

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

**Matheus Lutz Ramos**

**FATORES QUE AFETAM A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO  
SIMPLES (RCS) DE MISTURAS DE FRESADO ASFÁLTICO,  
SOLO LATERÍTICO E CIMENTO PORTLAND**

Avaliador:
Defesa: dia __/__/2016 às _____ horas
Local: _____
<b>Anotações com sugestões para qualificar o trabalho são bem-vindas. O aluno fará as correções e lhe passará a versão final do trabalho, se for de seu interesse.</b>

Porto Alegre  
Junho de 2016

**MATHEUS LUTZ RAMOS**

**FATORES QUE AFETAM A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO  
SIMPLES DE MISTURA DE FRESADO ASFÁLTICO, SOLO  
LATERÍTICO E CIMENTO PORTLAND**

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**

Porto Alegre

Junho de 2016

**MATHEUS LUTZ RAMOS**

**FATORES QUE AFETAM A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO  
SIMPLES DE MISTURA DE FRESADO ASFÁLTICO, SOLO  
LATERÍTICO E CIMENTO PORTLAND**

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/a Professor/a Orientador/a e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, junho de 2016

Prof. Washington Peres Núñez  
D. Sc pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)  
Orientador

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)**  
DSc.pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

**Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)**  
DSc.pela Coordenadoria de Programas de Pós Graduação em Engenharia na  
Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ)

**Lucas Delongui (UFSM)**  
MSc.pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

Dedico este trabalho àquela  
pessoa que fez ele possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Eu gostaria de agradecer aos colegas de pesquisa Willian Fedrigo, Thais Kleinert, Magnon Donin e Lucas Malabarba pela competência e dedicação empregada neste trabalho. A contribuição de vocês nunca será esquecida.

Além disso, gostaria de agradecer ao professor Washington Peres Núñez pela oportunidade de trabalho e aprendizagem.

Por fim, agradeço a minha família, que nunca deixou de acreditar em mim, nem por um momento.

Worlds to conquer,  
worlds to share.  
*Steven Erikson*

## RESUMO

A degradação das rodovias atinge grande parte da malha rodoviária brasileira. Em 2015, de acordo com a CNT, 48,6% das rodovias foram classificadas como em estado ruim, regular ou péssimo. Uma solução que envolveria o reaproveitamento desta malha já danificada seria a reciclagem de pavimento. Entretanto, ainda faltam documentos normativos e pesquisas completas no Brasil, que envolvam todos os tipos de base materiais presentes nos pavimentos brasileiros. Por esta razão o Laboratório de Pavimentação da UFRGS, está liderando o desenvolvimento de uma extensa pesquisa sobre a reciclagem de pavimento, do qual este trabalho faz parte. Neste estudo serão visto os fatores que afetam a resistência à compressão simples de mistura de fresado asfáltico, solo laterítico e cimento Portland. O ensaio de RCS (resistência à compressão simples) é um dos mais importantes ensaios sobre a resistência mecânica de um pavimento. Como diversas rodovias brasileiras possuem solo laterítico como base, a análise do comportamento deste tipo de material na reciclagem se torna indispensável para a difusão deste tipo de processo pelo Brasil. Para tanto, foram utilizados as dosagens propostas nos trabalhos de Fedrigo (2015) e Kleinert (2016), que também pertencem a mesma pesquisa global, porém aplicadas ao solo laterítico, o diferencial desta pesquisa. Os experimentos começaram com a análise granulométrica dos materiais e a escolha das dosagens adequadas para que as misturas atendessem os limites pré-estabelecidos de granulometria. Depois, foram realizados ensaios de compactação, que definiram o ponto de umidade ótimo para os ensaios de RCS. Os ensaios de RCS comprovaram a importância de uma boa dosagem de fresado asfáltico e do teor de cimento nesse tipo de mistura, além de reforçar a necessidade de uma cura sem imersão a água, para maior desempenho do material frente à compressão simples. Como resultado pode-se destacar que as misturas que apresentaram os melhores resultados nos ensaios foram as com 50% de fresado e que o aumento do teor de cimento apresenta ganhos a RCS.

**Palavras-chave:** *Reciclagem de pavimentos; reciclagem com cimento; solo laterítico; resistência à compressão simples; RCS; dosagem.*

## ABSTRACT

The degradation of roads reaches a great part of the road network. In 2015, according to CNT, 48.6% of the roads were classified as in bad, regular or terrible condition. A solution that could involve the reuse of this damaged road network would be the pavement recycling. However, there is still a lack of normative documents and complete researches in Brazil, involving all kinds of materials present in the Brazilian base floors. For this reason, the Pavement Laboratory of the Federal University of Rio Grande do Sul is leading the development of an extensive research on pavement recycling, which this work is part of. In this study, the factors that affect the unconfined compressive strength from a mixture of milled asphalt, lateritic soil and Portland cement will be studied. The UCS (unconfined compressive strength) test is one of the most important tests concerning the mechanical resistance of a pavement. As many Brazilian roads have lateritic soil as a base the analysis of the behavior of this kind of material in pavement recycling is indispensable for the dissemination of this type of process around Brazil. Therefore, the mix design methods proposed by Fedrigo (2015) and Kleinert (2016), which also belong to the same global research, were used in this study but applied to the lateritic soil, which is the spread of this research. The experiments began with the particle size analysis of materials and the selection of appropriate mix design so that the mixtures could meet the pre-defined limits of particle size. Then, compression tests were carried out which defined the moisture point great for UCS tests. The UCS tests proved the importance of a proper mix design for milled asphalt and cement content for this type of mixture. In addition to reinforce the necessity of a curing process without water immersion for a higher performance of the recycled material in relation to the compressive strength. As results of this study, it is possible to highlight that mixtures with 50% of milled asphalt has shown better results in the UCS tests and that the increasing of the cement content presents gains in the UCS.

**Keywords:** *Pavement recycling; FDR with cement; lateritic soil; unconfined compressive strength; UCS; mix design.*

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	15
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	17
<b>1.2.1 Objetivo principal</b> .....	17
<b>1.2.2 Objetivos secundários</b> .....	17
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	19
2.1 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS.....	19
<b>2.1.1 Tipos de reciclagem de pavimentos</b> .....	19
2.1.1.1 <i>Reciclagem a frio</i> .....	19
2.1.1.2 <i>Reciclagem a quente</i> .....	20
2.1.1.3 <i>Reciclagem a quente em situ</i> .....	20
2.1.1.4 <i>Reciclagem profunda do pavimento</i> .....	20
<b>2.1.2 Reciclagem de pavimentos com cimento Portland</b> .....	20
2.1.2.1 <i>Compatibilidade do pavimento para reciclagem com adição de cimento</i> .....	21
2.1.2.2 <i>Normas técnicas nacionais sobre reciclagem com cimento</i> .....	22
2.1.2.3 <i>Vantagens e limitações da reciclagem com cimento Portland</i> .....	24
2.2 SOLO LATERÍTICO.....	26
2.3 DOSAGEM DE MISTURAS RECICLADAS COM CIMENTO.....	27
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	32
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	32
3.2 MATERIAIS.....	33
<b>3.2.1 Fresado Asfáltico</b> .....	33
<b>3.2.2 Solo Laterítico</b> .....	34
<b>3.2.3 Cimento CP II E 32</b> .....	34
3.3 MÉTODOS.....	34
<b>3.3.1 Caracterização de materiais e misturas</b> .....	35
3.3.1.1 <i>Análise granulométrica</i> .....	35
3.3.1.2 <i>Elaboração da curva granulométrica</i> .....	36
3.3.1.3 <i>Compactação</i> .....	36
<b>3.3.2 Moldagem dos corpos de prova</b> .....	38
3.3.3 Resistência à compressão simples.....	40
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	41
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	41

<b>4.1.1</b>	<b>Análise granulométrica</b> .....	41
4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS .....	43
<b>4.2.1</b>	<b>Distribuição granulométrica</b> .....	45
<b>4.2.2</b>	<b>Compactação</b> .....	47
4.3	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES .....	50
<b>4.3.1</b>	<b>Análise estatística dos resultados de RCS</b> .....	53
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	56
	ANEXOS – Análises granulométricas.....	58

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema representativo da pesquisa global com destaque ao material de base deste estudo (adaptado de: FEDRIGO, 2015).....	17
Figura 2 - Fluxograma para avaliação estrutural do pavimento para fins de reciclagem (Fonte: Fedrigo, 2015).....	22
Figura 3–Distribuição de solos lateríticos em território nacional (Fonte: Villibor et al., 2009).	27
Figura 4 - Fresado asfáltico.....	33
Figura 5 - Solo Laterítico .....	34
Figura 6 - Peneiramento manual. ....	35
Figura 7 - Peneiramento mecânico .....	36
Figura 8 - Processo de mistura dos componentes (a) e adição de água a mistura (b).....	37
Figura 9 - Compactação dos CPs para obtenção da umidade ótima .....	37
Figura 10– Desmoldagem do CP com auxílio de macaco hidráulico .....	38
Figura 11 - Preparação da mistura de fresado asfáltico, solo laterítico e cimento.....	39
Figura 12 - Compactação dos CPs .....	39
Figura 13 – Corpos de prova após os ensaios de compressão .....	40
Figura 14 - Curva granulométrica do solo laterítico .....	42
Figura 15 - Curva granulométrica do fresado asfáltico .....	43
Figura 16 - Curva granulométrica dos finos de solo laterítico.....	45
Figura 17: Curvas granulométricas das misturas .....	47
Figura 18 - Ensaios de compactação para misturas com teor de cimento de 1,17% e 2%. .....	48
Figura 19 - Ensaios de compactação para misturas com teor de cimento de 4%. .....	48
Figura 20 - Ensaios de compactação para misturas com teor de cimento de 6%. .....	49
Figura 21 - Corpos de prova inviabilizados pelo contato com água.....	50
Figura 22 - RCS em função do tempo de cura.....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo entre as especificações de serviço e os limites das faixas granulométricas das normas nacionais (Baseado em: Kleinert, 2016). .....	24
Tabela 2 - Limites propostos por Wirtgen para análise granulométrica (Fonte: Wirtgen,2012) 29	
Tabela 3 - Comparativo entre os métodos de dosagem internacionais (adaptado de Fedrigo, 2015) .....	30
Tabela 4 - Limites de controle granulométrico (Fonte: Fedrigo,2015) .....	31
Tabela 5: Dosagens das misturas .....	33
Tabela 6 - Média da análise granulométrica do solo laterítico. ....	41
Tabela 7 - Média das análises granulométricas do fresado asfáltico. ....	42
Tabela 8 - Análise granulometria dos finos de solo laterítico. ....	44
Tabela 9 - Percentagem de finos adicionados.....	45
Tabela 10 - Granulometria das misturas .....	46
Tabela 11 - Parâmetros de umidade ótima para cada mistura. ....	49
Tabela 12 - Métodos de cura.....	50
Tabela 13 - RCS de misturas conforme dias de cura .....	51
Tabela 14 - Resultados de RCS para mistura SL-4-50 .....	51
Tabela 15- Aumento do RCS com aumento do teor de fresado .....	52
Tabela 16 - Aumento do RCS com aumento do teor de cimento .....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS.

ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AIPCR: Association Mondiale de La Route

ANTT: Agência Nacional de Transportes Terrestres

ARRA: *Asphalt Recycling and Reclaiming Association*

BGS: Brita Graduada Simples

BGTC: Brita Graduada Tratada com Cimento

CO<sub>2</sub>: Dióxido de carbono

COPPE: Coordenação de Programas de Pós Graduação em Engenharia

CP: Corpo de prova

CP II E 32: Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno, resistência a compressão de 32 MPa

DEINFRA-SC: Departamento Estadual de Infraestrutura do Estado 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

FDR: *Full-Depth Reclamation*

IECA: *Instituto Español Del Cemento y sus Aplicaciones*

IPR: Instituto de Pesquisas Rodoviárias

LAPAV: Laboratório de Pavimentação

LEME: Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

ME: Método de Ensaio

NBR: Norma Brasileira Regulamentadora

PCA: *Portland Cement Association*

RCS: Resistência à compressão simples

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFRJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro

UCS: *Unconfined Compressive Strength*

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

$\omega_{\acute{o}t}$ : teor de umidade ótimo

# 1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo faz-se uma contextualização do problema de pesquisa e os motivos que justificam este estudo. Os objetivos primários e secundários também estão aqui apresentados.

