



**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**  
**Área de Concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente**

**Matheus De Conto Ferreira**

**COMPORTAMENTO DE MATERIAL DE RECICLAGEM  
PROFUNDA DE PAVIMENTO ESTABILIZADO COM NATA  
DE CIMENTO**

**Passo Fundo**

**2016**

Matheus De Conto Ferreira

COMPORTAMENTO DE MATERIAL DE RECICLAGEM  
PROFUNDA DE PAVIMENTO ESTABILIZADO COM NATA DE  
CIMENTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia sob a orientação do Professor Doutor Antônio Thomé, e coorientação do Professor Doutor Francisco Dalla Rosa.

Passo Fundo

2016

# **MATHEUS DE CONTO FERREIRA**

## **COMPORTAMENTO DE MATERIAL DE RECICLAGEM PROFUNDA DE PAVIMENTO ESTABILIZADO COM NATA DE CIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia sob a orientação do Professor Dr. Antônio Thomé, e coorientação do Professor Dr. Francisco Dalla Rosa.

Data de Aprovação: Passo Fundo, 18 de abril de 2016.

Professor Doutor Antônio Thomé  
Orientador

Professor Doutor Francisco Dalla Rosa  
Coorientador

Professor Doutor Márcio Felipe Floss  
Universidade de Passo Fundo – UPF

Professor Doutor Pedro Domingos Marques Prietto  
Universidade de Passo Fundo – UPF

Professor Doutor José Tadeu Balbo  
Universidade de São Paulo – USP

Passo Fundo

2016

# DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus avós Ana e Getúlio (em memória).*

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pois sem Ele não conseguiria obter essa conquista.

Agradeço a toda minha família, em especial ao meu pai Dorci, a minha mãe Maria Izabel e ao meu irmão Lucas, pelo apoio durante toda essa caminhada.

Agradeço aos meus orientadores professores Antônio Thomé e Francisco Dalla Rosa pelo auxílio prestado durante a orientação deste trabalho, pela paciência, pela dedicação, pelas considerações, como também pelo conhecimento repassado.

Agradeço aos professores componentes da banca examinadora José Tadeu Balbo, Márcio Felipe Floss e Pedro Domingos Marques Prietto pelas suas considerações efetuadas sobre o trabalho.

Agradeço aos laboratoristas Leunir, Amilton, Mateus e Nilton do CETEC da Universidade de Passo Fundo pela ajuda e disposição para a realização dos ensaios.

Agradeço também ao laboratorista Derli do Núcleo de Tecnologia Mecânica da Universidade de Passo fundo pela ajuda na realização dos ensaios de fadiga.

Agradeço também as demais pessoas que me ajudaram na realização dos ensaios de laboratório, em especial a minha colega Aline Baruffi e a bolsista Maiara Karina.

Agradeço à Universidade de Passo Fundo e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental por me proporcionar mais uma etapa da vida alcançada.

Agradeço aos meus amigos e colegas de mestrado pelo convívio durante os dois anos de curso.

Enfim, a todos que contribuíram de alguma forma para que eu conseguisse alcançar essa conquista, muito obrigado.

## RESUMO

A remoção de um pavimento antigo gera uma grande quantidade de material, o qual pode causar impactos ambientais devido a sua disposição incorreta no ambiente. A utilização da reciclagem de pavimentos vem aumentando no mundo devido às vantagens que esta solução proporciona, como o aproveitamento dos agregados e ligantes do pavimento deteriorado, possível redução de custos e do consumo de energia, e a preservação do meio ambiente. Um dos agentes estabilizantes mais utilizados no processo de reciclagem de pavimentos é o cimento Portland, o qual gera um pavimento mais resistente e durável. Porém, quando aplicado em estado seco pode causar problemas, principalmente ameaçando à saúde das pessoas devido à inalação da poeira do cimento, tornando-se assim uma técnica restrita em áreas urbanas. Uma solução para resolver o problema deste pó gerado é a utilização do cimento em forma de nata, reduzindo os impactos ambientais e evitando os prejuízos à saúde das pessoas. Assim, o objetivo geral deste trabalho é avaliar o comportamento mecânico de misturas oriundas de reciclagem profunda de pavimento com a adição de nata de cimento. Em uma primeira etapa, foi realizada a caracterização dos materiais utilizados no estudo. Após, foram obtidas as resistências à compressão simples RCS das misturas recicladas para 5 consumos de cimento, obtendo-se um consumo ótimo para as misturas recicladas de 3,63% (70 kg/m<sup>3</sup>) em relação à massa seca. O valor médio de RCS encontrado para a mistura ótima foi de 3,19 MPa e o valor médio de tração na flexão foi de 0,71 MPa. Também foi verificada para esta mistura reciclada a vida de fadiga e os módulos de resiliência considerando 3 relações de tensões aplicadas (0,75; 0,60 e 0,45 da tensão de ruptura). Os módulos obtidos apresentaram-se baixos (variando de 855 MPa a 126 MPa) quando comparados valores encontrados para materiais cimentados. Com os resultados obteve-se também a curva de fadiga que apresentou um coeficiente de regressão R<sup>2</sup> igual a 0,9564.

**Palavras-chave:** Comportamento Mecânico, Estabilização, Nata de Cimento, Reciclagem de Pavimentos.

## ABSTRACT

Removing an old pavement generates a large amount of material, which can cause environmental impacts due to its improper disposal in the environment. The use of recycling pavement is increasing worldwide due to the advantages that this solution provides, such as the use of aggregates and binders of deteriorated pavement, possible reduce costs and energy consumption, and environmental preservation. One stabilizing agents commonly used in recycling pavement process is Portland cement, which generates a more rugged and durable surface. However, when applied to dry can cause problems, particularly threatening to people's health due to cement dust inhalation, thus becoming a restricted technique in urban areas. A solution to the problem of the dust generated is the use of cement slurry, reducing environmental impacts and avoiding damage to people's health. Therefore, the objective of this study is to evaluate the mechanical behavior of mixtures originating from full depth reclamation with the addition of cement slurry. In the first stage it was carried out to characterize the materials used in the study. After that, the unconfined compression strength UCS mixtures recycled to 5 cement content were obtained, obtaining a great content for recycled mixtures of 3.63% (70 kg/m<sup>3</sup>) in the dry mass. The average UCS found for the optimum mix was 3,19 MPa and the average value of the flexural tensile strength was 0,71 MPa. It was also verified for this mixture recycled the fatigue life and the resilience modules considering 3 strain relations applied (0,75; 0,60 and 0,45 of the breaking strain). The modules obtained were low (range 855 MPa to 126 MPa) compared to values found cemented materials. The results obtained are also the fatigue curve showed an R<sup>2</sup> regression coefficient of 0,9564.

**Keywords:** Mechanical Behaviour, Stabilization, Cement Slurry, Recycling Pavement.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aplicação da técnica de reciclagem <i>in situ</i> a frio.....	20
Figura 2 – Etapas da reciclagem <i>in situ</i> a frio com emulsão betuminosa.....	21
Figura 3 – Etapas da reciclagem <i>in situ</i> a frio com espuma de asfalto.....	22
Figura 4 – Etapas da reciclagem <i>in situ</i> a frio com cimento.....	22
Figura 5 – Técnica de reciclagem <i>in situ</i> a quente. ....	24
Figura 6 – Representação esquemática do processo de reciclagem profunda. ....	24
Figura 7 – Técnica de Reciclagem Profunda.....	25
Figura 8 – Técnicas de distribuição de cimento: (a) aplicação de cimento em pó no processo de reciclagem profunda, (b) aplicação de nata de cimento no processo de reciclagem profunda. ....	26
Figura 9 – Reciclagem em usina. ....	27
Figura 10 – Esquema para ensaio tração na flexão em dois cutelos.....	37
Figura 11 – Estágios em um processo de fadiga. ....	40
Figura 12 – Diagrama de Esforços na viga submetida ao ensaio de fadiga em 4 pontos.....	42
Figura 13 – Módulos de Resiliência sugeridos para estudos e projetos. ....	43
Figura 14 – Etapas a serem realizadas no estudo. ....	46
Figura 15 – Amostra de material fresado para secagem em temperatura ambiente. ....	49
Figura 16 – Resíduo proveniente do beneficiamento de pedras semi-preciosas no município de Soledade,RS. ....	51
Figura 17 – Adição da nata de cimento à mistura de material fresado e resíduo. ....	55
Figura 18 – Chapa de aço utilizada na compactação por vibração dos corpos de prova cilíndricos.....	55
Figura 19 – Chapa de aço no cilindro durante execução da compactação. ....	56
Figura 20 – Etapas da moldagem dos corpos de prova cilíndricos (golpes com haste, compactação por vibração, controle da altura e escarificação).....	57
Figura 21 – Corpos de prova armazenados em câmara úmida. ....	58
Figura 22 – Chapa de aço utilizada para compactação das vigas.....	59
Figura 23 – Moldagem das vigas (corpos de prova prismáticos). ....	59
Figura 24 – Vigas armazenadas em câmara úmida. ....	60
Figura 25 – Medição dos diâmetros e alturas dos corpos-de-prova cilíndricos. ....	61
Figura 26 – Ensaio de resistência à compressão simples. ....	62
Figura 27 – Ensaio de resistência à tração na flexão.....	63
Figura 28 – Ensaio de Fadiga. ....	64
Figura 29 – Leitura dos deslocamentos: (a) Dados da prensa, (b) Dados dos LVDTs. ....	64
Figura 31 – Distribuição granulométrica do material fresado.....	65
Figura 32 – Enquadramento da distribuição granulométrica do fresado na faixa II do DNIT. ....	66
Figura 33 – Distribuição granulométrica do resíduo. ....	67
Figura 34 – Mistura com 70% de fresado e 30% de resíduo.....	68
Figura 35 – Enquadramento da distribuição granulométrica da mistura (70% fresado + 30% resíduo) na faixa II do DNIT. ....	69
Figura 36 – Curva granulométrica obtida no ensaio e curva teórica, enquadradas na faixa II do DNIT.....	70
Figura 37 – Distribuição granulométrica dos materiais utilizados e limites da faixa II do DNIT.....	70
Figura 38 – Corpos de prova rompidos após os ensaios de resistência à compressão simples.....	71
Figura 39 – Médias de RCS, desvios padrões e classificação de cada grupo.....	75

Figura 40 – Resistência à compressão simples x Consumo de cimento.....	75
Figura 41 – Resistência à compressão simples x Consumo de cimento (com resultados do consumo ótimo). .....	78
Figura 42 – Viga rompida após ensaio de resistência à tração na flexão. ....	79
Figura 43 – Ruptura dentro do terço médio entre os apoios.....	79
Figura 44 – Ruptura de viga após o ensaio de fadiga.....	81
Figura 45 – Seção de uma das vigas rompidas (ensaio de fadiga). ....	81
Figura 46 – Curva de fadiga (Log N° de ciclos x RT).....	82
Figura 47 – N° de ciclos x Deslocamento (CDP1-0,75).....	83
Figura 48 – N° de ciclos x Deslocamento (CDP2-0,75).....	84
Figura 49 – N° de ciclos x Deslocamento (CDP3-0,75).....	84
Figura 50 – N° de ciclos x Deslocamento (RT = 0,75).....	85
Figura 51 – N° de ciclos x Deslocamento (CDP1-0,60).....	85
Figura 52 – N° de ciclos x Deslocamento (CDP2-0,60).....	86
Figura 53 – N° de ciclos x Deslocamento (CDP3-0,60).....	86
Figura 54 – N° de ciclos x Deslocamento (RT = 0,60).....	87
Figura 55 – N° de ciclos x Deslocamento (CDP1-0,45).....	88
Figura 56 – N° de ciclos x Deslocamento (CDP2-0,45).....	88
Figura 57 – N° de ciclos x Deslocamento (RT = 0,45).....	89
Figura 58 – N° de ciclos x Deslocamento (3 relações de tensões – RT). ....	89
Figura 59 – N° de Ciclos x Módulo de Resiliência (CDP1-0,75).....	91
Figura 60 – N° de Ciclos x Módulo de Resiliência (CDP2-0,75).....	91
Figura 61 – N° de Ciclos x Módulo de Resiliência (CDP3-0,75).....	92
Figura 62 – N° de ciclos x Módulo de Resiliência (RT = 0,75). ....	92
Figura 63 – N° de Ciclos x Módulo de Resiliência (CDP1-0,60).....	93
Figura 64 – N° de Ciclos x Módulo de Resiliência (CDP2-0,60).....	93
Figura 65 – N° de Ciclos x Módulo de Resiliência (CDP3-0,60).....	94
Figura 66 – N° de ciclos x Módulo de Resiliência (RT = 0,60). ....	94
Figura 67 – N° de Ciclos x Módulo de Resiliência (CDP1-0,45).....	95
Figura 68 – N° de Ciclos x Módulo de Resiliência (CDP2-0,45).....	95
Figura 69 – N° de ciclos x Módulo de Resiliência (RT = 0,45). ....	96
Figura 70 – N° de ciclos x Módulo de Resiliência – 200 a 20000 ciclos. ....	97
Figura 71 – N° de ciclos x Módulo de Resiliência – 200 a 2000 ciclos. ....	97

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos tipos de reciclagem de pavimentos. ....	18
Quadro 2 – Valores típicos de resistência à tração na flexão. ....	37
Quadro 3 – Dosagens e ensaios realizados no estudo. ....	47
Quadro 4 – Variáveis fixas, variáveis de controle e variáveis de resposta. ....	47
Quadro 5 – Faixas granulométricas dos materiais reciclados com adição de cimento. ....	50
Quadro 6 – Consumos de cimento, teor de água e relações água/cimento. ....	53
Quadro 7 – Identificação dos corpos de prova cilíndricos para os ensaios de resistência à compressão simples. ....	54
Quadro 8 – Identificação das vigas para os ensaios de fadiga. ....	64
Quadro 9 – Correção da curva granulométrica da mistura reciclada. ....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados obtidos dos ensaios de resistência à compressão simples. ....	72
Tabela 2 – Resultados obtidos pelo método ANOVA.....	73
Tabela 3 – Resultados obtidos do teste-t. ....	74
Tabela 4 – Consumos de cimento obtidos para resistências (RCS) da faixa do DNIT. ....	76
Tabela 5 – Resultados obtidos dos ensaios de RCS para o consumo ótimo de cimento. ....	77
Tabela 6 – Valores de coeficientes de regressão $R^2$ e equações obtidas para as linhas de tendência. ....	78
Tabela 7 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão. ....	80
Tabela 8 – Resultados obtidos dos ensaios de fadiga. ....	81

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1	Problema da Pesquisa .....	14
1.2	Justificativa.....	15
1.3	Objetivos.....	16
1.3.1	Objetivo Geral .....	16
1.3.2	Objetivos Específicos .....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1	Reciclagem de Pavimentos.....	17
2.2	Tipos de Reciclagem de Pavimentos .....	18
2.2.1	Reciclagem <i>In Situ</i> .....	18
2.2.1.1	Reciclagem <i>In Situ</i> a Frio .....	19
2.2.1.2	Reciclagem <i>In Situ</i> a Frio com Emulsões Asfálticas.....	21
2.2.1.3	Reciclagem <i>In Situ</i> a Frio com Espuma de Asfalto.....	21
2.2.1.4	Reciclagem <i>In Situ</i> a Frio com Cimento Portland.....	22
2.2.1.5	Reciclagem <i>In Situ</i> a Quente .....	23
2.2.1.6	Reciclagem Profunda ( <i>Full depth reclamation</i> ).....	24
2.2.2	Reciclagem em Usina .....	27
2.2.2.1	Reciclagem em Usina a Frio .....	28
2.2.2.2	Reciclagem em Usina a Quente .....	28
2.3	Aplicação da Técnica de Reciclagem de Pavimentos com Adição de Cimento .....	29
2.4	Especificações Sobre Reciclagem de Pavimentos com Adição de Cimento.....	30
2.5	Caracterização Mecânica de Misturas Recicladas com Adição de Cimento.....	31
2.5.1	Resistência à Compressão Simples (RCS) .....	31
2.5.2	Resistência à Tração .....	36
2.5.3	Vida de Fadiga.....	39
2.5.4	Módulo de Resiliência.....	42
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>46</b>
3.1	Programa de Pesquisa.....	46
3.2	Caracterização dos Materiais.....	48
3.2.1	Material Fresado .....	48
3.2.2	Resíduo de Beneficiamento de Pedras Semi-preciosas .....	50
3.2.3	Correção Granulométrica .....	51
3.2.4	Agente Estabilizante .....	52
3.2.5	Água .....	52
3.3	Definição das Variáveis – Consumos de Cimento e Densidade.....	52
3.4	Moldagem dos Corpos de Prova.....	53
3.4.1	Moldagem para Ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS).....	54
3.4.2	Corpos de prova para Ensaios de Resistência de Tração na Flexão e Vida de Fadiga.....	58
3.5	Ensaio de Resistência à Compressão Simples.....	60
3.5.1	Análise Estatística .....	62
3.6	Ensaio de Resistência à Tração na Flexão.....	62
3.7	Determinação da Vida de Fadiga e Módulo de Resiliência.....	63
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>65</b>
4.1	Caracterização dos Materiais.....	65
4.1.1	Distribuição Granulométrica do Material Fresado .....	65

4.1.2	Distribuição Granulométrica do Resíduo .....	66
4.1.3	Correção Granulométrica da Mistura (Fresado e Resíduo) .....	67
4.2	Resistência à Compressão Simples.....	71
4.2.1	Análise Estatística dos Resultados Obtidos.....	73
4.2.2	Definição do Consumo Ótimo de Cimento .....	75
4.3	Resistência à Tração na Flexão .....	78
4.4	Vida de Fadiga e Módulo de Resiliência.....	80
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>99</b>
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros .....	100

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

# 1 INTRODUÇÃO

A evolução da tecnologia está tomando caminhos que a levam a ter uma relação com o meio ambiente, reduzindo os impactos ambientais, como também o custo de obras civis. Como também é responsável por parte dos impactos ambientais, a construção rodoviária vem inovando gradativamente no desenvolvimento de novas tecnologias que possibilitem reduzir os danos ao meio ambiente (SACHET, 2007).

A qualidade e quantidade de rodovias pavimentadas têm um papel importante na economia, no desenvolvimento nacional e nos custos envolvidos. Assim, devem ser bem gerenciadas, de maneira a trazer o máximo de benefício à sociedade. De acordo com Specht et al. (2013), diferente de outras obras de engenharia, os pavimentos rodoviários possuem vida útil entre 10 e 20 anos, levando a um processo de manutenção e reabilitação bastante presente. As técnicas utilizadas na reabilitação variam desde a sobreposição de uma capa asfáltica com pouca espessura até a reconstrução total do pavimento, dependendo da avaliação estrutural, funcional e do tráfego previsto (SPECHT et al., 2013).

Segundo Lewis e Collings (1999), o crescimento das questões ambientais e econômicas forçou os engenheiros a considerarem em seus projetos a reutilização de materiais, evitando assim a abertura de novas pedreiras e a importação de material para a reconstrução do pavimento de uma rodovia.

Na década de 80, a alternativa da reciclagem para a reabilitação de pavimentos obteve um sucesso notável, devido a alguns fatores. Entre estes fatores, destacam-se a utilização de equipamentos de maior potência, gerando um melhor rendimento e maior profundidade de trabalho, permitindo a obtenção de um material de melhor qualidade, e a tomada de consciência decorrente das vantagens ambientais, principalmente devido ao esgotamento das fontes existentes de materiais e a dificuldade para dispor de novas fontes junto aos grandes centros urbanos (TRICHÊS e SANTOS, 2011).

Atualmente, a reciclagem de pavimentos vem sendo cada vez mais utilizada em diversos países do mundo. Esse aumento deve-se às principais vantagens que esta solução proporciona, como o aproveitamento dos agregados e ligantes do pavimento deteriorado, conservação da geometria e estrutura do pavimento existente, possível redução de custos e do consumo de energia, e a preservação do meio ambiente (DAVID, 2006).

## 1.1 Problema da Pesquisa

Os pavimentos rodoviários, durante a sua vida útil, sofrem processos de degradação devido à ação do tráfego e das condições climáticas. O aumento do volume de tráfego proporciona a aceleração desta degradação, sendo necessária a implantação mais frequente de planos de manutenção.

À medida que a degradação do pavimento vai evoluindo, há a necessidade de determinar o momento ótimo para proceder às intervenções de manutenção corretiva ou preventiva com o objetivo de aumentar a vida útil do pavimento e também recompor suas condições de serviço. Porém, muitas vezes as verbas disponíveis não são suficientes para atender ao aumento no ritmo de manutenção e preservar o pavimento à medida que este envelhece (OLIVEIRA, SANT'ANNA e SOUZA, 2011).

Atualmente, várias tecnologias e maneiras de intervenções para a recuperação da capacidade estrutural de uma rodovia estão sendo aplicadas. Porém, o aumento da conscientização da finitude dos recursos naturais, da necessidade da preservação ambiental e da necessidade de redução das emissões de poluentes, tem estimulado a busca por alternativas ambientalmente corretas e de maior durabilidade para a recuperação e preservação das rodovias. (TRICHÊS e SANTOS, 2011).

A remoção da camada asfáltica antiga de um pavimento gera uma grande quantidade de material fresado, o qual pode gerar impactos ambientais devido a sua disposição incorreta no ambiente. Esses impactos são ressaltados pelo grande acúmulo de material em locais de bota-fora, como também pelo grande consumo de material pétreo, máquinas e energia, além de gerar custos significativos para as obras (JORGE et al., 2014).

A reciclagem de pavimentos surge como solução para estes problemas. Um dos agentes estabilizantes mais utilizados no processo de reciclagem de um pavimento é o cimento Portland. A utilização deste agente no processo de reciclagem gera um pavimento com base resistente e durável. Porém, a sua aplicação gera um indesejável pó, podendo causar problemas, sendo o mais relevante a ameaça à saúde das pessoas pela inalação da poeira do cimento. Portanto, apesar das inúmeras vantagens, a reciclagem com adição de cimento como agente estabilizante geralmente torna-se restrita em áreas urbanas (DIXON, GUTHRIE e EGGETT, 2012).

O questionamento que motivou o desenvolvimento do presente trabalho é entender “como se comportam materiais reciclados provenientes do processo de reciclagem de pavimentos com a adição de nata de cimento como um agente estabilizante?”.

## 1.2 Justificativa

A necessidade da preservação ambiental, recorrendo a técnicas que restringem a utilização dos recursos naturais, juntamente com importantes ganhos econômicos, faz com que se recorra à utilização da reciclagem como uma das mais importantes técnicas de manutenção e reabilitação de pavimentos. Essa técnica possui implícito um desenvolvimento sustentável e uma redução do impacto ambiental, desde que se recorra à reutilização de materiais retirados do próprio pavimento, levando em conta a redução da necessidade do uso de materiais exteriores às obras (BATISTA, 2009).

A reciclagem de pavimentos asfálticos, a exemplo da reciclagem de qualquer outro material, tem apresentado exigências nos dias atuais, principalmente em termos de uma consciência ambiental mais desenvolvida, além de trazer repercussões econômicas e sociais (LIMA, 2003).

O fator econômico torna-se um ponto importante a ser considerado em relação à reciclagem de pavimentos, pois a preservação do material já utilizado no pavimento antigo evita custos com transportes e bota-fora do material fresado, além de gastos com novos agregados para a construção de um novo pavimento (GUSMÃO, 2008).

O conjunto de restrições impostas por leis de controle ambiental que estão sendo implantadas em todos os países do mundo é considerado outro motivo para a utilização da reciclagem, visto que estabelecem a redução da deposição de resíduos, emissão de gases poluentes e também a exploração de fontes de materiais não renováveis (DAVID, 2006).

As alternativas que contemplam a reciclagem de pavimentos asfálticos existentes vêm ganhando a simpatia dos órgãos de gestão e da comunidade internacional por serem alternativas técnicas e economicamente viáveis e politicamente corretas, pelo fato de possibilitar o reaproveitamento praticamente integral dos materiais, propiciando menor pressão sobre recursos naturais e menor gasto de energia e emissão de CO<sub>2</sub> ao ambiente (TRICHÊS e SANTOS, 2011).

Através da reciclagem de pavimentos asfálticos, busca-se reconstruir um pavimento deteriorado com a utilização de materiais provenientes do pavimento antigo, diminuindo ou eliminando a necessidade de aplicação de novos agregados e de uso de bota-fora, contribuindo assim com a sustentabilidade do planeta (GUSMÃO, 2008).

Atualmente, a reciclagem de pavimentos com adição de cimento é aplicada em diversos países, como os Estados Unidos, Austrália, Alemanha, África do Sul, Espanha e França. Na Alemanha, a reciclagem tornou-se obrigatória para atender às normas

estabelecidas pelo governo, que visam evitar e reduzir a exploração de novos materiais e que incentivam a reutilização de rejeitos ou aproveitamento dos materiais existentes. No Brasil, a reciclagem de pavimentos começou a ganhar destaque no início da década de 90, ganhando impulso a partir dos programas de concessão de rodovias, os quais utilizam essa técnica para a recuperação da malha rodoviária que necessitam de aumentos significativos de capacidade estrutural. Porém, há uma carência de pesquisas e informações publicadas no Brasil sobre o comportamento mecânico de materiais resultantes da reciclagem de pavimentos com adição de cimento bem como do seu desempenho em campo (TRICHÊS e SANTOS, 2011).

Segundo Dixon, Guthrie e Eggett (2012), a solução para resolver o problema do pó de cimento gerado quando aplicado no processo de reciclagem de pavimento é a utilização de uma nata de cimento, a qual é preparada pela combinação do cimento em pó com a água. Assim a aplicação da nata de cimento possibilita a utilização da técnica de reciclagem com cimento, principalmente em áreas urbanas.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o comportamento mecânico de misturas oriundas de reciclagem profunda de pavimento com a adição de nata de cimento.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

O trabalho apresenta os seguintes objetivos específicos:

- a) Caracterizar os materiais utilizados nas misturas recicladas;
- b) Determinar as resistências à compressão simples e o consumo ótimo de cimento da mistura reciclada com nata de cimento;
- c) Avaliar a resistência à tração na flexão da mistura reciclada com nata de cimento para o consumo ótimo;
- d) Avaliar a vida de fadiga e o módulo de resiliência da mistura reciclada com nata de cimento para o consumo ótimo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Reciclagem de Pavimentos

Durante séculos, o homem utiliza estradas como o principal meio de comunicação e transporte. Com o desenvolvimento do transporte motorizado, teve-se um enorme impacto sobre a necessidade de fornecer estradas adequadas aos usuários (LEWIS e COLLINGS, 1999).

Atualmente, existem algumas alternativas para reabilitação de pavimentos, as quais podem ser realizadas através de soluções convencionais. Um exemplo destas soluções é a fresagem com recomposição do capeamento asfáltico seguido de reforço estrutural através da aplicação de novos revestimentos asfálticos. Porém, considerando a visão ambiental, surgem as soluções de reconstrução total ou parcial do pavimento através das reciclagens (OLIVEIRA, BARAN e SCHMIDT, 2010).

A reciclagem de pavimentos envolve a reutilização total ou parcial dos materiais existentes no revestimento, na base ou na sub-base, onde esses materiais são misturados novamente no estado em que se encontram após a desagregação ou tratados por energia térmica e aditivados por ligantes novos ou rejuvenescedores, sendo realizada ou não a recomposição granulométrica. (MOMM e DOMINGUES, 1995).

De acordo com Fonseca (2002), permitindo a reutilização dos materiais de pavimentos existentes, a reciclagem mostra-se como um processo moderno, pois permite aumentar de forma considerável a capacidade estrutural e a homogeneidade dos mesmos, com o emprego mínimo de novos materiais. Este procedimento é mais indicado para a reabilitação de pavimentos flexíveis em estado de degradação total com bases granulares e pavimentos betuminosos num estado último de utilização.

Segundo Kandhal e Mallick (1997) a reutilização dos materiais existentes no pavimento para produzir um novo pavimento, tem como consequência uma redução considerável de materiais, custo e energia. Além disso, a reciclagem do pavimento deteriorado também contribui para a resolução de problemas de disposição do material na pista, pois a reutilização do material permite manter a geometria e a espessura do pavimento. Assim, são algumas vantagens da técnica de reciclagem de pavimentos: redução de custos da construção, aproveitamento de agregados e ligantes, preservação da geometria existente, preservação do

meio ambiente, economia de energia nas etapas de produção, transporte e extração da matéria-prima e menor tempo de execução.

## 2.2 Tipos de Reciclagem de Pavimentos

Atualmente, existem diversos métodos de reciclagem. Os principais métodos são os realizados a frio ou a quente, podendo ser processado em usina ou no próprio local (*in situ*).

Segundo Bonfim (2007), os tipos de reciclagem podem ser definidos segundo a classificação apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação dos tipos de reciclagem de pavimentos.

Quanto à geometria original	Sem modificação	Quando se mantém as cotas do greide
	Com modificação	Quando não se mantém as cotas do greide
Quanto ao local de processamento	Em usina	Fixa ou móvel, quente ou frio
	<i>In situ</i>	
	Mista	<i>In situ</i> da reciclagem da base e aplicação de reciclagem a quente processada em usina com material fresado
Quanto à fresagem do material	A frio	Realizada na temperatura ambiente
	A quente	Realizada com pré-aquecimento do pavimento
Quanto à profundidade de corte	Superficial	Somente da camada de revestimento
	Profunda	Camada de revestimento, base e até sub-base
Quanto à mistura reciclada	Mistura a quente	CBUQ, PMQ
	Mistura a frio	PMF
Quanto ao uso da mistura	Como base reciclada	
	Como camada de ligação	
	Como revestimento	
Quanto aos materiais adicionado	Agregados	Correção granulométrica
	Cimento Portland e Cal	Aumento da capacidade estrutural
	Emulsão especial e CAP	Rejuvenescimento
	Misturas asfálticas	Adição de material fresado

Fonte: BONFIM (2007).

A seguir serão apresentados os seguintes tipos de reciclagem: reciclagem *in situ* e reciclagem em usina, as quais envolvem a reciclagem a frio e a reciclagem a quente, e também a reciclagem profunda (*Full depth reclamation*).

### 2.2.1 Reciclagem *In Situ*

Na reciclagem *in situ*, a própria rodovia é utilizada como fonte de materiais a serem incorporados no novo pavimento. Assim, o consumo de recursos naturais é drasticamente reduzido, como também o custo de transporte de materiais virgens (SACHET, 2007).

