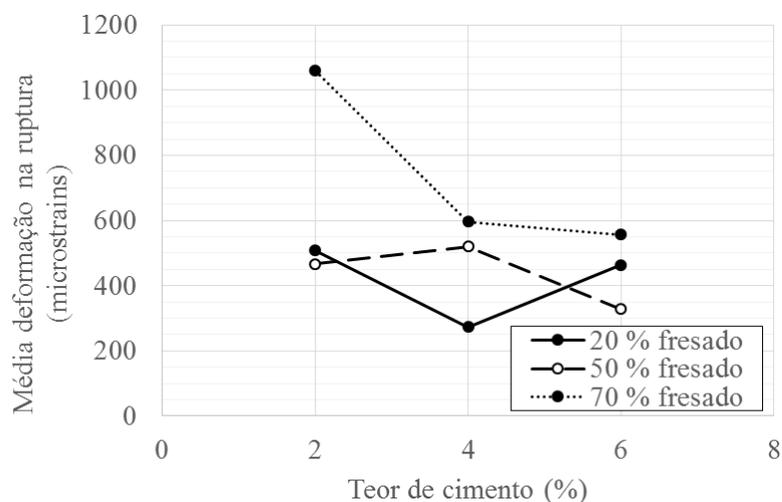


(fonte: elaborado pelo autor)

A partir dos gráficos das figuras 33 e 34, observa-se que, assim como verificado nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, os resultados de resistência à tração na flexão apresentaram uma tendência de aumento tanto com o acréscimo do teor de cimento quanto com

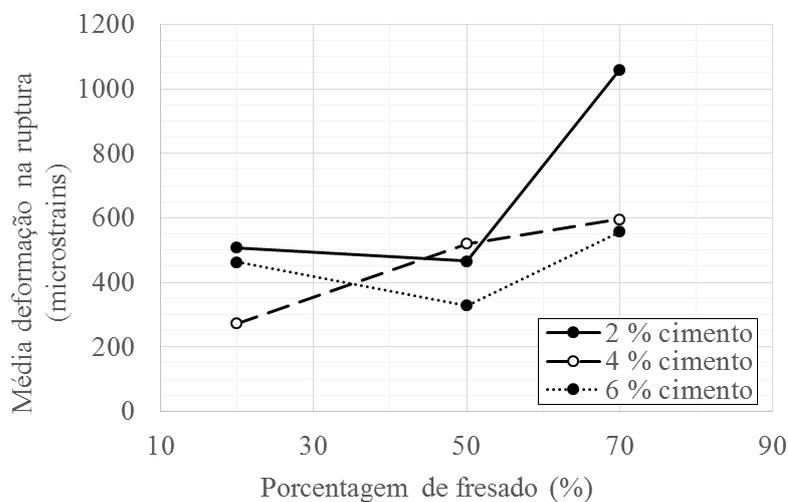
a elevação da porcentagem de fresado. Esse comportamento foi também observado para a rigidez das misturas, nos ensaios de MRD.

Figura 35 – Relação entre o teor de cimento e a deformação na ruptura



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 36 – Relação entre a porcentagem de fresado e a deformação na ruptura



(fonte: elaborado pelo autor)

Os valores de deformação na ruptura, por outro lado, apresentaram um comportamento bastante variado, mas com uma tendência de diminuição das deformações com o acréscimo do teor de cimento (figura 35), fato justificável pelo aumento da rigidez das misturas. Já para o material fresado (figura 36) observou-se o inverso, ou seja, uma propensão de elevação das deformações na ruptura com o acréscimo das porcentagens de fresado nas misturas estudadas.

## 6.6 CORRELAÇÃO ENTRE RCD E RTF

Com o objetivo de comparar os resultados de resistência à tração obtidos na flexão e por compressão diametral, realizou-se uma relação entre os valores de RTF e RCD aos 28 dias de cura, verificando-se a possibilidade de uma correlação significativa. Como esses ensaios foram realizados a partir de matrizes experimentais distintas, as misturas ensaiadas possuíam composições diferentes. Deste modo, parte dos valores de RCD utilizados na comparação foram obtidos por meio de um modelo de regressão gerado pelo *Minitab*.