## 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA

O transporte rodoviário vem sendo há muitos anos o tipo de transporte mais utilizado para movimentação de pessoas e cargas no Brasil. De acordo com a Pesquisa de Rodovias de 2015 feita pela Confederação Nacional de Transportes, 95% do transporte de passageiros e cerca de 61% do transporte de cargas do país utiliza o modal rodoviário. Isto atribui um papel importante a este modal, pois se trata do principal instrumento de integração do sistema logístico brasileiro.

Dessa forma, as condições das estradas afetam diretamente no desenvolvimento socioeconômico do país, uma vez que rodovias em condições insatisfatórias aumentam os riscos de acidentes, geram desperdícios de carga e elevam os gastos com manutenção e insumos para o transporte.

A malha rodoviária brasileira possui pouco mais de 1.720.000km de extensão, dos quais apenas 12,4% correspondem a rodovias pavimentadas. Dentre essas rodovias, as condições dos pavimentos de 48,6% foram classificadas como em estado ruim, regular ou péssimo. Outro dado interessante refere-se à densidade da malha rodoviária brasileira em comparação com outros países de grande extensão territorial. Enquanto no Brasil são 25 km de estradas pavimentadas para cada 1000km<sup>2</sup> de área, nos Estados Unidos e China a densidade da malha rodoviária é de 438,1 km e 359,9 km por 1000 km<sup>2</sup> de área, respectivamente (CNT, 2015).

Estes números mostram que as condições das rodovias no Brasil estão longe de serem consideradas adequadas para um país cujo modal rodoviário é predominante. A falta de manutenção aliada ao aumento do volume de tráfego, cargas mais pesadas e exposição das rodovias as condições climáticas são alguns dos fatores que contribuem para a deterioração cada vez mais rápida das rodovias que, por conseguinte impactam negativamente na economia do país. Portanto é evidente a necessidade de rodovias mais estáveis, duradouras e funcionais.

Considerando que o alto custo de construção de novos pavimentos, a reciclagem de pavimentos com cimento Portland se mostra uma alternativa economicamente mais viável. Além disto, a reciclagem apresenta vantagens como a redução significativa da quantidade necessária de agregados e derivados do petróleo, diminuição de impactos ambientais e a possibilidade de assegurar que as condições geométricas da pista sejam mantidas (DNIT, 2006).

A reciclagem de pavimentos com cimento já vem sendo utilizada no Brasil há muitos anos, no entanto seu emprego ainda esbarra em limitações técnicas referentes à documentação específica que oriente na realização deste método de restauração. A documentação técnica nacional referente à metodologia de projeto e dimensionamento de pavimentos reciclados, procedimento de dosagem de misturas recicladas com cimento e conhecimento das propriedades mecânicas das camadas recuperadas é ainda muito limitada, quando em vezes contraditória.

Tendo em vista esta necessidade de um procedimento técnico bem definido, uma ampla pesquisa sobre reciclagem de pavimentos com adição de cimento vem sendo realizada pelo Laboratório de Pavimentação (LAPAV) e pelo Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da UFRGS. O estudo conta também com a participação da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), do Instituto de Pesquisas Rodoviárias do DNIT (IPR/DNIT), de concessionárias de rodovias, de empresas que executam reciclagem e também produtoras de equipamentos para reciclagem.

Esta pesquisa iniciou-se com a dissertação de Fedrigo (2015) que estabelece bases para a proposição de um método de dosagem para reciclagem de pavimentos com adição de cimento através de estudos experimentais com base de brita graduada simples (BGS). Outro estudo integrante desta mesma pesquisa foi desenvolvido por Kleinert (2016), que objetiva a definição de um método de dosagem considerando bases de brita graduada tratada com cimento (BGTC) e solo-cimento. A Figura 1 apresenta de forma esquemática as etapas da pesquisa global no qual este estudo está inserido. As fases destacadas em linha contínua correspondem aos estudos já concluídos por Fedrigo (2015) e Kleinert (2016) enquanto as fases em amarelo correspondem ao foco deste estudo.

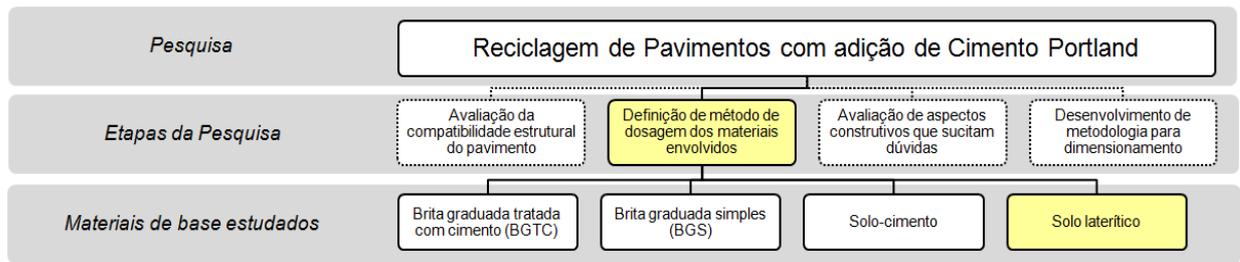


Figura 1 - Esquema representativo da pesquisa global com destaque ao material de base deste estudo (adaptado de: FEDRIGO, 2015).

Uma das características mais relevantes ao pavimento reciclado com cimento Portland é a resistência à compressão simples, que, por sua vez, quando mal dosado ou executado, acarreta inúmeros problemas no desempenho do mesmo, comprometendo tanto a sua vida útil quando segurança do usuário. Desta forma, é indispensável estudar este aspecto do pavimento, como forma de encontrar as dosagens que minimizem estes defeitos e estendam a vida útil deste tipo de pavimento. Por este motivo, compreender os fatores que afetam a resistência à compressão de pavimentos asfálticos reciclados com cimento Portland foi a grande motivação deste estudo.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo principal

Esta pesquisa tem como objetivo principal estudar os fatores que afetam a resistência à compressão simples (RCS) de misturas de fresado asfáltico, solo laterítico e cimento Portland. O estudo se dará através de ensaios de compressão simples (RCS) com amostras preparadas em laboratório e as análises serão realizadas em diferentes tempos de cura.

### 1.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários estão abaixo listados:

- Avaliar a evolução da RCS das misturas mencionadas em função do teor de cimento, da porcentagem de fresado asfáltico e do tempo de cura;
- Estimar quantidades adequadas dos componentes da mistura que resultem em uma maior resistência à compressão, mantendo as características desejáveis de um pavimento como a baixa deformabilidade, resistência a esforços e durabilidade.

- Comparar os valores de RCS obtidos, com valores semelhantes em misturas de fresado asfáltico, base cimentada (solo-cimento ou brita graduada com cimento), visando contribuir para o desenvolvimento de um método de dosagem de camadas recicladas com cimento.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

A reciclagem de pavimentos é uma técnica de restauração, reconstrução e conservação de pavimentos que visa à reutilização de materiais pré-existentis tais como ligantes e agregados bem como a conservação de energia necessária para tais manutenções (DNER, 1998).

No processo de reciclagem a camada deteriorada do pavimento é retirada, parcial ou totalmente, através da fresagem e o material oriundo deste corte é utilizado na nova camada de revestimento a ser executada. No entanto, algumas características dos ligantes asfálticos sofrem alterações como, por exemplo, o aumento da viscosidade. Para garantir que estas características sejam recuperadas, são adicionados a mistura alguns agentes rejuvenescedores como a espuma de asfalto e cimento asfáltico de petróleo ou cimento Portland (BERNUCCI, 2008).

Conforme David (2006), a reciclagem de pavimentos tem se tornado uma opção mais adequada sob o ponto de vista sustentável uma vez que a legislação ambiental dos países vem impondo condições mais restritivas quanto à geração de resíduos, emissão de poluentes e a utilização de recursos não renováveis na construção e reabilitação de rodovias.

#### 2.1.1 Tipos de reciclagem de pavimentos

As técnicas de reciclagem de pavimentos podem ser divididas em cinco diferentes grupos: reciclagem a frio *in situ* ou em usina, reciclagem a quente *in situ*, reciclagem a quente e reciclagem profunda (ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION, 2001). Estes métodos são brevemente contextualizados nos tópicos seguintes.

##### 2.1.1.1 Reciclagem a frio

A técnica de reciclagem a frio consiste em retirar os materiais do pavimento sem que seja necessário aquecimento e pode ser executada *in situ* ou em usina. Quando realizada *in situ*, o pavimento danificado é removido e reutilizado no mesmo local. Neste caso, o conjunto de equipamentos, que executa a fresagem da superfície é também responsável pela compactação da nova camada de revestimento. Na reciclagem a frio em usina, o pavimento deteriorado é processado em outro local e posteriormente a mistura é transportada para o pavimento que será

restaurado. Neste tipo de reciclagem, a adição de agentes químicos como o cimento Portland é usada a fim de garantir maior resistência mecânica ao pavimento reciclado.

#### *2.1.1.2 Reciclagem a quente*

Na reciclagem a quente o pavimento degradado é combinado a novos agregados, ligantes asfálticos e, se necessário, a agentes recicladores para posteriormente ser transportado ao local de aplicação, para ser pavimentado pelos métodos convencionais. A mistura é submetida ao calor a fim de garantir que o pavimento amoleça e melhor se associe as demais substâncias.

#### *2.1.1.3 Reciclagem a quente em situ*

O método de reciclagem in situ compreende que o aquecimento do revestimento pré-existente bem como o a mistura com agregados, ligantes e agentes recicladores seja feita no próprio local do pavimento. A distribuição da mistura sobre a superfície é realizada por uma pavimentadora tradicional.

#### *2.1.1.4 Reciclagem profunda do pavimento*

Na reciclagem profunda, o revestimento asfáltico é completamente removido juntamente com uma parte pré-definida das camadas subjacentes (base, sub-base e subleito). Estes materiais são uniformemente fragmentados e misturados a fim de criar um material-base homogêneo. Assim como a reciclagem a frio, não existe acréscimo de calor.

Segundo Oliveira (2003) a reciclagem profunda tem se mostrado uma técnica eficiente na reabilitação de pavimentos degradados e com problemas estruturais, pois possibilita a correção de falhas nas camadas inferiores ao pavimento.

### **2.1.2 Reciclagem de pavimentos com cimento Portland**

A reciclagem de pavimentos com cimento é uma técnica de reabilitação na qual se transforma um pavimento deteriorado em uma nova camada de base com notável capacidade estrutural, utilizando o mesmo pavimento como fonte de fornecimento de agregados. O método consiste em misturar o material resultante do pavimento antigo com água e cimento e compactá-lo na

superfície. Sobre a nova base é feita a aplicação de um revestimento asfáltico para finalização do pavimento (INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES, 2013).

Segundo a *Portland Cement Association* (PCA, 2005), é esperado que um novo pavimento reciclado com adição de cimento Portland apresente desempenho mais satisfatório quanto à durabilidade e a necessidade de manutenção do que o pavimento original visto que a nova camada base será mais resistente e homogênea. Neste contexto, a reciclagem profunda de pavimentos vem conquistando espaço na recuperação estrutural de rodovias.

#### *2.1.2.1 Compatibilidade do pavimento para reciclagem com adição de cimento*

Conforme Bernucci *et al.* (2008), a escolha do tipo de restauração a ser realizada em um pavimento depende do resultado de um estudo das condições funcionais e estruturais do pavimento existente. A avaliação funcional contempla análise da superfície do pavimento como o tipo e a severidade de defeitos superficiais e irregularidade longitudinal. Já na avaliação estrutural é verificada a condição do pavimento em suportar cargas, onde o principal parâmetro avaliado é a deflexão na superfície.