Segundo Cunha (2010), a reciclagem *in situ* possui como vantagem evitar o transporte do material fresado proveniente do pavimento degradado e a condição de aproveitamento total desse material.

A utilização do processo de reciclagem *in situ* fornece também outras vantagens para o meio ambiente. Bonfim (1999) expõe que uma destas vantagens está ligada à redução no consumo de energia, já que não há necessidade de aquecimento de materiais. Outra vantagem, segundo o mesmo autor, está relacionada à redução do tempo de construção quando comparada com métodos de reciclagem a quente, uma vez que não ocorre a remoção, para o posterior lançamento de nova camada de pavimento. Essa redução traz um aumento da segurança, pois o tempo em que o tráfego é interrompido diminui. Entre outras vantagens, destacam-se a significativa melhora estrutural, melhora da resistência à derrapagem e a eliminação do trincamento por deflexão quando a profundidade de homogeneização e reprocessamento for adequada.

Porém, o processo de reciclagem *in situ* também apresenta desvantagens. Bonfim (1999) cita algumas destas desvantagens: o processo não pode ser utilizado em pavimentos de concreto de cimento Portland; limitação dos procedimentos de construção pelas condições climáticas; necessidade frequente de reparos no equipamento de pulverização, reduzindo assim a produção; e menor controle de qualidade dos serviços realizados *in situ* que dos realizados em usinas, devido ao processo ser realizado simultaneamente (fresagem, pulverização do agente rejuvenescedor, mistura e aplicação na pista), podendo acarretar em uma capacidade estrutural reduzida do pavimento.

### **2.2.1.1 Reciclagem *In Situ* a Frio**

A reciclagem a frio é o termo utilizado para a recuperação e reutilização de materiais provenientes de um pavimento existente, sem a adição de calor. Esse tipo de reciclagem apresenta uma grande quantidade de aplicações, desde camadas finas formadas principalmente de material asfáltico até camadas espessas que incluem dois ou mais materiais diferentes do pavimento (WIRTGEN, 2012).

A reciclagem *in situ* a frio consiste basicamente na fresagem do pavimento existente até uma profundidade pré-determinada, com o objetivo de recuperar o material (fresado) utilizado na estrutura original. Este material é então reprocessado normalmente com um agente estabilizante, para formar uma nova camada de pavimento reforçado (LEWIS e COLLINGS, 1999).

Um exemplo de aplicação do processo de reciclagem *in situ* a frio pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – Aplicação da técnica de reciclagem *in situ* a frio.



Fonte: BROWN BROWN, 2014.

A reciclagem *in situ* a frio para a reabilitação de pavimentos é aceita em diversos países do mundo. Pode ser utilizada para reabilitar uma ampla variedade de pavimentos, que vão desde rodovias não pavimentadas com pouco tráfego, até rodovias com tráfego mais pesado (LEWIS e COLLINGS, 1999).

De acordo com Cunha (2010), na reciclagem a frio, os consumos de energia são menores quando comparados às técnicas realizadas a quente, pelo fato de não haver a necessidade do aquecimento do material. A reciclagem *in situ* a frio também apresenta menores níveis de emissão de gases tóxicos para a atmosfera quando comparada com uma solução de reabilitação tradicional de um pavimento.

Em estudo realizado por Lane, Kazmierowski e Alkins (2008), no qual foi comparada a quantidade de dióxido de carbono liberado em um processo de reabilitação tradicional de um pavimento, com um processo de reabilitação utilizando a técnica da reciclagem *in situ* a frio, foi concluído que a quantidade de gases emitidos é cerca de metade para a solução que contempla a reciclagem do pavimento.

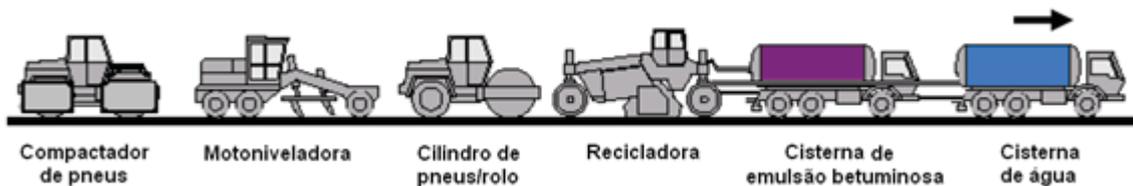
Na reciclagem *in situ* a frio, pode ser utilizados alguns agentes estabilizantes, como as emulsões asfálticas, a espuma de asfalto e o cimento.

### 2.2.1.2 Reciclagem *In Situ* a Frio com Emulsões Asfálticas

A utilização da emulsão asfáltica ou emulsão betuminosa obriga a um período inicial de cura, no qual a água vai sendo eliminada e a camada vai ganhando coesão e resistência. Somente após este período é que a camada reciclada com emulsão asfáltica apresentará as características de projeto (CUNHA, 2010).

A sequência do processo de reciclagem com emulsão asfáltica envolve as etapas que podem ser observadas na Figura 2.

Figura 2 – Etapas da reciclagem *in situ* a frio com emulsão betuminosa.



Fonte: COSTA-BAPTISTA, 2006.

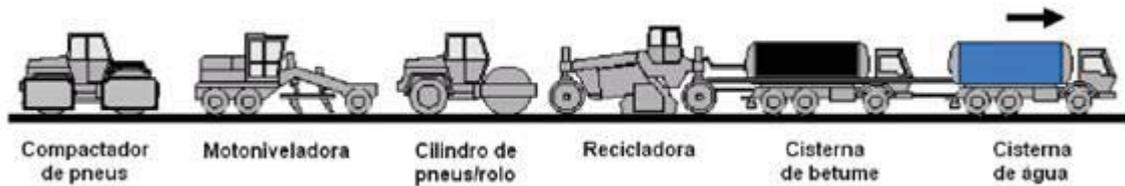
De acordo com Costa-Baptista (2006), a técnica de reciclagem *in situ* a frio com emulsão asfáltica apresenta algumas desvantagens, as quais estão associadas a uma maior sensibilidade às condições climáticas. Essa técnica exige um tempo de cura de duas a três semanas, sendo que nesse período não deve ser aplicada uma nova camada. Assim, os trabalhos devem ser realizados em tempo seco, sendo a técnica não recomendada em zonas úmidas.

### 2.2.1.3 Reciclagem *In Situ* a Frio com Espuma de Asfalto

Segundo Cunha (2010), o principal objetivo da utilização de espuma de asfalto em reciclagem de pavimentos *in situ* a frio é a redução da viscosidade do asfalto, o que possibilita o envolvimento dos agregados, areias naturais e também argilas com baixa plasticidade.

A Figura 3 apresenta as etapas do processo de reciclagem *in situ* a frio com a utilização de espuma de asfalto.

Figura 3 – Etapas da reciclagem *in situ* a frio com espuma de asfalto.



Fonte: COSTA-BAPTISTA, 2006.

Apesar da necessidade do aquecimento do asfalto, a reciclagem *in situ* a frio com espuma de asfalto não é considerada uma técnica a quente, uma vez que a mistura dos componentes (espuma de asfalto, material fresado e aditivos), a aplicação e compactação da mistura são efetuadas à temperatura ambiente (CUNHA, 2010).

#### 2.2.1.4 Reciclagem *In Situ* a Frio com Cimento Portland

Segundo Wirtgen (2012), o cimento é considerado o agente estabilizador mais usado em pavimentação, sendo que a quantidade utilizada no mundo todo ultrapassa todos os outros agentes estabilizadores juntos. Isso se deve ao custo e a disponibilidade deste material, como também pelo seu histórico comprovado como um material de construção. Existe uma grande quantidade de padrões, métodos de ensaio e especificações disponíveis, sendo que as camadas estabilizadas com cimento têm produzido um nível excelente de serviço em diversas estradas.

O uso do cimento como agente estabilizante proporciona um grande aumento na capacidade de suporte do pavimento, sem a necessidade de aumentar a sua espessura. A reciclagem *in situ* a frio com a adição desse agente é indicada para situações em que o pavimento apresenta degradações com elevada extensão (CUNHA, 2010).

A Figura 4 apresenta as etapas do processo de reciclagem *in situ* a frio com cimento.

Figura 4 – Etapas da reciclagem *in situ* a frio com cimento



Fonte: COSTA-BAPTISTA, 2006.

Segundo Lewis e Collings (1999), a utilização de cimento como agente estabilizante proporciona algumas vantagens, tais como a fácil aplicabilidade deste agente em forma de pó ou lama e um menor custo quando comparado com o asfalto ou emulsão.

O espargimento de cimento seco na técnica de reciclagem *in situ* é afetado pelo clima, principalmente pelo vento e pela chuva. O cimento, sendo um pó fino, é suscetível à erosão pelo vento, sendo levado pelo ar com a ação de uma brisa, podendo ser natural ou provocada pelos caminhões que passam sobre o mesmo, afetando a uniformidade da sua taxa de aplicação. Já quando o cimento entra em contato com a chuva, a mesma provocará um processo de hidratação. Sendo assim, o cimento espargido deverá ser misturado imediatamente ou descartado (WIRTGEN, 2012).

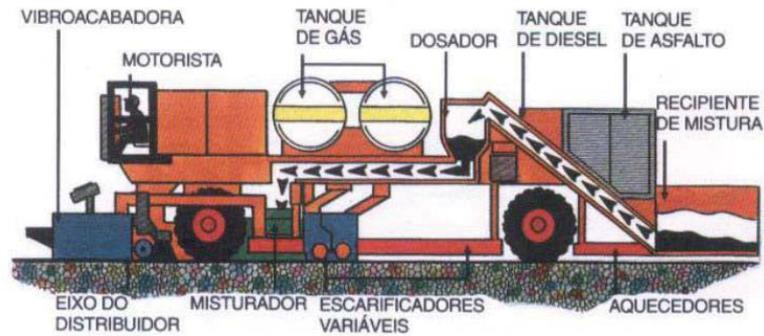
A aplicação do cimento em forma de lama na técnica de reciclagem *in situ* a frio, o que evita a formação de poeira, apresenta vantagens ambientais significativas, em termos de melhorias de saúde e segurança aos trabalhadores, e também na redução da poluição gerada pela ação do vento (WIRTGEN, 2012).

#### **2.2.1.5 Reciclagem *In Situ* a Quente**

A reciclagem de misturas asfálticas a quente realizada *in situ* é um processo de correção da superfície do pavimento asfáltico, o qual consiste na remoção mecânica da superfície asfáltica, através de aquecimento e consequente amolecimento (utilização da fresagem a quente). Esta superfície é então misturada com o ligante asfáltico, agregados virgens, e agentes rejuvenescedores, sendo depois a mistura reciclada recolocada sobre o pavimento remanescente (LIMA, 2003).

Para a aplicação da técnica de reciclagem *in situ* a quente, o equipamento utilizado possui um custo muito elevado quando comparado com outros equipamentos utilizados em outros tipos de reciclagem *in situ*. Além disso, o fato da necessidade do aquecimento do pavimento faz com que essa técnica de reciclagem apresente elevados consumos de energia (CUNHA, 2010). A Figura 5 mostra a operação da reciclagem *in situ* a quente.

Figura 5 – Técnica de reciclagem *in situ* a quente.

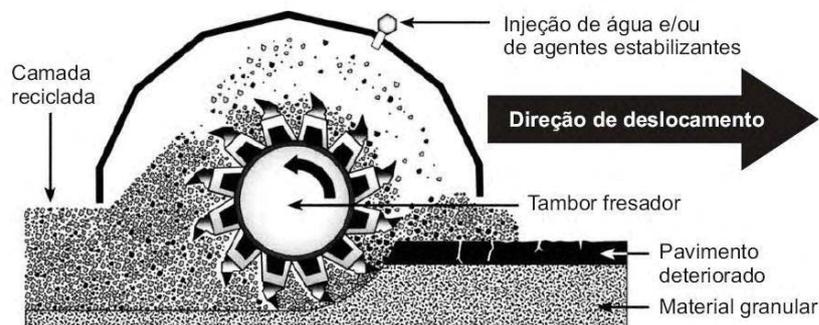


Fonte: LIMA, 2003.

### 2.2.1.6 Reciclagem Profunda (*Full depth reclamation*)

A técnica de reciclagem profunda é considerada uma técnica de reciclagem *in situ*. Segundo Souza (2009), a reciclagem profunda torna-se o processo mais adequado a ser utilizado para a restauração de pavimentos que necessitem de re-capacitação funcional e estrutural. Essa técnica consiste em triturar e recuperar os materiais existentes, de modo a homogeneizá-los, com a adição de outros materiais, quando isso se faz necessário. Após, a mistura reciclada deve ser compactada e, em seguida ser lançada uma camada de desgaste ou revestimento betuminoso. A Figura 6 apresenta o funcionamento do processo de reciclagem profunda, e a Figura 7 mostra a execução da técnica de reciclagem profunda.

Figura 6 – Representação esquemática do processo de reciclagem profunda.



Fonte: SOUZA, 2009.

Figura 7 – Técnica de Reciclagem Profunda.



Fonte: BROWN BROWN, 2014.

Na técnica de reciclagem profunda podem ser utilizados vários agentes estabilizantes, como por exemplo, o cimento. A reciclagem profunda com a utilização de cimento é uma prática constituída para a reabilitação de pavimentos flexíveis em diversos locais (DIXON, GUTHRIE e EGGETT, 2012).

A reciclagem profunda com adição de cimento Portland é uma técnica em que o material do pavimento asfáltico é removido e reutilizado com adição de cimento para melhorar as condições da nova base do pavimento. Posteriormente, a base é coberta por um revestimento de CBUQ ou por uma camada de concreto (GARBER, RASMUSSEN e HARRINGTON, 2011).

A principal função da adição de cimento em pavimentos reciclados, como por exemplo, na reciclagem profunda, é o ganho de resistência, sendo que a resistência à compressão não confinada alcançou uma situação de aceitação mundial como o principal critério de projeto. Porém, muitos outros fatores devem ser considerados além da resistência à compressão não confinada, tais como a taxa de ganho de resistência, a resistência de tração indireta, o potencial de trincas e as questões de durabilidade (WIRTGEN, 2012).

Segundo Garber, Rasmussen e Harrington (2011) a técnica de reciclagem profunda com adição de cimento Portland tem como objetivos:

- Fornecer ao pavimento uma base mais reforçada para suportar as cargas atuais e futuras do tráfego, através da reutilização dos materiais degradados do revestimento e da base;
- Reduzir ou eliminar totalmente a necessidade da utilização de agregados virgens;
- Reduzir as tensões no subleito;
- Melhorar a capacidade estrutural da base estabilizada;

- Fornecer uma técnica de reconstrução do pavimento mais rápida e que reduz a interrupção do tráfego;

- Fornecer uma opção de reconstrução sustentável, entre outros.

Segundo Khay et al. (2015), em um contexto de desenvolvimento sustentável, a utilização de material reciclado de pavimento asfáltico com adição de cimento é considerada teoricamente uma das técnicas de reciclagem mais eficientes, que causam menor poluição ao meio ambiente.

A adição de cimento no processo de reciclagem profunda gera alguns benefícios, como reduzir as emissões de poluentes e os danos nas estradas locais; o trabalho pode ser concluído com rapidez quando comparado com outras técnicas de remoção e substituição de pavimentos; é considerado um processo econômico quando comparado com outras técnicas; entre outros. Essa técnica de reciclagem pode ser aplicada em rodovias, vias locais e urbanas, aeródromos, entre outros (GARBER, RASMUSSEN e HARRINGTON, 2011).

De acordo com Dixon, Guthrie e Eggett (2012), quando utilizado na forma seca, o cimento que é distribuído sobre a base gera uma poeira, a qual pode ser observado na Figura 8 (a). A eliminação deste pó de cimento pode ser obtida com a aplicação de uma nata de cimento, como apresentado na Figura 8 (b).

Figura 8 – Técnicas de distribuição de cimento: (a) aplicação de cimento em pó no processo de reciclagem profunda, (b) aplicação de nata de cimento no processo de reciclagem profunda.



Fonte: DIXON, GUTHRIE E EGGETT, 2012.

Segundo os mesmos autores, a utilização de nata de cimento apresenta vários fatores que possivelmente afetam a resistência da base do pavimento estabilizado, e que não estão presentes quando é utilizado cimento em pó. O transporte da pasta para o local de aplicação

aumenta o tempo de início de hidratação do cimento quando comparado com o uso do cimento seco.

No processo de reciclagem profunda com adição de cimento Portland, os materiais provenientes do revestimento asfáltico e da base ou sub-base são misturados com cimento e água como descrito anteriormente. A quantidade de água a ser adicionada depende da dosagem especificada em projeto e da granulometria do material proveniente do antigo revestimento e da base. Já o teor de cimento a ser utilizado deve fornecer uma resistência à compressão simples aos sete dias entre 2,1 a 2,8 MPa, valores que são considerados satisfatórios na maioria das aplicações no processo de reciclagem profunda (GARBER, RASMUSSEN e HARRINGTON, 2011).

### 2.2.2 Reciclagem em Usina

No método de reciclagem em usina, o material proveniente da fresagem é transportado para a central, sendo após incorporado na produção das misturas betuminosas, as quais podem ser utilizadas no local de origem do material fresado ou em outros locais. De tal modo, a principal desvantagem ligada a este processo provém do custo adicional com o transporte do material a ser reciclado, do local da obra para a central de usinagem e desta novamente para o local da obra. Porém, o produto final obtido pela reciclagem em usina apresenta uma maior qualidade e confiabilidade. Essa técnica também permite uma melhoria na qualidade das misturas obtidas, as quais não são afetadas pelas condições locais de execução, nem pelas condições climáticas (CUNHA, 2010). A Figura 9 mostra o processo de reciclagem em usina.

Figura 9 – Reciclagem em usina.



Fonte: WIRTGEN, 2012.

As principais vantagens resultantes da técnica de reciclagem em usina quando comparado ao tratamento *in situ* são: o controle dos insumos, uma melhor qualidade da mistura, e a capacidade de pilhas de estocagem, eliminando a interdependência dos processos de mistura e pavimentação (WIRTGEN, 2012).

A reciclagem em usina, igualmente à reciclagem *in situ*, pode ser executado a frio ou a quente.

### **2.2.2.1 Reciclagem em Usina a Frio**

O processo de reciclagem em usina a frio inicia-se com a fresagem a frio que reduz o revestimento do pavimento e eventualmente a base em fragmentos de dimensões adequadas. Essas dimensões são determinadas em função da profundidade de corte, da velocidade de avanço da máquina fresadora, do sentido de rotação do cilindro fresador, da qualidade do material, das condições do pavimento e do teor de asfalto (CUNHA, 2010).

A reciclagem em usina móvel a frio pode gerar misturas com alta qualidade com a utilização de material granular virgem e material fresado. Essa usina permite a execução de misturas com espuma de asfalto para camadas de base, como também possibilita a execução de misturas com emulsão asfáltica e cimento (WIRTGEN, 1999).

### **2.2.2.2 Reciclagem em Usina a Quente**

A reciclagem em usina a quente é um processo em que parte ou toda a estrutura do revestimento de um pavimento é removida através de fresagem a frio, e posteriormente transportada para ser misturada e recuperada em usina de asfalto (GUSMÃO, 2008).

Segundo Castro (2003), uma das vantagens da reciclagem em usina a quente de misturas asfálticas está ligada pelo processo permitir a sua correção deficiente. Torna-se uma técnica vantajosa pelo fato de permitir a reutilização de material que seria descartado e causaria danos ao meio ambiente.

### 2.3 Aplicação da Técnica de Reciclagem de Pavimentos com Adição de Cimento

A técnica de reciclagem de pavimentos com adição de cimento vem sendo utilizada em todo o mundo, obtendo-se resultados satisfatórios.

Os primeiros relatos de experiências da utilização da técnica de reciclagem de pavimentos com adição de cimento surgiram na década de 1950, sendo os Estados Unidos e a França os dois países pioneiros nestes estudos (JASIENSKI E RENS, 2001).

De acordo com os mesmos autores, a reciclagem de pavimentos com adição de cimento foi utilizada pela primeira vez na Bélgica em 1989, na cidade de Vaux-sur-Sûre, onde foi recuperada uma área de 6.000 m<sup>2</sup> de pavimento. Neste país, até o ano de 2001, em torno de 300.000 m<sup>2</sup> de pavimentos foram recuperados através desta técnica de reciclagem.

Segundo Sufian et al. (2009), a Malásia foi um dos primeiros países a utilizarem a técnica de reciclagem com cimento como alternativa para reabilitação de pavimentos degradados. Em 1985, foi executado neste país o primeiro projeto com a utilização desta técnica, pela qual foram reciclados cerca de 15 km de pavimento em uma via de baixo volume de tráfego. A partir desta data, a técnica de reciclagem com cimento tornou-se a principal solução para a reabilitação de pavimentos no país.

A Espanha é um dos países onde a técnica de reciclagem de pavimentos com adição de cimento é mais utilizada. A primeira experiência com a técnica no país ocorreu em 1992, através da reciclagem de um trecho de 12 km de extensão. Desde 2006, a quantidade de material reciclado no país sofreu grande aumento de produção, sendo reciclados anualmente mais de 2,5 milhões de metros quadrados de pavimentos. Há estimativas de que foram reciclados no país cerca de 25,4 milhões de metros quadrados de pavimentos até o ano de 2012 (IECA, 2013).

Na Austrália, as primeiras recicladoras profundas de pavimentos chegaram em 1992, sendo que o cimento Portland é o ligante mais utilizado em obras de reciclagem no país, devido a sua aptidão para estabilização da maior parte dos materiais, baixo preço e disponibilidade (VOROBIEFF E WILMOT, 2001).

Na África do Sul, a técnica foi utilizada pela primeira vez em 1991, quando foi realizada a reciclagem de um trecho de 23 km de uma rodovia federal do país (COLLINGS, 2001).

A técnica de reciclagem de pavimentos com adição de cimento também já vem sendo utilizada no Brasil há cerca de 30 anos. Estima-se que até o ano de 2009, essa técnica tenha recuperado mais de sete milhões de metros quadrados de pavimento em todo o país (PAIVA E

OLIVEIRA, 2009). De acordo com Paiva et al. (2013), somente no estado de São Paulo, nos últimos anos, milhares de quilômetros de rodovias têm sido recuperados com a técnica de reciclagem com adição de cimento.

#### **2.4 Especificações Sobre Reciclagem de Pavimentos com Adição de Cimento**

No Brasil, existem normas técnicas (especificações de serviço) sobre reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland desenvolvidas pelos Departamentos de Estradas de Rodagem (DER) dos estados de São Paulo e Paraná, e pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

A Norma desenvolvida pelo DNIT (DNIT 167/2013-ES) define a sistemática a ser empregada na execução de reciclagem profunda de pavimento “in situ”, com adição de cimento Portland. A norma também apresenta os requisitos relativos a materiais, equipamentos, execução, controle da qualidade, condicionantes ambientais, condições de conformidade e não conformidade e critérios de medição dos serviços.

Segundo DNIT (2013), alguns aspectos devem ser considerados para misturas recicladas com adição de cimento, como, por exemplo, apresentar resistência à compressão simples, aos sete dias de cura, entre 2,1 e 2,5 MPa, e resistência à tração por compressão diametral, também aos 7 dias de cura, entre 0,25 e 0,35 MPa. Em relação à granulometria das misturas recicladas, as mesmas devem apresentar uma granulometria densa e bem graduada, e também se enquadrar nas faixas granulométricas estabelecidas pela norma. Outra recomendação é de que a quantidade do revestimento asfáltico em relação à massa seca da mistura reciclada deve ser limitada em 50%.

A coleta de amostras para elaboração do projeto de dosagem da mistura reciclada deve ser efetuada de preferência com o auxílio da própria recicladora que será utilizada nos serviços de reciclagem. Na ausência deste equipamento, pode ser utilizada a fresadora de asfalto. A coleta de amostras deve ser realizada de forma a cobrir todas as possíveis variações da estrutura do pavimento existente. A cada uma destas variações corresponde um segmento homogêneo, para o qual deve ser elaborado um projeto de dosagem específico (DNIT, 2013).

De acordo com a norma (DNIT, 2013), um relatório de dosagem deve conter as seguintes informações: granulometria do material reciclado (capa + base); granulometria dos agregados (caso haja necessidade de adição) e sua procedência; composição granulométrica da mistura reciclada e seu enquadramento na faixa trabalho; massa específica aparente seca máxima do material reciclado (capa + base) e respectiva umidade ótima; massa específica

aparente seca máxima da mistura reciclada (capa + base + cimento e eventualmente agregados) e respectiva umidade ótima; energia de compactação utilizada (Proctor Modificado); teor de cimento; tipo de cimento e sua procedência (quando houver mudança do tipo ou marca de cimento durante a obra é obrigatória a elaboração de um novo projeto de dosagem); resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral, aos sete dias de cura; indicação, em massa, do consumo de cimento por metro quadrado ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ); e indicação, em volume, do consumo de agregados por metro quadrado ( $\text{m}^3/\text{m}^2$ ), caso haja necessidade da adição dos mesmos.

## **2.5 Caracterização Mecânica de Misturas Recicladas com Adição de Cimento**

Segundo Noureldin e Wood (1989), a avaliação de desempenho de misturas asfálticas recicladas pode ser realizada por meio de ensaios destrutivos, como por exemplo, os testes de compressão diametral, os quais baseados nos comportamentos elásticos e visco-plásticos das misturas, ensaios empíricos que correlacionam os seus resultados com o desempenho no campo, ensaios não destrutivos, baseados nas teorias da mecânica dos materiais, e também testes com a utilização do ultrassom.

Em pavimentos, alguns parâmetros são considerados importantes para sua caracterização, como por exemplo, a resistência à compressão simples, a resistência à tração, a vida de fadiga e o módulo de resiliência.

### **2.5.1 Resistência à Compressão Simples (RCS)**

A resistência à compressão simples é considerada uma propriedade importante em misturas recicladas com adição de cimento. Alguns estudos mostram o comportamento de diversas misturas de pavimento reciclado, conforme apresentado a seguir.

Em estudo realizado por Guthrie e Brown (2009), foi analisado o comportamento de um material de pavimento asfáltico reciclado utilizado como base estabilizada com cimento. Na pesquisa, foram utilizados teores de cimento de 0%, 2% e 4%, e umidade de 7% para atingir em uma densidade aparente seca de  $20,7 \text{ kN}/\text{m}^3$ , estabelecida como amostra de controle. Com esses valores foram obtidas densidades aparentes secas médias de 19,98; 19,8 e  $20,2 \text{ kN}/\text{m}^3$  para os teores de cimento de 0%, 2% e 4% respectivamente. Foi analisada no

estudo a resistência à compressão simples aos 7 dias para cada dosagem, sendo obtidos para os teores de cimento (0%, 2% e 4%) os valores de 1,11; 1,89 e 2,67 MPa respectivamente.

No estudo realizado por Taha et al. (2002), foi avaliado o comportamento de materiais reciclados de pavimentos asfálticos (RAP) com a adição de cimento e agregados virgens para utilização como base de pavimento. Foram analisadas misturas com adição de RAP de 100%, 90%, 80%, 70% e 0%, e com teores de cimento de 0%, 3%, 5% e 7%. Em relação às misturas analisadas compostas por 100% de resíduo, as densidades aparentes secas obtidas para os teores de cimento (0%, 3%, 5% e 7%) foram de 18,85; 19,21; 19,93 e 20,14 kN/m<sup>3</sup> respectivamente, considerando teores de umidade de 7%, 7,8%, 8,2% e 8,5% respectivamente. No estudo foram analisadas as resistências à compressão simples, onde obteve-se aos sete dias de cura para misturas com 100% de RAP e para os teores de cimento estabelecidos (0%, 3%, 5% e 7%) os valores de 0,30; 0,75; 1,25 e 1,75 MPa respectivamente. Através dos resultados obtidos, concluiu-se que a mistura com 100% de RAP poderia ser utilizada como material de base quando estabilizado com cimento. Os autores também verificaram que as misturas com RAP apresentam melhores resultados quando são estabilizadas com cimento do que quando são utilizados apenas agregados virgens.

Em estudo realizado por Khay et al. (2015), verificou-se que o aumento de utilização de RAP em misturas recicladas reduz as propriedades mecânicas, como a resistência à compressão simples, módulo de elasticidade, resistência à flexão, entre outras. Porém, verificou-se que com a utilização de 60% de RAP em misturas recicladas com adição de cimento foi possível atender a recomendação de critérios de resistência à compressão.

Yang e Wu (2014) também utilizaram RAP com adição de cimento em uma pesquisa. Os autores, com base nos resultados apresentados, verificaram que a proporção de RAP e o teor de cimento geram um impacto significativo nos valores de resistência à compressão simples. Para misturas considerando 100% de RAP, foram obtidos para os teores de cimento de 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0% e 2,5% valores médios de resistências à compressão simples de 0,36; 0,82; 1,67; 2,02 e 2,34 MPa respectivamente. Através de ensaios com outros teores de RAP, foi observado pelos autores que a quantidade ótima deve incluir de 50% a 75% de RAP e teor de cimento entre 1,5% a 2,5%.

Silva e Miranda (2000) realizaram a experiência de reciclagem da camada asfáltica da rodovia BR-381 em Minas Gerais. Os autores realizaram ensaios de laboratório para a verificação do teor ótimo de cimento a ser utilizado no processo de reciclagem, para atingir uma resistência mínima à compressão simples aos 7 dias de 4,5 MPa. Foi utilizado 100% do material fresado da camada de revestimento, sendo o material compactado com energia

Modificada. Para os teores de cimento de 3%, 3,5%, 4% e 4,5%, aos 7 dias de cura foram encontradas respectivamente resistências à compressão simples de 3,32; 3,63; 4,56 e 5,49 MPa. Assim, a espessura média de corte utilizada na rodovia foi de 15 cm, sendo adicionados 4,2% de cimento e 5% de pó-de-brita, ambos em massa. Através de medições com viga Benkelman, os autores concluíram que houve redução no valor das deflexões do pavimento após o processo de reciclagem.

Oliveira (2003) realizou uma pesquisa para verificar a influência do prazo de trabalhabilidade do cimento Portland na resistência à compressão simples da mistura reciclada de pavimento. Para o estudo, foram utilizados materiais das rodovias SP-294 e BR-040 (MG). Da primeira rodovia, o material utilizado era composto pela camada de revestimento asfáltico e base de solo-cimento, enquanto que o material da segunda rodovia era composto pela camada de revestimento asfáltico e base de cascalho laterítico. A energia de compactação utilizada nos ensaios foi a Normal. Os teores de cimento utilizados foram de 3%, 4% e 5%, em massa. Após 7 dias de cura em câmara úmida, foram verificadas as resistências à compressão simples para os 3 teores, obtendo-se valores de 2,41; 2,53 e 2,82 MPa respectivamente para o material com base de solo-cimento e 30% de material fresado, e valores de 1,33; 1,82 e 2,11 MPa respectivamente para o material com base de cascalho laterítico e 85% de material fresado.