Na tabela 21 são apresentados os resultados de RCD aos 28 dias de cura, os quais foram obtidos a partir da média de seis amostras para o ponto central (4-50) e de apenas uma amostra para as demais misturas. O modelo de regressão, gerado a partir desses valores, apresentou um  $R^2$  significativo de 77 % e é definido pela equação 8, em unidades não codificadas.

Tabela 21 – Resultados de RCD aos 28 dias de cura das misturas analisadas

Mistura	RCD
	28 dias
SL 1,17-50	0,05
SL 2-20	0,16
SL 2-80	0,58
SL 4-7,57	0,42
SL 4-50	0,50
SL 4-92,43	0,86
SL 6-20	0,22
SL 6-80	0,84
SL 6,83-50	0,84

(fonte: elaborado pelo autor)

$$\text{RCD}_{28 \text{ dias}} = -0,211 - 0,00694*fr + 0,0904*ci \quad (8)$$

Onde:

$\text{RCD}_{28 \text{ dias}}$  – resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de cura, em MPa;

ci – teor de cimento, em %;

fr – porcentagem de fresado, em %.

A partir da substituição, na equação 8, com os teores de cimento e as porcentagens de fresado presentes nas misturas ensaiadas à RTF, chegou-se aos valores apresentados na tabela 22.

Tabela 22 – Comparação entre os resultados de RCD e RTF

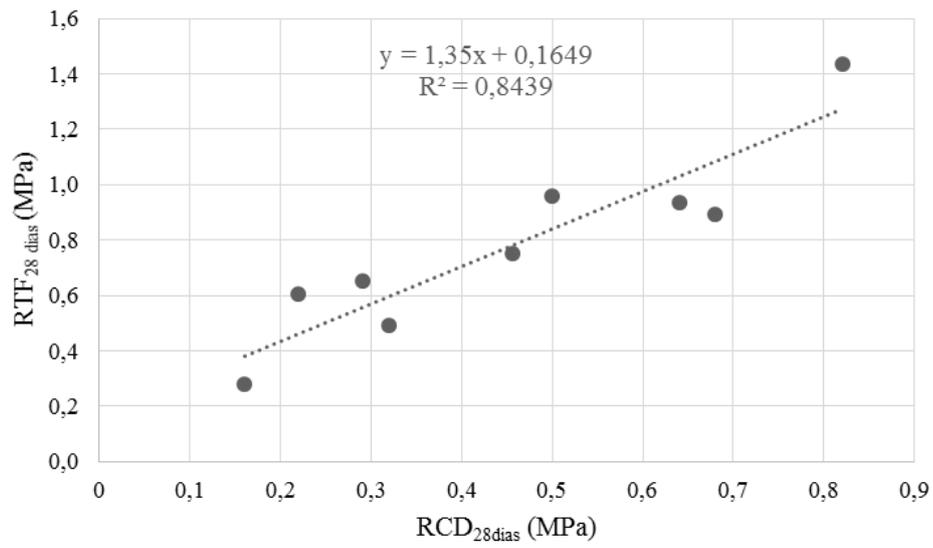
Mistura	RCD	RTF
	28 dias	28 dias
SL 2-20	0,16	0,28
SL 2-50	0,32*	0,49
SL 2-70	0,46*	0,75
SL 4-20	0,29*	0,65
SL 4-50	0,50	0,96
SL 4-70	0,64*	0,93
SL 6-20	0,22	0,61
SL 6-50	0,68*	0,90
SL 6-70	0,82*	1,43

\*Valores obtidos a partir do modelo de regressão.

(fonte: elaborado pelo autor)

Por fim, a correlação entre os resultados de RCD e RTF aos 28 dias de cura é apresentada no gráfico da figura 37, assim como a respectiva linha de tendência. Conforme o esperado, observa-se que a correlação entre as resistências à tração obtidas pelos dois métodos é significativa, alcançando um coeficiente de determinação  $R^2$  igual a 84%.

Figura 37 – Correlação entre RTF e RCD aos 28 dias de cura



(fonte: elaborado pelo autor)

## 7 CONCLUSÕES

Para a descrição das conclusões, optou-se pelo desenvolvimento individual das observações acerca dos resultados obtidos para cada ensaio, considerando-se as variáveis investigadas e as análises estatísticas realizadas para, em seguida, sintetizar as considerações finais quanto ao comportamento mecânico das misturas estudadas.