A Austroads (2002) apresenta em forma de fluxograma uma sistemática para avaliação estrutural de pavimentos a serem estabilizados e reciclados, conforme Figura 2. Em um primeiro estágio a espessura do pavimento é avaliada, observando a incidência de remendos, cortes e aterros. Além disso, avalia-se a possibilidade de testes em laboratório para seleção de locais de investigação do pavimento. Caso os ensaios sejam possíveis, a análise granulométrica, índice de plasticidade e Índice de Suporte Califórnia (ISC) são elementos muito importantes na investigação do pavimento. Na sequência, verifica-se a profundidade do material disponível e a necessidade de acrescentar ou não mais material. Na etapa seguinte, a homogeneidade do pavimento é analisada. Se a uniformidade como um todo não for possível, sugere-se separar em zonas com homogeneidade razoável para então seguir a próxima etapa da investigação. Na última fase de avaliação, é feita a análise da resistência do subleito. Caso a resistência não esteja adequada, deve-se buscar outro método de restauração. Mas se a resistência estiver conforme, busca-se avaliar o quão longe da superfície está o nível freático bem como a se o local é bem drenado.

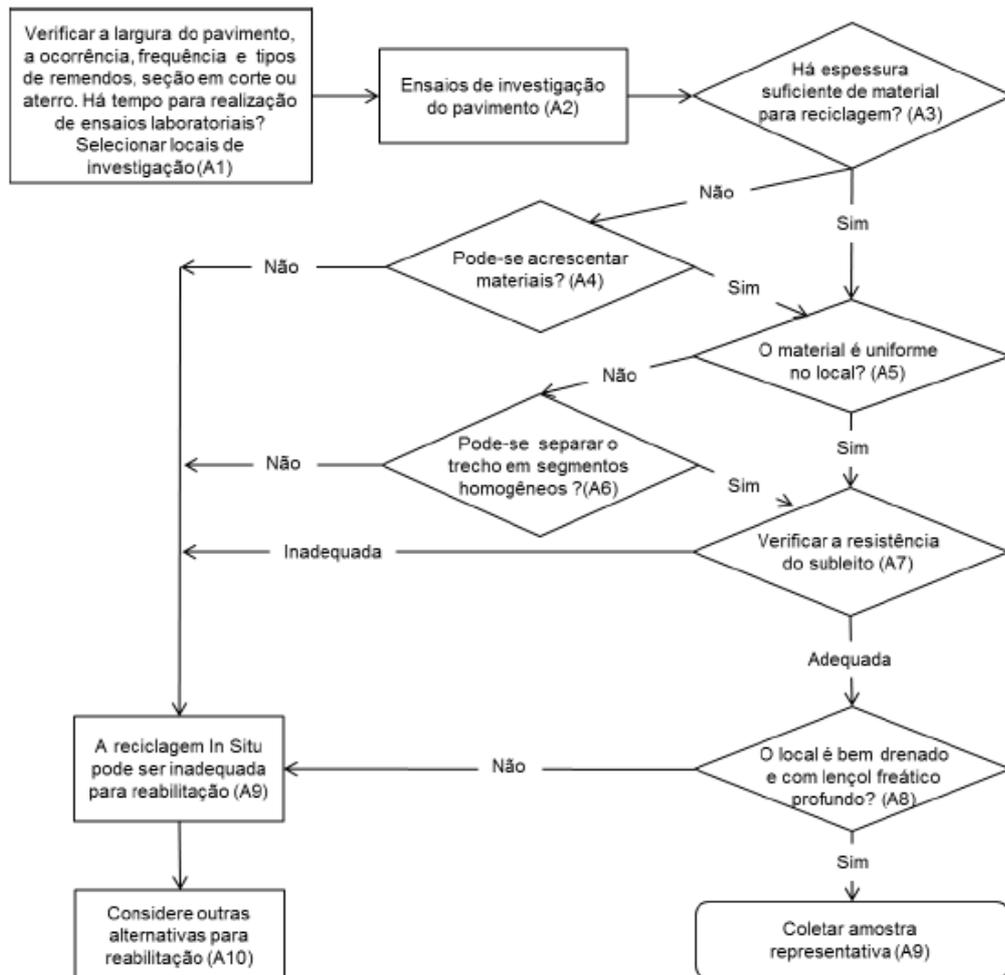


Figura 2 - Fluxograma para avaliação estrutural do pavimento para fins de reciclagem (Fonte: Fedrigo, 2015).

De acordo com a *Portland Cement Association* (PCA, 2005), para que a reciclagem de pavimentos com cimento seja a alternativa de restauração mais adequada, algumas condições devem ser observadas, tais como:

- a) Pavimento está seriamente danificado e não pode ser reabilitado através de um recapeamento;
- b) Os defeitos do pavimento existente indicam que o problema está na base ou sub-base;
- c) Os defeitos do pavimento existente requerem remendos profundos em mais de 15% a 20% da área do pavimento;
- d) A estrutura do pavimento não é mais adequada para o tráfego atual ou futuro.

### 2.1.2.2 Normas técnicas nacionais sobre reciclagem com cimento

No Brasil, os Departamentos de Estradas de Rodagem dos estados de São Paulo e do Paraná, o DEINFRA de Santa Catarina e o DNIT desenvolveram as seguintes especificações de serviço para a reciclagem de pavimentos com adição de cimento:

- a) DER-PR ES-P 33/05 – Pavimentação: Reciclagem de pavimento *in situ* com adição de cimento (DER-PR, 2005);
- b) DER-SP ET-DE-P00/035 – Reciclagem de pavimento asfáltico *in situ* com cimento e brita (DER-SP, 2006);
- c) DEINFRA-SC ES-P-09/12 – Reciclagem profunda de pavimento com adição de cimento Portland (DEINFRA-SC, 2012);
- d) DNIT 167/2013-ES – Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos *in situ* com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço (DNIT, 2013a).

As especificações citadas acima apresentam diferenças significativas em alguns itens importantes para o processo de reciclagem de pavimentos. Estas divergências nos itens da especificação bem como as diferentes faixas granulométricas, a qual o material reciclado deverá se enquadrar, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Comparativo entre as especificações de serviço e os limites das faixas granulométricas das normas nacionais (Baseado em: Kleinert, 2016).

		Especificação de Serviço								
		DER-PR ES-P 33/05	DER-SP ET-DE-P00/035	DEINFRA-SC ES-P-	DNIT 167/2013-ES					
Itens da especificação	Profundidade de corte mínima atingida pela recicladora (cm)	Não estabelece	12	30	30					
	Teor máximo de material fresado do revestimento asfáltico	Não estabelece	Não estabelece	50	50					
	Energia de Compactação	Intermediária	Intermediária	Modificada	Modificada					
	Grau de compactação mínimo em campo (%)	100	100	98	98					
	Tolerância do teor de umidade ótima em campo (%)	± 1	- 2 e +1	Não estabelece	Não estabelece					
	Resistência a compressão simples aos 7 dias de cura (MPa)	3,5 a 8	Não estabelece	2,1 a 2,5	2,1 a 2,5					
	Resistência à tração por compressão diameral aos 7 dias de cura (MPa)	Não estabelece	Não estabelece	0,25 a 0,35	0,25 a 0,35					
	Liberação ao tráfego da camada reciclada	Após 7 dias de cura	Após salgamento, desde que a camada apresente resistência compatível com as solicitações impostas.	Período de 3 a 7 dias, para que eventuais deficiências possam ser verificadas e sanadas.	Após salgamento, durante 3 a 7 dias, para que eventuais deficiências possam ser verificadas e sanadas.					
Limites das faixas granulométricas	Peneira (mm)	DER-PR ES-P 33/05 Faixa Única (%)		DER-SP ET-DE-P00/035 Faixa Única (%)		DEINFRA-SC ES-P-09/12 e DNIT 167/2013-ES Faixa I (%)      Faixa II (%)				
		Mínimo	Máxima	Mínimo	Máxima	Mínimo	Máxima	Mínimo	Máxima	
	50,8	-	-	-	-	-	100	100	100	100
	38,1	100	100	100	100	-	-	-	-	
	25,4	-	-	-	-	75	90	100	100	
	9,5	-	-	-	-	40	75	50	85	
	4,75	50	100	50	100	30	60	35	65	
	2,36	-	-	-	-	20	45	25	50	
	0,425	15	100	15	100	15	30	15	30	
	0,075	5	100	5	100	5	15	5	15	

### 2.1.2.3 Vantagens e limitações da reciclagem com cimento Portland

O *Instituto Español Del Cemento y sus Aplicaciones* (IECA, 2013) apresenta, conforme descritas a seguir, as principais vantagens da reciclagem com cimento sob os aspectos ambiental, técnico e econômico.

#### a) Vantagens ambientais:

- A reutilização de materiais no local contribui para evitar que novas fontes de agregados sejam abertas, ou ainda que as reservas existentes sejam consumidas. A economia de agregados pode ser estimada em 3.000 a 4.000 t/km (quando comparado à necessidade de agregado para um novo pavimento de estrutura similar);

- A necessidade de aterros para descarte é reduzida ao aproveitar os materiais existentes no próprio pavimento;
- Ao se evitar transportes, as emissões de CO<sub>2</sub> e outros poluentes assim como os impactos ambientais a fauna e a flora são minimizados;
- Se trata de uma técnica especialmente adaptada ao emprego de cimento com aditivo. Isto resulta na redução de emissões durante a produção, minimizando a quantidade necessária de clínquer e incorporando subprodutos industriais, o que contribui para o cumprimento do Protocolo de Kioto e com os compromissos de desenvolvimento sustentável;
- é uma técnica a frio que consome pouca energia e conseqüentemente reduz notavelmente a poluição do ar e a emissão de gases nocivos à saúde.

b) Vantagens técnicas:

- Permite a restauração de um pavimento deteriorado, transformando-o em uma camada estabilizada mais homogênea, com significativas características mecânicas e maior capacidade de suporte as solicitações;
- Diminui as tensões que atingem o subleito e também aquelas que se manifestam no revestimento asfáltico;
- Os efeitos negativos provenientes das mudanças de umidade na estrutura do pavimento, como trincamento de revestimentos, diminuição da capacidade de suporte do subleito devido à saturação do mesmo, são reduzidos;
- Como não existem transportes de materiais entre a local de processamento da mistura e o pavimento em restauração, os prejuízos pelo tráfego de obra e danos nas vias adjacentes são diminuídos;
- A reciclagem pode ser combinada com execução de uma ampliação, utilizando os mesmos equipamentos da reciclagem. A escolha adequada de materiais para este expansão permite obter após o seu processamento uma mistura com características similares ao pavimento reciclado, melhorando assim a homogeneidade da secção

transversal e evitando o aparecimento de fissuras longitudinais entre a ampliação e o pavimento pré-existente;

- Possibilidade de reabilitação de faixas individuais;
- Permite manter o perfil longitudinal inicial da via.

c) Vantagens econômicas:

- Redução da necessidade de novos agregados a serem utilizados na obra e os custos de transporte;
- quando o processo for realizado *in situ*, não é necessário instalar uma central de processamento;
- vantagens técnicas já citadas também se traduzem como vantagens econômicas.

Quanto às limitações da reciclagem de pavimentos com adição de cimento, pode-se destacar:

- Aumento da rigidez, resultando na redução das características de fadiga (OLIVEIRA, 2003 *apud* WIRTGEN, 1998);
- O surgimento de trincas por contração, podendo ser minimizados seus efeitos (OLIVEIRA, 2003 *apud* WIRTGEN, 1998);
- Necessidade de tempo de cura adequada, podendo o tráfego prematuro causar danos à superfície (OLIVEIRA, 2003 *apud* WIRTGEN, 1998);
- Obtenção de mistura heterogênea quando o pavimento reciclado pré-existente possui uma estrutura também muito heterogênea (MINGUELA, 2011);
- A reciclagem de vias individuais pode, ocasionalmente, causar o aparecimento de fissuras longitudinais se as devidas precauções não forem tomadas para assegurar uma ligação adequada entre os materiais de vias adjacentes (MINGUELA, 2011).

## 2.2 SOLO LATERÍTICO

Segundo Villibor *et al.* (2009), solos laterítico são solos superficiais, pertencentes aos horizontes A e B, resultante da transformação pelo intemperismo da parte superior do subsolo

de partes bem drenadas das regiões tropicais úmidas. No processo de laterização, o solo é enriquecido de óxido hidratados de ferro e/ou alumínio e a permanência de um argilo-mineral chamado caolinita, lhe garante uma coloração bastante típica e característica nas cores vermelha, amarela, marrom e alaranjada.