Após os resultados obtidos, Oliveira (2003) conclui que, para os dois materiais analisados, a resistência reduz quando a compactação é retardada em 2, 4 e 6 horas quando comparada à resistência obtida a partir de condições normais de compactação. O autor observa que essa redução é menor nas duas primeiras horas, podendo estar associada a uma pequena perda de água neste período.

Dellabianca (2004) estudou o comportamento de materiais fresados de revestimento asfáltico, visando sua aplicação em reciclagem de bases de pavimentos rodoviários. Foram estudadas misturas não estabilizadas e estabilizadas com cal ou cimento, ambos em teor igual a 2%, e energia de compactação igual à Intermediária. As misturas eram compostas de material fresado do revestimento e cascalho laterítico. No estudo foram realizados ensaios de resistência à compressão simples, índice de suporte Califórnia (ISC), cisalhamento direto e de módulo de resiliência, como também foram realizadas análises estrutural e econômica do uso da reciclagem, mostrando a técnica como sendo viável. Considerando a mistura reciclada com 25% de material fresado, foram obtidas resistências à compressão simples aos 3, 7 e 28 dias, com valores de 0,7; 0,9 e 1,3 MPa respectivamente. Uma das conclusões do estudo realizado por Dellabianca (2004), foi que a película de ligante que envolve os grãos do fresado

influencia nas propriedades do material, contribuindo para a redução dos valores de índice de suporte Califórnia, resistência à compressão simples e de módulo de resiliência.

Gusmão (2008) realizou uma pesquisa para a verificação da resistência ao longo do tempo de misturas para simular a técnica de reciclagem de pavimentos com adição de cimento. Foram utilizadas misturas de brita graduada e brita graduada mais material fresado, ambas com adição de cimento, as quais foram ensaiadas à compressão simples e tração por compressão diametral após 1, 3 e 28 dias de cura. Foram utilizados teores de cimento de 3% e 5%, energia de compactação Intermediária. Também foi variado a quantidade de material fresado nas misturas (de 40% a 60%). Através dos ensaios, o autor mostra que conforme aumenta a porcentagem de material fresado nas misturas, há uma redução na resistência à compressão simples para um mesmo valor de teor de cimento.

Em estudo realizado por Guthrie, Brown e Eggett (2007), onde foi utilizado pavimento asfáltico reciclado (RAP) com adição de cimento, observou-se que houve uma redução da resistência à compressão simples de 2,93 MPa para 1,44 MPa com o aumento de RAP de 0% a 100%. Notou-se também um aumento de 0,43 MPa para 3,89 MPa com o acréscimo de cimento de 0% para 2%. No estudo, os autores concluíram que a mistura com 75% de RAP aparenta ser menos sensível à variação de teor de cimento, enquanto que as misturas com teor de cimento de 1,0% aparenta ser menos sensível à variação da quantidade de RAP.

Trichês et al. (2013) realizaram estudos sobre a caracterização e o comportamento de misturas recicladas com adição de cimento. Na primeira pesquisa, foi utilizado o material reciclado do revestimento e de parte da base de um pavimento de uma rodovia, sendo adicionado 15% de agregado virgem. Utilizando-se a umidade ótima de 7,2% e energia do Proctor modificado, sendo a massa específica aparente seca máxima de 2,210g/cm<sup>3</sup>, um dos parâmetros analisados foi a resistência à compressão simples para os teores de cimento de 3,0; 3,5; 4,0 e 4,5%. Após 7 dias de cura, foram obtidas, respectivamente para esses teores de cimento, as resistências de 1,63; 2,06; 2,85 e 3,33 MPa.

No segundo estudo realizado pelos autores, foi analisado o comportamento do material com 30% de fresado e 70% de brita graduada, compactado na umidade ótima de 8,2% e energia de Proctor Intermediário, sendo a massa específica aparente máxima seca de 2,150 g/cm<sup>3</sup>. Um dos parâmetros analisados foi a resistência à compressão simples. Sendo utilizados 3 teores de cimento (2, 3 e 4%), foram obtidos após 7 dias de cura os valores de resistência de 0,86; 1,31 e 2,02 MPa, respectivamente.

No terceiro estudo foi analisado o comportamento mecânico o material reciclado com material fresado, agregado virgem e cimento, sendo a mistura compactada na umidade ótima

de 7,2% e na energia de Proctor modificado, sendo a massa específica aparente máxima seca de 2,578 g/cm<sup>3</sup>. Em relação à resistência à compressão simples, foram obtidos para os teores de cimento de 2, 3 e 4%, aos 7 dias de cura, os valores de 1,24; 1,74 e 2,05 MPa, respectivamente.

Em estudo realizado por Fedrigo, Nuñez e Ceratti (2015), foi analisado o comportamento mecânico de misturas de brita graduada simples e fresado recicladas com cimento, sendo utilizados os teores de cimento de 2%, 4% e 6% e teores de fresado de 20% e 50%. Para a compactação das misturas foram utilizadas a energia Modificada para o teor de cimento de 2% e a energia Intermediária para o teor de cimento de 6%. Um dos parâmetros analisados foi a resistência à compressão simples. Misturas com 20% de fresado apresentaram, aos 7 dias de cura, resistências de 2,65; 4,77; 3,03 e 5,65 MPa para os teores de cimento de 2%, 4% (energia modificada), 4% (energia intermediária) e 6%. Para os mesmos teores de cimento, as misturas com 50% de fresado apresentaram respectivamente, após 7 dias de cura, as resistências de 2,63; 4,43; 2,83 e 4,98 MPa.

Além das pesquisas realizadas para a verificação do comportamento de materiais reciclados de pavimento com adição de cimento no estado seco, como as citadas anteriormente, também já foi analisado o comportamento dos materiais com adição do cimento em forma de nata, como no caso do trabalho realizado por Dixon, Guthrie e Eggett (2012). No estudo foi analisado o comportamento de materiais provenientes do processo de reciclagem profunda com adição de nata de cimento e também com adição de cimento em pó. Um dos parâmetros analisados foi a resistência à compressão simples aos 7 dias de cura, considerando teores de cimento de 2% e 6%. Para estes teores, o material reciclado com adição de nata de cimento apresentou valores de 3,42 e 6,35 MPa respectivamente, enquanto que o material reciclado com adição de cimento em pó apresentou valores de 3,44 e 7,31 MPa respectivamente. Assim, os autores observaram que o material com adição de cimento em pó apresenta valores maiores de resistência quando comparado com o material com adição de nata. Também verificaram que o aumento do teor de cimento de 2% para 6% gerou um crescimento de 86% (2,93 MPa) na resistência do material com a adição de nata, sendo considerado menor quando comparado com o material com adição de cimento em pó, que teve um crescimento de 112 % (3,87 MPa).

### 2.5.2 Resistência à Tração

Além da resistência a compressão simples, a resistência à tração também é utilizada para analisar o comportamento de materiais para pavimentação. Segundo Balbo (2007), os principais ensaios para a determinação da resistência à tração são os seguintes:

- Ensaio de resistência à tração indireta (compressão diametral): ensaio realizado sobre amostras cilíndricas para aferição da resistência à tração indireta. Também chamado de Ensaio Brasileiro, é muito empregado na atualidade para a medida de resistência de amostras de concretos asfálticos. O ensaio normalmente é aplicado para materiais como o concreto de cimento Portland, concreto asfáltico usinado a quente, brita graduada tratada com cimento e solo-cimento.

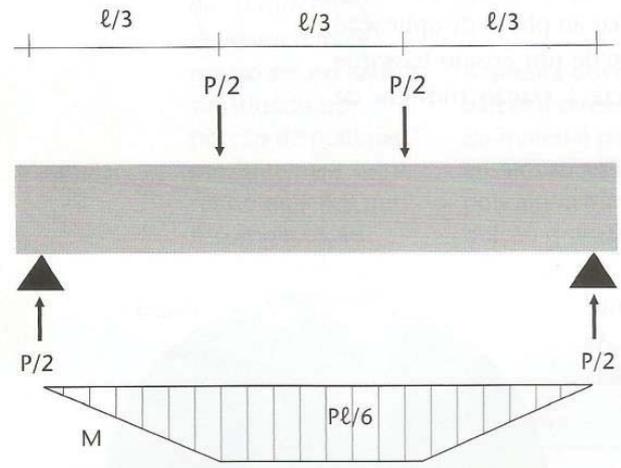
- Ensaio de tração direta (tração uniaxial): utilizado para avaliação direta da resistência à tração de amostras cilíndricas, sendo pouco empregado na prática;

- Ensaio de tração na flexão: ensaio realizado com dois cutelos para determinação do momento fletor de ruptura em amostra prismática. Normalmente é empregado para materiais como o concreto de cimento Portland, concreto compactado com rolo e brita graduada tratada com cimento.

O ensaio de resistência à tração na flexão é um dos mais importantes para materiais de pavimentação tratados com cimento ou com concretos para pavimentação permitindo a medida de um esforço semelhante ao qual a camada estará submetida em campo. Quando o ensaio é realizado em um arranjo de dois cutelos, o momento fletor no terço central da vigota é constante, o que garante que a seção de ruptura seja aquela mais fraca (considerando material heterogêneo). Nesta situação, o momento máximo é proporcional a um sexto da carga total aplicada (BALBO, 2007).

O esquema para a realização do ensaio de tração na flexão em dois cutelos é apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Esquema para ensaio tração na flexão em dois cutelos.



Fonte: BALBO, 2007.

De acordo com Balbo (2007), pesquisadores do Transport and Road Research Laboratory (TRRL) propuseram que a resistência à tração na flexão para materiais estabilizados, como o solo-cimento e a brita graduada tratada com cimento, deve ser estimada em 10% do valor obtida da resistência à compressão simples do material.

O Quadro 2 mostra alguns valores típicos de resistência à tração na flexão para materiais cimentados.

Quadro 2 – Valores típicos de resistência à tração na flexão.

Material	$f_{ct,f}$ (MPa)
Solo-cimento (SC)	0,25 - 0,5
Brita graduada tratada com cimento (BGTC)	0,5 - 1,0
Concreto compactado com rolo (CCR) - base de pavimentos	0,8 - 3,5
Concreto compactado com rolo (CCR) - revestimentos	2,5 - 5,0
Concreto de cimento Portland (CCP) - revestimentos em concreto simples	4,0 - 5,5
Concreto de alto desempenho (CAD)	6,0 - 10,0

Fonte: BALBO, 2007.

Em alguns estudos, o comportamento mecânico de materiais reciclados de pavimentos com adição de cimento é avaliado, além da resistência à compressão, através da resistência à tração.

Segundo estudo realizado por Trichês et al (2013), foi analisada a resistência à tração na flexão para misturas recicladas com adição de cimento com teores de 3,0; 3,5; 4,0 e 4,5%, sendo obtidos os valores de 0,34; 0,36; 0,48 e 0,52 MPa respectivamente após 7 dias de cura, sendo a massa específica aparente seca máxima do material analisado de 2,210g/cm<sup>3</sup>. Os

resultados obtidos indicaram uma resistência à tração na flexão cerca de 0,15 a 0,24 da resistência à compressão simples.

Sobhan e Mashnad (2000) realizaram estudo para avaliar o desempenho de um material de base de pavimento estabilizado com cimento, constituído por agregados de concreto reciclado, cinza volante e fibras de resíduos plásticos (polietileno). Foram utilizados dois teores de cimento (4% e 8%) para avaliar alguns parâmetros, dentre eles a resistência à tração na flexão do material aos 28 dias de cura. Para mistura reciclada contendo 4% de cimento e 4% de cinza volante, mais os agregados reciclados, foi obtida uma resistência média à tração na flexão de 0,84 MPa. Para o mesmo teor de cimento e cinza volante, porém com adição de fibras de plástico variando de 0,50% a 1,25%, foram obtidas resistências à tração na flexão variando de 1,06 a 0,82 MPa. Já para a mistura com 8% de cimento e 8% de cinza volante, mais os agregados reciclados, a resistência alcançada foi de 0,91 MPa. Com os mesmo teor de cimento e cinza volante, mais o acréscimo de fibras de plástico (0,50% a 1,25%), os autores encontraram resistências à tração na flexão variando de 1,64 a 1,10 MPa.

Behiry (2013) analisou em seu estudo alguns parâmetros de um material para base e sub-base de pavimento composto por agregados de concreto reciclado e agregado calcário, juntamente com adição de cimento. Um dos parâmetros analisados foi a resistência à tração na flexão. Com a adição de 5% de cimento, o autor analisou 4 misturas recicladas, com 0%, 25%, 50% e 75% de agregados de concreto reciclado, sendo o restante compostos pelo agregado calcário. Para cada uma destas composições, foram obtidos valores de resistência à tração na flexão aos 7 dias de cura respectivamente de 0,295 MPa, 0,281 MPa, 0,272 MPa e 0,265 MPa.

No estudo realizado por Minguela (2011), foi verificada a resistência à tração na flexão 7, 28 e 90 dias de cura de um material com 33% de fresado e com adição de cimento de 3,5%. Utilizando-se a energia modificada para a moldagem das amostras, foram obtidas resistências para os dias de cura citados respectivamente de 0,45; 0,54 e 0,69 MPa.

Em estudo realizado por Dalla Rosa et al. (2015), foi realizado ensaios para verificação do comportamento mecânico de um material composto por fresado, obtido de uma camada degradada de pavimento de 5 cm de CBUQ e 10 cm base de brita graduada, e com adição de agentes estabilizantes. Para a mistura com adição simples de 3,5% de cimento, obteve-se uma resistência à tração por compressão diametral de 0,463 MPa, valor considerado baixo devido, segundo o autor, ao não envolvimento do RAP (pavimento asfáltico reciclado) na mistura.

### 2.5.3 Vida de Fadiga

Desde os anos 80, o emprego de modelos de fadiga para materiais de pavimentação vem sendo considerado um instrumento adequado para dimensionamento e análise de pavimentos (BALBO, 2000).

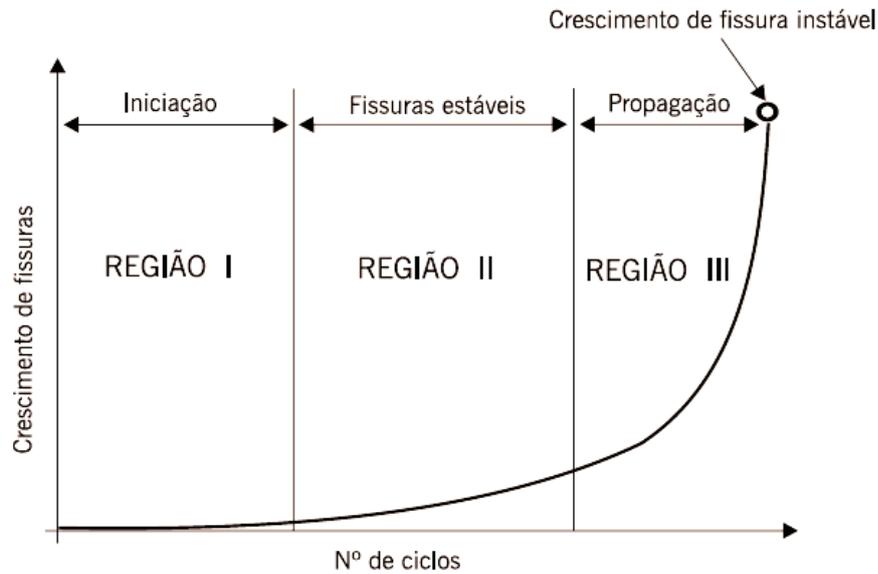
De acordo com Preussler (1983) a fadiga é o processo de mudança estrutural permanente, localizada e progressiva que ocorre em um material quando o mesmo é submetido a condições de carregamento que produzem tensões e deformações repetidas, resultando trincas ou rachaduras após um determinado número de repetições, que apresente um valor máximo menor que a resistência à tração do material.

A ruptura por fadiga ocorre, segundo Balbo (2000), devido à microfissuração progressiva na estrutura de um material, provocando aos poucos a degradação da sua microestrutura cristalina, fraturando a peça estrutural, gerando uma ou mais superfícies de ruptura. Esse fenômeno ocorre devido às deformações impostas com proporções inferiores à deformação de ruptura, ou seja, quando o material é imposto a tensões inferiores à sua capacidade resistente.

De acordo com Bernucci et al. (2008), um material sujeito a um determinado carregamento cíclico apresenta alguns estágios durante o processo de fadiga (Figura xx):

- Região I: ocorrem as primeiras mudanças microestruturais com a formação de microfissuras, crescimento da densidade dos deslocamentos e início de zonas de danos irreversíveis;
- Região II: caracterizada pelas macrofissuras que surgem da união das microfissuras;
- Região III: crescimento das macrofissuras conduzindo rapidamente ao colapso total da estrutura do material.

Figura 11 – Estágios em um processo de fadiga.



Fonte: BERNUCCI et al.,2008.

As propriedades de fadiga podem ser determinadas através de ensaios de laboratório, sendo que os resultados obtidos são apresentados graficamente na forma de uma tensão ( $\sigma$ ) ou de uma deformação ( $\epsilon$ ) em função do número de ciclos ( $N$ ) até a ruptura, para cada corpo de prova ensaiado. Nestes ensaios, dois tipos de comportamento são verificados: quanto maior for o valor da tensão, menor o número de ciclos que o material é capaz de suportar antes da ruptura; e quando existe um limite de resistência à fadiga, abaixo do qual a ruptura não irá ocorrer. Este limite representa o maior valor de tensão cíclica que não irá causar a ruptura por fadiga mesmo após vários ciclos de carregamento e descarregamento (CERVO, 2004).

De acordo com Cervo (2004), um parâmetro importante que caracteriza o comportamento à fadiga de um material é a vida de fadiga, a qual é representada pelo número de ciclos ( $N$ ) necessários para gerar a ruptura em um nível de tensão específico. Os resultados obtidos de ensaios de fadiga apresentam uma dispersão considerável, ou seja, uma variação no valor de  $N$  medido para várias amostras ensaiadas sob um mesmo nível de tensão, podendo levar a incertezas de projeto quando a vida de fadiga ou a resistência à fadiga estiverem sendo consideradas.

Segundo Cervo (2004), essa variação dos resultados obtidos é consequência da sensibilidade da resistência à fadiga a vários parâmetros relacionados aos ensaios e ao material analisado, que são impossíveis de serem controlados de maneira precisa. Entre esses parâmetros estão as condições de moldagem dos corpos de prova, o alinhamento do corpo de prova no equipamento do ensaio, a frequência dos ensaios, a tensão média, etc.

De acordo com Balbo (2000), para a determinação experimental do comportamento à fadiga de um material, são empregadas técnicas de laboratório sendo considerados 5 arranjos de ensaios que permitem a aplicação de esforços cíclicos e dinâmicos em amostras moldadas em laboratório ou extraídas de campo, onde os esforços são aplicados em níveis inferiores ao limite de ruptura do material, a fim de que após um determinado número de ciclos ocorra uma manifestação associada ao processo de ruptura por fadiga. Os 5 tipos de arranjos de ensaios são:

- Ensaio de tração uniaxial: as amostras (cilíndricas ou prismáticas) são submetidas a carregamentos cíclicos de tração direta, sendo realizados a baixas e altas frequências (> 25 Hz). O nível de deformação para um material mais dúctil, através deste ensaio, seria controlado por ciclos alternados de tração-compressão da amostra.

- Ensaio de tração indireta (ensaio dinâmico de compressão diametral): o arranjo deste ensaio permite a criação de uma zona tracionada que coincide com o plano de aplicação de cargas, sendo realizados em níveis de frequência variando entre 10 e 15 Hz, onde a amostra cilíndrica é submetida a um estado de tensões bi-axial, sendo que seções verticais ficam sujeitas a esforços de compressão e seções horizontais a esforços de tração.

- Ensaio com amostra cilíndrica em torção: a amostra cilíndrica é submetida a esforços de tração, compostos por ciclos de aplicação opostos, criando zonas de compressão e tração em uma seção circular da amostra, sendo realizado com frequências maiores que 10 Hz, considerando-se um padrão de deformação que é controlado ao longo do ensaio.

- Ensaio de flexão em amostras trapezoidais: a força é aplicada na extremidade de menor seção da amostra enquanto a extremidade oposta encontra-se engastada em uma base, simulando assim esforços de flexão na amostra, sendo a deformação elástica aplicada facilmente controlada. O ensaio é realizado com frequências inferiores a 20 Hz.

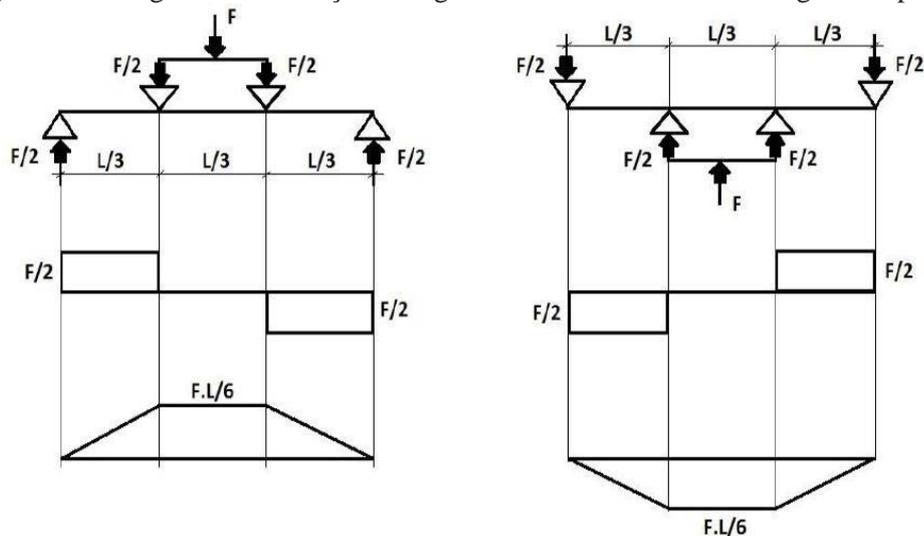
- Ensaio com vigotas em flexão: são realizados em corpos de prova prismáticos, baseado no ensaio de “dois cutelos” para a determinação da resistência à tração na flexão em uma zona com momento fletor constante.

De acordo com Loureiro (2003), o ensaio realizado com flexão em vigas (também conhecido como ensaio de fadiga de viga em 4 pontos) consiste na aplicação de uma carga vertical nos dois terços médios da viga. No ensaio com tensão controlada, verifica-se o número de golpes até a ruptura da viga, enquanto que no ensaio com a deformação controlada, o critério de ruptura mais utilizado é o de redução em 50% da deformação de tração inicial. A leitura dos valores de deformação de compressão e de tração é realizada através de transdutores do tipo *straingages* instalados nas faces inferior e superior da amostra enquanto

que a leitura de deflexão é realizada através de um LVDT posicionado no centro médio superior do corpo de prova.

Segundo Cavalcanti et al. (2013) o ensaio de fadiga de viga em 4 pontos é utilizado para permitir que no centro da viga exista um momento constante máximo ou mínimo e esforço cortante nulo, ou seja, uma condição de flexão pura. Assim, há uma garantia que as trincas não são geradas devido ao cisalhamento, conforme observa-se na Figura 12.

Figura 12 – Diagrama de Esforços na viga submetida ao ensaio de fadiga em 4 pontos.



Fonte: CAVALCANTI et al., 2013.

A rigidez é o parâmetro usado para a definição da condição de fadiga da viga ensaiada. A norma da AASHTO define o fim do ensaio quando a rigidez da viga atinge 50% da rigidez inicial, enquanto que a ASTM indica 40% (CAVALCANTI et al., 2013).

A frequência estabelecida pelas normas para o ensaio das vigas é de 5Hz a 10Hz e temperatura de 20°C. Porém, os equipamentos utilizados permitem a variação destas informações, gerando uma análise mais aprofundada dos materiais e permitindo a avaliação em diversas situações de tráfego e clima (CAVALCANTI et al., 2013).

#### 2.5.4 Módulo de Resiliência

Segundo Bernucci et al. (2008), os primeiros estudos sobre o comportamento “resiliente” de materiais utilizados em pavimentos foram realizados na década de 1930 com Francis Hveem. Este foi o primeiro a relacionar as deformações resilientes (recuperáveis) com as fissuras que surgiam nos revestimentos asfálticos. Hveem adotou o termo “resiliência”, que

é definido como “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações”.

O módulo de resiliência é equivalente ao módulo de elasticidade, sendo ambos definidos com a relação entre tensão e deformação. A diferença é que o módulo de resiliência é determinado em ensaio com carga cíclica (BARKSDALE et al., 1997).

A Instrução de Projeto 08 da prefeitura de São Paulo (PMSP, 2004), para análise mecanicista de pavimentos, sugere faixas de valores de módulos de resiliência para materiais de pavimentação. A Figura 13 mostra as faixas de módulo de resiliência sugeridas para estudos e projetos para alguns materiais a serem utilizados como camada de base de pavimento.

Figura 13 – Módulos de Resiliência sugeridos para estudos e projetos.

Camada	Material	Valores Sugeridos (MPa)
Base	Granular	$100 \leq Mr \leq 500$
	Asfáltica	$800 \leq Mr \leq 1.000$
	Cimentada - BGTC	$5.000 \leq Mr \leq 15.000$

Fonte: PMSP, 2004.

A seguir são citados alguns estudos realizados para a verificação de módulo de resiliência de materiais reciclados de pavimentos com adição de cimento.

Kolias e Williams (1978 apud BALBO, 2007) através de estudo realizado com mistura de solo-cimento com teor de cimento de 10%, encontraram valor de módulo de resiliência em tração de 4.800 MPa e de resistência à tração na flexão de 0,7 MPa, através de ensaios de laboratório. Para o mesmo tipo de solo, os autores encontraram para um teor de cimento de 7,5% um módulo de resiliência na tração de 2.900 MPa.

Dalla Rosa et al. (2015) analisaram o comportamento de material reciclado de pavimento composto por material fresado do revestimento e de base de brita graduada, com a adição de agentes estabilizantes (emulsão asfáltica e cimento). Para a mistura com adição de 3,5% de cimento, para a qual foi encontrada uma resistência à tração de 0,463 MPa foi obtido módulo de resiliência de 15.593 MPa, sendo que o valor de tensão de tração aplicado foi da ordem de 15% a 30% da resistência à tração.

Em estudo realizado por Kavussi e Modarres (2010), foram obtidos módulos de resiliência por tração indireta de mistura reciclada de pavimento com adição de 4% de emulsão asfáltica e teor de cimento pozolânico de 3%. Os resultados foram obtidos para os 7,

28 e 120 dias de cura. Para a temperatura de 25°C, foram obtidos respectivamente para os dias de cura citados os valores de módulos de 1730 MPa, 3312 MPa e 4581 MPa.

Triches et al. (2013) analisaram em seu estudo os módulos de resiliência de um material reciclado de pavimento com 30% de fresado, 70% de brita graduada e adição de cimento, sendo compactado com Energia Intermediária. Foram utilizados teores de cimento de 2, 3 e 4% nas misturas, obtendo-se após 28 dias de cura valores de módulos de resiliência na tração indireta, respectivamente iguais a 601,5 MPa, 1684,5 MPa e 2615 MPa.

Os mesmos autores também avaliaram os módulos de resiliência de uma mistura reciclada de pavimento composto por material fresado proveniente do revestimento e da base e agregado virgem, tendo como agente estabilizante o cimento. Para os teores de cimento de 2, 3 e 4% foram obtidos módulos de resiliência aos 7 e 28 dias de cura. Para os 7 dias, os autores encontram valores de módulos de 2669 MPa, 3212 MPa e 4685 MPa, respectivamente. Já para os 28 dias foram obtidos os valores de módulos de 3727 MPa, 4861 MPa e 5518 MPa, respectivamente.

Fedrico, Nuñez e Ceratti (2015) analisaram módulos de resiliência de misturas recicladas de brita graduada simples e fresado com adição de cimento, sendo utilizados teores de fresado de 20% e 50%. Foram analisadas misturas com teores de cimento de 2%, 4% e 6%, sendo utilizadas energias de compactação Modificada (teores de 2% e 4%) e Intermediária (teores de 4% e 6%). O carregamento aplicado durante o ensaio foi de 30% da carga de ruptura alcançada no ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Para as misturas com 20% de fresado e teores de cimento de 2%, 4% (energia modificada), 4% (energia intermediária) e 6%, após 7 dias de cura foram obtidos módulos de resiliência de 16.364 MPa, 19.727 MPa, 16.231 MPa e 23.208 MPa respectivamente. Para os mesmos teores de cimento, as misturas com 50% de fresado apresentaram respectivamente, após 7 dias de cura, módulos de resiliência de 13.187 MPa, 18.528 MPa, 13.548 MPa e 20.597 MPa respectivamente. Após os resultados obtidos, os autores concluíram que o acréscimo de material fresado na mistura analisada gera a redução do módulo de resiliência e verificaram que a compactação com energia maior compensa um teor inferior de cimento utilizado. Também observaram que os valores de módulo de resiliência se apresentaram bastante elevados, sendo superiores aos encontrados por outros pesquisadores que estudaram misturas semelhantes.