Em relação à resistência à tração por compressão diametral:

- a) Os valores de RCD, obtidos aos 3, 7 e 14 dias de cura, foram bastante elevados, variando entre 0,10 MPa e 0,98 MPa. A maioria dos resultados foram superiores a 0,25 MPa, que é o valor proposto pelo DNIT (2013a) e pelo DEINFRA-SC (2016) para a RCD mínima aos 7 dias de cura. Apenas misturas com baixos teores de cimento e/ou baixas porcentagens de fresado (SL 1,17-50, SL 2-20 e SL 6-20) apresentaram resistências inferiores a esse valor.
- b) O intervalo de valores de RCD encontrado é próximo aos intervalos obtidos por Fedrigo (2015), Ely (2014) e Kleinert (2016), em estudos de misturas recicladas com cimento, porém com utilização de outros materiais de base. No entanto, destaca-se que o procedimento de cura “seca”, utilizado neste trabalho, foi bem distinto das pesquisas citadas, nas quais foi empregada cura úmida. Tal modificação, muito provavelmente, deve ter interferido nos resultados, já que a cura úmida representa a pior situação que pode ser encontrada em campo.
- c) O modelo de regressão gerado apresentou um coeficiente de determinação  $R^2$  de 76%, comprovando a significância estatística dos resultados. A resistência apresentou aumento tanto com o acréscimo do teor de cimento quanto com a elevação da porcentagem de fresado, sendo que essas duas variáveis apresentaram grande influência na determinação da RCD, enquanto o tempo de cura não demonstrou importância significativa no modelo.

Quanto ao módulo de resiliência diametral:

- a) Obteve-se um intervalo de variação do módulo de resiliência bastante considerável, com valores de 860 a 16.927 MPa. Os valores superiores encontrados indicam que as misturas, principalmente aquelas com altos teores de cimento e/ou altas porcentagens de fresado, podem alcançar níveis de rigidez bastante elevados.
- b) O modelo de regressão apresentou um coeficiente de determinação  $R^2$  de 62%, resultado não muito significativo, mas considerado aceitável em decorrência do tamanho da amostra e da variabilidade dos materiais empregados. A rigidez, assim como observado para a RCD, aumentou tanto com a elevação do teor de cimento quanto com o acréscimo da porcentagem de fresado, sendo que as duas

variáveis também apresentam grande influência na determinação do MRD. O tempo de cura, por outro lado, demonstrou efeito pouco relevante.

Com relação à resistência à tração na flexão e à deformação na ruptura:

- a) Os resultados de RTF ficaram no intervalo de 0,28 a 1,43 MPa e apresentaram coeficientes de variação aceitáveis, enquanto que a deformação na ruptura apresentou grande oscilação, com valores situados numa faixa entre 273 e 1.059  $\mu\epsilon$  e apresentando elevados coeficientes de variação.
- b) O intervalo de valores de RTF encontrado é próximo aos intervalos obtidos por López (2016) e D'Avila (2015) em estudos de misturas recicladas com cimento, porém considerando bases de BGS e BGTC, respectivamente. Entretanto, salienta-se novamente que neste trabalho foi adotada uma cura “seca”, procedimento bem distinto dessas duas pesquisas, nas quais a cura dos corpos de prova foi realizada em câmara úmida, podendo exercer grande influência nos resultados.
- c) Como esperado, a resistência à tração obtida por flexão teve comportamento próximo, quanto à influência do teor de cimento e da porcentagem de fresado, da resistência obtida por compressão diametral, observando-se uma correlação bastante significativa entre os resultados, com um coeficiente de determinação  $R^2$  igual a 84%.

Em síntese, as misturas estudadas apresentaram resistências à tração satisfatórias, não apenas levando em consideração os valores mínimos adotados pela normatização nacional, mas também quando comparadas com os resultados obtidos nos demais estudos da pesquisa global, nos quais foram empregados outros materiais de base (BGS, BGTC e solo-cimento) e apresentaram valores próximos. Quanto aos módulos de resiliência, o amplo intervalo de resultados obtidos demonstrou que as misturas podem gerar camadas recicladas com diferentes níveis de rigidez.