O solo laterítico, por ser um solo residual e de forte influência das intempéries, apresenta poucas características originais das rochas que a deram origem (MARTINEZ, 2003). Além disso, este tipo de solo tende a ter uma grande parcela com granulometria inferior a dois milímetros, podendo ainda, no entanto, apresentar pedregulhos maciços ou porosos, com mesmas características mineralógicas chamadas de laterita (SUAREZ, 2008).

No Brasil, o solo laterítico está presente em quase todo território, como mostra a Figura 3. Por este motivo é muito usado como base em pavimento nas regiões sudeste e centro-oeste. Sobre sua aplicabilidade na pavimentação de rodovias, Suarez (2008) afirma que solo laterítico, quando compactado corretamente, apresenta ótimo desempenho, com grande resistência e baixa permeabilidade.



Figura 3–Distribuição de solos lateríticos em território nacional (Fonte: Villibor *et al.*, 2009).

### 2.3 DOSAGEM DE MISTURAS RECICLADAS COM CIMENTO

No atual panorama nacional, se desconhece um procedimento bem definido para dosagem de misturas recicladas com adição de cimento Portland. A documentação existente a cerca da dosagem na reciclagem de pavimentos limita-se apenas a algumas orientações constantes nas especificações de serviços citadas anteriormente no item 2.1.2.3 deste trabalho.

De acordo as especificações de serviço do DEINFRA-SC (2012), DER-PR (2005) e DNIT (2013) as seguintes instruções devem ser seguidas:

- a) Sobre a coleta de amostras, estas devem ser feitas com a própria recicladora executora dos serviços e o maior número de segmentos homogêneos deve ser coletado a fim de garantir que um projeto de dosagem mais específico para cada variação da estrutura do pavimento;
- b) Sobre o projeto de dosagem, este deve conter as seguintes informações: granulometria do material reciclado e dos agregados, composição granulométrica da mistura reciclada e seu enquadramento na faixa trabalho, massa específica aparente seca máxima do material reciclado e da mistura reciclada, umidade ótima, energia de compactação, teor de cimento, tipo de cimento e energia de compactação empregada e resistência à compressão simples aos 7 dias.

Pela razão da falta de documentos normativos mais precisos no cenário nacional, este estudo tem como referência os métodos de dosagem internacionais mencionados nos estudos de Fedrigo (2015) e Kleinert (2016), uma vez que no âmbito internacional existem diversos procedimentos de dosagem de para a reciclagem com cimento definidos.

A *Portland Cement Association*, através do seu método de dosagem, define que a análise granulométrica deve obedecer à faixa especificada pela organização e que a presença do fresado não deve ser maior que 50% da massa da mistura (PCA, 2005).

A ARRA (2001) propõe um método menos detalhado de dosagem. Primeiramente se determina a granulometria e o índice de plasticidade para então definir a composição da mistura e o teor de cimento. Na sequência ensaios de compactação e ensaios de RCS são realizados. O teor de cimento cuja mistura obtiver o menor valor de resistência de projeto é então considerado o teor ótimo.

A Austroads (2002), órgão responsável pelas rodovias da Austrália e da Nova Zelândia, estabelece limites para os resultados da análise granulométrica, que deve ser corrigida caso não

atenda a estes parâmetros. Além disso, este método sugere a execução de ensaios adicionais de retração por secagem, absorção capilar e expansão e erodibilidade após os ensaios de RCS quando as propriedades mecânicas e volumétricas dos materiais a serem reciclados não são bem conhecidas.

A Wirtgen (2012), empresa fabricante das máquinas recicladoras, considera como modificada a energia de compactação e estabelece a necessidade de no mínimo três corpos de prova para os ensaios de resistência a compressão simples. Este método de dosagem define também importantes parâmetros para granulometria dos materiais utilizados. Estes parâmetros serão utilizados para as análises granulométricas dos materiais deste estudo e podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 - Limites propostos por Wirtgen para análise granulométrica (Fonte: Wirtgen, 2012).

<b>Peneira (mm)</b>	<b>Limites Inferiores</b>	<b>Limites Superiores</b>
<b>76.2</b>	-	-
<b>50.8</b>	100	100
<b>38.1</b>	85	100
<b>25.4</b>	72	100
<b>19</b>	60	100
<b>12.7</b>	50	100
<b>9.5</b>	42	90
<b>6.3</b>	35	80
<b>4.75</b>	30	72
<b>2.36</b>	21	56
<b>1.18</b>	14	44
<b>0.6</b>	9	35
<b>0.425</b>	7	31
<b>0.3</b>	5	27
<b>0.15</b>	3	21
<b>0.075</b>	2	18

A IECA (2013), por sua vez, leva em conta a homogeneidade dos segmentos quanto ao tráfego para definir quantos projetos de dosagem serão necessários a fim de atender as necessidades do pavimento a ser reciclado.

Algumas características importantes dos métodos de dosagem anteriormente citados estão destacados na Tabela 3. Já os limites granulométricos considerados alguns destes procedimentos e referenciados no quadro comparativo são apresentados na Tabela 4.

Tabela 3 - Comparativo entre os métodos de dosagem internacionais (adaptado de Fedrigo, 2015).

Característica	Método de dosagem				
	PCA (2005)	IECA (2013)	Witgen (2012)	ARRA (2001)	Austrroads (2002)
Ensaio preliminar	Análise 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 4	Não estabelece	Tabela 4	Não estabelece	Tabela 4
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	4 a 10 MPa (conforme material)	Não estabelece	1 a 4 MPa (conforme cimentação)
Ensaio 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

Tabela 4 - Limites de controle granulométrico (Fonte: Fedrigo, 2015).

Peneira (mm)	Limites Wirtgen (%)		Limites Austroads (%)		Limites PCA (%)
	Grossa	Fina	Grossa	Fina	Mínimo Passante
<b>76,5</b>	-	-	-	-	-
<b>50,8</b>	100	100	-	-	100
<b>38,1</b>	85	100	-	-	95
<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	-

### 3. METODOLOGIA

Nesse capítulo serão descritos o programa experimental, os materiais e os métodos utilizados nesta pesquisa. Desta forma, serão apresentados os ensaios realizados e os materiais utilizados nos mesmos, que possibilitaram a obtenção dos objetivos finais deste trabalho.

#### 3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Esta seção versa sobre o programa experimental desenvolvido para esta pesquisa. Para tanto, foi utilizado os preceitos de Montgomery (2001), que define um experimento como um ensaio ou uma série de ensaios, nos quais são realizadas variações propositais nos dados de entrada de um processo ou sistema, sendo possível observar e identificar as razões das mudanças a partir dos dados de saída.

Desta forma, foi realizada uma série de ensaios elaborados através dos métodos de dosagens desenvolvidos por Fedrigo (2015) e Kleinert (2016), já que esta pesquisa faz parte do grupo de pesquisas desenvolvidas pelo Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da UFRGS envolvendo reciclagem de pavimentos. Além disso, o fato de serem usados métodos semelhantes de dosagens facilita a comparação de resultados e do desempenho dos diferentes materiais.

De acordo com os resultados obtidos por Fedrigo (2015), verificou-se que seria mais importante analisar a variação da porcentagem de fresado e do teor de cimento, mantendo fixada a energia de compactação modificada. As dosagens utilizadas nesta pesquisa foram as mesmas sugeridas por Kleinert (2016), onde os percentuais de fresado e cimento foram estabelecidos através de uma matriz experimental para se entender os efeitos de uma ou mais variáveis. O Projeto Composto de Segunda Ordem foi o projeto de experimentos adotado por Kleinert (2016), que possibilitou estimar termos lineares e suas interações bem como efeitos quadráticos puros de três diferentes fatores: teor de fresado, teor de cimento e material, sendo este último de caráter qualitativo. A partir desta análise, foi possível extrapolar para o teor de fresado para valores de 7,57%, 20%, 50%, 80% e 92,43% enquanto para o teor de cimento os percentuais de 1,17%, 2%, 4%, 6% e 6,83%. Deste modo, foram desenvolvidas as seguintes misturas a serem experimentadas, como descritas na Tabela 5.

Tabela 5: Dosagens das misturas

Mistura	Porcentagem de fresado (%)	Teor de cimento (%)
SL 1,17-50	50	1,17
SL 2-20	20	2
SL 2-80	80	2
SL 4-7,57	7,57	4
SL 4-50	50	4
SL 4-92,43	92,43	4
SL 6-20	20	6
SL 6-80	80	6
SL 6,83-50	50	6,83

### 3.2 MATERIAIS

Nesta seção vamos descrever os materiais usados nos experimentos. Como a reciclagem de pavimento busca a reutilização da camada de revestimento asfáltico e sua base, usamos o fresado asfáltico e solo laterítico presentes em diversas rodovias do Brasil. Além disso, foi utilizado o cimento CP II E 32, pelas razões descritas a seguir.

#### 3.2.1 Fresado Asfáltico

O fresado asfáltico utilizado nesta pesquisa é oriundo de rodovias já degradadas, e pode ser visto na Figura 4 a seguir. Este fresado não apresenta nenhuma característica especial que possa impedir a replicabilidade desta pesquisa ou aplicação em campo. Nenhum processamento além da armazenagem foi realizado com este material após sua retirada *in situ*.



Figura 4 - Fresado asfáltico.

### 3.2.2 Solo Laterítico

O solo laterítico utilizado para a confecção dos corpos de prova é comumente encontrado em território nacional e tem como característica a coloração avermelhada pode ser visto a seguir na Figura 5. Como descrito na seção 4.2, foi necessária uma correção granulométrica, em vista que o solo laterítico por si só não atendia aos critérios pré-estabelecidos para pesquisa, que visava manter os níveis granulométricos dentro dos limites estabelecidos por Wirtgen (2012). Para tanto, foi utilizado uma porcentagem de finos oriundos do mesmo solo laterítico.



Figura 5 - Solo Laterítico

### 3.2.3 Cimento CP II E 32

A *Association mondiale de La Route* recomenda a utilização de cimento composto e de classe de resistência intermediária para reciclagem de pavimentos (AIPCR, 2003), o que o cimento CP II E 32, segundo a NBR 11578 (ABNT, 1991), se enquadra. Este cimento apresenta uma trabalhabilidade compatível com o método construtivo, resistência mecânica intermediária e calor de hidratação moderado (KLEINERT, 2016 *apud* PAIVA *et al.*, 2013).

## 3.3 MÉTODOS

Este programa experimental foi elaborado através dos métodos de dosagens desenvolvidos por Fedrigo (2015) e Kleinert (2016), e baseado na normal brasileira para ensaios de resistência a compressão simples.

A seguir, versaremos sobre caracterização dos materiais e misturas, além dos ensaios de resistência a compressão simples. A caracterização dos materiais e das misturas envolve a análise granulométrica, a distribuição granulométrica de misturas e ensaios de compactação. Já os ensaios de RCS correspondem aos testes descritos na norma rodoviária DNER-ME 091/98 (DNIT, 1998a).

### 3.3.1 Caracterização de materiais e misturas

Na caracterização de materiais e misturas foram desenvolvidas a análise granulométrica e os ensaios de compactação, como descritos nas seções seguintes.

#### 3.3.1.1 Análise granulométrica

Para a análise granulométrica, foi realizado o peneiramento manual do fresado asfáltico e solo laterítico, de acordo com os ensaios propostos por DNER-ME 083/98 (DNIT, 1998b). Foram utilizadas duas a três amostras para a elaboração da curva granulométrica, de acordo com a heterogeneidade dos materiais envolvidos.

O processo iniciou-se com a secagem das amostras e remoção da umidade. O solo laterítico foi seco na estufa a 60°C, enquanto o fresado asfáltico foi seco a temperatura ambiente, pois se tinha receio que a temperatura da estufa causasse o derretimento dos ligantes asfálticos ainda presentes no fresado.

Após isto, foi realizado o peneiramento manual dos materiais, utilizando as peneiras com diferentes espaçamentos. O processo manual de granulometria pode ser visto a Figura 6.



Figura 6 - Peneiramento manual.

### 3.3.1.2 Adequação da curva granulométrica

Com análise granulométrica concluída, verificou-se que os resultados se encontravam dentro da faixa sugerida pelo manual de reciclagem a frio da Wirtgen (2012) para a reciclagem com cimento, com exceção de apenas algumas faixas granulométricas. Nestes casos, foi adicionada uma porcentagem de finos oriundos do próprio solo laterítico, separadas através do peneiramento mecânico, como pode ser visto na Figura 7.