Taha et al. (2002) obtiveram valores de módulos de resiliência de misturas recicladas de pavimento com adição de cimento. Foram analisadas misturas com 100%, 90%, 80% e 70% de material reciclado de pavimento (RAP) na sua composição para os teores de cimento de 3%, 5% e 7%. Para teor de 3% de cimento, as misturas apresentaram módulos variando de

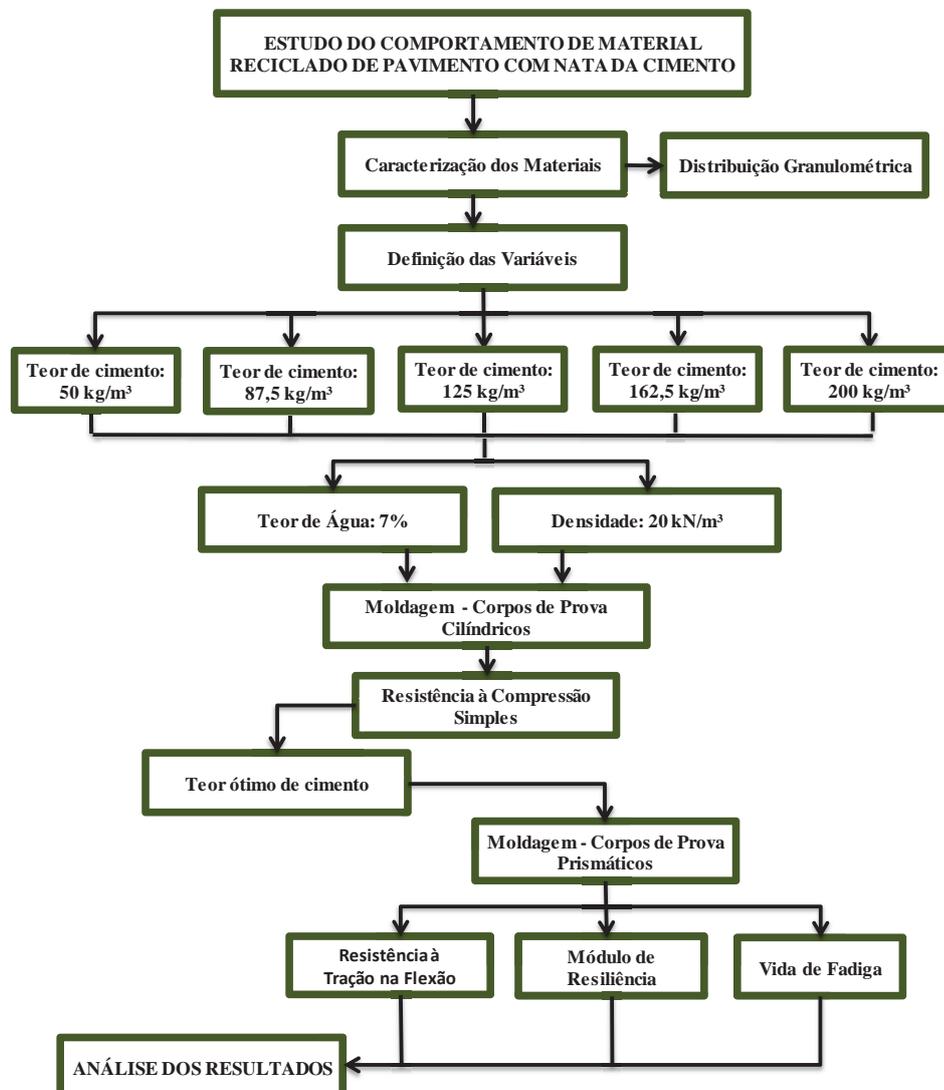
3381 MPa à 3558 MPa. Para o teor de cimento de 5%, os módulos obtidos encontravam-se na faixa 3519 MPa e 3795 MPa. Já as misturas com 7% de cimento apresentaram módulos variando de 3726 MPa a 4002 MPa. Para os 3 teores de cimento, os módulos encontrados aumentaram com a redução da quantidade de RAP.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Programa de Pesquisa

O programa de pesquisa é composto de 4 etapas principais: caracterização dos materiais utilizados no estudo; moldagem de corpos de prova com as determinadas dosagens estabelecidas; realização dos ensaios para obtenção do comportamento do material em estudo; e a análise dos resultados obtidos. As etapas podem ser observadas no fluxograma da Figura 14.

Figura 14 – Etapas a serem realizadas no estudo.



Conforme apresentado no fluxograma da Figura 14, na primeira etapa do estudo foi realizada a caracterização dos materiais utilizados através da análise da distribuição granulométrica dos mesmos. Na segunda etapa, foram estabelecidos os consumos de cimento, o teor de água e a densidade das misturas recicladas com nata de cimento a serem utilizados na moldagem dos corpos de prova para a realização dos ensaios. Na terceira etapa, foram realizados os ensaios para a verificação da resistência à compressão simples das misturas recicladas com nata de cimento para as 5 dosagens definidas, sendo estabelecido o consumo ótimo de cimento a ser adotado. Para a mistura reciclada com o consumo ótimo de cimento, foram realizados ensaios para verificação da resistência à tração na flexão, módulo de resiliência e vida de fadiga. Na quarta etapa do estudo foi realizada a análise e a discussão dos resultados obtidos.

Durante o estudo, foram realizados ensaios de laboratório, os quais estão definidos no Quadro 3, juntamente com a quantidade realizada para cada ensaio.

Quadro 3 – Dosagens e ensaios realizados no estudo.

Ensaio	Quantidade de Dosagens	Quantidade de Ensaios por Dosagem	Quantidade Total de Ensaios
Análise Granulométrica	-	-	2
Resistência à Compressão Simples	5	3	15
Resistência à Tração na Flexão	1	3	3
Vida de Fadiga e Módulo de Resiliência	1	9	9

O estudo apresenta, também, variáveis fixas, variáveis de controle e variáveis de resposta, as quais podem ser observadas no Quadro 4. As variáveis fixas são aquelas que foram definidas para o estudo e não serão alteradas. As variáveis de controle são aquelas definidas para se ter um controle do parâmetro analisado. E as variáveis de resposta são os resultados obtidos para cada variável de controle.

Quadro 4 – Variáveis fixas, variáveis de controle e variáveis de resposta.

Variáveis Fixas	Variáveis de Controle	Variáveis de Resposta
Granulometria, Densidade das Misturas e Teor de Água	Consumo de Cimento	Resistência à Compressão Simples
		Resistência à Tração na Flexão
	Tensão de Tração	Módulo de Resiliência
		Vida de Fadiga

Das variáveis fixas, a granulometria foi definida de acordo com as faixas granulométricas da norma DNIT 167/2013-ES, enquanto que a densidade das misturas e o teor de água foram estabelecidos tendo como base valores obtidos em trabalhos já realizados com materiais reciclados semelhantes. As variáveis fixas foram utilizadas para a obtenção de todas as variáveis de resposta.

Das variáveis de controle, o consumo de cimento foi variado com o objetivo de encontrar o consumo ótimo a ser utilizado no estudo, sendo que o maior valor estabelecido refere-se ao consumo de cimento utilizado em pavimentos de concreto compactado com rolo (CCR), enquanto que o valor mais baixo foi estabelecido com base em valor utilizado em bases graduadas tratadas com cimento. Essa variável de controle foi utilizada para a obtenção das variáveis de resposta de resistência à compressão simples e de tração na flexão. Já a variável de controle “tensão de tração” utilizada para a determinação da vida de fadiga e dos módulos de resiliência foi variada para observar o comportamento do material reciclado com baixo, médio e alto nível de carregamento.

As variáveis de resposta utilizadas no estudo foram definidas de acordo com os principais parâmetros necessários para a avaliação do comportamento do material reciclado de pavimento.

## **3.2 Caracterização dos Materiais**

### **3.2.1 Material Fresado**

No presente trabalho, foi utilizado o material fresado proveniente do processo de reciclagem do pavimento no km 241 da rodovia BR 285, próximo ao acesso ao município de Ciríaco/RS.

O material fresado proveniente deste trecho foi estocado no pátio do Centro Tecnológico de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo (CETEC/UPF). A coleta e separação das amostras para serem utilizadas nos ensaios foram realizadas conforme a norma do DAER/RS-EL 001/01: Preparação de amostras de solos.

Para a realização da caracterização e dos demais ensaios do estudo, o material foi coletado e transportado até o laboratório, onde foi acondicionado em uma bandeja, sendo a secagem realizada em local com temperatura ambiente por 24 horas, para que as amostras apresentassem uma condição de campo mais próxima possível, pois o processo de reciclagem de pavimento não possui um tempo de espera de secagem, como também não apresenta um

processo de secagem durante a sua execução. O acondicionamento do material é apresentado na Figura 15. Após a secagem, o material fresado foi acondicionado em uma caixa de plástico até a sua utilização nos ensaios.

Figura 15 – Amostra de material fresado para secagem em temperatura ambiente.



A caracterização do material fresado foi realizada através da verificação da sua granulometria, sendo utilizada para o ensaio a norma do DAER/RS-EL 003/01: Análise granulométrica de solos. Antes da realização do ensaio, o material passou pelo processo de quarteamento manual, conforme a norma do DAER/RS-EL 001/01.

Após o quarteamento, parte do material fresado foi separado para a realização do ensaio de análise granulométrica através do peneiramento, sendo utilizadas peneiras e uma balança de precisão conforme estabelecido pela norma do DAER/RS-EL 003/01.

A curva granulométrica obtida através do ensaio foi comparada com as faixas granulométricas da norma DNIT 167/2013-ES, pois a mesma descreve aspectos sobre reciclagem profunda de pavimentos “*in situ*” com adição de cimento Portland. Esta norma estabelece duas faixas granulométricas, nas quais o material proveniente da reciclagem deve se enquadrar, como apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 – Faixas granulométricas dos materiais reciclados com adição de cimento.

Peneira de malha quadrada		Porcentagem passando, em massa (%)		Tolerância da faixa de projeto (%)
ABNT	Abertura (mm)	I	II	
2"	50,8	100	100	
1"	25,4	75 – 90	100	± 7
3/8"	9,50	40 – 75	50 – 85	± 7
Nº 4	4,75	30 – 60	35 – 65	± 5
Nº 10	2,0	20 – 45	25 – 50	± 5
Nº 40	0,425	15 – 30	15 - 30	± 2
Nº 200	0,075	5 - 15	5 - 15	± 2

Fonte: DNIT, 2013.

### 3.2.2 Resíduo de Beneficiamento de Pedras Semi-preciosas

Para o enquadramento do material fresado em uma das faixas do DNIT, foi necessário ser adicionado ao mesmo um material mais fino.

O material fino adicionado é um resíduo proveniente da rolagem de pedras semi-preciosas, como ametistas, ágatas, calcitas, entre outras, gerado por empresas de beneficiamento de pedras semi-preciosas do município de Soledade, RS. Segundo Edler (2011), um dos destaques de Soledade é a indústria de pedras preciosas e semi-preciosas, a qual abre novos mercados e incentiva o setor de joalheria na região norte do Rio Grande do Sul. As pedras representam 30% da economia do município, sendo que são extraídas das minas cerca de 180 toneladas por mês de pedras.

A Figura 16 apresenta o resíduo proveniente do processo de beneficiamento de pedras semi-preciosas e que será utilizado como material fino no trabalho.

Figura 16 – Resíduo proveniente do beneficiamento de pedras semi-preciosas no município de Soledade,RS.



O resíduo de beneficiamento de pedras semi-preciosas foi coletado e transportado até o laboratório do CETEC da UPF. Como o material encontrava-se úmido, o mesmo foi espalhado em local com temperatura ambiente para a sua secagem. Após, o material foi armazenado em sacos até a sua utilização.

Para a caracterização do resíduo, foi realizado o ensaio de análise granulométrica, conforme a norma DAER/RS-EL 003/01. Antes da realização do ensaio, o material passou pelo processo de secagem em estufa a uma temperatura de 100 °C durante um período de 24 horas. Após a secagem, igualmente ao material fresado, o resíduo passou pelo processo de quarteamento, sendo coletadas amostras em quantidades suficientes para o ensaio.

### 3.2.3 Correção Granulométrica

Após a caracterização dos materiais a serem utilizados, foi necessário realizar a correção granulométrica da mistura dos dois materiais. A porcentagem de cada material a ser adicionado na mistura para que a mesma se enquadre na faixa II do DNIT foi determinada através do Método das Tentativas. Segundo Senço (2007), nesse método são feitas estimativas de porcentagens a serem utilizadas de cada material, para que a distribuição granulométrica se enquadre aos limites desejados de uma determinada faixa granulométrica.

A análise pelo Método das Tentativas foi realizada através de uma planilha Excel. Estabelecidas as porcentagens a serem utilizadas de cada material, foi realizada a análise granulométrica da mistura reciclada, para comparar o resultado com o obtido pelo Método das Tentativas.

### **3.2.4 Agente Estabilizante**

O agente estabilizante utilizado nas misturas recicladas é o cimento Portland. Foi utilizado o cimento CPV-ARI (alta resistência inicial) devido ao tempo para a realização dos ensaios. O rompimento de cada corpo-de-prova foi realizado 7 dias após a sua moldagem.

Para a sua utilização nos ensaios, o cimento foi peneirado na peneira nº 16, pois parte do material apresentava-se em forma de pequenos torrões.

O cimento para a estabilização das misturas foi utilizado em forma de nata, e não em forma de pó. A nata de cimento foi confeccionada de forma manual, através da adição de água ao cimento em uma bandeja. Após a confecção, a nata foi misturada à mistura reciclada (fresado + resíduo) em quantidades estabelecidas, conforme estabelecido a seguir.

Foi utilizado um teor de água de 7% em relação à massa das misturas para a confecção da nata de cimento. Esse teor foi estabelecido para que as misturas com os consumos de cimento citados anteriormente apresentem relações água/cimento distintas, gerando assim misturas recicladas com consistências diferentes.

### **3.2.5 Água**

Para a confecção da nata de cimento, foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento da Universidade de Passo Fundo.

## **3.3 Definição das Variáveis – Consumos de Cimento e Densidade**

No presente trabalho, para a confecção da nata foram considerados 5 consumos de cimento: 50 kg/m<sup>3</sup>; 87,5 kg/m<sup>3</sup>; 125 kg/m<sup>3</sup>; 162,5 kg/m<sup>3</sup> e 200 kg/m<sup>3</sup>. O maior valor adotado refere-se ao máximo consumo de cimento utilizado em pavimentos de concreto compactado com rolo (CCR), conforme determina PITTA (2002). Segundo o autor, para a utilização em camada de base ou sub-base de pavimentos, seu consumo varia entre 80 kg/m<sup>3</sup> e 200 kg/m<sup>3</sup>, dependendo das propriedades mecânicas requeridas, sendo que o cimento adotado deve atender os requisitos para uso no concreto convencional.

Já o valor mais baixo de consumo de cimento foi estabelecido com base em valor utilizado em bases graduadas tratadas com cimento (aproximadamente 50 kg/m<sup>3</sup>), sendo proposto também 3 valores intermediários a essas duas proporções.

O Quadro 6 mostra os consumos utilizados de cimento seco (em relação à massa seca) e água, e as relações água/cimento obtidas para cada consumo.

Quadro 6 – Consumos de cimento, teor de água e relações água/cimento

Consumo de Cimento		Teor de Água (%)	Relação água/cimento
(kg/m <sup>3</sup> )	(%)		
50	2,56	7	2,8
87,5	4,58		1,6
125	6,67		1,12
162,5	8,84		0,86
200	11,11		0,7

Para os 5 consumos de cimento, foi considerado um único peso específico aparente seco com o valor de 20 kN/m<sup>3</sup> com o objetivo de avaliar o comportamento do material analisado para distintos consumos de cimento para uma mesma densidade.

Para cada uma destas dosagens, foram realizados ensaios para a verificação da resistência à compressão simples. Através dos resultados obtidos, foi estabelecido o consumo ótimo de cimento a ser utilizado para as demais análises (resistência à tração na flexão, vida de fadiga e módulo de resiliência). O consumo ótimo foi obtido tendo como referência os valores de resistência à compressão simples da norma DNIT 167/2013-ES, a qual estabelece que a resistência deve encontrar-se entre 2,1 e 2,5 MPa aos 7 dias de cura.

### 3.4 Moldagem dos Corpos de Prova

A moldagem dos corpos-de-prova das misturas recicladas com a adição de nata de cimento foi realizada com base na norma da ABNT NBR 5738/2003 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.

Foram moldados corpos de prova cilíndricos para a realização dos ensaios para a determinação da resistência à compressão simples para cada dosagem estabelecida. Também foram moldados corpos de prova prismáticos para a realização de ensaios para a obtenção da resistência à tração na flexão, módulo de resiliência e vida de fadiga para as dosagens em estudo.

### 3.4.1 Moldagem para Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS)

Para a verificação da resistência à compressão simples para cada dosagem das misturas recicladas, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura. Decidiu-se utilizar essas dimensões pelo fato da dificuldade da moldagem e compactação em corpos-de-prova de dimensões menores (10cm x 20cm) em estudos anteriores. Foram moldados 3 corpos de prova para cada uma das 5 dosagens estabelecidas, totalizando 15 amostras. Os mesmos foram identificados conforme apresentado no Quadro 7.

Quadro 7 – Identificação dos corpos de prova cilíndricos para os ensaios de resistência à compressão simples.

<b>Consumo de Cimento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Identificação dos corpos de prova cilíndricos</b>		
50	CDP1-50	CDP2-50	CDP3-50
87,5	CDP1-87,5	CDP2-87,5	CDP3-87,5
125	CDP1-125	CDP2-125	CDP3-125
162,5	CDP1-162,5	CDP2-162,5	CDP3-162,5
200	CDP1-200	CDP2-200	CDP3-200

Para a moldagem dos corpos de prova, foram separados os materiais que compõem a mistura (material fresado, resíduo de pedras semi-preciosas, cimento e água) nas quantidades estabelecidas. A mistura do material fresado mais o resíduo foi realizada separadamente da mistura de cimento e água (nata), para simular o processo de reciclagem com adição de nata de cimento.

Após a confecção das misturas separadamente, foi adicionada a nata de cimento sobre o material fresado e o resíduo, como pode ser observado na Figura 17. Após esse procedimento, a mistura foi realizada manualmente até o material ficar homogêneo.

Figura 17 – Adição da nata de cimento à mistura de material fresado e resíduo.



Após as misturas serem homogeneizadas, as mesmas foram dispostas nos cilindros (moldes) para a compactação e confecção dos corpos de prova. Antes da moldagem, foi adicionado aos cilindros um desmoldante para facilitar posteriormente a desmoldagem dos corpos de prova.

As misturas recicladas foram compactadas por vibração através de uma mesa vibratória do laboratório de materiais de construção.

Além da mesa vibratória, foi necessário utilizar uma chapa circular de aço sobre a mistura a ser compactada para facilitar o processo de compactação. Para isso, foi necessária a execução de uma chapa com 147 mm de diâmetro e 38,5 mm de altura, adaptada com parafusos para que após o processo de compactação das camadas fosse possível a sua retirada de dentro do cilindro. A Figura 18 mostra a chapa de aço utilizada na compactação dos corpos de prova cilíndricos.

Figura 18 – Chapa de aço utilizada na compactação por vibração dos corpos de prova cilíndricos.



A Figura 19 mostra a chapa inserida no cilindro para a realização da compactação dos corpos de prova cilíndricos.

Figura 19 – Chapa de aço no cilindro durante execução da compactação.



Sobre a chapa de aço foram adicionados outros pesos compatíveis com o diâmetro do cilindro, pois sem os mesmos não seria possível compactar o material na densidade estabelecida.

Para a compactação, as misturas foram divididas em 3 camadas dentro do cilindro, as quais foram compactadas separadamente. A quantidade de material a ser acrescentada em cada camada foi determinada através do volume da camada e da densidade estabelecida de 20 kN/m<sup>3</sup>.

Após ser determinada a quantidade de material para cada camada, o mesmo foi inserido no cilindro, sendo aplicados 25 golpes com uma haste metálica. Os golpes foram distribuídos uniformemente em toda a seção transversal do molde.

Em seguida, foi realizada a compactação por vibração da mistura reciclada. Após cada camada ser compactada, foi verificada a altura da mesma através da leitura de uma régua, para se ter o controle da densidade do material compactado. Verificada a altura, foi realizada a escarificação do material através de uma haste metálica. A escarificação foi realizada para se ter aderência entre as camadas compactadas.

Durante o processo de moldagem, também foram coletadas amostras do material reciclado com nata de cimento para verificar a umidade de compactação.

As etapas citadas anteriormente sobre o processo de moldagem dos corpos de prova cilíndricos estão apresentadas na Figura 20.

Figura 20 – Etapas da moldagem dos corpos de prova cilíndricos (golpes com haste, compactação por vibração, controle da altura e escarificação).



Para a compactação da última camada, foi utilizado um colar metálico para não haver perda do material. Após a moldagem, os corpos de prova cilíndricos foram pesados e armazenados em câmara úmida durante 7 dias durante o tempo de cura a uma temperatura de  $23^{\circ}\text{C}\pm 3$ . Após 2 dias de armazenamento, os corpos de prova foram desmoldados e acondicionados novamente na câmara úmida até o sétimo dia, no qual foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples. Os corpos de prova, após a desmoldagem e armazenados na câmara úmida podem ser observados na Figura 21.

Figura 21 – Corpos de prova armazenados em câmara úmida.



### 3.4.2 Corpos de prova para Ensaios de Resistência de Tração na Flexão e Vida de Fadiga

Para a realização dos ensaios de resistência de tração na flexão e verificação da vida de fadiga e módulo de resiliência do material reciclado com o consumo ótimo de cimento obtido através dos resultados de resistência à compressão, foram moldados corpos de prova prismáticos (vigas) com as dimensões de 15cm x 15cm x 50cm.

Para os ensaios de resistência à tração na flexão, foram moldadas 3 vigas para a mistura reciclada com o consumo ótimo de cimento estabelecido. Já para os ensaios para a verificação do módulo de resiliência e da vida de fadiga do material reciclado com nata de cimento foram verificados para 3 tensões de tração diferentes: 75%, 60% e 45% do valor da resistência de tração na flexão média obtida. Assim, para cada tensão de tração estabelecida, foram moldadas 3 vigas, totalizando 9 amostras.

Para a moldagem das vigas, foram separados os materiais que compõem a mistura (material fresado, resíduo, cimento e água) nas quantidades estabelecidas. A separação e a mistura dos materiais foram realizadas igualmente à moldagem dos corpos de prova cilíndricos. A compactação também foi realizada por vibração. Para isso foi necessário utilizar uma chapa retangular de aço sobre a mistura a ser compactada para facilitar o processo de compactação. Assim, foi necessária a execução da chapa com 498 mm de comprimento e 148 mm de largura, adaptada com parafusos para que após o processo de compactação das camadas fosse possível a sua retirada de dentro do molde. A Figura 22 mostra a chapa de aço utilizada na compactação das vigas.

Figura 22 – Chapa de aço utilizada para compactação das vigas



Para a compactação, as misturas foram divididas em 2 camadas dentro do molde, as quais foram compactadas separadamente. A quantidade de material a ser acrescentada em cada camada foi determinada através do volume da camada e da densidade estabelecida de 20 kN/m<sup>3</sup>. O material foi inserido no molde, sendo aplicados 50 golpes com uma haste metálica, distribuídos uniformemente sobre o mesmo.

Igualmente aos corpos de prova cilíndricos, as vigas foram compactadas por vibração, tendo-se um controle da densidade do material compactado através da verificação da altura de cada camada, e também foram escarificadas para se ter aderência entre a primeira e a segunda camada. A moldagem das vigas pode ser observada na Figura 23.

Figura 23 – Moldagem das vigas (corpos de prova prismáticos).



Para a compactação da última camada, foi utilizado um segundo molde para não haver perda do material.

Durante o processo de moldagem, também foram coletadas amostras do material reciclado com nata de cimento para verificar a umidade de compactação.

Após a moldagem, as vigas foram pesadas e armazenadas em câmara úmida durante 7 dias durante o tempo de cura. As desmoldagens foram realizadas aproximadamente após 2 dias de armazenamento. A Figura 24 mostra as vigas dispostas em câmara úmida durante o processo de cura.

Figura 24 – Vigas armazenadas em câmara úmida.



### 3.5 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Para a verificação da resistência à compressão simples das misturas recicladas, foi realizado o ensaio prescrito pela norma NBR 5739/2007 – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

Após 7 dias de cura na câmara úmida, como descrito anteriormente, foram verificadas as dimensões (diâmetros e alturas) dos corpos de prova (Figura 25) através de um paquímetro, para saber posteriormente se as amostras atingiram a densidade estabelecida de 20 kN/m<sup>3</sup>.

Figura 25 – Medição dos diâmetros e alturas dos corpos-de-prova cilíndricos.



Após a medição, foi realizado o ensaio nos 15 corpos de prova para a verificação da resistência à compressão simples. Os ensaios foram realizados em uma prensa modelo PC200 CS com capacidade máxima de 200 toneladas, instalada no laboratório de materiais de construção do CETEC da UPF. Para a realização do ensaio, foi necessária a utilização de neoprene nas faces superiores e inferiores dos corpos de prova, pois não foi possível fazer o faceamento dos mesmos, conforme um teste realizado, devido ao grande desgaste apresentado. A execução do ensaio para a obtenção da resistência à compressão simples é apresentada na Figura 26.

Figura 26 – Ensaio de resistência à compressão simples.



### 3.5.1 Análise Estatística

Com os resultados obtidos de resistência à compressão simples para as 5 dosagens do estudo, foi realizada análise estatística, sendo analisado se existe diferença estatística entre os valores médios de resistência à compressão simples obtidos. Para isso, inicialmente foi utilizado o método ANOVA (Analysis of Variance), que tem como objetivo de analisar se existe uma diferença significativa entre as médias obtidas para dosagem estabelecida. O método compara a variação dentro de cada grupo e entre os grupos utilizadas no estudo, no caso as dosagens. Utilizou-se também o teste-t para encontrar quais os grupos apresentam diferença significativa entre suas médias.

### 3.6 Ensaio de Resistência à Tração na Flexão

Os ensaios para a verificação da resistência à tração na flexão foram realizados conforme a norma NBR 12.142/2010 – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.

Foram ensaiadas 3 vigas (CDP1, CDP2 e CDP3) com material reciclado com o consumo ótimo de cimento obtido através dos resultados de resistência à compressão.

Após 7 dias de cura na câmara úmida, como descrito anteriormente, foram verificadas as dimensões (comprimento, largura e altura) das vigas através de um paquímetro, com o

objetivo de saber a densidade de cada amostra ensaiada. Também foram feitas marcações nos terços médios de cada viga para a verificação do local da ruptura após os ensaios.

A prensa para realização dos ensaios foi a mesma utilizada para os ensaios de resistência à compressão simples. A execução do ensaio pode ser observado na Figura 27.

A resistência à tração na flexão foi determinada de acordo com a equação  $f_{ct,f} = F \times l / b \times d^2$ , onde  $F$  é a força máxima (N) obtida pela prensa do ensaio,  $l$  é a dimensão do vão (mm) entre os apoios,  $b$  é a largura média da viga (mm) e  $d$  é a altura média da viga (mm).

Figura 27 – Ensaio de resistência à tração na flexão.



### 3.7 Determinação da Vida de Fadiga e Módulo de Resiliência

A vida de fadiga e o módulo de resiliência das misturas recicladas com nata de cimento foram realizadas através do ensaio de fadiga de viga em 4 pontos (tração na flexão), tendo como base a norma internacional ASTM D7460-10 (ASTM, 2010).

Os ensaios foram realizados com tensão controlada, sendo considerados 3 níveis de tensão (relações de tensões – RT): 75%, 60% e 45% da resistência média de tração na flexão obtida no ensaio de tração. Para cada nível de tensão, foram ensaiadas 3 vigas com o material reciclado com nata de cimento, considerando o consumo ótimo de cimento obtido nos ensaios de resistência à compressão simples, totalizando assim 9 amostras, as quais foram identificadas conforme apresentado no Quadro 8. A frequência utilizada para os ensaios foi de 5 Hz, a qual é a mínima estabelecida pela norma. A temperatura ambiente durante a realização dos ensaios era de aproximadamente 20°C. O gráfico gerado pelas cargas cíclicas aplicadas aos corpos de prova foi do tipo senoidal.

Quadro 8 – Identificação das vigas para os ensaios de fadiga.

Relação de Tensão RT	Tensão Aplicada (MPa)	Identificação das vigas		
		CDP1-0,75	CDP2-0,75	CDP3-0,75
0,75	0,53	CDP1-0,75	CDP2-0,75	CDP3-0,75
0,6	0,42	CDP1-0,60	CDP2-0,60	CDP3-0,60
0,45	0,32	CDP1-0,45	CDP2-0,45	CDP3-0,45

Para a execução dos ensaios, foi utilizada uma prensa modelo *Shimadzu Servopulser* com capacidade de 200 kN, destinada exclusivamente para ensaios de fadiga localizada no Núcleo de Tecnologia Mecânica da UPF.

Para a medição dos deslocamentos no centro das vigas, foram utilizados 2 sensores LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*). Também foram registradas as leituras dos deslocamentos da prensa de fadiga, sendo assim possível determinar os módulos de resiliência.

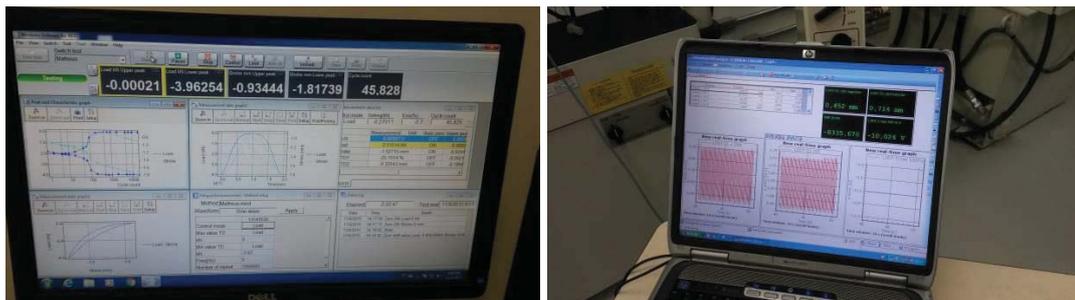
A Figura 28 apresenta a execução do ensaio para a obtenção da vida de fadiga e dos módulos de resiliência do material reciclado com nata de cimento.

Os dados gerados pela prensa e pelos LVDTs foram registrados em dois computadores, como pode ser observado também na Figura 28 e na Figura 29.

Figura 28 – Ensaio de Fadiga.



Figura 29 – Leitura dos deslocamentos: (a) Dados da prensa, (b) Dados dos LVDTs.