No entanto, salienta-se que a presença do solo laterítico torna as misturas recicladas, mesmo após compactadas, bastante suscetíveis à ação da umidade, ocorrendo erosão e desagregação dos materiais envolvidos e conseqüente diminuição da resistência, fato pelo qual não foi possível a realização de uma cura úmida dos corpos de prova neste trabalho. Deste modo, a reciclagem com cimento em pavimentos com base de solo laterítico deve abranger um estudo mais minucioso quanto aos efeitos da água no comportamento da camada reciclada e possíveis soluções para esse problema.

Quanto ao efeito das variáveis nos parâmetros mecânicos das misturas estudadas, a partir das análises estatísticas inferiu-se que tanto o teor de cimento quanto a porcentagem de fresado

regem fortemente o comportamento (resistência e rigidez) das camadas resultantes. O tempo de cura, por outro lado, não demonstrou influência relevante nos parâmetros. Conforme esperado, verificou-se que maiores teores de cimento proporcionam uma maior resistência e rigidez às camadas, porém, observou-se que o fresado asfáltico também propiciou esse efeito.

Esse comportamento evidenciado, de elevação da resistência e da rigidez com a adição do material de fresado, não era esperado, já que o fresado asfáltico pode afetar o arranjo dos grãos e a compactabilidade das misturas, como já verificado nos estudos anteriores para os demais materiais de base (BGS, BGTC e solo-cimento). Nesses, o fresado asfáltico demonstrou influenciar negativamente os parâmetros avaliados.

Esse contraste pode estar relacionado com a granulometria das misturas, visto que, após uma análise granulométrica mais apurada por meio de ensaios de sedimentação com emprego de defloculante, observou-se que a grande parcela de finos no solo laterítico torna as misturas com maiores porcentagens de solo mal graduadas. Apenas as misturas com 80% ou mais de fresado se enquadraram totalmente na faixa sugerida para reciclagem com cimento e essas apresentaram elevados valores de resistência e rigidez.

Logo, salienta-se a importância, no processo de dosagem de misturas recicladas contendo solo laterítico, da realização de uma análise granulométrica completa do material, por meio de ensaios de peneiramento e também de sedimentação com emprego de defloculante, com o intuito de garantir uma composição bem graduada.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6307-16**: Standard Test Method for Asphalt Content of Asphalt Mixture by Ignition Method. West Conshohocken, PA, 2016.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION. United States of America. Department of Transportation. Federal Highway Administration. **Basic asphalt recycling manual**. [Annapolis], 2001.

AUSTROADS. **Mix design for stabilized pavement materials**. Sydney, 2002. AP-T16/02.

\_\_\_\_\_. **Fatigue performance of cemented materials under accelerated loading**: influence of vertical loading on the performance of unbound and cemented materials. Sydney, 2008. AP-T102/08.

\_\_\_\_\_. **Cost effective structural treatments for rural highways**: cemented materials. Sydney, 2010. AP-T168/10.

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

BERNUCCI, L. L. B. **Expansão e contração de solos tropicais compactados e suas aplicações às obras viárias**: classificação de solos tropicais com base na expansão e contração. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica**: Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRÁS: ABEDA, 2008.

BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3. ed. rev. e atual. São Paulo: Exceção, 2007.

BUTTON, S. T. Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados. 2016. **Apostila da disciplina** – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CERATTI, J. A. P. **Estudo do comportamento à fadiga de solos estabilizados com cimento para utilização em pavimentos**. 1991. 314 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2016**. Brasília, 2016. Relatório Gerencial disponível em: <[http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20\(2016\)%20-%20LOW.pdf](http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20(2016)%20-%20LOW.pdf)>. Acesso em: 04 nov. 2016.

D'AVILA, V. E. **Reciclagem de pavimentos com adição de cimento: comportamento à flexão de misturas contendo BGTC e fresado asfáltico**. 2015. 82 p. Trabalho de diplomação (Engenharia Civil) – UFRGS, Porto Alegre.

DELLABIANCA, L. M. A. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos**. 2004. 110 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – UnB, Brasília.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **ET-DE-P00/035**: reciclagem de pavimento asfáltico *in situ* com cimento e brita. São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **DER-PR ES-P 33/05**: pavimentação: reciclagem de pavimento *in situ* com adição de cimento. Curitiba, 2005.