Figura 7 - Peneiramento mecânico

### 3.3.1.3 Compactação

Estes ensaios foram realizados de acordo com o método de ensaio DNIT-ME 164/2013 (DNIT, 2013b), com objetivo da obtenção da massa específica aparente seca máxima ( $\gamma_{sm\acute{a}x}$ ) e teor de umidade ótimo ( $\omega_{\acute{o}t}$ ) das misturas. Foram realizados no mínimo cinco ensaios para cada medida, com diferentes quantidades de água acrescida.

O processo foi iniciado colocando os materiais a serem misturados (fresado asfáltico, solo laterítico e cimento) em uma bandeja, como pode ser visto na Figura 8a. Posteriormente, a quantidade de água referente a cada amostra foi sendo colocado gradativamente (Figura 8b).

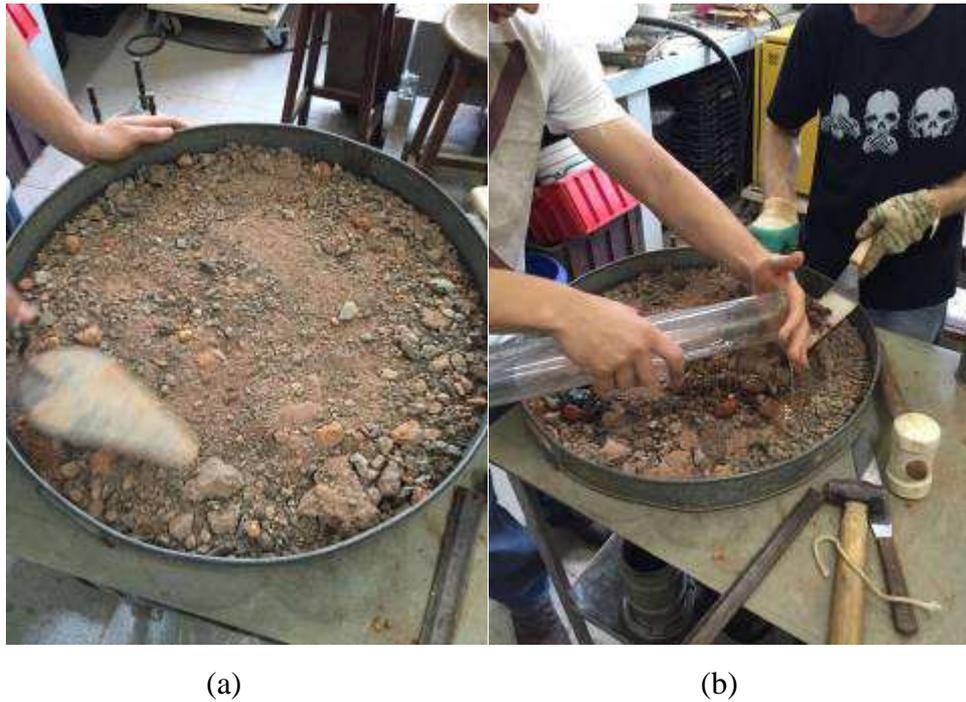


Figura 8 - Processo de mistura dos componentes (a) e adição de água a mistura (b)

Após a homogeneidade da mistura ter sido alcançada, foram moldados os corpos de prova, com a aplicação de cinco camadas, cada uma recebendo 55 golpes, equivalente a energia modifica (Figura 9). Posteriormente, o corpo de prova foi pesado, para a determinação dos parâmetros da amostra.



Figura 9 - Compactação dos CPs para obtenção da umidade ótima

O corpo de prova foi retirado do molde com o auxílio de um macaco hidráulico como mostra a Figura 10. Após isto, foram removidas duas amostras do corpo de prova, que posteriormente foram colocadas em cápsulas, pesadas e colocadas em uma estufa (a 110°C). Quando as amostras se encontraram secas, estas foram novamente pesadas, o que possibilitou a determinação da umidade em cada ponto. Através destes resultados, foi traçada uma curva de compactação, que possibilitou a determinação da massa específica aparente seca máxima e teor de umidade ótimo, que foram utilizados para a realização dos ensaios seguintes.



Figura 10– Desmoldagem do CP com auxílio de macaco hidráulico

### 3.3.2 Moldagem dos corpos de prova

Para a moldagem dos corpos de prova, foi separado e pesado cada material e suas respectivas quantidades para cada amostra. Estes materiais foram acondicionados em sacos plásticos até a moldagem, de maneira semelhante aos ensaios de compactação. Apenas o cimento foi mantido separado, e pesado no momento da moldagem. A moldagem foi realizada com soquete Proctor grande e com molde cilíndrico.

A confecção dos CP foi iniciada com a mistura do fresado asfáltico e do solo laterítico. Após a mistura ter alcançado a homogeneidade, foi adicionado o cimento, e posteriormente, a quantidade de água ótima determinada pelos ensaios de compactação (Figura 11).



Figura 11 - Preparação da mistura de fresado asfáltico, solo laterítico e cimento

Após a mistura ficar novamente homogênea, a mesma foi então lançada no molde em camadas, com cada camada recebendo golpes até atingir a altura especificada, referente à energia de compactação modificada. No total, foram cinco camadas para cada corpo de prova (Figura 12).



Figura 12 - Compactação dos CPs

A moldagem foi finalizada com uma coleta de uma amostra da mistura, para verificação de umidade. Além disto, foi realizado um arremate com pasta de cimento, para regularização da superfície.

Posteriormente, os corpos de prova foram desmoldados e cobertos com sacos plásticos para que não houvesse contato com umidade externa. Após 2 horas, os CPs eram desmoldados e colocados nos sacos plásticos para serem imersos em água até o momento especificado para o ensaio de resistência a compressão simples.

### 3.3.3 Resistência à compressão simples

O ensaio de resistência à compressão simples é indispensável para avaliação resistência mecânica do pavimento reciclado, já que esse é executado com grande frequência e está presente em grande parte das pesquisas relacionadas ao tema, fazendo com que seja de fácil comparação (KLEINERT, 2016).

Antes da realização do ensaio, foram tomadas medidas do diâmetro e da altura de cada corpo de prova através de um paquímetro com precisão de centésimo de milímetro. Este ensaio foi realizado através do rompimento dos corpos de prova, utilizando uma prensa hidráulica digital e os ensaios foram realizados conforme DNER-ME 091/98 (DNIT, 1998a).

O corpo de prova foi colocado na prensa entre os discos de neoprene, quando se teve início a aplicação de carga. Esta carga foi aplicada de forma contínua, com aumento de tensão média sobre o CP de 0,25 MPa/s, até que a ruptura do corpo de prova fosse alcançada (Figura 13).



Figura 13 – Corpos de prova após os ensaios de compressão

Neste momento, era executado o registro da carga máxima anterior ao rompimento e, com base nos dados anteriores, era determinada a resistência à compressão simples do corpo de prova em questão.

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios desenvolvidos assim como uma discussão dos mesmos. Além disso, serão feitos comparativos entre os resultados obtidos neste estudo com os resultados de outras pesquisas semelhantes. Os dados são referentes às médias das granulometrias, com os dados geradores das mesmas expostos no Anexo 1.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Esta secção apresentará a caracterização dos materiais, que consiste na análise granulométrica do fresado asfáltico e do solo laterítico. Ainda, serão feitos alguns comentários sobre os resultados.

#### 4.1.1 Análise granulométrica

Na tabela 6, pode ser visto os resultados do da análise granulométrica do solo laterítico.

Tabela 6 - Média da análise granulométrica do solo laterítico.

<b>Peneira (mm)</b>	<b>Peso retido (Gr)</b>	<b>% Retido</b>	<b>% Retido acumulado</b>	<b>% Passante</b>
<b>38</b>	0.0	0.0	0	100
<b>25</b>	1177.5	11.3	11	89
<b>19</b>	442.7	4.2	16	84
<b>12.5</b>	729.8	7.0	23	77
<b>9.5</b>	436.0	4.2	27	73
<b>6.3</b>	903.0	8.7	35	65
<b>4.8</b>	677.0	6.5	42	58
<b>2.4</b>	1302.0	12.5	54	46
<b>1.2</b>	1085.4	10.4	65	35
<b>0.6</b>	1342.2	12.9	78	22
<b>0.4</b>	670.6	6.4	84	16
<b>0.3</b>	452.7	4.3	88	12
<b>0.15</b>	679.9	6.5	95	5
<b>0.075</b>	397.9	3.8	99	1
<b>Fundo</b>	123.7	1.2	100	0
<b>Soma (Gr)</b>	10420.4			

Foram coletadas três amostras (dados complementares no Anexo 1), das quais foram extraídas a média e desenvolvida a curva granulométrica a seguir (Figura 14), Além disto, foi realizado um comparativo com os limites de Wirtgen. Como descrito capítulos anteriores, é indispensável que a granulometria do material utilizado na reciclagem de pavimento com cimento Portland atenda a estes parâmetros.

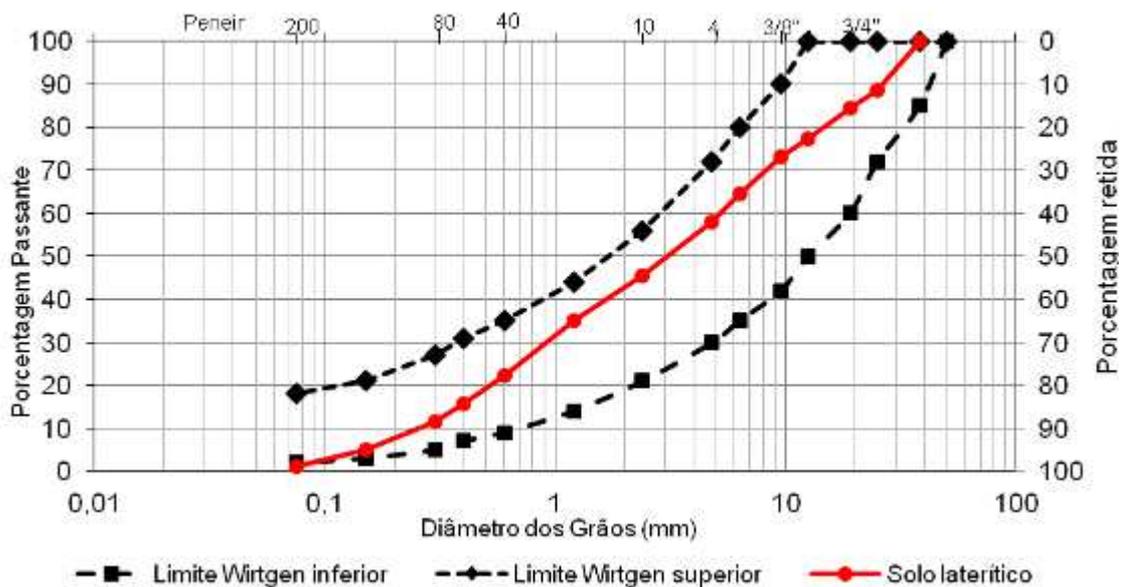


Figura 14 - Curva granulométrica do solo laterítico

Como visto no gráfico, apenas uma pequena faixa de grãos finos fica abaixo do limite inferior de Wirtgen, sendo que o restante do material atendeu aos parâmetros pré-estabelecidos. Desta forma, podemos caracterizar este solo como bem graduado.

A seguir, temos a análise granulométrica do fresado asfáltico (Tabela 7). A média foi desenvolvida através de quatro amostras (dados complementares no Anexo 2).

Tabela 7 - Média das análises granulométricas do fresado asfáltico.

Peneira (mm)	Peso retido (g)	% Retido	% Retido acumulado	% Passante
38	0.0	0.0	0	100
25	954.8	8.6	9	91
19	492.4	4.4	13	87
12.5	1279.6	11.5	24	76
9.5	917.2	8.2	33	67
6.3	1720.7	15.4	48	52

<b>4.8</b>	1000.6	9.0	57	43
<b>2.4</b>	1895.1	17.0	74	26
<b>1.2</b>	1214.0	10.9	85	15
<b>0.6</b>	944.9	8.5	93	7
<b>0.4</b>	307.7	2.8	96	4
<b>0.3</b>	165.2	1.5	98	2
<b>0.15</b>	180.3	1.6	99	1
<b>0.075</b>	54.9	0.5	100	0
<b>Fundo</b>	17.1	0.2	100	0
<b>Soma (g)</b>	11144.5			

Assim como realizado para o solo laterítico, foi desenvolvida uma curva granulométrica da média das amostras estudadas, assim como um comparativo com os limites de Wirtgen. Ao contrário do solo laterítico, grande parcela dos grãos finos ficam abaixo do limite de Wirtgen, o que reforça ainda mais a necessidade de ser feita uma correção granulométrica, para adequar a mistura aos limites pré-estabelecidos.