(a)

(b)

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

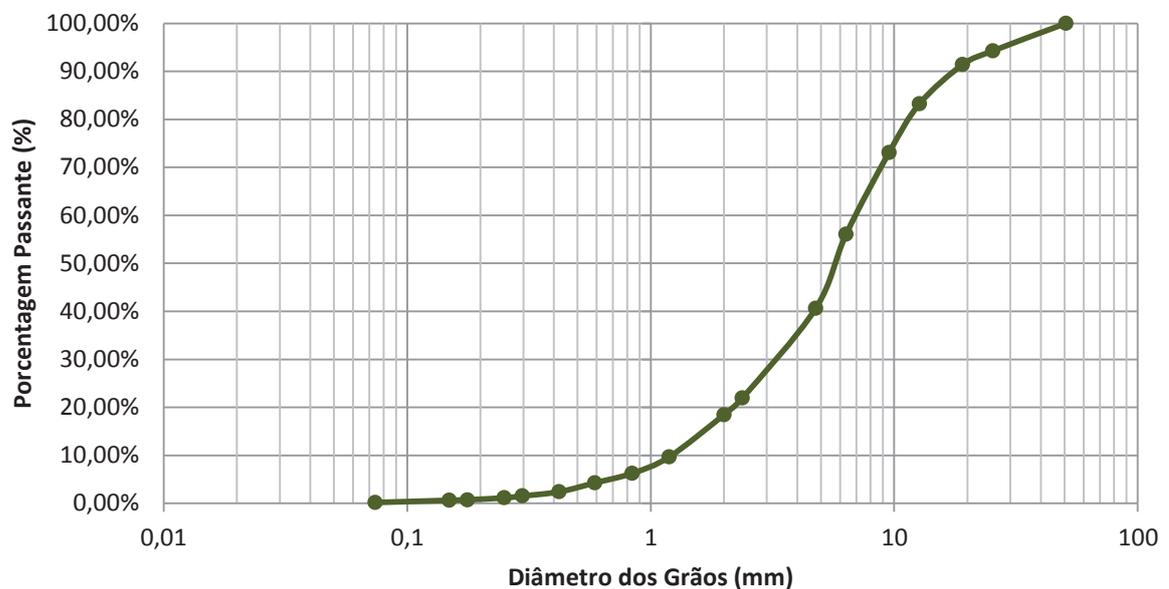
A seguir são apresentados os resultados obtidos durante o estudo. Serão apresentados e discutidos os resultados da caracterização dos materiais, resistência à compressão simples e definição do consumo ótimo de cimento, resistência à tração na flexão, vida de fadiga e módulo de resiliência.

### 4.1 Caracterização dos Materiais

#### 4.1.1 Distribuição Granulométrica do Material Fresado

Através do ensaio de análise granulométrica, foram obtidas as curvas granulométricas do material fresado. O ensaio foi realizado para duas amostras do material fresado, conforme determina a norma. A distribuição granulométrica resultante do ensaio, obtida através da média entre as distribuições granulométricas das duas amostras, é apresentada na Figura 30.

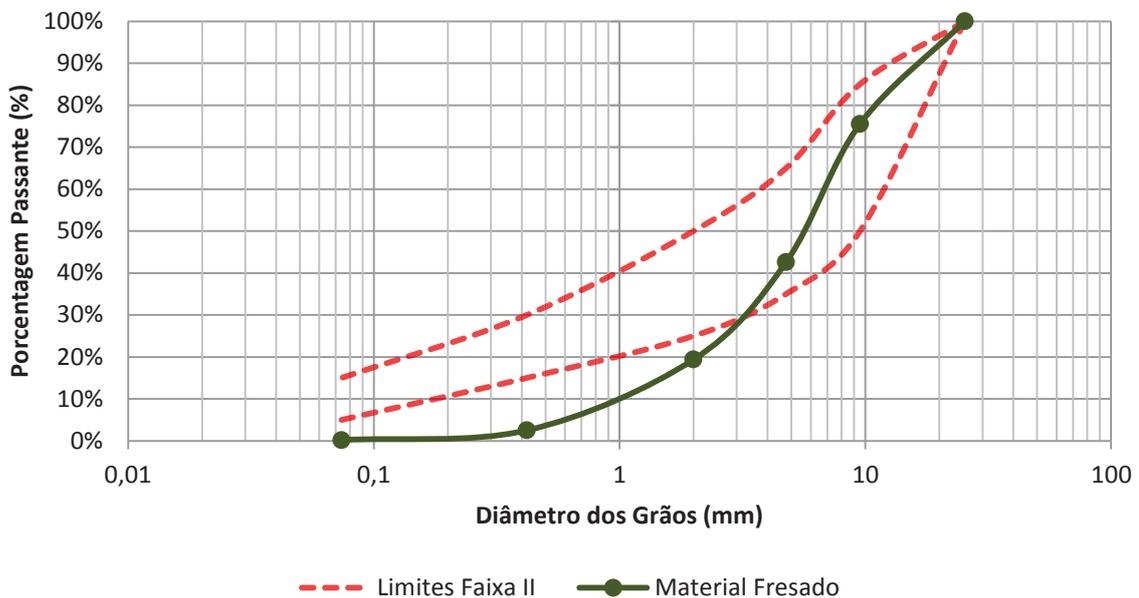
Figura 30 – Distribuição granulométrica do material fresado.



Analisando as faixas granulométricas da norma DNIT 167/2013-ES, estabeleceu-se que o material fresado deve se enquadrar na faixa II, pois para se enquadrar na faixa I, no máximo 90% do material deveria passar na peneira 1", o que não ocorre. Ainda, para se enquadrar na faixa II, o material fresado retido na peneira 1" teve que ser descartado, pois 100% do material deve passar por essa peneira.

Assim, considerando o descarte do material retido na peneira 1", o resultado da distribuição granulométrica, juntamente com os limites superior e inferior da faixa II do DNIT é apresentado na Figura 31.

Figura 31 – Enquadramento da distribuição granulométrica do fresado na faixa II do DNIT.



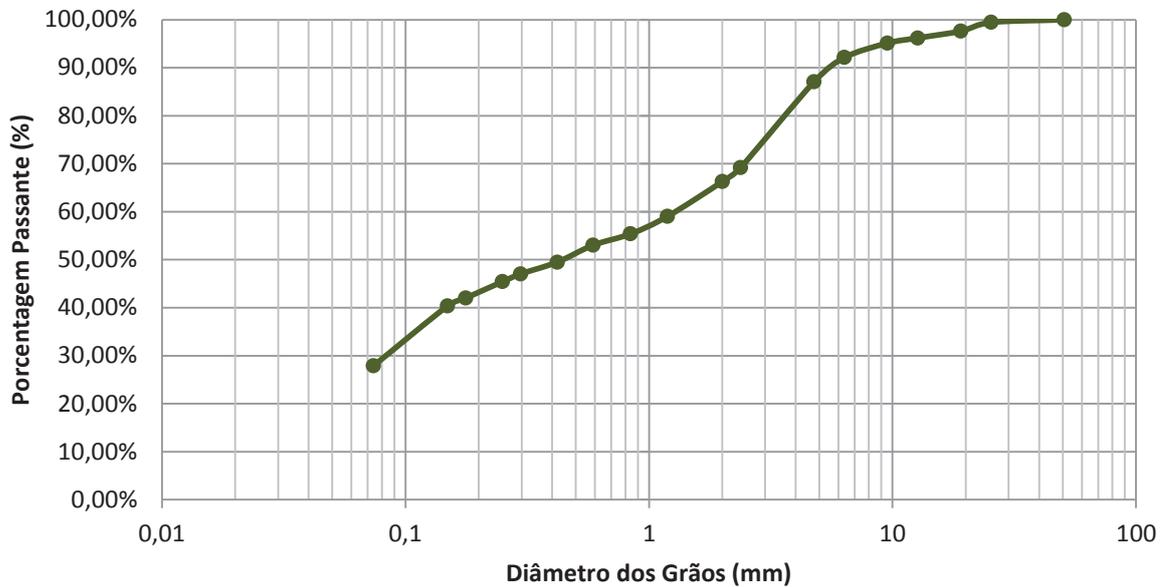
Nota-se que a curva granulométrica do material fresado não se enquadra nos limites da faixa II do DNIT, devido à falta de uma porcentagem de material fino. Assim, para se enquadrar à faixa, foi necessária a adição de material fino ao fresado. O material fino adicionado é um resíduo proveniente da rolagem de pedras semi-preciosas, gerado por empresas do município de Soledade, RS, conforme já descrito no capítulo 3.

#### 4.1.2 Distribuição Granulométrica do Resíduo

O ensaio para a determinação da distribuição granulométrica do resíduo de beneficiamento de pedras semi-preciosas foi realizado para duas amostras do resíduo, conforme determina a norma. A distribuição granulométrica resultante do ensaio, obtida

através da média entre as distribuições granulométricas das duas amostras do resíduo, é apresentada na Figura 32.

Figura 32 – Distribuição granulométrica do resíduo.



Para que o resíduo se enquadre na faixa II do DNIT, o material retido na peneira 1", foi descartado, igualmente ao material fresado.

#### 4.1.3 Correção Granulométrica da Mistura (Fresado e Resíduo)

O resultado obtido da correção granulométrica da mistura do material fresado com o resíduo realizada pelo método das tentativas é apresentado no Quadro 9. Obteve-se assim a mistura reciclada com 70% de material fresado e 30% de resíduo, a qual é apresentada na Figura 33.

Quadro 9 – Correção da curva granulométrica da mistura reciclada.

Peneira	Malha (mm)	DNIT - Faixa II		Porcentagem Passante Acumulada (%) FRESADO	Porcentagem Passante Acumulada (%) RESÍDUO	Porcentagem Passante Acumulada (%) 70% Fresado + 30% Resíduo
		Limite Inferior (%)	Limite Superior (%)			
2"	50,8	100%	100%	100,00%	100,00%	100,00%
1"	25,4	100%	100%	100,00%	100,00%	100,00%
3/8"	9,52	50%	85%	75,53%	95,64%	83,15%
n°4	4,76	35%	65%	42,57%	87,53%	60,31%
n° 10	2	25%	50%	19,37%	66,64%	36,70%
n°40	0,42	15%	30%	2,51%	49,77%	18,89%
n°200	0,074	5%	15%	0,19%	28,07%	9,29%

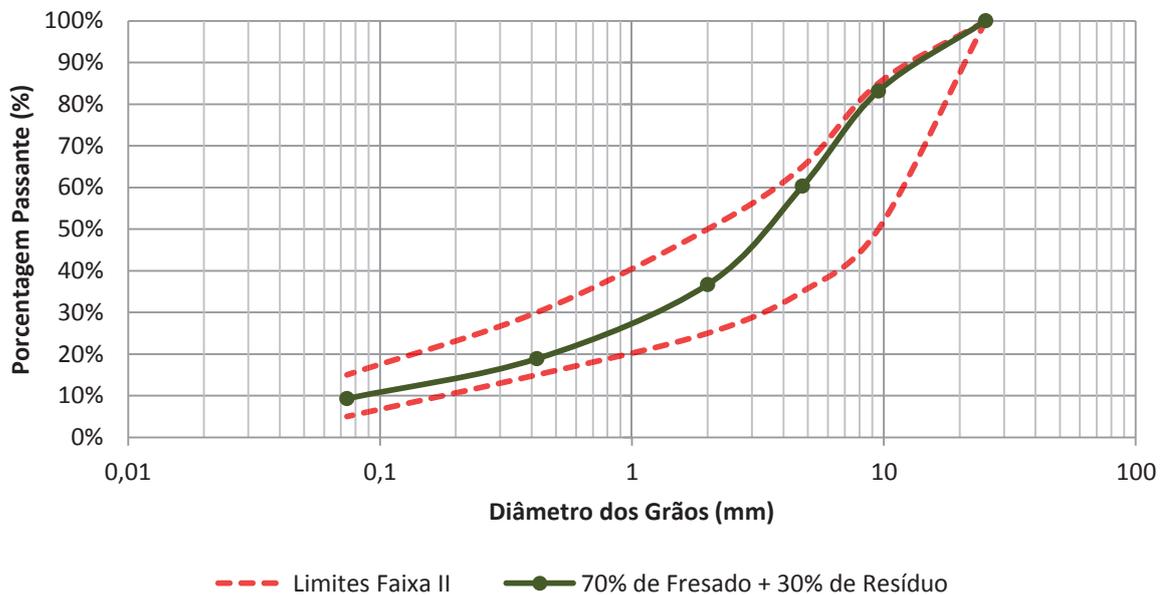
Figura 33 – Mistura com 70% de fresado e 30% de resíduo.



O ensaio para a verificação da distribuição granulométrica da mistura com 70% de material fresado e 30% de resíduo, com o objetivo de comparar o resultado com o obtido pelo Método das Tentativas, foi realizado para duas amostras do resíduo, conforme estabelecido pela norma.

Após a realização do ensaio de análise granulométrica, foi obtida a distribuição granulométrica resultante da mistura de fresado mais resíduo. Após, foi realizado o enquadramento da mesma com os limites da faixa II do DNIT, como pode ser observado na Figura 34.

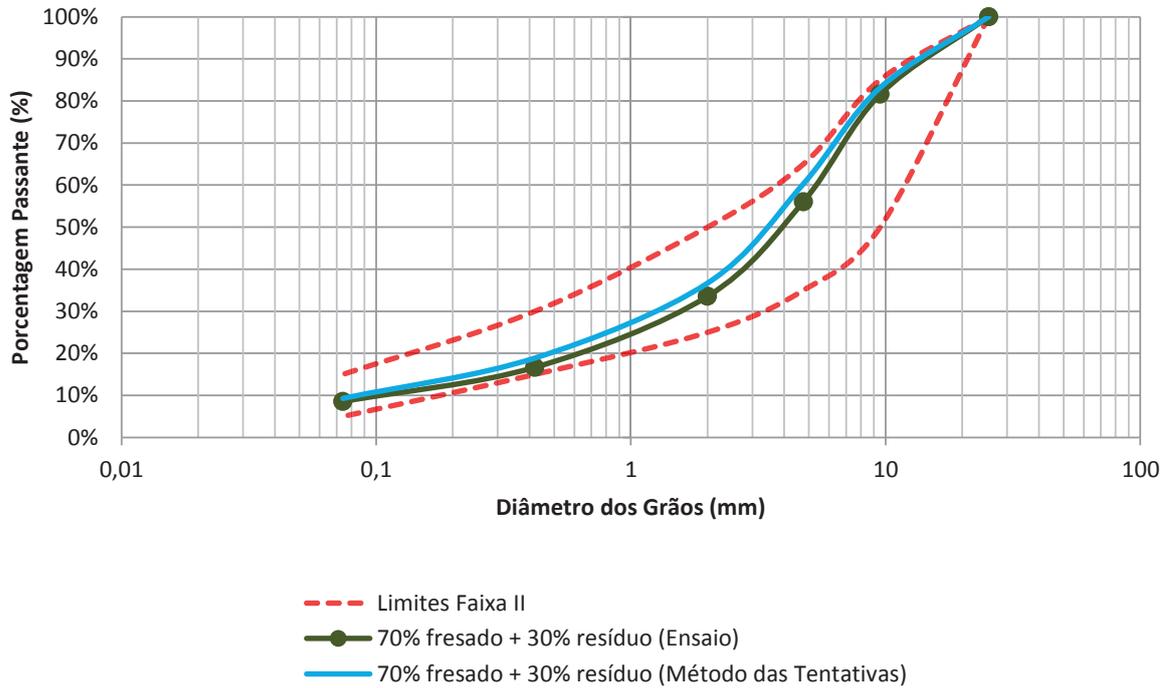
Figura 34 – Enquadramento da distribuição granulométrica da mistura (70% fresado + 30% resíduo) na faixa II do DNIT.



Observa-se que a mistura com 70% de fresado e 30% de resíduo se enquadra na faixa II do DNIT, podendo ser utilizada no processo de reciclagem com adição de cimento. Porém, segundo a norma do DNIT 167/2013-ES, a quantidade máxima de revestimento asfáltico a ser utilizada na mistura reciclada é de 50%. Mesmo assim, decidiu-se manter as quantidades obtidas de fresado e resíduo a serem utilizadas, não sendo acrescentado material virgem com o objetivo de observar se apenas com material reciclado é possível ou não obter misturas recicladas com um comportamento mecânico satisfatório.

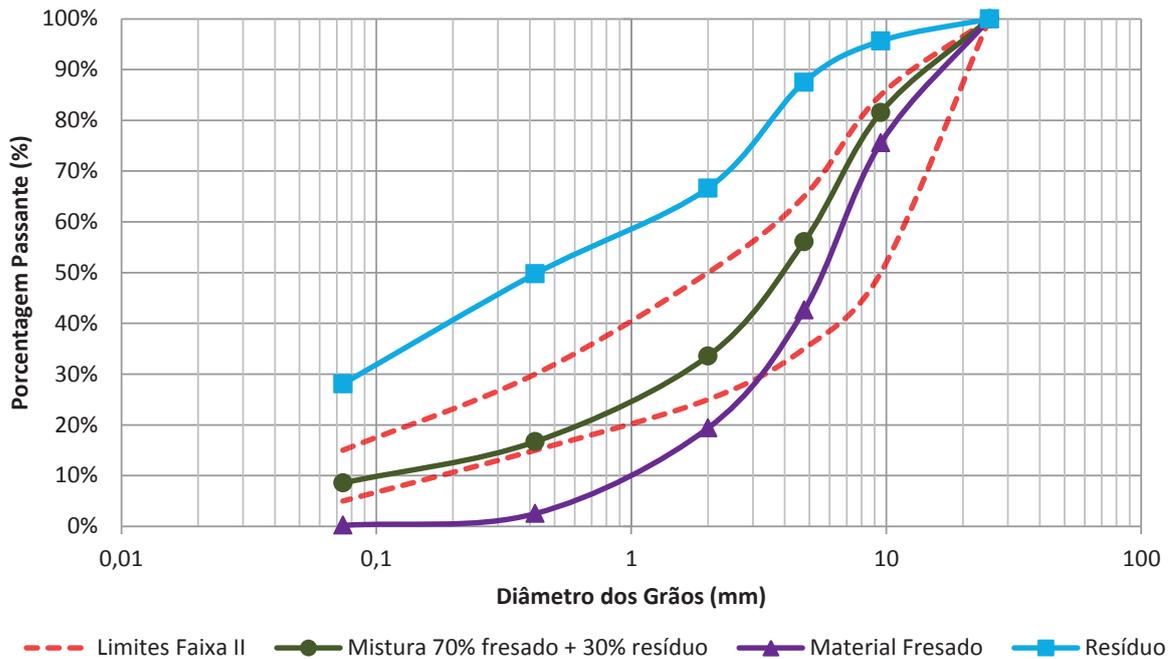
Comparando a distribuição granulométrica obtida através do ensaio e a obtida pelo Método das Tentativas, observa-se que as duas curvas ficaram bem próximas, conforme pode ser apresentado na Figura 35.

Figura 35 – Curva granulométrica obtida no ensaio e curva teórica, enquadradas na faixa II do DNIT.



A Figura 36 mostra as distribuições granulométricas obtidas do material fresado, do resíduo, da mistura reciclada e os limites da faixa II do DNIT.

Figura 36 – Distribuição granulométrica dos materiais utilizados e limites da faixa II do DNIT.



## 4.2 Resistência à Compressão Simples

Através dos ensaios realizados para a verificação da resistência à compressão simples das misturas recicladas, os corpos de prova para cada dosagem de cimento foram rompidos, conforme é apresentado na Figura 37.

Figura 37 – Corpos de prova rompidos após os ensaios de resistência à compressão simples



Observou-se que na maioria dos corpos de prova ensaiados a ruptura ocorreu na parte superior da amostra, provavelmente por ser a região da última camada que foi compactada.

Após a realização dos ensaios, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 1. Estão descritos os pesos específicos aparentes secos obtidos de cada corpo de prova antes da realização dos ensaios, como também as resistências à compressão simples (RCS) obtidas para cada corpo de prova, o desvio padrão, o coeficiente de variação (CV) e a média dos valores de resistência para cada consumo de cimento.

Tabela 1 – Resultados obtidos dos ensaios de resistência à compressão simples.

Consumo de Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Nº do CDP	Peso Específico Aparente Seco (kN/m <sup>3</sup> )	RCS (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)	Média (MPa)
50 kg/m <sup>3</sup>	1	19,47	1,86	0,29	16,88	1,73
	2	19,67	1,94			
	3	19,45	1,40			
87,5 kg/m <sup>3</sup>	1	19,97	3,85	0,71	23,28	3,07
	2	19,58	2,89			
	3	19,66	2,46			
125 kg/m <sup>3</sup>	1	19,51	5,27	0,54	9,21	5,89
	2	19,59	6,18			
	3	19,68	6,24			
162,5 kg/m <sup>3</sup>	1	19,18	4,99	0,40	8,37	4,80
	2	19,50	5,07			
	3	19,74	4,34			
200 kg/m <sup>3</sup>	1	19,70	5,60	0,53	8,92	5,95
	2	19,87	6,56			
	3	19,63	5,68			

Observa-se na Tabela 1 que os pesos específicos dos corpos de prova ensaiados ficaram um pouco abaixo do valor padrão estabelecido para o estudo de 20 kN/m<sup>3</sup>. Isso ocorreu possivelmente pelo fato dos cilindros metálicos utilizados na moldagem apresentarem pequenas diferenças nas suas dimensões (diâmetro e altura) quando comparadas com as dimensões padrões que cada cilindro deveria ter. Outro motivo foi os valores encontrados de umidade no momento da compactação das misturas, os quais variaram em média entre 7 a 8% (acima do valor de 7% estabelecido para o estudo) provavelmente devido à evaporação da quantidade presente no material asfáltico do fresado no momento da secagem em estufa.

Observa-se também que os coeficientes de variação (CV) para os consumos de cimento de 50 kg/m<sup>3</sup> e 87,5 kg/m<sup>3</sup> apresentaram valores maiores. Isso se deve provavelmente a heterogeneidade das misturas recicladas com nata de cimento ensaiadas para esses consumos.

Em relação aos valores obtidos de resistência à compressão simples, observa-se que há um aumento parcial da resistência com o acréscimo de cimento nas misturas recicladas até o consumo de cimento de 125 kg/m<sup>3</sup>. Observa-se que houve uma redução de resistência de 1,09 MPa quando o consumo de cimento aumenta de 125 kg/m<sup>3</sup> para 162,5 kg/m<sup>3</sup>. Já para os consumos de cimento de 125 kg/m<sup>3</sup> e 200 kg/m<sup>3</sup> as resistências obtidas foram praticamente iguais, com uma diferença de apenas 0,06 MPa.

Ainda, em relação aos valores de resistência à compressão simples, observa-se que o valor médio obtido para o consumo de cimento de 50 kg/m<sup>3</sup> (1,73 MPa) não se enquadra na faixa de resistência à compressão simples aos sete dias de 2,1 a 2,5 MPa estabelecida pela norma do DNIT 167/2013-ES para que a mistura reciclada possa ser utilizada no processo de reciclagem profunda com adição de cimento. Já os valores médios obtidos para os demais consumos analisados encontram-se acima da faixa a estabelecida pelo DNIT, podendo qualquer um ser adotado por esse critério.

#### 4.2.1 Análise Estatística dos Resultados Obtidos

A Tabela 2 mostra os resultados obtidos pelo método ANOVA para a verificação se há diferença significativa entre as médias obtidas.

Tabela 2 – Resultados obtidos pelo método ANOVA.

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Entre grupos	40,87257	4	10,21814	38,33923	0,000004895	3,47805
Dentro dos grupos	2,665193	10	0,266519			
Total	43,53776	14				

Através da análise, percebe-se que o valor de F é maior que o valor de F crítico, mostrando assim que há uma diferença significativa entre as médias obtidas de resistência à compressão simples. Considerando um nível de significância ( $\alpha$ ) de 5% para a análise, comparou-se com o valor obtido da análise para o “valor-P” (0,000004895) e constatou-se que este último valor é bem menor do que primeiro (0,05, que corresponde aos 5%), comprovando assim a diferença significativa entre as médias. Porém, o método ANOVA não apresenta qual dos grupos analisados possui diferença significativa entre as médias.

Assim, utilizou-se o teste-t para encontrar quais os grupos apresentam diferença significativa entre suas médias. No teste, foi comparado o valor obtido de  $P(T \leq t)$  uni-caudal com o valor de  $\alpha$ , com objetivo de saber se as médias entre os grupos possuem diferença significativa ou não. Quando o valor de  $P(T \leq t)$  uni-caudal for menor que  $\alpha$ , afirma-se que há diferença significativa entre as médias dos grupos analisados. Caso contrário, ou seja, quando  $P(T \leq t)$  uni-caudal for maior que  $\alpha$ , não há diferença significativa entre as médias.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos do teste-t realizado para cada par de grupos (consumo de cimento) do estudo.

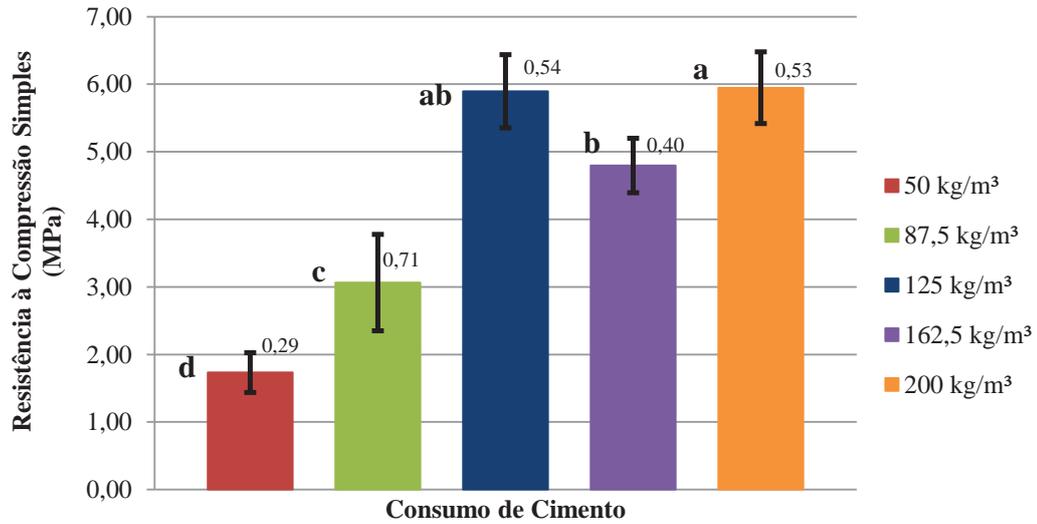
Tabela 3 – Resultados obtidos do teste-t.

Variáveis - Consumos de Cimento (kg/m <sup>3</sup> )		Valor de P(T<=t) uni-caldal
Variável 1	Variável 2	
50	87,5	0,0283
50	125	0,0049
50	162,5	0,0002
50	200	0,0018
87,5	125	0,0295
87,5	162,5	0,0152
87,5	200	0,0191
125	162,5	0,0718
125	200	0,4390
162,5	200	0,0258

Analisando os resultados obtidos do teste-t, observa-se que para os grupos de variáveis (consumos de cimento) 125 e 162,5 kg/m<sup>3</sup>; e 125 e 200 kg/m<sup>3</sup>, os valores de P(T<=t) uni-caldal são maiores que o valor de  $\alpha$  estabelecido (0,05, correspondente aos 5%), garantindo-se que não há uma diferença significativa entre as médias obtidas entre esses grupos. Para os demais grupos de variáveis, nota-se que os valores de P(T<=t) uni-caldal são menores que o valor de  $\alpha$  estabelecido, podendo-se afirmar que há diferença significativa entre as médias obtidas entre os grupos.

Com os resultados obtidos, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 38, sendo apresentadas as médias obtidas de resistência à compressão simples (RCS) para cada consumo de cimento analisado, atribuindo-se para cada grupo uma letra (a, b, c ou d), com o objetivo de mostrar quais os grupos que apresentam diferenças significativas entre as suas médias. Ou seja, grupos classificados com a mesma letra, são os que não apresentam diferenças significativas entre as médias. A Figura 38 também apresenta os desvios padrões obtidos para cada média já apresentada anteriormente na Tabela 1.

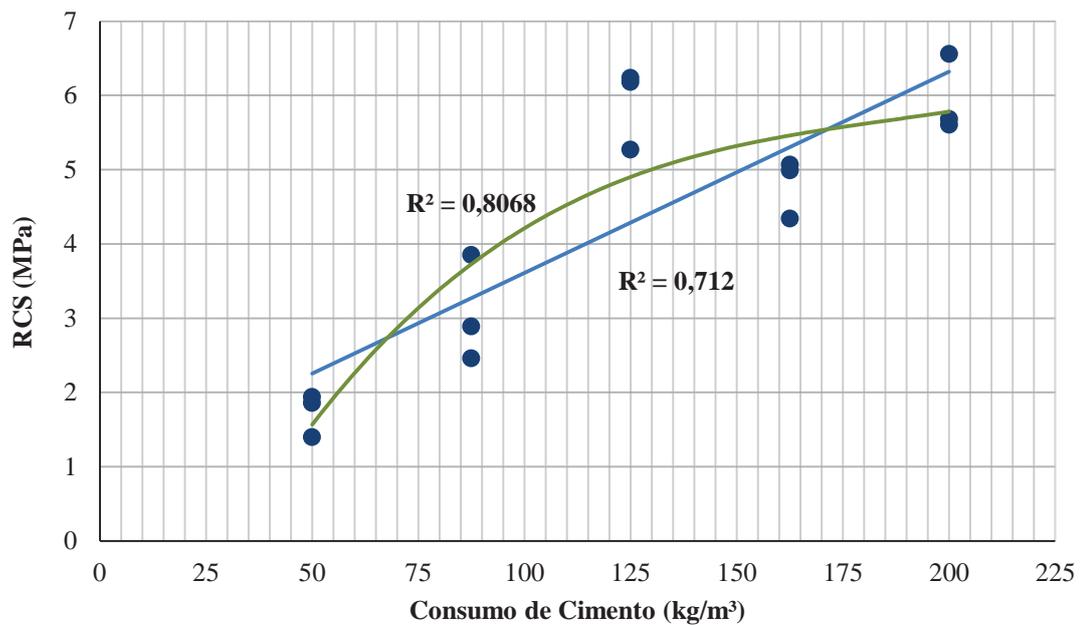
Figura 38 – Médias de RCS, desvios padrões e classificação de cada grupo



#### 4.2.2 Definição do Consumo Ótimo de Cimento

Com os resultados obtidos e apresentados na Tabela 1, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 39, o qual mostra as resistências à compressão simples obtidas para cada consumo de cimento analisado, juntamente com duas linhas de tendência.

Figura 39 – Resistência à compressão simples x Consumo de cimento.



Através do gráfico da Figura 39 observa-se um aumento da resistência à compressão simples da mistura reciclada com nata de cimento conforme o aumento do consumo de cimento. Porém, nota-se que para o consumo de cimento de 162,5 kg/m<sup>3</sup>, a resistência diminui quando comparada com a resistência para o consumo de cimento de 125 kg/m<sup>3</sup>. Por esse motivo, foram traçadas duas linhas de tendências para representar o comportamento do material, e que mais se aproximam dos resultados obtidos: linear e polinomial de terceira ordem.