DEPARTAMENTO ESTADUAL DE INFRAESTRUTURA DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **DEINFRA-SC ES-P-09/16**: pavimentação: reciclagem profunda de pavimentos. Florianópolis, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 051/94**: solos – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 093/94**: solos – determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 256/94**: solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 258/94**: solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 259/96**: classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 083/98**: agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.

**Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006.

Disponível em:

<[http://www1.dnit.gov.br/ipr\\_new/..%5Carquivos\\_internet%5Cipr%5Cipr\\_new%5Cmanuais%5CManual\\_de\\_Restauracao.pdf](http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/..%5Carquivos_internet%5Cipr%5Cipr_new%5Cmanuais%5CManual_de_Restauracao.pdf)>. Acesso em: 06 out. 2016.

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

\_\_\_\_\_. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**: DNIT 135/2010 – ME. Rio de Janeiro, 6 p. 2010b.

\_\_\_\_\_. **Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos “in situ” com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço: DNIT 167/2013 – ES.** Rio de Janeiro, 11 p. 2013a.

\_\_\_\_\_. **Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio: DNIT 164/2013 – ME.** Rio de Janeiro, 7 p. 2013b.

ELY, V. **Influência da energia de compactação na resistência e na rigidez de mistura reciclada com cimento e com elevado teor de fresado.** 2014. 57 p. Trabalho de diplomação (Engenharia Civil) – UFRGS, Porto Alegre.

FEDRIGO, W. **Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland: definição das bases para um método de dosagem.** 2015. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES. **Reciclado de firmes in situ con cemento.** Madrid, 2013. Guía técnica.

ISOLA, M. *et al.* Evaluation of cement treated mixtures with high percentage of reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, Vol. 48, p. 238-247, 2013.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Concrete Library os JSCE n. 3 – Part III-2 – JSCE-SF4: method of tests for flexural strenght and flexural toughness os steel fiber reinforced concrete.** [S. l.], 1984. p. 58-60.

JASIENSKI, A.; RENS, L. *In situ* recycling with cement: the Belgian experience . In: SEMINAR ON ROAD PAVEMENT RECYCLING –**Proceedings...** Polônia, 7 p. 2002.

KLEINERT, T. R. **Reciclagem de pavimentos semirrígidos com adição de cimento: contribuição ao desenvolvimento de um método de dosagem.** 2016. 177p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

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

MINGUELA, J. D. **El estudio del comportamiento de los firmes reciclados in situ con cemento.** 2011. 572 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – UBU, Burgos.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D.F. **Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, 1981, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: COPPE/CNPq/ABMS, 1981.

OLIVEIRA, P. C. A. **Contribuição ao estudo da técnica de reciclagem profunda na recuperação de pavimentos flexíveis.** 2003. 177 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – UNICAMP, Campinas.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. 1991. 478 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 2. ed. Rio de Janeiro: Copiarte, 2002.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Guide to full-depth reclamation (FDR) with cement**. Skokie, 2005.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **The road recycled: full-depth reclamation with cement**. 2008.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Design of full-depth reclamation with Portland cement (FDR-PC) pavements. In: 2010 ANNUAL CONFERENCE OF THE TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA – **Anais...** Halifax, 2010. 12 p.

RAMOS, M. L. **Fatores que afetam a resistência à compressão simples (RCS) de misturas de fresado asfáltico, solo laterítico e cimento Portland**. 2016. 59 p. Trabalho de diplomação (Engenharia Civil) – UFRGS, Porto Alegre.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. S. Projeto de experimentos. 2014. **Série Monográfica Qualidade** – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFRGS, Porto Alegre

SENÇO, W. de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2001. v. 1.

VILLIBOR, D. F. *et al.* **Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas**. 2. ed. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI J. S. **Pavimentos econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos**. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.

WIRTGEN. **Reciclagem a frio: tecnologia de reciclagem a frio** Wirtgen. Windhagen, Alemanha, 2012.

WIRTGEN GmbH. **Manual Wirtgen de Reciclagem a Frio**. Windhagen, Alemanha, 1998.