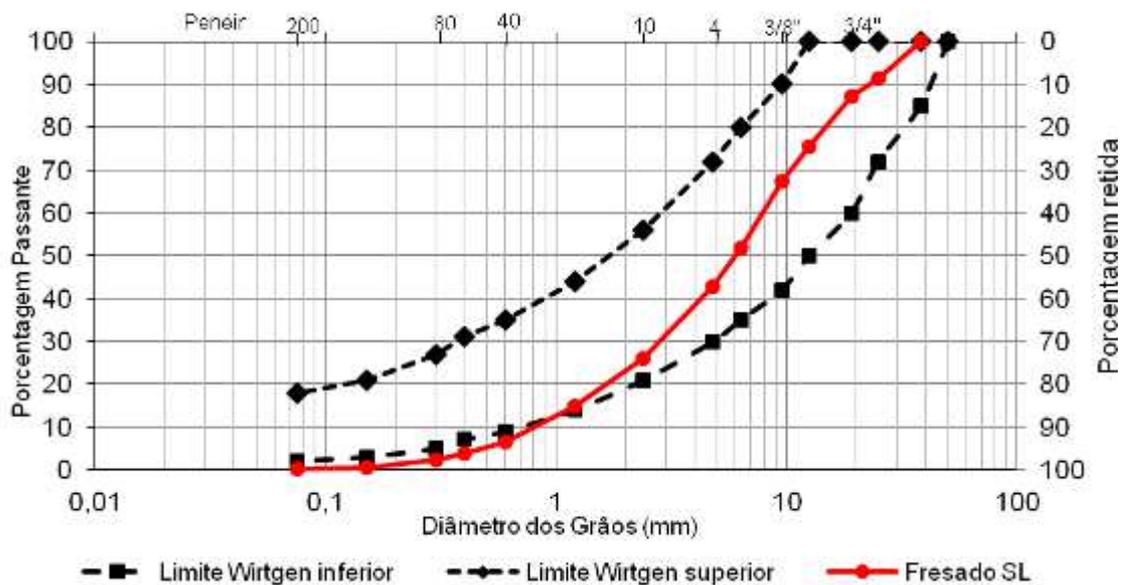


Figura 15 - Curva granulométrica do fresado asfáltico

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS

Este item trata da composição granulométrica das misturas, as alterações necessárias para mantermos a mistura dentro dos limites de Wirtgen, assim como os ensaios de compactação para determinação da umidade ótima.

Como analisado nas granulometrias do solo laterítico e do fresado asfáltico, seria necessária uma correção granulométrica para manter a mistura dentro nos limites definidos. Para tanto, decidiu-se adicionar uma parcela de finos oriundo do próprio solo laterítico, assim corrigindo a granulometria, e mantendo o experimento dentro do objetivo da pesquisa, que é estudar a reciclagem como solo laterítico, fresado asfáltico e cimento Portland, sem acrescentar um quarto material que destoaria do estudo.

Na Tabela 8 a seguir, pode ser visto a granulometria dos finos gerados a partir do solo laterítico.

Tabela 8 - Análise granulometria dos finos de solo laterítico.

<b>Peneira (mm)</b>	<b>Peso retido (Gr)</b>	<b>% Retido</b>	<b>% Retido acumulado</b>	<b>% Passante</b>
<b>38</b>	0.0	0.0	0	100
<b>25</b>	0.0	0.0	0	100
<b>19</b>	0.0	0.0	0	100
<b>12.5</b>	0.0	0.0	0	100
<b>9.5</b>	0.0	0.0	0	100
<b>6.3</b>	0.0	0.0	0	100
<b>4.8</b>	0.0	0.0	0	100
<b>2.4</b>	0.0	0.0	0	100
<b>1.2</b>	320.9	8.5	8	92
<b>0.4</b>	2187.0	57.9	66	34
<b>0.15</b>	437.4	11.6	78	22
<b>0.075</b>	477.1	12.6	91	9
<b>Fundo</b>	355.2	9.4	100	0
<b>Soma (Gr)</b>	3777.6			

Como pode ser visto na Figura 16, foi peneirado um material com alto percentual de finos, e decidido pelo acréscimo de 10% a 30% deste material para cada mistura, como será visto no item seguinte.

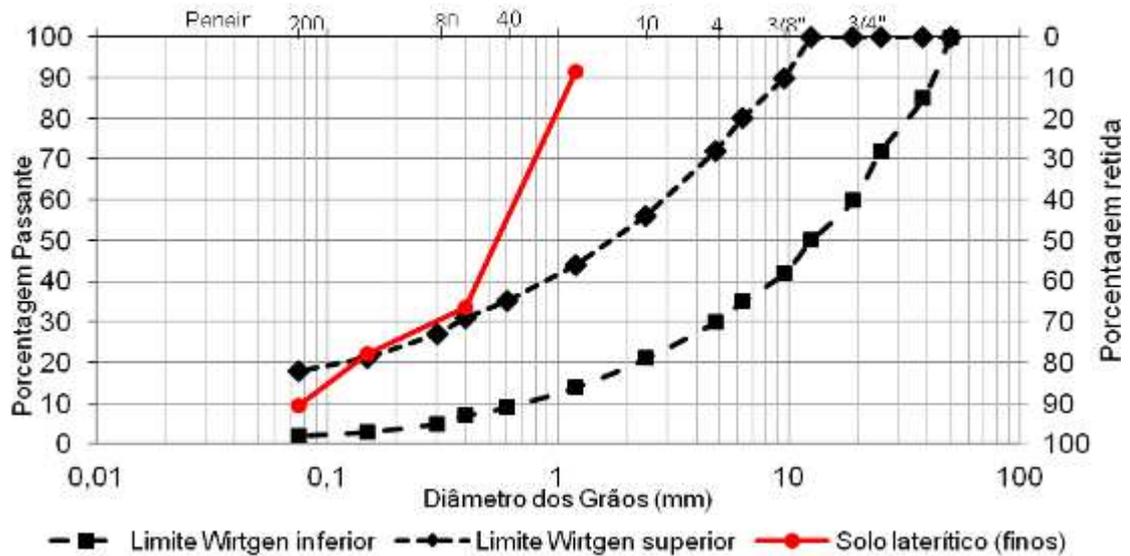


Figura 16 - Curva granulométrica dos finos de solo laterítico.

#### 4.2.1 Distribuição granulométrica

Neste item, será descrito a análise granulométrica das misturas que fazem parte da pesquisa. Foram desenvolvidas cinco dosagens distintas, sendo 7,57%, 20%, 50%, 80% e 92,43% de fresado asfáltico (e o restante de solo laterítico). Além disto, foram adicionados de 10% a 30% de finos oriundos do solo laterítico, dependendo da mistura, para correção granulométrica, como pode ser visto na tabela 9 a seguir.

Tabela 9 - Percentagem de finos adicionados

Mistura (% de fresado asfáltico)	% de finos adicionados
7.57%	10%
20%	30%
50%	30%
80%	30%
92.43%	30%

De acordo com estes dados, podemos verificar que as misturas com pouco teor de fresado (7.57%) não precisaram de muita correção, já que os próprios finos do solo laterítico eram praticamente capazes de manter a mistura dentro dos limites. Entretanto, quando a quantidade de fresado era superior a 20%, foi necessário adicionar o uma maior percentagem de finos

(30%). A adição de finos está vinculada a característica de quantidade limitada de finos presentes no fresado asfáltico, como pode ser visto na análise granulométrica anteriormente apresentada.

O resultado destas análises para cada mistura pode ser visto na Tabela 10.

Tabela 10 - Granulometria das misturas

<b>Peneira (mm)</b>	<b>Percentual Passante de Fresado</b>				
	<b>7.57%</b>	<b>20%</b>	<b>50%</b>	<b>80%</b>	<b>92.43%</b>
<b>38</b>	100	93	96	98	99
<b>25</b>	90	88	91	92	92
<b>19</b>	85	84	86	88	89
<b>12.5</b>	79	80	81	81	82
<b>9.5</b>	75	73	74	75	75
<b>6.3</b>	67	67	65	64	63
<b>4.8</b>	61	58	58	57	56
<b>2.4</b>	49	48	47	45	44
<b>1.2</b>	38	37	36	34	34
<b>0.6</b>	27	32	30	28	27
<b>0.4</b>	17	16	14	12	12
<b>0.3</b>	13	11	11	10	9
<b>0.15</b>	7	6	6	6	6
<b>0.075</b>	2	2	2	2	2

Por fim, foi possível gerar as curvas granulométricas de cada mistura (Figura 17). Como podem ser visualizadas, após o acréscimo dos finos de solo laterítico, todas as misturas se encontram dentro dos limites de Wirtgen.

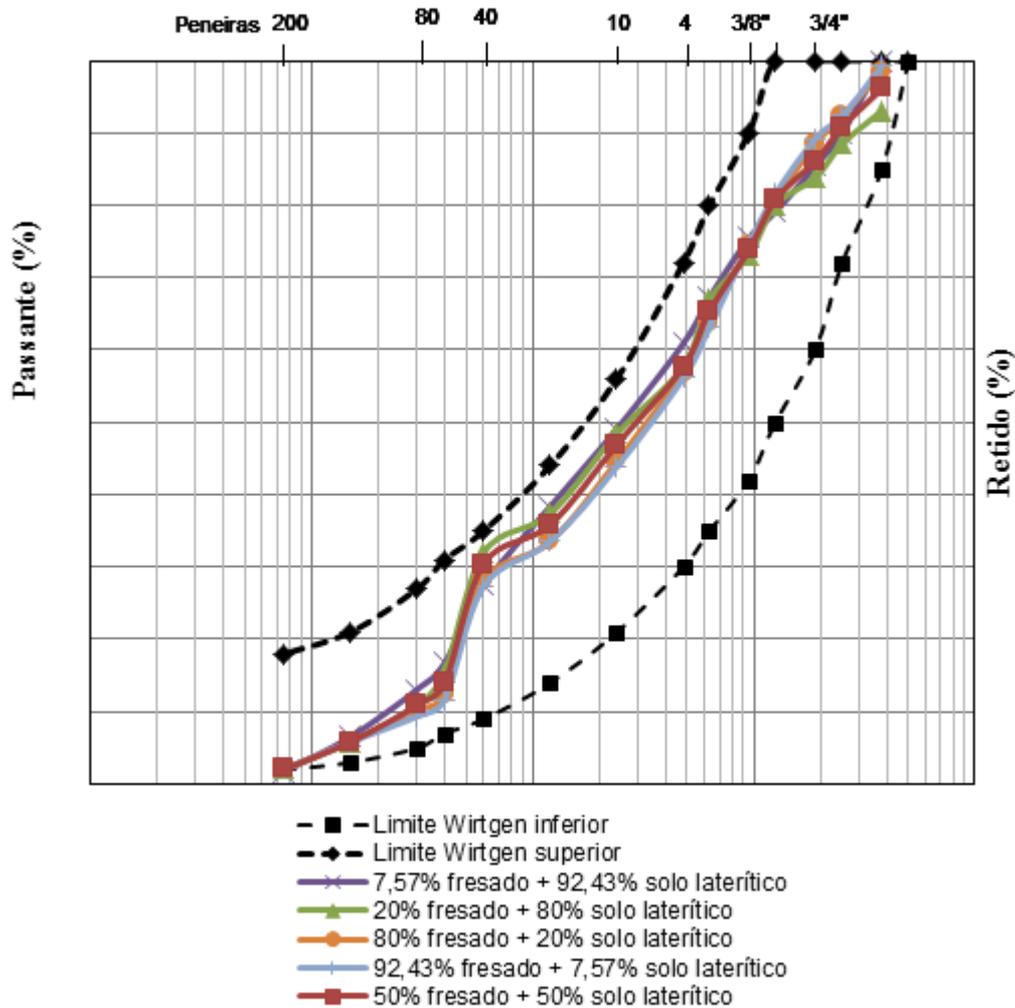


Figura 17: Curvas granulométricas das misturas

#### 4.2.2 Compactação

Para uma boa moldagem dos corpos de prova e resultados confiáveis a respeito do comportamento destas misturas, é necessário saber a umidade ótima para as mesmas. Isto é realizado através dos ensaios de compactação.