Considerando o comportamento linear, observa-se que a resistência do material para o consumo de cimento de 125 kg/m<sup>3</sup> ficou distante da linha de tendência apresentada no gráfico, resultando assim em um coeficiente de regressão R<sup>2</sup> igual a 0,712. Já considerando o comportamento polinomial, nota-se que a resistência do material para o consumo de cimento de 162,5 kg/m<sup>3</sup> ficou mais distante da linha de tendência resultando em um coeficiente de regressão R<sup>2</sup> igual a 0,8068.

Assim, através das linhas de tendências obtidas, foi possível estimar os valores dos consumos de cimento para se obter uma resistência a compressão simples que encontra-se dentro da faixa estabelecida pelo DNIT (2,1 a 2,5 MPa). Estes valores são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Consumos de cimento obtidos para resistências (RCS) da faixa do DNIT.

RCS (MPa)	Equação Linear	Consumo de Cimento (kg/m <sup>3</sup> ) - Linear	Equação Polinomial	Consumo de Cimento (kg/m <sup>3</sup> ) - Polinomial
2,1	RCS = 0,0271x + 0,9001	44,28	RCS = 0,000001x <sup>3</sup> -	60,17
2,5		59,04	0,0007x <sup>2</sup> + 0,1317x - 3,5081	67,50

Através da tabela observa-se que os consumos de cimento obtidos quando considerado a equação linear, para as resistências à compressão simples de 2,1 e 2,5 MPa, foram de 44,28 e 59,04 kg/m<sup>3</sup> respectivamente. Estes valores são menores quando comparados com os consumos de cimento obtidos pela equação polinomial de 60,17 e 67,50 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente para as resistências de 2,1 e 2,5 MPa.

Assim, para a escolha do consumo ótimo a ser utilizado para a mistura reciclada com nata de cimento foi considerado a linha de tendência polinomial, pois apresenta uma faixa de consumos de cimento maiores quando comparados com os consumos obtidos para a linha de

tendência linear, como também apresenta um valor do coeficiente de regressão  $R^2$  maior (0,8068).

Com isso, foi estabelecido que o consumo ótimo de cimento para a mistura reciclada encontra-se na faixa de 60,17 a 67,50 kg/m<sup>3</sup>. Para o presente estudo, adotou-se como consumo ótimo o valor de 70 kg/m<sup>3</sup>, ou seja, um pouco acima do intervalo obtido para a linha de tendência polinomial, pois foi considerado um fator de segurança para que a resistência à compressão simples para o consumo ótimo não encontrar-se abaixo do intervalo estabelecido.

Estabelecido o consumo ótimo de 70 kg/m<sup>3</sup> (equivalente a 3,63% da mistura reciclada seca), foram moldados mais 3 corpos de prova para avaliar a resistência à compressão simples (RCS) para este consumo de cimento. Através dos ensaios realizados foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 5.

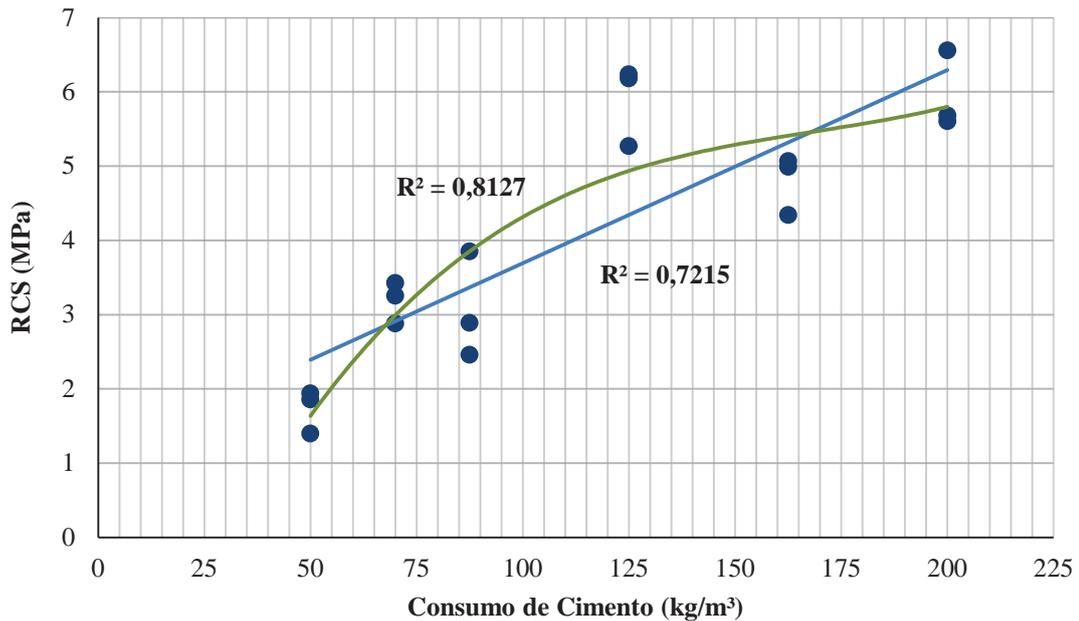
Tabela 5 – Resultados obtidos dos ensaios de RCS para o consumo ótimo de cimento.

Consumo de Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Nº do CDP	Peso Específico	RCS (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)	Média (MPa)
		Aparente Seco (kN/m <sup>3</sup> )				
70 kg/m <sup>3</sup>	1	19,77	3,25	0,28	8,78	3,19
	2	19,81	2,88			
	3	19,90	3,43			

Analisando a tabela, nota-se que a resistência média obtida de 3,19 MPa ficou um pouco acima dos valores da faixa do DNIT (2,1 a 2,5), como já era previsto, pois foi estabelecido como consumo ótimo um valor um pouco acima dos valores encontrados pela equação polinomial, como citado anteriormente.

Com os valores das resistências à compressão simples obtidas para o consumo ótimo de cimento estabelecido de 70 kg/m<sup>3</sup>, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 40, o qual mostra os resultados de RCS obtidos anteriormente para cada consumo de cimento analisado, juntamente a os resultados de RCS para o consumo ótimo.

Figura 40 – Resistência à compressão simples x Consumo de cimento (com resultados do consumo ótimo).



Com o acréscimo dos resultados obtidos de RCS para o consumo ótimo de 70 kg/m<sup>3</sup>, observa-se no gráfico que as linhas de tendências (linear e polinomial) apresentaram valores dos coeficientes de regressão R<sup>2</sup> próximos aos encontrados para as linhas do gráfico da Figura 39. Esses valores, juntamente com as equações obtidas para cada linha de tendência são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores de coeficientes de regressão R<sup>2</sup> e equações obtidas para as linhas de tendência.

R <sup>2</sup> (Linear)	Equação Linear	R <sup>2</sup> (Polinomial)	Equação Polinomial
0,7215	RCS = 0,026x + 1,0895	0,8127	RCS = 0,000002x <sup>3</sup> - 0,0008x <sup>2</sup> + 0,1503x - 3,9905

### 4.3 Resistência à Tração na Flexão

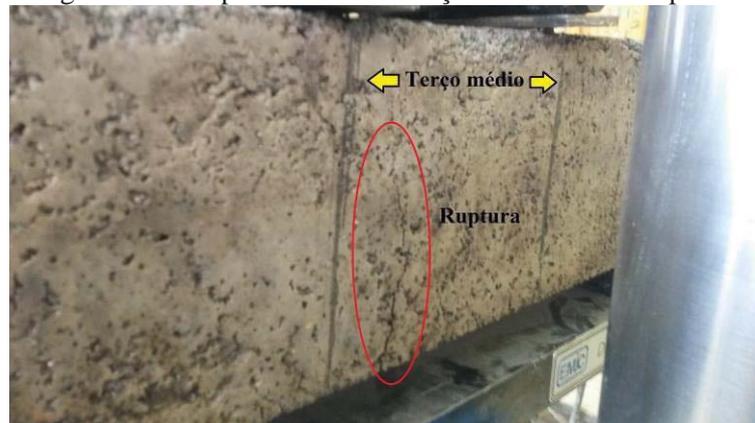
A verificação da resistência à tração na flexão das misturas recicladas com nata de cimento foi realizada para o consumo ótimo de cimento obtido de 70 kg/m<sup>3</sup>. Através dos ensaios realizados, as vigas (corpos de prova prismáticos) foram rompidas, conforme é apresentado na Figura 41.

Figura 41 – Viga rompida após ensaio de resistência à tração na flexão.



Após cada viga ser ensaiada, foi realizada a verificação do local da ruptura das mesmas, a fim de se obter a resistência à tração na flexão, como determina a norma NBR 12.142/2010. Observou-se que nas 3 vigas ensaiadas a ruptura ocorreu dentro do terço médio entre os apoios, como é apresentado na Figura 42.

Figura 42 – Ruptura dentro do terço médio entre os apoios.



Após a realização dos ensaios, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 7. A tabela mostra as densidades aparentes secas obtidas de cada viga antes da realização dos ensaios, como também apresenta as resistências à tração na flexão ( $f_{ct,f}$ ) obtidas para cada viga, o desvio padrão, o coeficiente de variação (CV) e a resistência média.

Tabela 7 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão.

Teor de Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Nº do CDP	Peso Específico Aparente Seco (kN/m <sup>3</sup> )	f <sub>ct,f</sub> (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)	Média (MPa)
70 kg/m <sup>3</sup>	1	19,34	0,64	0,13	17,82	0,71
	2	19,30	0,63			
	3	19,57	0,85			

Segundo a norma DNIT 167/2013-ES, misturas recicladas com adição de cimento, devem apresentar resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias de cura na faixa de 0,25 a 0,35 MPa. De acordo com Pinheiro, Muzardo e Santos (2007), os valores encontrados para a resistência à tração na flexão, considerando o concreto como material, são maiores que os encontrados nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, sendo que o valor da resistência à tração na flexão é de aproximadamente 1,28 vezes o valor obtido de ensaios de resistência à tração por compressão diametral. Assim, tendo o comportamento do concreto como referência, obtém-se a faixa para resistência à tração na flexão de 0,32 a 0,45 MPa.

Na Tabela 7 observa-se que a resistência média à tração na flexão obtida foi de 0,71 MPa, com um coeficiente de variação de 17,82%. Este valor corresponde a aproximadamente 22% da resistência média à compressão simples (3,19 MPa). Nota-se também que o valor de 0,71 MPa encontra-se acima da faixa para resistência à tração na flexão apresentada (0,32 a 0,45 MPa), igualmente ao valor médio obtido de resistência à compressão simples.

Quando comparado com os valores típicos de resistência à tração na flexão para materiais cimentados citados por Balbo (2007), a resistência obtida de 0,71 MPa enquadra-se na faixa de 0,5 a 1,0 MPa, a qual é estabelecida para brita graduada tratada com cimento.

#### 4.4 Vida de Fadiga e Módulo de Resiliência

Através da realização dos ensaios de fadiga de viga em 4 pontos (tração na flexão), após os 7 dias de cura em câmara úmida as vigas foram rompidas conforme apresentado na Figura 43 e na Figura 44, obtendo-se assim os resultados da vida de fadiga e os módulos de resiliência para as misturas recicladas com nata de cimento. Apenas para as vigas ensaiadas com a relação entre tensões (RT) igual a 0,45, os ensaios foram encerrados antes da ruptura, como será visto posteriormente.

Figura 43 – Ruptura de viga após o ensaio de fadiga.



Figura 44 – Seção de uma das vigas rompidas (ensaio de fadiga).



Após os ensaios, observou-se que em todas as vigas que chegaram à ruptura, a mesma ocorreu dentro do terço médio da amostra. Os resultados obtidos de vida de fadiga (número de ciclos), como também os pesos específicos aparentes secos de cada viga para as 3 relações de tensões analisadas são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados obtidos dos ensaios de fadiga.

Relação de Tensões	Corpo de prova	Peso Específico Aparente Seco (kN/m <sup>3</sup> )	Número de Ciclos	Média
0,75	CDP1-0,75	19,32	2825	4216
	CDP2-0,75	19,33	7492	
	CDP3-0,75	19,34	2332	
0,6	CDP1-0,60	19,4	18630	34934
	CDP2-0,60	19,37	53291	
	CDP3-0,60	19,32	32880	
0,45	CDP1-0,45	19,35	849714*	-
	CDP2-0,45	19,44	772658*	
	CDP3-0,45	19,16	529632*	

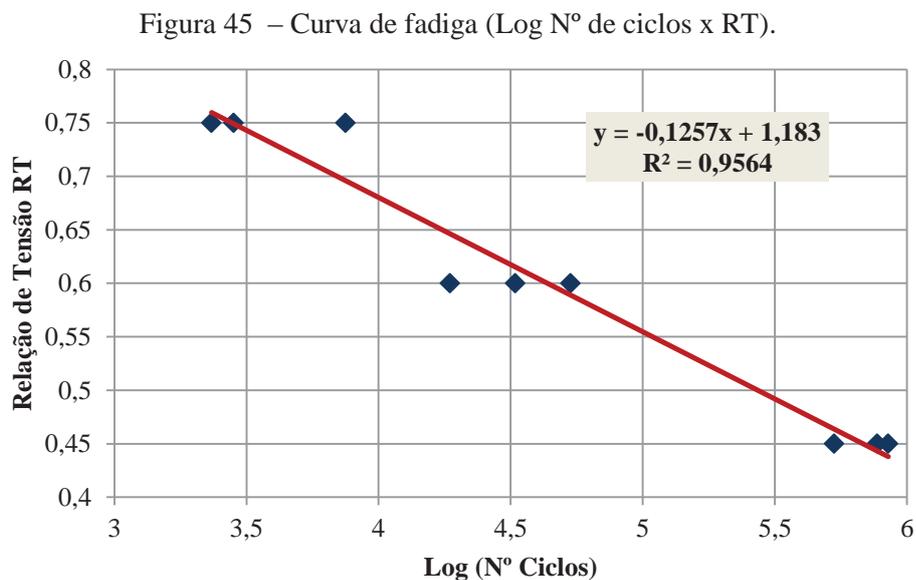
\* Número de Ciclos de paralização do ensaio

Observa-se que os pesos específicos ficaram abaixo do padrão estabelecido para o estudo ( $20 \text{ kN/m}^3$ ), igualmente aos demais corpos de prova cilíndricos e prismáticos ensaiados anteriormente. Percebe-se também que houve pouca variação do peso específica entre as vigas analisadas nos ensaios de fadiga.

Em relação ao número de ciclos de cada viga, nota-se que há um aumento da vida de fadiga quanto menor a relação entre tensões, como já era esperado. Para RT igual a 0,75, obteve-se uma média entre as 3 vigas analisadas de 4216 ciclos. Já para RT igual a 0,60, o valor médio obtido foi de 34934 ciclos, sendo que para esta relação entre tensões houve uma grande dispersão dos resultados, variando de 18630 a 53291 ciclos, como pode ser observado. Esta variação pode ter como causa diversos fatores conforme citado por CERVO (2004), entre eles as condições de moldagem dos corpos de prova.

Para as vigas ensaiadas com RT igual a 0,45, o número de ciclos durante o ensaio passou de 500000. Porém, estas vigas não atingiram a ruptura, sendo paralisado o ensaio após atingir um valor superior a este número de ciclos, como pode ser observado na Tabela 8. Foi estabelecido como critério de paralização dos ensaios a variação dos deslocamentos registrados, ou seja, a partir dos 500000 ciclos a variação dos deslocamentos foi considerada insignificante.

Com os resultados obtidos da vida de fadiga para cada relação entre tensões analisada, foi elaborada a curva de fadiga, considerando para  $RT = 0,45$  os valores dos números de ciclos do momento da paralização dos ensaios. A curva é apresentada na Figura 45, considerando o logaritmo do número de ciclos.



Observa-se que a curva obtida apresentou um coeficiente de regressão  $R^2$  igual a 0,9564, considerando os 3 valores de ciclos para  $RT = 0,45$  do momento da paralisação dos ensaios. Se, para esta relação de tensões, a ruptura ocorresse até 1000000 de ciclos, a curva de fadiga não apresentaria grandes alterações.

Juntamente ao ensaio de fadiga, foram obtidos os módulos de resiliência das misturas recicladas com nata de cimento. Os resultados foram obtidos através das leituras registradas dos deslocamentos das vigas e da prensa. Foram obtidos os deslocamentos no centro das vigas para os números de ciclos que a prensa estava configurada para realizar a leitura. Os ciclos foram os seguintes: 1, 2, 5, 7, 10, 20, 50, 70, 100, 200, 500, 700, 1000, 2000, 5000, 7000, 10000, 20000, 50000, 70000, 100000, 200000, 500000, 700000, etc.

A prensa utilizada para os ensaios de fadiga não realizava a leitura do deslocamento no momento da ruptura. Ou seja, foram registrados os deslocamentos e conseqüentemente obtidos os módulos de resiliência apenas para os ciclos citados. A prensa também aplicava a carga constante estabelecida para os ensaios somente a partir de 200 ciclos. Antes disso, a carga aplicada era crescente até 199 ciclos. Sendo assim, os valores obtidos de módulos de resiliência foram obtidos somente a partir de 200 ciclos.

Os deslocamentos obtidos para cada viga ensaiada com  $RT$  igual a 0,75 são apresentados na Figura 46, Figura 47 e Figura 48.

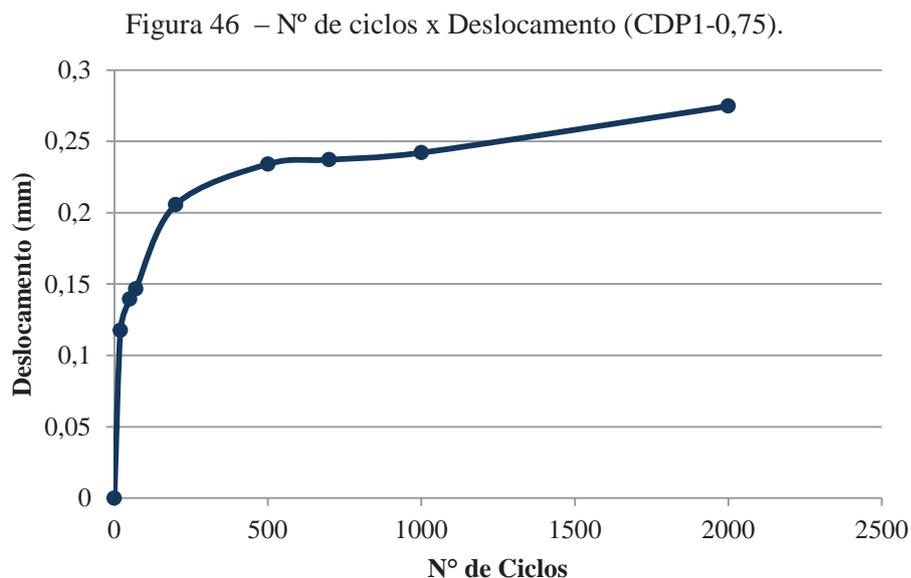


Figura 47 – N° de ciclos x Deslocamento (CDP2-0,75).

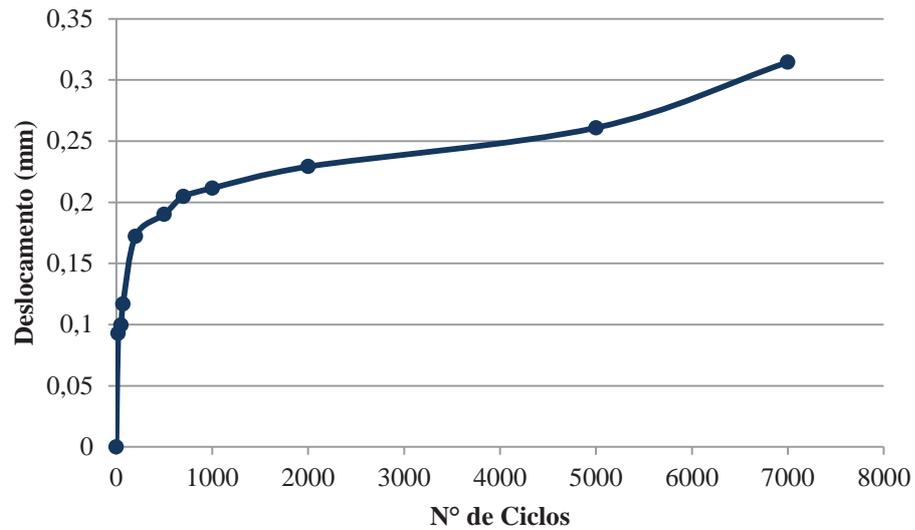
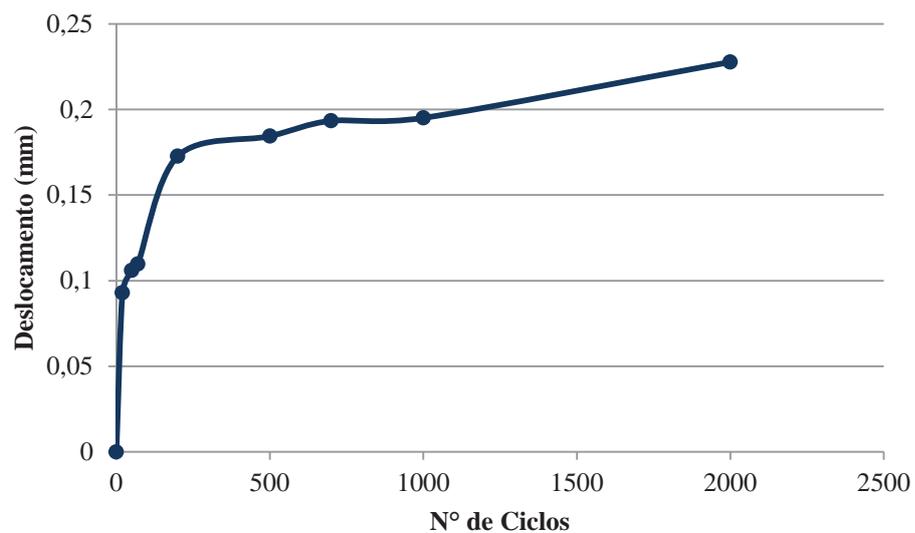


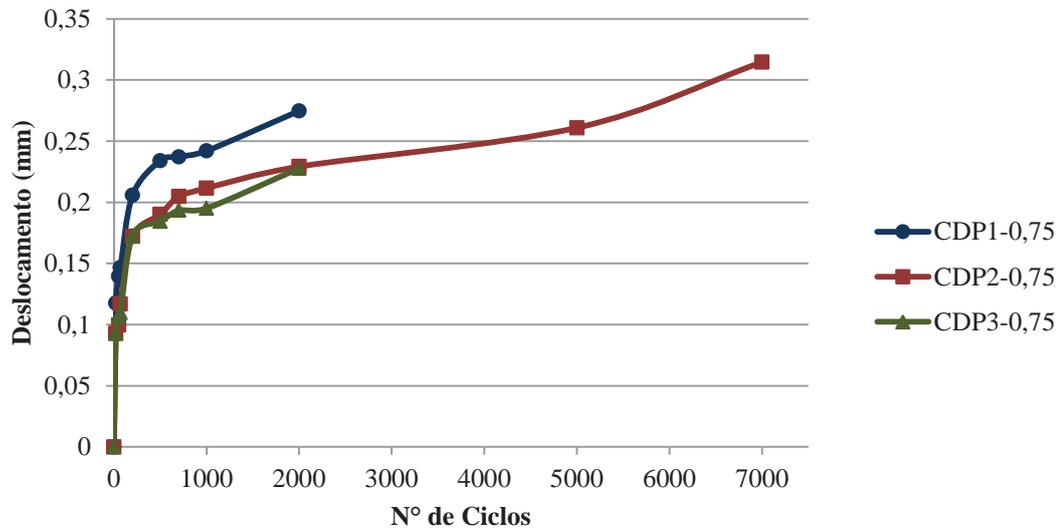
Figura 48 – N° de ciclos x Deslocamento (CDP3-0,75).



Observa-se que para as 3 vigas ensaiadas, considerando RT igual a 0,75, os deslocamentos para os ciclos iniciais apresentaram um crescimento mais acentuado devido ao aumento da tensão aplicada. Após a tensão ficar constante (0,53 MPa) a partir dos 200 ciclos, nota-se que os deslocamentos continuam crescendo porém de forma menos acentuada nas 3 vigas.

Para comparação entre os resultados obtidos dos deslocamentos das 3 vigas, os 3 gráficos estão apresentados juntos conforme mostra a Figura 49.

Figura 49 – N° de ciclos x Deslocamento (RT = 0,75).



A partir dos 200 ciclos, onde a tensão fica constante, nota-se que para as 3 vigas ensaiadas com RT igual a 0,75 o comportamento foi semelhante, sendo que apenas a viga CDP2-0,75 apresentou uma vida de fadiga maior.

Os deslocamentos obtidos para cada viga ensaiada com RT igual a 0,60 são apresentados na Figura 50, Figura 51 e Figura 52.

Figura 50 – N° de ciclos x Deslocamento (CDP1-0,60).

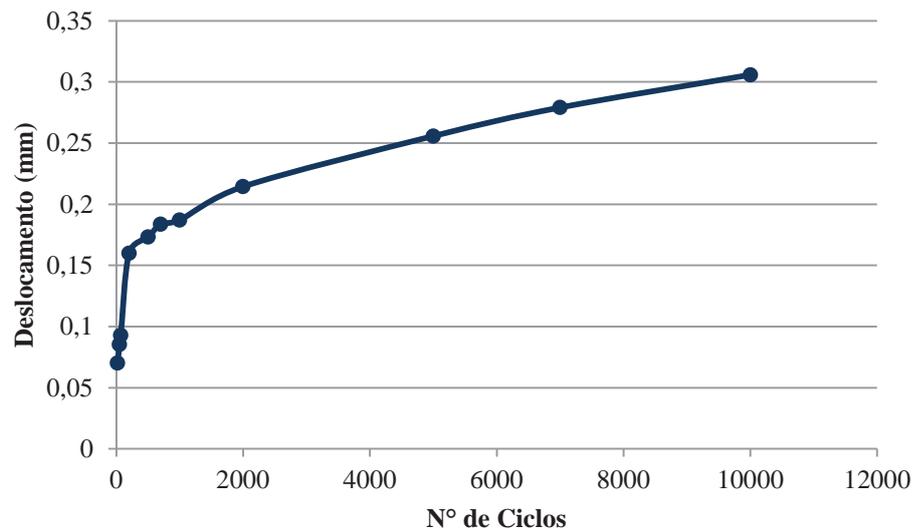


Figura 51 – N° de ciclos x Deslocamento (CDP2-0,60).

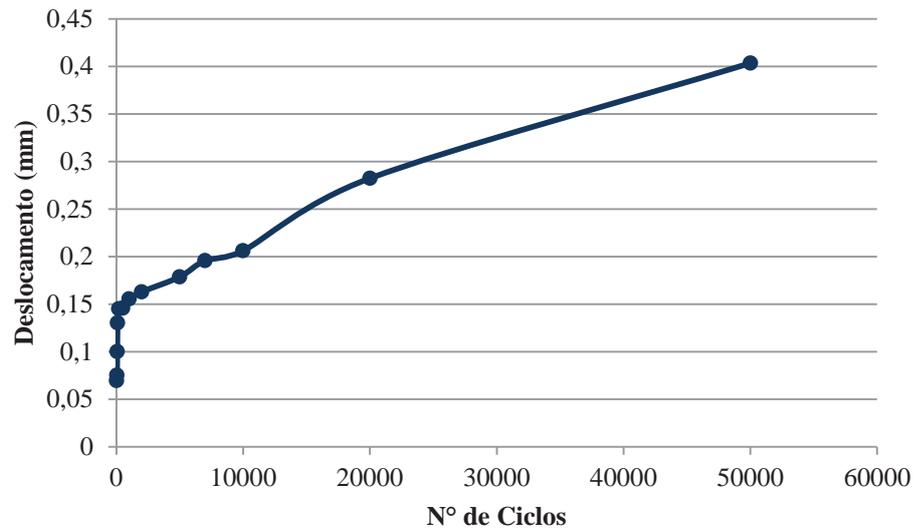
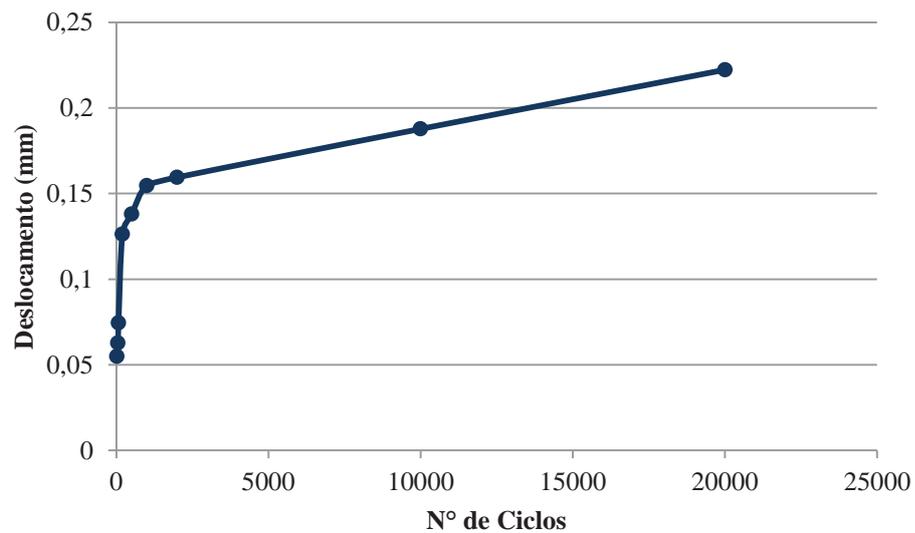


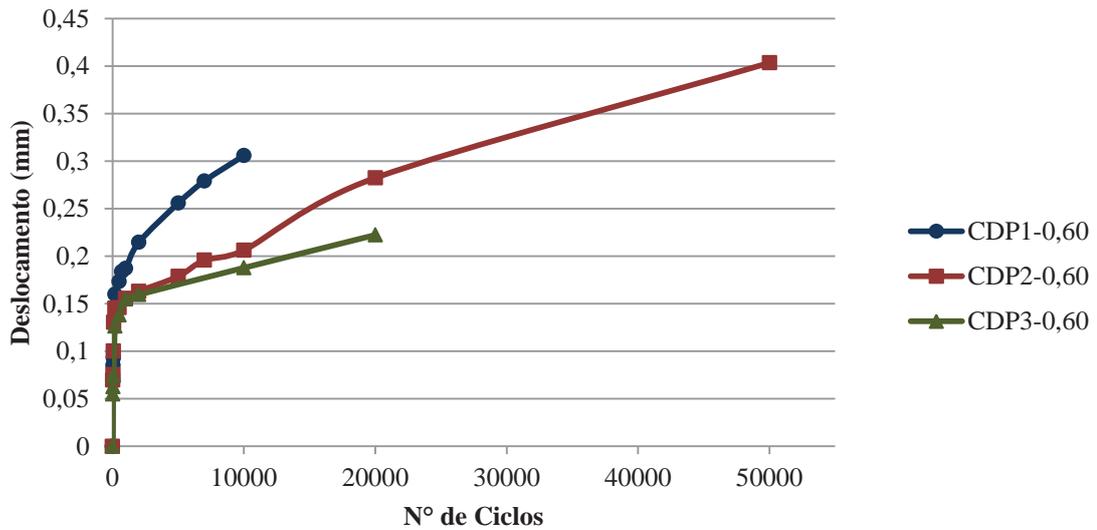
Figura 52 – N° de ciclos x Deslocamento (CDP3-0,60).