Foram adotados diferentes teores de cimento para cada mistura, de acordo com a pesquisa desenvolvida por Kleinert (2016). Diferentes dosagens de fresado asfáltico necessitam diferentes teores de cimento para uma mistura mais coesa. Desta forma, foram desenvolvidas nove misturas, com cinco pontos de umidade cada. Para melhor visualização, agruparam-se os gráficos das misturas que possuíam o mesmo (ou valor aproximado) teor de cimento. O primeiro número de cada mistura diz respeito ao teor de cimento na mistura, e o segundo, a

porcentagem de fresado asfáltico. Logo, a mistura SL 4-7,57 possui 4% de cimento e 7,57% de fresado asfáltico.

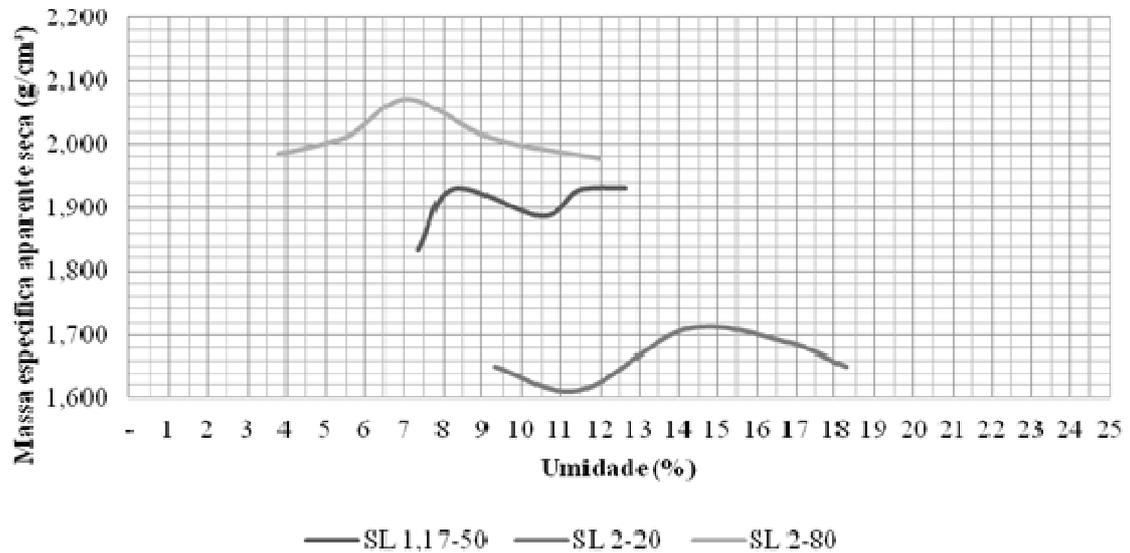


Figura 18 - Ensaio de compactação para misturas com teor de cimento de 1,17% e 2%.

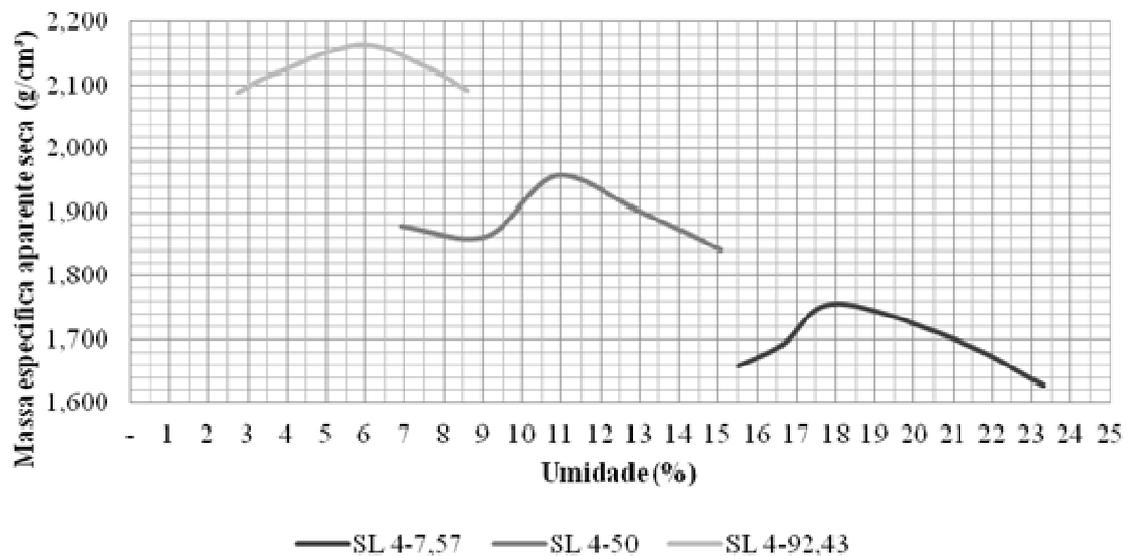


Figura 19 - Ensaio de compactação para misturas com teor de cimento de 4%.

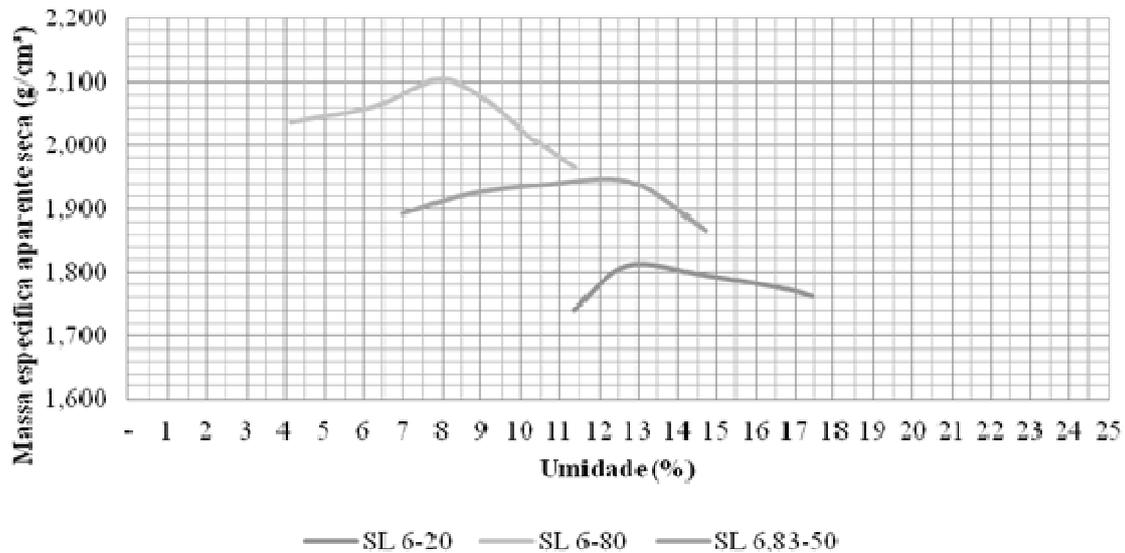


Figura 20 - Ensaio de compactação para misturas com teor de cimento de 6%.

A análise dos gráficos mostra a influência do fresado asfáltico no teor de umidade ótimo. É possível verificar que quanto maior a dosagem de fresado, menor o ponto do teor de umidade ótimo. Cada curva de massa específica apresenta uma queda significativa em relação à curva com menor dosagem de fresado. Esse fenômeno deve-se a menor capacidade do fresado asfáltico de absorver água, principalmente em relação ao solo laterítico, que apresenta uma boa absorção de água.

Através destes resultados obtidos, foi possível encontrar os seguintes pontos de umidade ótimos para cada mistura (Tabela 11).

Tabela 11 - Parâmetros de umidade ótima para cada mistura.

Mistura	$\omega_{ót}$ (%)	$\gamma_{smáx}$ (g/cm <sup>3</sup> )
<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

### 4.3 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples. Posteriormente, também é apresentada a análise estatística destes resultados que nos conduz a conclusões importantes a respeito da resistência a compressão simples de misturas deste tipo.

Conforme proposto por Kleinert (2016), o processo de cura envolvia colocar os corpos de prova embalados em invólucro plástico e imersos em água. No entanto, foi constatado que o contato dos CPs com água durante a cura inviabilizava a utilização dos mesmos. Na Figura 21 a seguir podem ser vistas as condições de alguns corpos de prova após este contato com a água.



Figura 21 - Corpos de prova inviabilizados pelo contato com água

Essa ocorrência pode ser justificada pela presença do solo laterítico, que precisa ser muito bem drenado para apresentar resultados satisfatórios. Por esta razão, a partir do momento em que foi detectado este problema, decidiu-se mudar o método de cura para preservar os corpos de prova restantes. Desta forma, os métodos de cura dos corpos de prova esta descritos na tabela 12.

Tabela 12 - Métodos de cura

<b>Método de Cura</b>	<b>Tempo de Cura</b>	<b>Molde</b>	<b>Imersão em água</b>	<b>Fora d'água</b>
<b>3 dias A</b>	3 dias	1 dia	1 dia	1 dia
<b>3 dias B</b>	3 dias	1 dia	2 horas	46 horas
<b>7</b>	7 dias	1 dia	-	6 dias
<b>14 dias A</b>	14 dias	1 dia	6 dias	7 dias
<b>14 dias B</b>	14 dias	1 dia	5 dias	8 dias

A Tabela 13a seguir apresenta os resultados de RCS obtidos para os tempos de cura de 3, 7 e 14 dias. Infelizmente, alguns resultados não foram possíveis devido à perda dos corpos de prova como anteriormente citado.

Os valores descritos na tabela abaixo correspondem a valores individuais, com exceção da mistura SL 4-50, cujo valor apresentado é a média dos resultados de corpos de prova para cada tempo de cura.

Tabela 13- RCS de misturas conforme dias de cura

Mistura	RCS (MPa)		
	3 dias	7 dias	14 dias
SL 1,17-50	-	1.99	-
SL 2-20	-	2.27	-
SL 2-80	1.11	2.64	1.19
SL 4-7,57	0.46	1.69	0.46
SL 4-50	1.21	3.52	2.50
SL 4-92,43	2.51	3.28	3.92
SL 6-20	-	0.97	-
SL 6-80	2.35	3.57	3.77
SL 6,83-50	2.43	3.90	3.69

A Tabela 14 apresenta os valores individuais de RCS bem como a média, desvio padrão e o coeficiente de variação obtidos para a mistura SL 4-50.

Tabela 14 -Resultados de RCS para mistura SL-4-50

Mistura	RCS (MPa)		
	3 dias	7 dias	14 dias
SL 4-50	1.25	-	-
	1.14	-	2.48
	1.18	-	2.42
	1.34	3.77	-
	-	3.73	2.37
	1.13	3.06	2.72
<b>Média</b>	1.21	3.52	2.50
<b>Desvio padrão</b>	0.09	0.40	0.16
<b>Coeficiente de variação</b>	7%	11%	6%

A partir dos dados da Tabela 13, pode-se gerar um gráfico do comportamento do RCS em relação ao tempo de cura.