Analisando os gráficos obtidos para as 3 vigas ensaiadas, considerando RT igual a 0,60, observa-se que os deslocamentos para os ciclos iniciais também apresentaram um crescimento mais acentuado nos primeiros ciclos devido ao aumento da tensão aplicada. Após a tensão ficar constante a partir dos 200 ciclos (0,42 MPa), observa-se que os deslocamentos também continuam crescendo porém de forma menos acentuada nas 3 vigas ensaiadas.

Para comparação entre os resultados obtidos dos deslocamentos das 3 vigas com RT igual a 0,60, os 3 gráficos estão apresentados juntos conforme mostra a Figura 53.

Figura 53 – N° de ciclos x Deslocamento (RT = 0,60).



Nota-se que, a partir do momento em que a tensão aplicada fica constante (200 ciclos), a viga CDP1-0,6 apresenta deslocamentos um pouco superiores quando comparados com os deslocamentos das outras duas vigas, as quais apresentaram comportamento semelhante entre elas até os 10000 ciclos. Porém, houve uma grande variação em relação à vida de fadiga entre essas duas 2 vigas analisadas (CDP2-0,60 e CDP3-0,60), conforme foi apresentado anteriormente.

Os resultados dos deslocamentos obtidos para as vigas ensaiadas com RT igual a 0,45 são apresentados na Figura 54 e na Figura 55. Devido a um problema ocorrido durante o ensaio da viga CDP3-0,45, não foram registrados os deslocamentos para a obtenção posteriormente do módulo de elasticidade. Assim, a análise dos deslocamentos foi realizada apenas com 2 amostras.

Figura 54 – N° de ciclos x Deslocamento (CDP1-0,45).

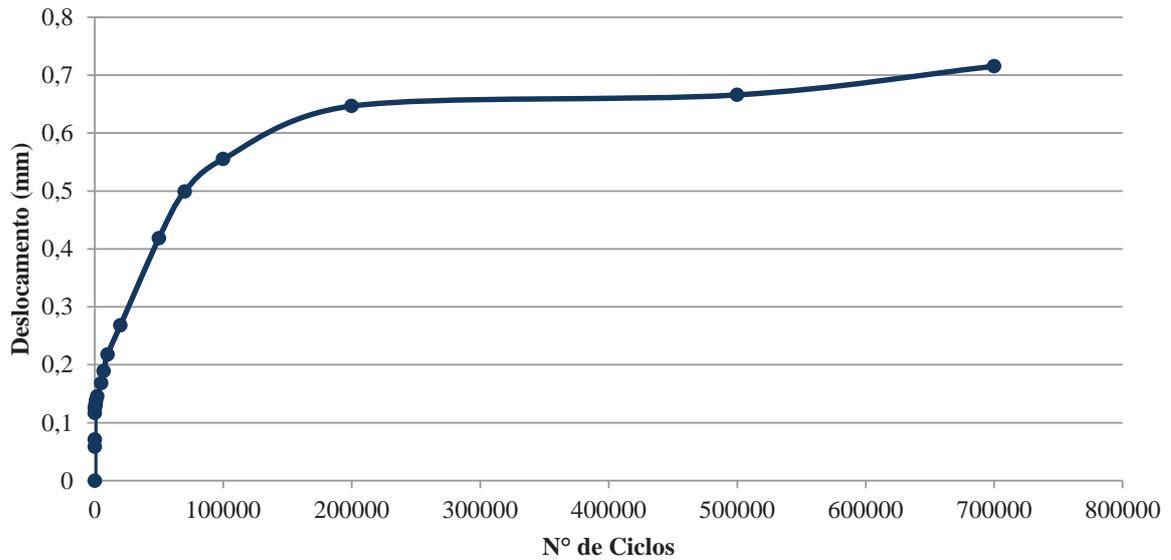
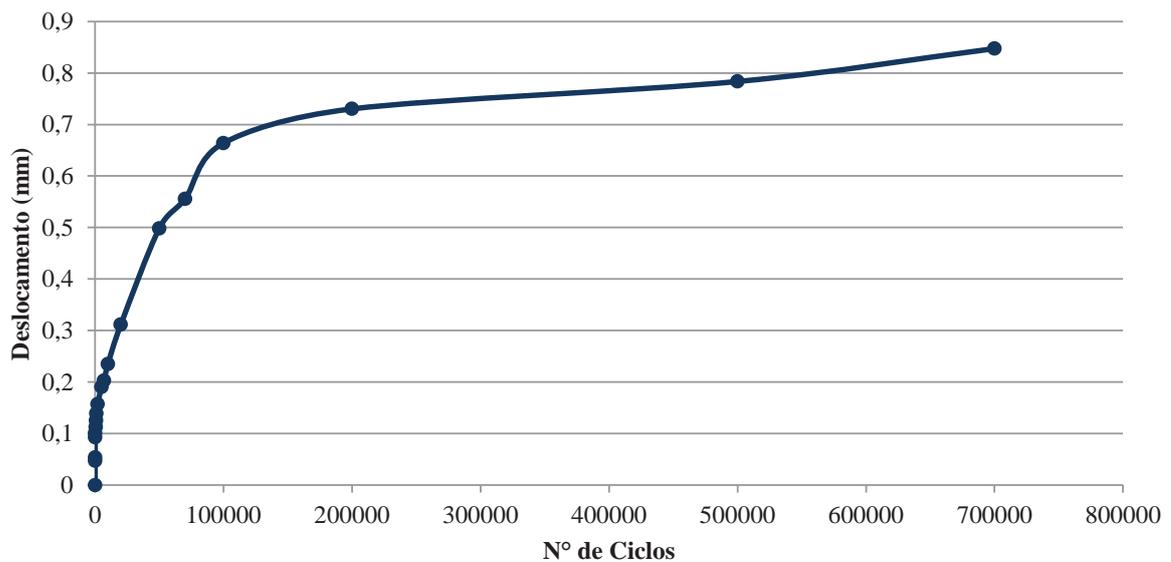


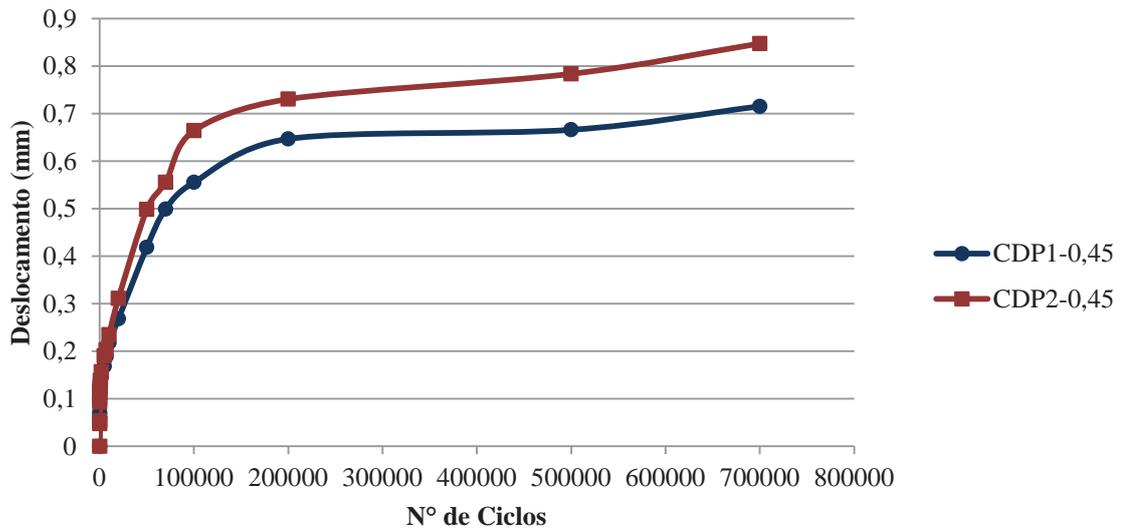
Figura 55 – N° de ciclos x Deslocamento (CDP2-0,45).



Observa-se que para as 2 vigas analisadas ( $RT=0,45$ ), a partir dos 100000 ciclos a variação dos deslocamentos são baixas quando comparada com os ciclos iniciais, sendo que a tensão aplicada fica constante (0,32 MPa) a partir dos 200 ciclos.

Para comparação entre os resultados obtidos dos deslocamentos das 2 vigas analisadas ( $RT = 0,45$ ), os 2 gráficos estão apresentados juntos conforme mostra a Figura 56.

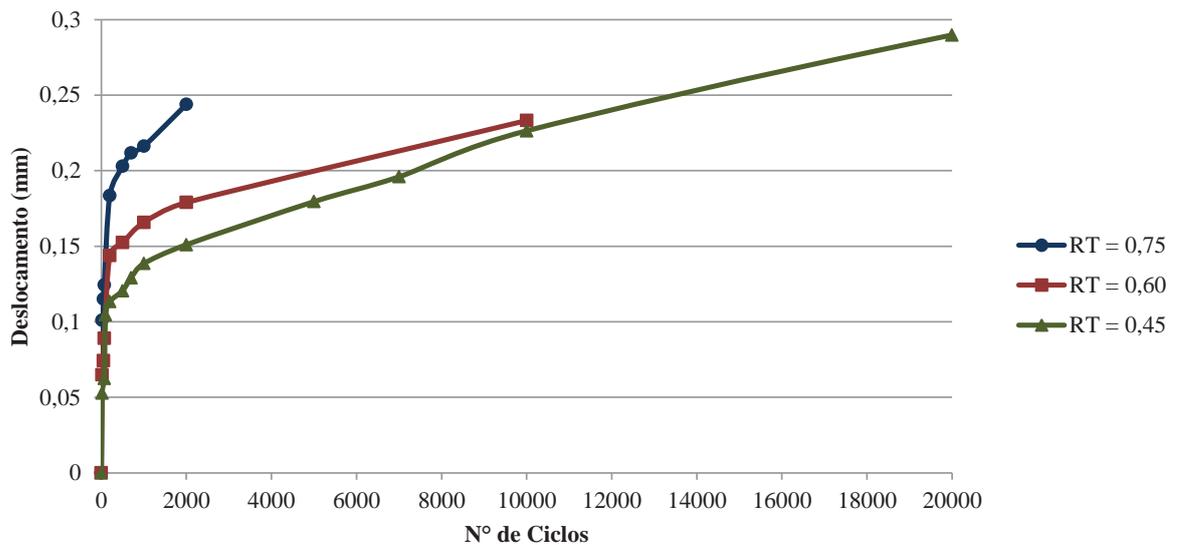
Figura 56 – N° de ciclos x Deslocamento (RT = 0,45).



Observa-se que o comportamento das duas vigas durante os ensaios foi semelhante. No entanto, houve uma diferença de aproximadamente 0,1 mm entre os deslocamentos obtidos das 2 vigas a partir de 100000 ciclos. Antes disso, a diferença de deslocamento obtida foi menor.

Após obtidos e apresentados os resultados dos deslocamentos das vigas, foram elaborados os gráficos com os valores médios obtidos para cada relação de tensões analisada, os quais são apresentados na Figura 57.

Figura 57 – N° de ciclos x Deslocamento (3 relações de tensões – RT).



Analisando os gráficos, observa-se que quanto maior a relação de tensões, maiores foram os deslocamentos obtidos, o que já era esperado. A diferença entre os deslocamentos médios obtidos para as vigas com RT igual a 0,75 e RT igual a 0,60 entre 200 ciclos e 2000 ciclos foi de aproximadamente 0,05 mm. Já os deslocamentos médios obtidos entre as vigas com RT igual a 0,60 e RT igual a 0,45 entre os mesmos ciclos foi de aproximadamente 0,03 mm, sendo que aos 10000 ciclos essa diferença foi praticamente nula, como pode ser observado.

Com os resultados dos deslocamentos, foi possível obter os módulos de resiliência das vigas com misturas recicladas com nata de cimento para as 3 relações de tensões estabelecidas. Os módulos foram obtidos tendo como base a norma ASTM D7460-10, através da relação tensão/deformação, conforme a fórmula apresentada a seguir:

$$S = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t}$$

Onde:

S = Rigidez à flexão da viga

$\sigma_t$  = Tensão aplicada

$\varepsilon_t$  = Deformação

Para a obtenção das deformações, foi utilizada a seguinte fórmula:

$$\varepsilon_t = \frac{12 \times \delta \times h}{(3 \times L^2) - (4 \times a^2)}$$

Onde:

$\delta$  = máximo deslocamento no centro da viga

$h$  = altura média da amostra

$L$  = distância entre os apoios inferiores

$a$  = distância entre os apoios centrais (superiores)

Assim, com as 3 tensões estabelecidas neste estudo (0,53; 0,42 e 0,32 MPa) e com as deformações obtidas através do ensaio, foram encontrados os módulos de resiliência para cada

ciclo do ensaio, iniciando a partir dos 200 ciclos, pois para os ciclos anteriores a tensão aplicada era menor, como descrito anteriormente. Não foi possível ser obtido os módulos nos momentos de ruptura das vigas pelo fato da prensa de fadiga utilizada não registrar o deslocamento no momento da ruptura.

Os resultados obtidos de módulo de resiliência ( $M_r$ ) para as vigas com RT igual a 0,75 são apresentados na Figura 58, na Figura 59 e na Figura 60.

Figura 58 – N° de Ciclos x Módulo de Resiliência (CDP1-0,75).

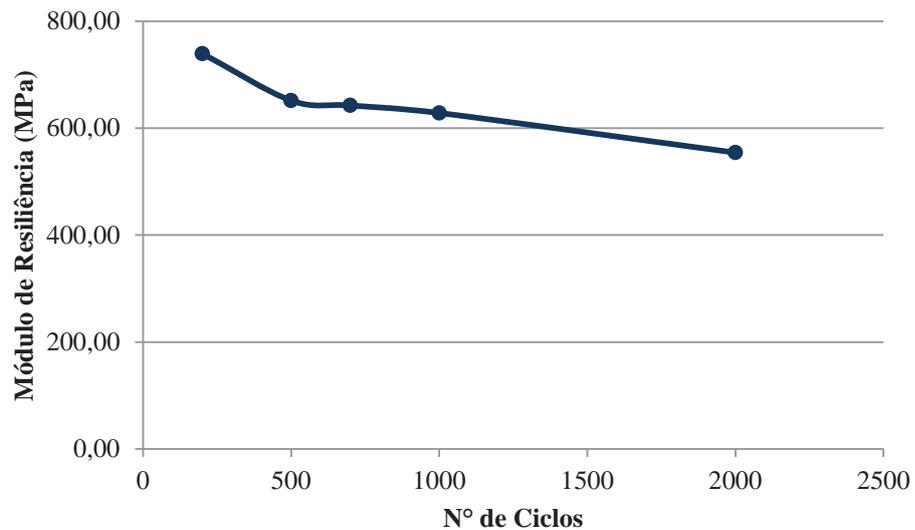


Figura 59 – N° de Ciclos x Módulo de Resiliência (CDP2-0,75).

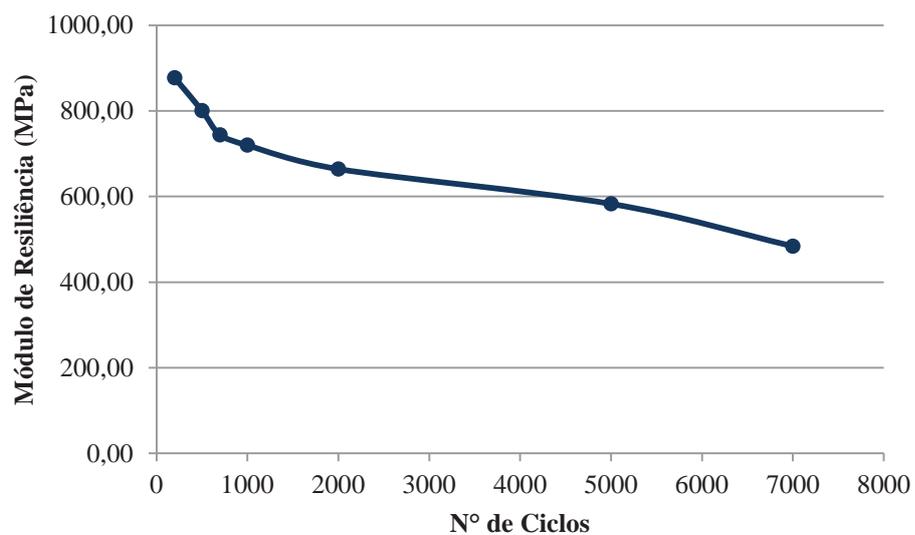
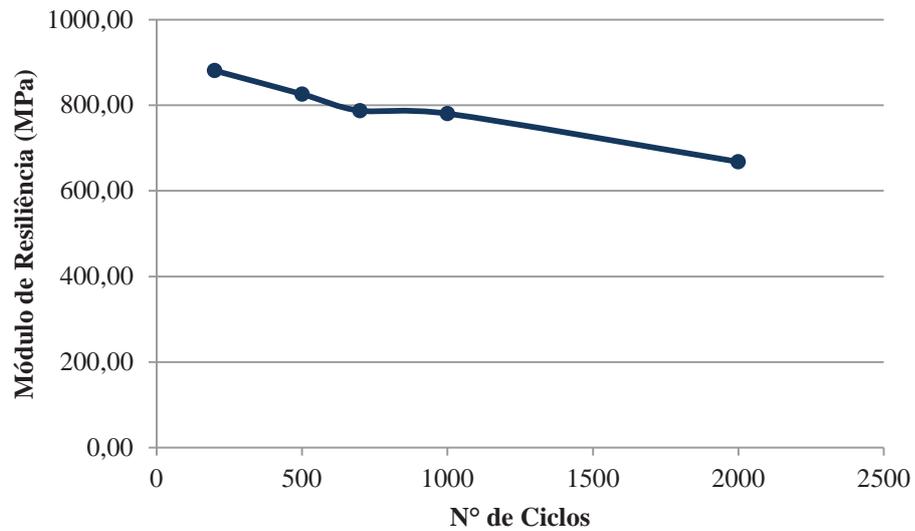
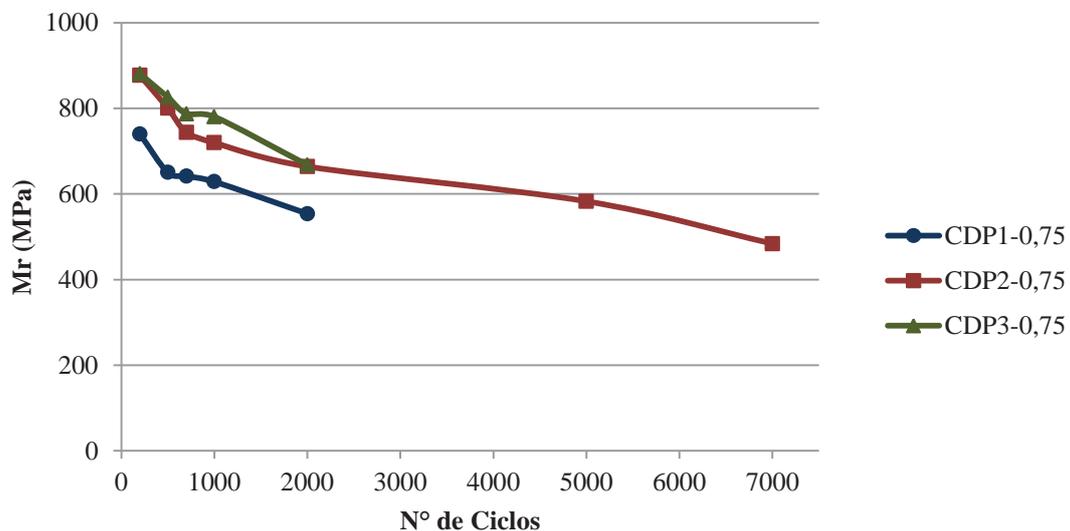


Figura 60 – N° de Ciclos x Módulo de Resiliência (CDP3-0,75).



Observa-se que o comportamento das 3 vigas em relação aos módulos de resiliência obtidos são semelhantes, tendo-se uma redução dos valores dos módulos com o aumento do número de ciclos. Os 3 gráficos gerados também são apresentados na Figura 61.

Figura 61 – N° de ciclos x Módulo de Resiliência (RT = 0,75).



Nota-se que os módulos de resiliência obtidos para as vigas CDP2-0,75 e CDP3-0,75 de 200 ciclos até 2000 ciclos são semelhantes, variando de aproximadamente 880 MPa a 665 MPa. Para o mesmo intervalo de ciclos, a viga CDP1-0,75 apresentou valores de módulos

inferiores, variando de 740 MPa a 555 MPa, ou seja, entorno de 100 MPa abaixo das outras 2 vigas.

Os módulos de resiliência para as vigas com RT igual a 0,60 são apresentados na Figura 62, na Figura 63 e na Figura 64.

Figura 62 – N° de Ciclos x Módulo de Resiliência (CDP1-0,60).

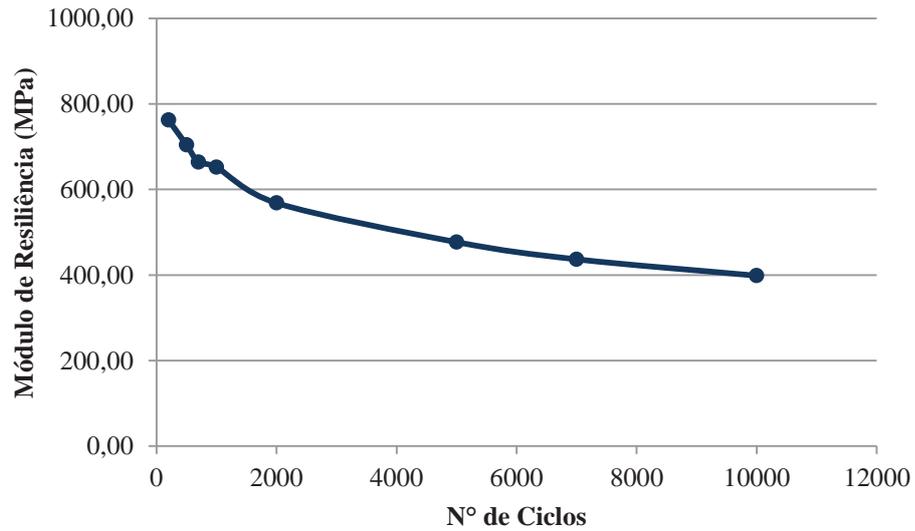


Figura 63 – N° de Ciclos x Módulo de Resiliência (CDP2-0,60).

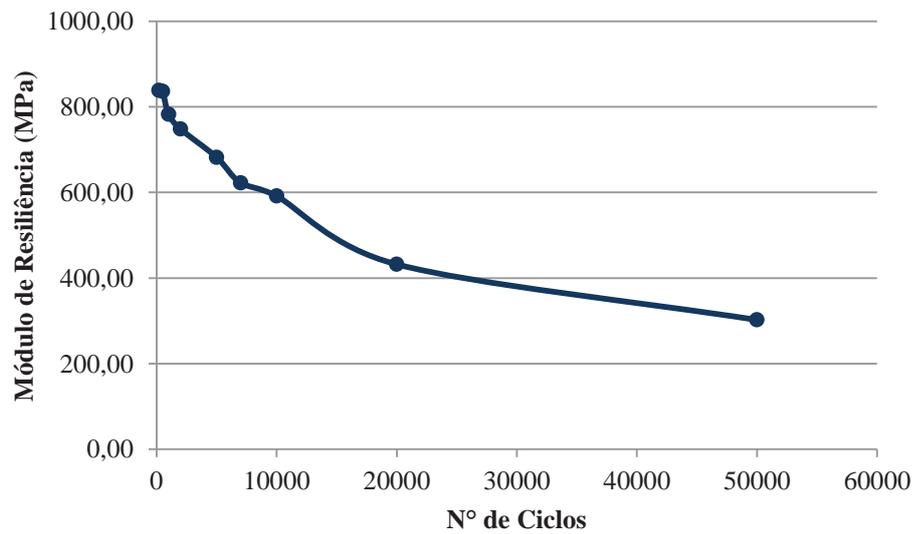
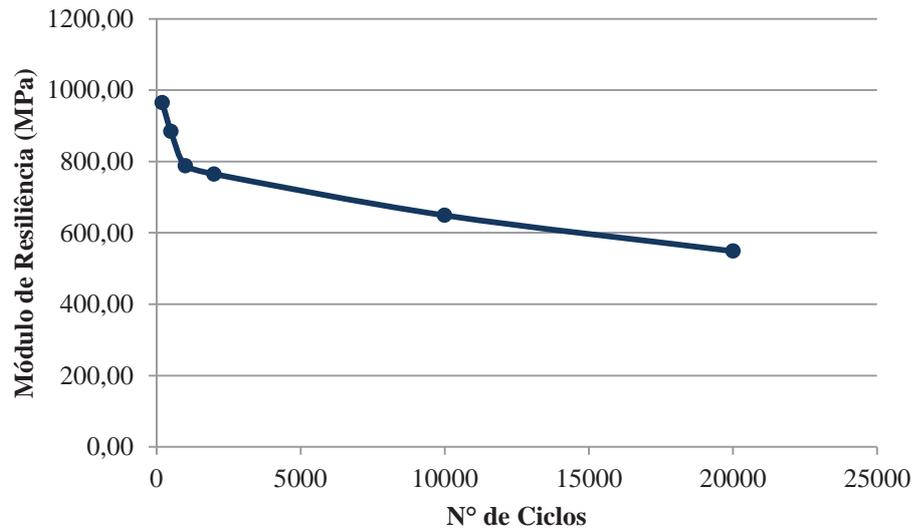
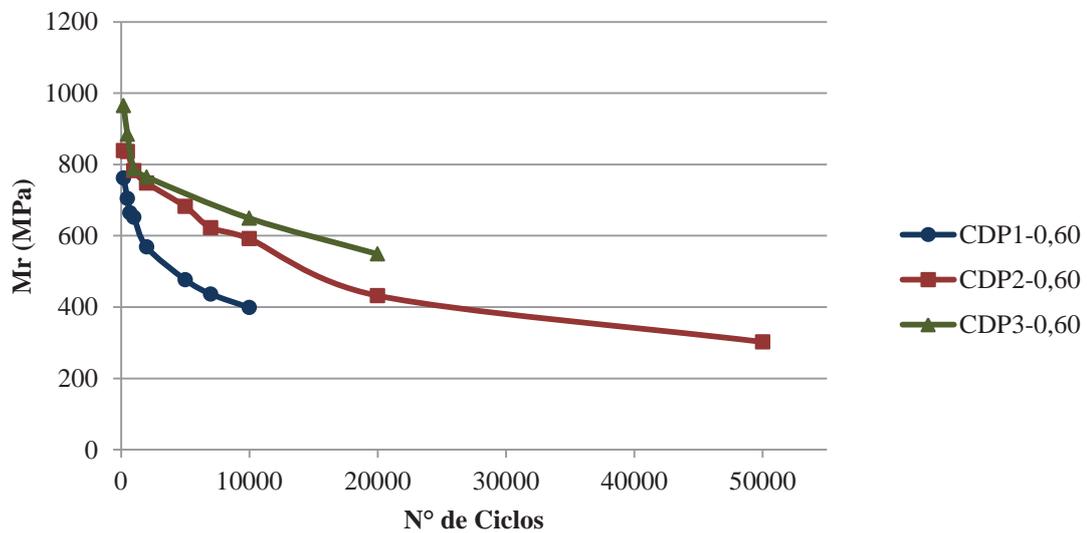


Figura 64 – N° de Ciclos x Módulo de Resiliência (CDP3-0,60).



Observa-se que para as 3 vigas, os valores dos módulos de resiliência também diminuem com o aumento do número de ciclos, sendo que há uma variação entre estes valores obtidos para cada viga. Os gráficos obtidos também são apresentados na Figura 65.

Figura 65 – N° de ciclos x Módulo de Resiliência (RT = 0,60).



Comparando os gráficos gerados para as 3 vigas, observa-se que a viga CDP1-0,60 apresentou módulos inferiores às demais vigas, variando de 760 MPa a 400 MPa entre 200 e 10000 ciclos. Para a viga CDP2-0,60 os módulos variaram de 840 MPa a 300 MPa entre 200 e 50000 ciclos. Já os módulos obtidos para a viga CDP3-0,60 foram maiores, variando de 965

MPa a 550 MPa entre 200 e 20000 ciclos, porém a sua vida de fadiga foi inferior a obtida para a viga CDP2-0,60.

Os módulos de resiliência para as 2 vigas ensaiadas com RT igual a 0,45 são apresentados na Figura 66 e na Figura 67.

Figura 66 – N° de Ciclos x Módulo de Resiliência (CDP1-0,45).