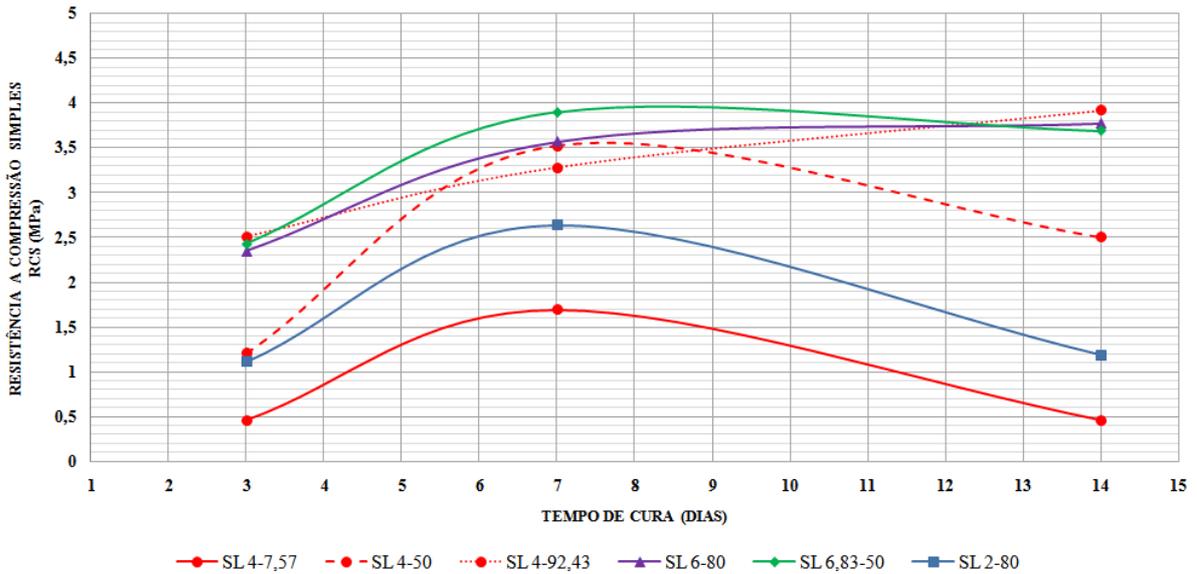


Figura 22 - RCS em função do tempo de cura

Claramente, o método de cura influencia no resultado dos ensaios de RCS, como poder ser visto no gráfico. Além disso, é importante destacar que as misturas com maior teor de cimento ainda apresentaram uma estabilidade na resistência com a cura, mesmo tendo sido imersas alguns dias em água.

Outra análise importante que pode ser feita a partir dos resultados dos ensaios realizados é o comportamento da RCS em relação a diferentes dosagens de fresado asfáltico e cimento. As Tabelas 15 e 16 apresentam, em valores percentuais, o aumento da resistência à compressão simples quando o teor de apenas uma dos componentes da mistura se altera.

Tabela 15- Aumento do RCS com aumento do teor de fresado

Misturas comparadas		Aumento do RCS (%)		
		3 dias	7 dias	14 dias
<b>SL 4-7,57</b>	<b>SL 4-50</b>	62%	52%	82%
<b>SL 4-50</b>	<b>SL 4-92,43</b>	52%	-7%	36%

Tabela 16 - Aumento do RCS com aumento do teor de cimento

Misturas comparadas		Aumento do RCS		
		3 dias	7 dias	14 dias
<b>SL 2-80</b>	<b>SL 6-80</b>	53%	26%	68%
<b>SL 4-50</b>	<b>SL 6,83-50</b>	50%	10%	32%

Os resultados apresentados mostram que o acréscimo de material fresado na mistura resultou num aumento do RCS para os tempos de cura de 3 e 14 dias, enquanto o aumento do teor de cimento mostrou gerar um incremento na RCS em todas as situações apresentadas na tabela 16.

#### 4.3.1 Análise estatística dos resultados de RCS

Os resultados obtidos nos ensaios foram submetidos a uma análise estatística, para então gerar um modelo de regressão e por fim de identificar quais fatores influenciam na resistência à compressão simples de misturas recicladas de fresado asfáltico, solo laterítico e cimento Portland.

$$RCS_i = -0,4 + 0,02(\%fres) + 0,26(\%cim) + 0,07(tempo)$$

Como a constante não era estatisticamente significativa, a mesma foi retirada da regressão e o processo foi repetido.

$$RCS_i = 0,02(\%fres) + 0,21(\%cim) + 0,07(tempo)$$

O resultado revela que as três variáveis ajudam a explicar o RCS e são estatisticamente significativas. Contudo, como podemos ver a partir da leitura do  $R^2$  ajustado nos traz apenas 34% de explicação, nos informando que as nossas variáveis explicam pouco sobre a resistência. Como houve problema amostral, isto pode ter afetado a nossa capacidade inferência dos resultados. Mesmo assim, a porcentagem de fresado, o teor de cimento e tempo de cura foram positivos e contribuíram para o aumento da resistência, possuindo uma relação estatística forte com o resultado final.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões sobre a resistência a compressão simples a partir dos resultados obtidos neste estudo.

Primeiramente, faz-se necessária a comparação dos resultados deste estudo com os valores pré-definidos para normas existentes sobre reciclagem de pavimentos com cimento. Tanto DEINFRA quanto DNIT estabelecem um valor de RCS entre 2,1 e 2,5 MPa 7 dias de cura, como mostrado na Tabela 1. Estes limites foram observados nos resultados de ensaios com alguns corpos de prova, principalmente aqueles com menor teor de cimento. Além disso, quando comparado às referências estabelecidas pela Austroads (2002), a mistura de fresado asfáltico, solo laterítico e cimento apresentou um nível de cimentação considerado levemente cimentado, onde os valores de RCS encontram-se entre 1 MPa e 4 MPa.

Quanto à influência das variáveis estudadas na resistência a compressão simples deste tipo de mistura é possível afirmar que essas variáveis apresentam influência significativa na RCS. A dosagem de fresado de 50% apresenta maior resistência dentre as misturas apresentada, comprovando a importância do material, desde que bem dosada. Já o teor de cimento apresentou ganhos crescentes na resistência, aumentando sempre que a dosagem era elevada. O método de cura, por sua vez, mostrou-se bastante relevante aos resultados dos ensaios, uma vez que quando alterado, foi possível perceber um ganho em RCS.

Sobre o método de cura, também é possível inferir que, para este tipo de mistura, a imersão em água como parte do processo de cura representa um risco à integridade dos corpos de prova, o que foi comprovado neste estudo com a perda de alguns corpos de prova e a diminuição da resistência dos mesmos. Logo, a imersão em água compromete a resistência à compressão simples em misturas recicladas envolvendo solo laterítico.

Quanto ao tipo de material base utilizado na reciclagem de pavimentos é possível observar características distintas no comportamento das misturas e na evolução da RCS com o tempo de cura, quando comparado aos resultados obtidos em outros estudos desta mesma pesquisa global. Para misturas com solo laterítico, a maior taxa de elevação da resistência pode ser observada entre o 3º e o 7º dia de cura. Para solo-cimento, por exemplo, o maior aumento da resistência se dá entre o 7º e o 14º dia, como constatado por Kleinert (2016).

Além disso, vale destacar que as misturas de BGTC e solo-cimento pesquisadas por Kleinert (2016) apresentaram valores de RCS maiores do que as misturas recicladas com solo laterítico presente neste trabalho.

Por fim, então, podemos então afirmar se faz necessário a importância de um solo laterítico bem drenado, uma vez que a presença de água influencia diretamente na RCS deste tipo de mistura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland composto: NBR 11578**. Rio de Janeiro, 5p. 1991.

ASSOCIATION MONDIALE DE LA ROUTE. **Recyclage des chaussées (guides): AIPCR 78.02.BFR**. Paris, 160p. 2003

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION. **Basic Asphalt Recycling Manual**. Annapolis, Maryland, 2001.

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

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

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2015: Relatório gerencial**. Brasília, 422p. 2015.

DAVID, D. de. **Misturas asfálticas recicladas a frio: estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado**. 2006. 128p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **Pavimentação: Reciclagem de pavimento in situ com adição de cimento: DER/PR ES-P 33/05**. Curitiba, 13 p. 2005.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Reciclagem de pavimento asfáltico in situ com cimento e brita: ET-DE-P00/035**. São Paulo, 22 p. 2006.

DEPARTAMENTO ESTADUAL DE INFRAESTRUTURA DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Pavimentação – Especificação de Serviço: Reciclagem profunda de pavimento com adição de cimento Portland: DEINFRA-SC-ES-P09/12**. Florianópolis, 14 p. 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos: DNER-ME 091/98**. Rio de Janeiro, 6 p. 1998a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Agregados – Análise Granulométrica: DNER-ME 083/98**. Rio de Janeiro, 5 p. 1998b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **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.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio: DNIT 164/2013 – ME.** Rio de Janeiro, 7 p. 2013b

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) – UFRGS, Porto Alegre.

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

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.

MARTINÉZ, G.S.S. **Estudo do comportamento mecânico de solos laterítico da formação barreiras.** 2003. 291p. Dissertação (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 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.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments.** 5. Ed. New York: John Willey & Sons, Inc., 2001.

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.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Guide to Full Depth Reclamation (FDR) with Cement.** Illinois, EUA, 2005.

SUAREZ, D.A.A. **Estudo do comportamento de dois solos lateríticos do Estado de São Paulo com adição de emulsão asfáltica.** 2008. 144p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Carlos.

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

## **ANEXOS –Análises granulométricas**

## ANEXO 1 - Análise granulométrica do fresado asfáltico

Peneira (mm)	Saco C1		Saco C3		Saco C6		SL Média	
	Peso retido	Passante (%)	Peso retido	Passante (%)	Peso retido	Passante (%)	Peso retido	Passante (%)
<b>38.0</b>	70.40	99.09	0.00	100.00	0.00	100.00	39.77	99.56
<b>25.0</b>	68.70	98.21	56.30	99.49	415.50	94.32	75.37	98.72
<b>19.0</b>	321.90	94.07	270.80	97.02	514.70	87.28	245.60	95.99
<b>12.5</b>	843.90	83.22	960.30	88.26	1114.0	72.04	899.97	85.97
<b>9.5</b>	795.20	72.99	744.80	81.46	755.80	61.70	786.27	77.22
<b>6.3</b>	1233.8	57.12	1536.8	67.44	1319.8	43.65	1352.1	62.18
<b>4.8</b>	551.20	50.03	1015.0	58.18	586.00	35.63	795.87	53.32
<b>2.4</b>	1362.7	32.51	1954.10	40.35	1259.50	18.41	1553.20	36.04
<b>2.0</b>	246.50	29.34	488.40	35.90	190.30	15.80	324.67	32.42
<b>1.2</b>	690.00	20.46	1207.1	24.89	454.60	9.58	888.17	22.54
<b>0.6</b>	553.40	13.35	1054.9	15.26	321.10	5.19	748.13	14.21
<b>0.4</b>	248.10	10.16	475.80	10.92	93.80	3.91	328.43	10.56
<b>0.3</b>	192.40	7.68	359.80	7.64	62.90	3.05	262.00	7.64
<b>0.180</b>	187.20	5.27	410.20	3.90	53.00	2.32	263.53	4.71
<b>0.150</b>	96.70	4.03	205.20	2.02	31.20	1.90	133.73	3.22
<b>0.075</b>	171.80	1.82	168.30	0.49	58.80	1.09	171.77	1.31
	141.50	0.00	53.60	0.00	79.90	0.00	117.80	0.00

## ANEXO 2 - Análise granulométrica do solo laterítico

Peneira (mm)	SL 1		SL 2		SL 3		SL Média	
	Peso retido (g)	Passante (%)	Peso retido (g)	Passante (%)	Peso retido (g)	Passante (%)	Peso retido (g)	Passante (%)
<b>38.0</b>	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
<b>25.0</b>	1035.9	87.96	1132.5	88.81	1364.0	89.12	1177.5	88.70
<b>19.0</b>	468.60	82.52	436.20	84.50	423.20	85.74	442.67	84.45
<b>12.5</b>	640.10	75.08	703.90	77.55	845.40	78.99	729.80	77.45
<b>9.5</b>	330.70	71.24	485.30	72.76	491.90	75.07	435.97	73.26
<b>6.3</b>	679.50	63.34	899.90	63.87	1129.5	66.05	902.97	64.60
<b>4.8</b>	511.30	57.40	683.40	57.12	836.30	59.38	677.00	58.10
<b>2.4</b>	1049.6	45.20	1250.3	44.77	1606.2	46.56	1302.0	45.61
<b>1.2</b>	852.40	35.30	1049.4	34.40	1354.3	35.76	1085.3	35.19
<b>0.6</b>	1111.7	22.38	1293.50	21.62	1621.50	22.82	1342.23	22.31
<b>0.4</b>	557.40	15.90	604.01	15.66	850.50	16.03	670.64	15.88