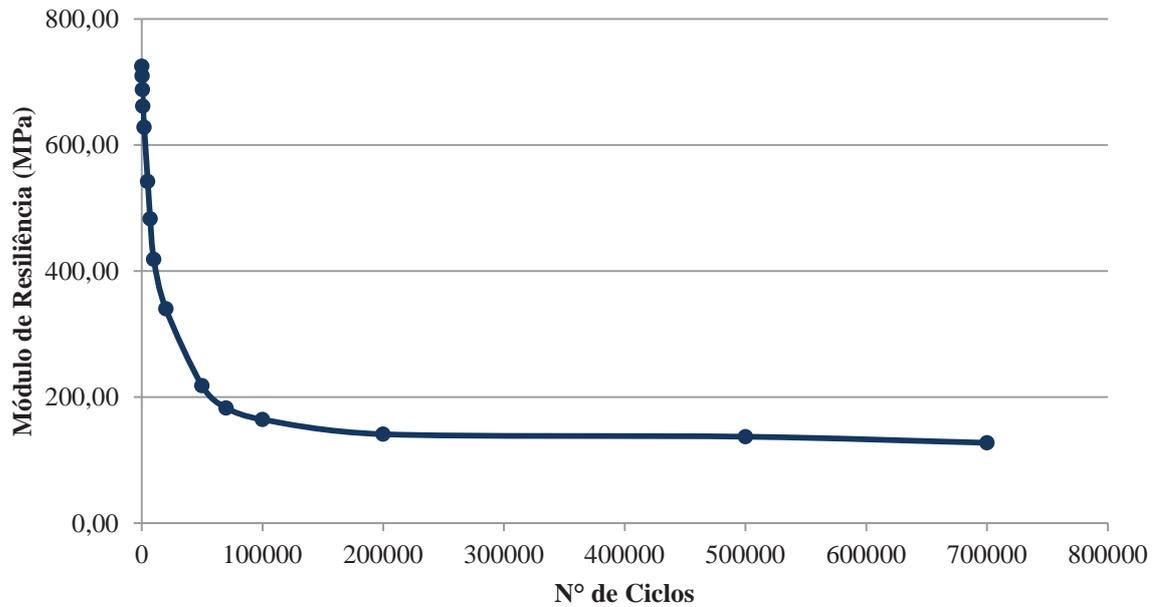
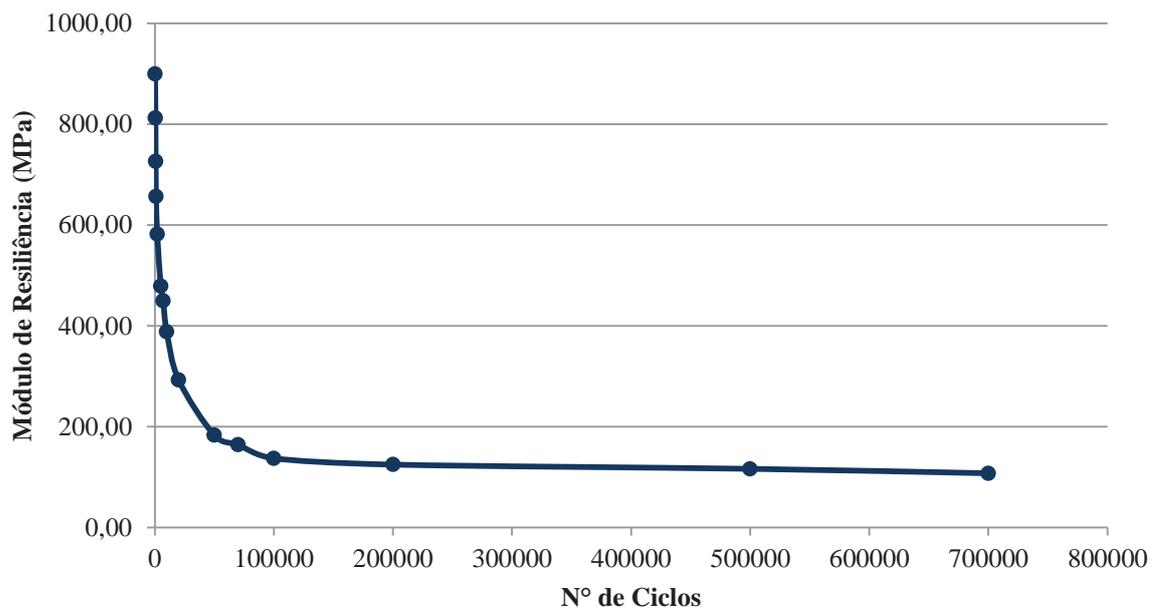
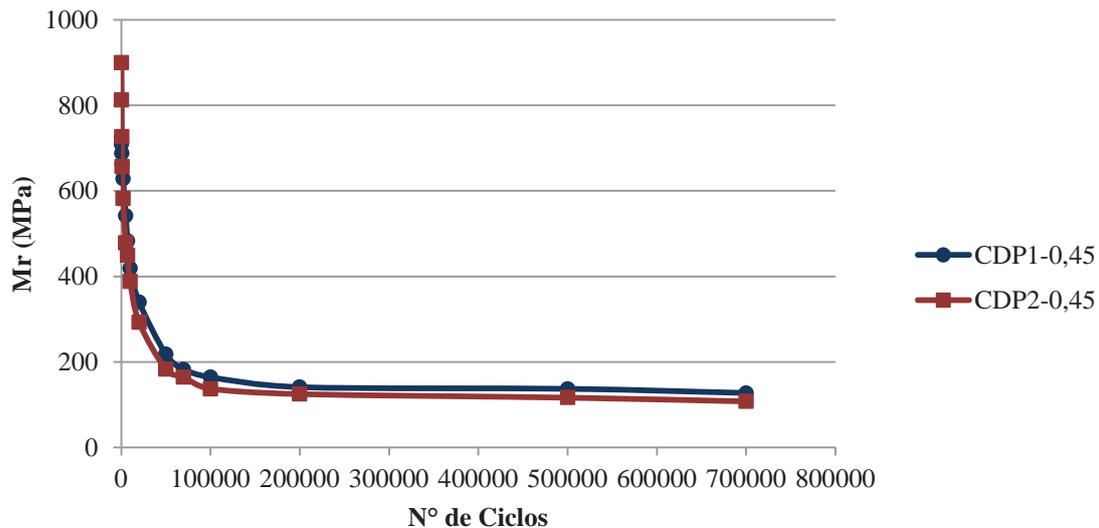


Figura 67 – N° de Ciclos x Módulo de Resiliência (CDP2-0,45).



Através dos resultados obtidos, nota-se que os comportamentos das vigas em relação aos módulos de resiliência obtidos durante o ensaio foram semelhantes. Para as 2 vigas, observa-se que há um crescimento acentuado dos módulos entre 200 e 100000 ciclos. Após esse intervalo, os módulos praticamente se estabilizaram, não apresentando grandes variações. Os 2 gráficos gerados também são apresentados na Figura 68.

Figura 68 – N° de ciclos x Módulo de Resiliência (RT = 0,45).



Comparando os gráficos, observa-se que há uma diferença significativa entre os módulos obtidos para as 2 vigas apenas nos primeiros ciclos do ensaio. Nos 200 ciclos, a viga CDP1-0,45 apresentou um módulo de 725 MPa, enquanto que a viga CDP2-0,45 apresentou um módulo de 900 MPa, ou seja, entorno de 175 MPa de diferença. Após os 100000 ciclos, não houve grande diferença entre os módulos obtidos para as vigas.

Após apresentados os módulos de resiliência obtidos nos ensaios realizados para cada viga, foram elaborados gráficos com os valores médios dos módulos obtidos pra as 3 relações de tensões analisadas, conforme apresentados na Figura 69 e na Figura 70. As duas Figuras apresentam os mesmos gráficos, porém a primeira com o número de ciclos variando de 200 a 20000, e a segunda variando de 200 a 2000 ciclos. Foram apresentadas desta maneira para se ter uma melhor visualização dos resultados obtidos nos ensaios com RT igual a 0,75 e 0,60.

Figura 69 – N° de ciclos x Módulo de Resiliência – 200 a 20000 ciclos.

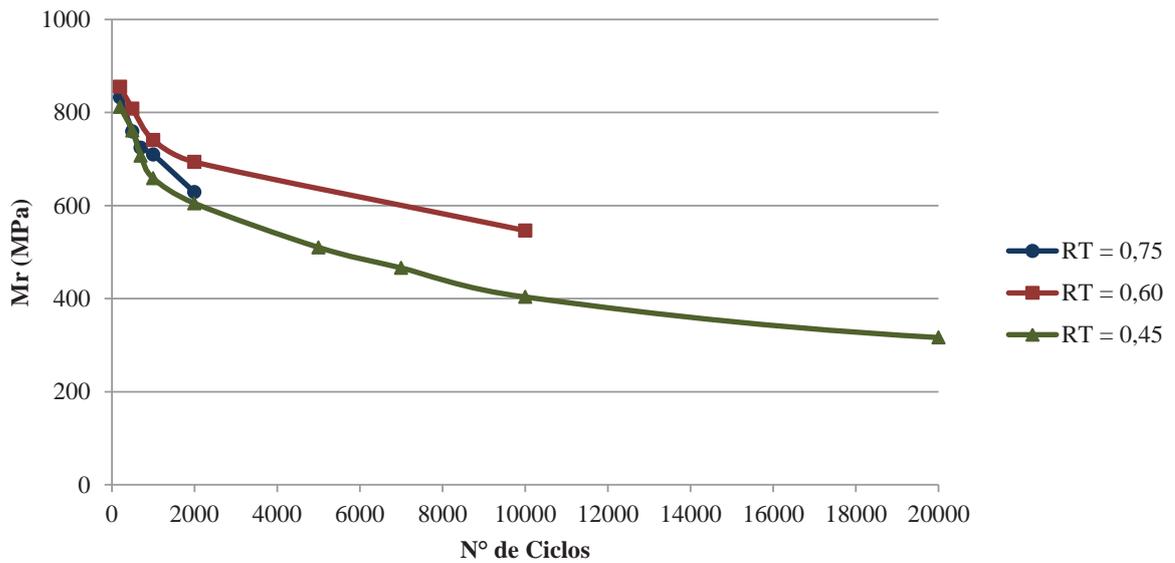
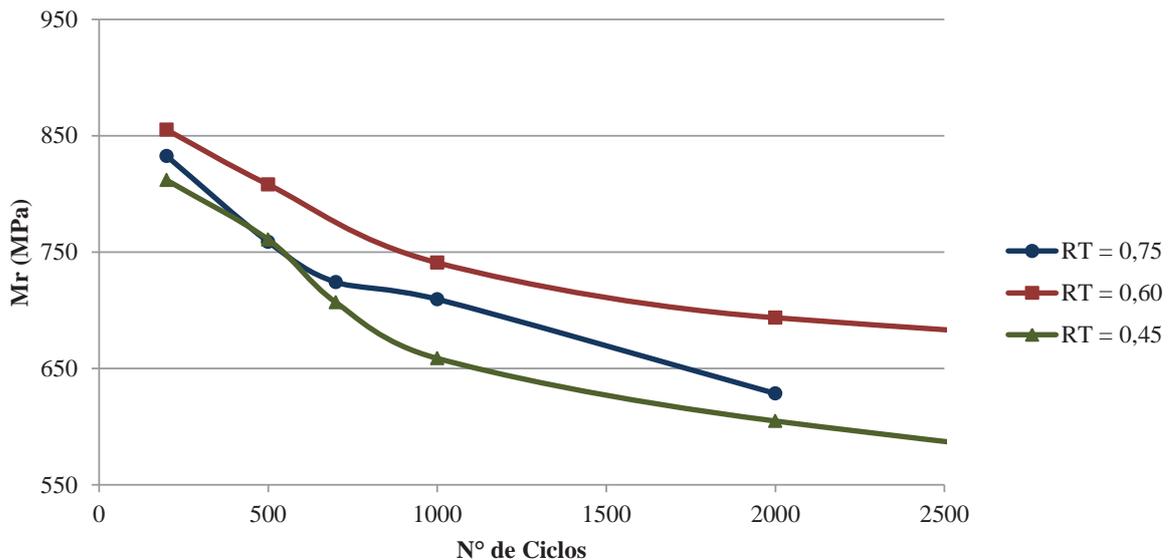


Figura 70 – N° de ciclos x Módulo de Resiliência – 200 a 2000 ciclos.



Observa-se, através dos gráficos, que os valores de módulos de resiliência foram maiores para as misturas recicladas ensaiadas com RT de 0,60 quando comparados com as outras duas relações de tensões.

Dos 200 até os 10000 ciclos, para RT de 0,60 os módulos variaram de 855 MPa a 546 MPa. Já para RT de 0,75 houve uma variação dos módulos de 832 MPa a 628 MPa entre os 200 e os 2000 ciclos. Para RT de 0,45 os módulos obtidos foram os mais baixos, variando de 812 MPa a 326 MPa entre os 200 e 700000 ciclos.

Nota-se, também através dos gráficos, que os módulos de resiliência obtidos para as 3 relações de tensões apresentam uma diferença baixa entre eles, porém essa diferença aumenta com a quantidade de ciclos. Nos 200 ciclos, a maior diferença entre os módulos foi de 43 MPa, enquanto que nos 2000 ciclos a diferença aumentou para 89 MPa.

Os valores de módulos de resiliência obtidos para as 3 relações de tensões são considerados baixos, quando comparado com a Instrução de Projeto citada por PMSP (2004), onde para materiais cimentados utilizados como base de pavimentos, no caso a brita graduada tratada com cimento, devem apresentar módulo de resiliência na faixa de 5000 MPa a 15000 MPa. Os módulos obtidos são bem inferiores a esta faixa sugerida, porém deve ser observado que o material analisado no estudo é composto por resíduos.

Através dos resultados obtidos para as 3 relações de tensões, também é possível observar que o material reciclado analisado apresentou um crescimento do nível de deformação durante os ensaios, gerando assim uma redução dos módulos de resiliência ao longo da aplicação da carga. Porém, essa redução não ocorre em materiais com comportamento rígido, ou seja, para materiais rígidos, o módulo de resiliência permanece praticamente constante até próximo à ruptura.

A redução dos módulos de resiliência ao longo da aplicação de carga, mesmo com a utilização de cimento Portland em forma de nata, pode estar relacionada à grande quantidade de fresado (70%) utilizada na mistura reciclada, sendo que a maior parte deste fresado é proveniente da camada de revestimento asfáltico de um pavimento. Outro fator que pode ter contribuído para os valores baixos de módulos e para a progressiva degradação da mistura reciclada são os pequenos “grumos de fresado” presentes no material reciclado analisado.

## 5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos ao longo do estudo, foi possível chegar as seguintes conclusões:

- Em relação à caracterização dos materiais utilizados nas misturas recicladas, o material fresado utilizado apresentou uma distribuição granulométrica com pouca quantidade de finos, não se enquadrando nas faixas da norma do DNIT 167/2013-ES. Assim, houve a necessidade da utilização do resíduo de beneficiamento de pedras semi-preciosas junto ao material fresado para a correção granulométrica. Através desta correção, foi obtida uma mistura reciclada com 70% de material fresado e 30% de resíduo, enquadrando-se assim na faixa II da norma;

- As misturas recicladas com nata de cimento apresentaram resistências médias à compressão simples iguais a 1,73; 3,07; 5,89; 4,80 e 5,95 MPa para os consumos de cimento de 50; 87,5; 125; 162,5 e 200 kg/m<sup>3</sup> respectivamente. A análise estatística mostrou que não há uma “diferença estatística” entre os valores de resistência obtidos entre os consumos de cimento de 125 e 162,5 kg/m<sup>3</sup> e entre os consumos de 125 e 200 kg/m<sup>3</sup>;

- Com os resultados encontrados de resistência à compressão simples para os consumos analisados, obteve-se um consumo ótimo de cimento de 70 kg/m<sup>3</sup> que equivale a 3,63%, tendo como referência o intervalo de valores de resistência estabelecido para utilização da mistura reciclada com cimento especificado pela norma do DNIT 167/2013-ES. Para o consumo ótimo estabelecido, obteve-se uma resistência à compressão simples de 3,19 MPa;

- Para a mistura reciclada com nata de cimento com o consumo ótimo estabelecido, obteve-se uma resistência média à tração na flexão de 0,71 MPa, que equivale a 22% da resistência média à compressão simples encontrada;

- Através dos ensaios realizados para a verificação da vida de fadiga das misturas recicladas com nata de cimento, observou-se que para as 3 relações de tensões (RT) analisadas (0,75; 0,60 e 0,45) a vida de fadiga aumentou quanto menor o nível de tensão aplicado, como já era esperado, sendo obtidos para RT de 0,75 e 0,60 os valores médios de 4216 e 34934 ciclos, enquanto que para RT de 0,45 o valor médio passou dos 500000 ciclos. No entanto, houve uma grande dispersão dos resultados obtidos, principalmente nos ensaios com relação de tensões de 0,60. Com os resultados obteve-se a curva de fadiga que apresentou um coeficiente de regressão R<sup>2</sup> igual a 0,9564;

- Os módulos de resiliência obtidos para as misturas recicladas com nata de cimento foram diminuindo com o aumento do número de ciclos aplicados para as 3 relações de tensões analisadas. As vigas ensaiadas com RT de 0,60 apresentaram os maiores valores de módulos quando comparados com as outras duas relações analisadas, enquanto as vigas ensaiadas com RT de 0,45 apresentaram os menores valores. Porém, a diferença entre os módulos obtidos para as 3 relações de tensões para um mesmo número de ciclos foi considerada baixa, sendo que essa diferença foi aumentando com a quantidade de ciclos aplicados;

- Os valores encontrados de módulos de resiliência para as misturas recicladas com nata de cimento mostraram-se baixos quando comparados com pesquisas semelhantes realizadas com materiais cimentados, apresentando assim um comportamento de um pavimento flexível.

- Através dos resultados obtidos, pode-se concluir que o material reciclado com nata de cimento analisado apresenta um bom comportamento mecânico, podendo ser utilizado no processo de reciclagem de pavimento.

## **5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros**

A seguir, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros tendo como base o presente trabalho:

- Realizar uma análise das resistências, vida de fadiga e módulo de resiliência do material reciclado com nata de cimento considerando outras densidades;

- Comparar o custo da aplicação da técnica de reciclagem profunda com adição de nata de cimento com outros processos de reciclagem existentes;

- Realizar uma análise sobre a utilização do material reciclado com nata de cimento em relação à sustentabilidade;

- Avaliar o comportamento do material reciclado através de ensaios de tração por compressão diametral e comparar os resultados com os valores obtidos neste estudo;

- Realizar ensaios de campo para a verificação de outros parâmetros importantes do pavimento reciclado com adição de nata de cimento;

- Realizar ensaios de fadiga considerando deformação controlada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738/2003:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739/2007:** Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 12142/2010:** Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro. 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D7460-10:** Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending. West Conshohocken, 2010.

BALBO, J. T. (2000). **Fatos, mitos e falácias sobre os modelos experimentais de fadiga.** In: 32ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO – **Anais...** Brasília, 2000. p. 391-404.

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

BARKSDALE, R. D. et al. Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design. In: GEORGIA TECH PROJECT E20-634 – **Anais...** Estados Unidos, 1997.

BATISTA, F. G. M. R. **Reabilitação de pavimentos flexíveis através de reciclagem com cimento.** 2009. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.

BEHIRY, A. E. A. E. Utilization of cement treated recycled concrete aggregates as base or subbase layer in Egypt. **Ain Shams Engineering Journal**, Egypt, v. 4, n. 4, p. 661-673, 2013.

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

BONFIM, V. **Estudo da Granulometria Resultante da Fresagem de Revestimentos Asfálticos com Vistas à Reciclagem *in situ* a Frio.** 1999. 179 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos.** 3ª ed., São Paulo, Exceção Editorial, 2007.

BROWN BROWN. **Brown e Brown Brasil.** 2014. Disponível em:  
<[http://www.brownbrown.com.br/site/?page\\_id=73](http://www.brownbrown.com.br/site/?page_id=73)>  
Acesso em: 11 nov. 2014.

CASTRO, L. N. **Reciclagem a Frio *in situ* com Espuma de Asfalto.** 2003. 183 f. Dissertação (Mestrado) – COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

CAVALCANTI, L. S. et al. Determinação da Resistência à Fadiga de Misturas Asfálticas com Diferentes Tipos de Ligantes Asfálticos e Agregados. In: 8º CONGRESSO BRASILEIRO DE RODOVIAS E CONCESSÕES – CBR&C 2013 E 8ª EXPOSIÇÃO INTERNACIONAL DE PRODUTOS PARA RODOVIAS – BRASVIAS 2013 – **Anais...** Santos, 2013.

Disponível em: <<http://www.cbrbrasvias.com.br/CBRC2013>> Acesso em: 12 nov. 2014.

CERVO, T. C. **Estudo da resistência à fadiga de concretos de cimento Portland para pavimentação.** 2004. 220 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

COLLINGS, D. C. Experiences gained from ten years of pavement rehabilitation by in situ recycling with cement and combinations of cement / bituminous stabilising agents. In: 1º SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE ESTABILIZACIÓN DE EXPLANADAS Y RECICLADO IN SITU DE FIRMES CON CEMENTO – **Anais...** Salamanca, 2001. p. 89-103.

COSTA-BAPTISTA, A. M. **Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central – Contribuição para o seu Estudo e Aplicação.** 2006. 382 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2006.

CUNHA, C. M. **Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis – Diferentes Tipos de Reciclagem.** 2010. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Vias de Comunicação e Transporte) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2010.

DALLA ROSA, F. et al. Análise do comportamento mecânico de um pavimento reciclado com adição de diferentes agentes estabilizadores. **Revista Transportes**, v. 23, n. 2, p. 95-104, 2015.

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

DELLABIANCA, L. M. A. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos.** 2004. 128 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

DIXON, P. A., GUTHRIE, W. S., EGGETT, D. L. Factors Affecting the Strength of Road Base Stabilized with Cement Slurry or Dry Cement in Conjunction with Full-Depth Reclamation. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, D.C., v. 2310, p. 113 –120, 2012.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM (DAER). **DAER/RS – EL 001/01:** Preparação de amostras de solos. Porto Alegre, 2001.

\_\_\_\_\_. **DAER/RS-EL 003/01:** Análise granulométrica de solos. Porto Alegre, 2001.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT 167/2013-ES: Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos “in situ” com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço.** Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR. Rio de Janeiro, 2013.

EDLER, P. **Comportamento de estacas broca compostas de solo-cimento e resíduo de beneficiamento de pedras preciosas a partir de provas de carga estática.** 2011. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia: Infraestrutura e Meio Ambiente) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2011.

FEDRIGO, W; NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A. P. Reciclagem de pavimentos com adição de cimento: proposição de um método de dosagem preliminar. In: 44ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO – **Anais...** Foz do Iguaçu, 2015. 18 p.

FONSECA, P. **Reciclagem de pavimentos rodoviários.** Escola Superior de tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Bragança. Bragança, 2002.

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos.** 2009. 545 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

GARBER, S.; RASMUSSEN, R. O.; HARRINGTON, D. **Guide to Cement-Based Integrated Pavement Solutions.** Institute for Transportation Iowa State University. Portland Cement Association (PCA). Estados Unidos, 2011.

GUSMÃO, C. B. **Evolução temporal da resistência mecânica em laboratório, de misturas simulando a reciclagem de pavimento asfáltico com adição de Cimento Portland.** 2008. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Transportes) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

GUTHRIE, W. S.; BROWN, A. V. Effect of Remolding on Cement-Stabilized Base Course Blended with Reclaimed Asphalt Pavement. In: 14TH CONFERENCE ON COLD REGIONS ENGINEERING – COLD REGIONS ENGINEERING 2009: COLD REGIONS IMPACTS ON RESEARCH, DESIGN, AND CONSTRUCTION – **Anais...** Estados Unidos, 2009. p. 346-355.

GUTHRIE, W. S.; BROWN, A. V.; EGGETT, D. L. Cement Stabilization of Aggregate Base Material Blended with Reclaimed Asphalt Pavement. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, D.C., v. 2026, p. 47-53, 2007.

INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES - IECA. **Reciclado de firmes in situ con cemento: Guías técnicas.** Madrid, 2013.

JASIENSKI, A.; RENS, L. In situ recycling with cement: The Belgian experience. In: 1º SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE ESTABILIZACIÓN DE EXPLANADAS Y RECICLADO IN SITU DE FIRMES CON CEMENTO – Salamanca, 2001. p. 918-930.

JORGE, F. S. et al. Análise do comportamento mecânico de pavimentos flexíveis reciclados com adição de agentes. In: 43ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO E 17º ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA – **Anais...** Maceió, 2014.

KANDHAL, P. S.; MALLICK, R. B. **FHWA Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments**. Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation. FHWA-SA-98-042. Washington, 1997.

KAVUSSI, A., MODARRES, A. A model for resilient modulus determination of recycled mixes with bitumen emulsion and cement from ITS testing results. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 2252-2259, 2010.

KHAY, S. E. E. et al. Laboratory Investigation of Cement-Treated Reclaimed Asphalt Pavement Material. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 6, 2015.

LANE, B.; KAZMIEROWSKI, T ALKINS, A. E. Sustainable Pavements – Environmental, Economic and Social Benefits of In-Situ Pavement Recycling. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA – **Anais...** Canada, 2008.

LEWIS, A. J. N.; COLLINGS, D. C. **Cold in Place Recycling: A Relevant Process for Road Rehabilitation and Upgrading**. In: 7TH CONFERENCE ON ASPHALT PAVEMENTS FOR SOUTHERN AFRICA – **Anais...** África do Sul, 1999.  
Disponível em: <<http://viastrade.com/letteratura/bitume/COLD%20IN%20PLACE%20RECYCLING%20A%20RELEVANT%20PROCESS%20FOR%20ROAD.pdf>> Acesso em: 28 out. 2014.

LIMA, A. T. **Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente**. 2003. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

LOUREIRO, T. G. **Estudo da Evolução do Dano por Fadiga em Misturas Asfálticas**. 2003. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

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

MOMM, L.; DOMINGUES, F. A. A. Reciclagem de Pavimentos à Frio "*in situ*", Superficial e Profunda. 29ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO – **Anais...** Cuiabá, 1995.

NOURELDIN, A. S.; WOOD, L. E. **Use of Nondestructive Tests to Evaluate Hot Mix Recycled Asphalt Pavements**. Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists-AAPT, v. 58, Estados Unidos, 1989.

OLIVEIRA, A.; BARAN, K. R.; SCHMIDT, F. S. Reciclagem de pavimentos para restauração da BR-282 em Santa Catarina. In: 6º SEMINÁRIO NACIONAL MODERNAS TÉCNICAS RODOVIÁRIAS – **Anais...** Florianópolis, 2010.

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

OLIVEIRA, P. C. A.; SANT'ANNA, F. M. G.; SOUZA, F. S. V. **Restauração do pavimento da rodovia SP-351 através de reciclagem das camadas de capa e base com adição de Cimento Portland e brita.** Artigo Científico. 2011.

Disponível em: <http://revisa-sa.com.br/wp-content/uploads/2011/01/SP351.pdf>

Acesso em: 25 de junho de 2014.

PAIVA, C. E. L.; OLIVEIRA, P. C. A. Reciclagem de pavimentos: Estudo da influência do tipo de cimento Portland na resistência à compressão simples do material reciclado. In: IV SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS E PROJETOS DE REFORÇO – **Anais...** Fortaleza, 2009.

PAIVA, C. E. L.; OLIVEIRA, P. C. A.; BONFIM, V. As perspectivas de reabilitação de pavimentos no estado de São Paulo – Brasil: Enquadramento e técnicas usuais. **Construção Magazine**, Porto, v. 53, p. 34-38, 2013.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P. **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios.** Apostila. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, 2007.

PITTA, M. R. Concreto Rolado: Uma Solução Econômica e Durável para a Pavimentação Urbana. In: Seminário Técnico Sobre Pavimentação Urbana à Base de Cimento – **Anais...** São Paulo, 2002.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO – PMSP. **Instruções de Projeto: Portaria 084/SIURB G/2004**, Diário Oficial do Município de São Paulo. Secretaria de Infraestrutura Urbana, São Paulo, 2004.

PREUSSLER, E. S. **Estudo de Deformação Resiliente de Pavimentos Flexíveis e Aplicação ao Projeto de Camadas de Reforço.** 1983. 266 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1983.

SACHET, T. **Controle Tecnológico de Obras Rodoviárias Envolvendo a Reciclagem *in situ* de Bases Granulares de Pavimentos Asfálticos.** 2007. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia: Infraestrutura e Meio Ambiente) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2007.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação.** 2. ed. São Paulo: Pini, 2007.

SILVA, C. A. R.; MIRANDA JR., J. Reciclagem de camada betuminosa como sub-base estabilizada com cimento na BR-381: Uma experiência. In: 32ª Reunião Anual de Pavimentação – **Anais...** Brasília, 2000.

SOBHAN, K.; MASHNAD, M. **Fatigue Durability of Stabilized Recycled Aggregate Base Course Containing Fly Ash and Waste-Plastic Strip Reinforcement.** Department of Civil and Geological Engineering. Universidade do Estado do Novo México, Estados Unidos, 2000.

SOUZA, F. S. V. **Avaliação do Desempenho de Pavimentos Restaurados por Meio de Técnicas de Reciclagem de Materiais de Pavimentação**. 2009. 99 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica – Pavimentação) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

SPECHT, L. P. et al. Utilização de material fresado como camada de pavimento: estudo laboratorial e aplicação em campo. In: 42ª Reunião Anual De Pavimentação e 16º Encontro Nacional De Conservação Rodoviária – **Anais...** Gramado, 2013.

SUFIAN, Z. et al. **Construction of cold in place recycling method in Malaysia**. In: 13th CONFERENCE OF ROAD ENGINEERING ASSOCIATION OF ASIA AND AUSTRALASIA – **Anais...** Incheon, 2009. 12 p.

TAHA, R. et al. Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 14, n. 3, p. 239-245, 2002.

TRICHÊS, G. et al. Caracterização do comportamento mecânico de misturas recicladas com adição de cimento. In: 42ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO – **Anais...** Gramado, 2013.

TRICHÊS, G.; SANTOS, A. Avaliação do Desempenho da Reciclagem do Pavimento da Rodovia SC 303. In: 7º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões – **Anais...** Foz do Iguaçu, 2011.

VOROBIEFF, G.; WILMOT, T. **Australian experience on subgrade stabilization and pavement recycling**. In: 1º SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE ESTABILIZACIÓN DE EXPLANADAS Y RECICLADO IN SITU DE FIRMES CON CEMENTO – **Anais...** Salamanca, 2001. p. 104-132.

WIRTGEN GMBH. **Misturas de materiais a frio: preparação e processos**. Alemanha: Wirtgen GmbH, 1999.

\_\_\_\_\_. **Reciclagem a frio – Tecnologia de reciclagem a frio Wirtgen**. 1ª ed., Alemanha, 2012.

YANG, Y. H., WU, Y. B. Mix Design for Full-Depth Reclaimed Asphalt Pavement with Cement as Stabilizer. In: GEO-HUBEI 2014 INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE CIVIL INFRASTRUCTURE. **Anais...** China, 2014. p. 1-8.