

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**RECICLAGEM DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS COM ADIÇÃO
DE CIMENTO PORTLAND: ESTUDO DE FADIGA ATRAVÉS
DO ENSAIO DE FLEXÃO EM VIGA QUATRO PONTOS**

MARIO ALEXANDER CASTAÑEDA LÓPEZ

Porto Alegre
2016

MARIO ALEXANDER CASTAÑEDA LÓPEZ

**RECICLAGEM DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS COM ADIÇÃO
DE CIMENTO PORTLAND: ESTUDO DE FADIGA ATRAVÉS
DO ENSAIO DE FLEXÃO EM VIGA QUATRO PONTOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia

Porto Alegre

2016

Ficha Catalográfica

- L881r López, Mario Alexander Castañeda
 Reciclagem de pavimentos flexíveis com adição de cimento Portland :
 estudo de fadiga através do ensaio de flexão em viga quatro pontos / Mario
 Alexander Castañeda López. – 2016.
 162 f. : il. color.
 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
 Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,
 Porto Alegre, BR-RS, 2016.
 Orientadores: Washington Peres Núñez e Jorge Augusto Pereira Ceratti.
1. Pavimentos flexíveis. 2. Reciclagem. 3. Ensaio de fadiga. I. Núñez,
 Washington Peres, orient. II. Ceratti, Jorge Augusto Pereira, orient. III. Título.

MARIO ALEXANDER CASTAÑEDA LÓPEZ

**RECICLAGEM DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS COM ADIÇÃO
DE CIMENTO PORTLAND: ESTUDO DE FADIGA ATRAVÉS
DO ENSAIO DE FLEXÃO EM VIGA QUATRO PONTOS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, na Área de Concentração Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre, 1 de Junho de 2016

Prof. Washington Peres Núñez

Dr. pela UFRGS / Brasil

Orientador

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti

DSc. pela UFRJ / Brasil

Orientador

Prof. Carlos Torres Formoso
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Francisco Dalla Rosa (UPF)
Dr. pela UFRGS, Brasil

Prof. Luiz Antônio Bressani (UFRGS)
PhD pela University of London, Inglaterra

Prof. Márcio Muniz de Farias (UnB)
PhD. pela University of Wales, UK

A mis padres,
todo lo hago por ustedes.

AGRADECIMENTOS

À Organização de Estados Americanos (OEA), representada pela República Federativa do Brasil, e ao Grupo COIMBRA de Universidades Brasileiras (GCUB), representado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul e o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), pela ótima oportunidade de estudo. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo fornecimento da bolsa de estudos que fez possível minha dedicação exclusiva ao curso.

Ao professor Washington Peres Núñez, orientador da pesquisa, quem além de ser um excelente educador se tornou num grande amigo. Agradeço pela confiança, pela oportunidade de participação no projeto e o tempo dedicado, além da motivação constante e o incentivo na divulgação do trabalho desenvolvido.

Ao professor Jorge Augusto Pereira Ceratti, quem além de ser orientador da pesquisa, é coordenador do projeto no qual está inserida. Assim mesmo, pela disponibilidade do Laboratório de Pavimentação (LAPAV) que também coordena.

À toda a equipe do LAPAV: André, Bruna, Camila, Camilo, Cynthia, Douglas Engelke, Douglas Mocelin, Fábio, Filipe, Gracieli, Guilherme, Gustavo, Isadora, Seu Ivo, Jefferson, Junior, Kethelin, Luiza, Marlova, Mateus Felipe, Mateus Freitas, Maximiliano, Nathália, pelos momentos descontraídos, pelas recomendações. Especialmente a Daniel, Felipe, Matheus Matuella, Rodrigo, Vinicius pelas inúmeras caronas. A Larissa, pela grande ajuda na fase de ensaios estáticos. Ao professor Lélío Brito e Dionísio Döering cujas recomendações foram essenciais no componente experimental da pesquisa. Especial agradecimento à Bernadette quem, além de tudo, sempre esteve atenta de minha saúde.

Especial agradecimento aos bolsistas e voluntários da pesquisa da reciclagem de pavimentos com cimento: Augusto, Gabriel, Lucas e Vinícius, pela força nas infinitas compactações. Aos colegas e amigos William e Thaís, cujas recomendações ao longo deste processo foram de grande ajuda. Foi um prazer ter formado parte da equipe e contar com sua amizade.

À equipe do Laboratório de Geotecnologia (LAGEOTEC): Guilherme, Jair, Lucas, Marina, Matheus Matuella, Matheus Porto, e à professora Wai. Obrigado pelas recomendações e por fazerem parte dos nossos encontros quase mensais.

Agradeço à toda a equipe do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME), especialmente à professora Ângela Graeff, pelo tempo. A Diego Guimarães. Aos técnicos Edgar e Eurípedes pela fabricação de peças, e ao funcionário José.

À equipe do Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), ao professor Telmo Strohaecker, Fabiano, Mariane e Rafael pelas recomendações no projeto do equipamento quatro pontos.

A Mateus Mascolo, pela usinagem das peças.

À equipe da CIENTEC pela parceria na moldagem e cura dos corpos de prova, especialmente a Eduardo Mallman, Gerente do Departamento de Meio Ambiente, e ao colega Rodrigo Saldanha. Também aos técnicos Isaac, Rafael e Teylor.

Componentes das bancas de seminário de andamento da pesquisa: Ângela Graeff e Lucas Delongui. Aos componentes da banca de defesa de dissertação: Francisco Dalla Rosa, Luiz Antônio Bressani e Márcio Muniz de Farias, pelos comentários e críticas construtivas.

Às empresas Tecnopav e Traçado pelo fornecimento dos materiais utilizados nesta pesquisa. À Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), à Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), ao Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) do DNIT e às empresas parceiras na pesquisa, Wirtgen, CCR e Ecorodovias.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) pela qualidade das disciplinas. Amplio meu agradecimento cada um dos colegas que conheci no programa, pela amizade e dicas ao longo do curso, especialmente aos colegas Guaranis.

À minha família toda, especialmente aos meus pais Mario Castañeda e Marina López, meu irmão Danilo, e minha sobrinha Valentina, pela paciência e seu apoio incondicional, mesmo que às vezes eu não consiga estar para vocês. A Andrea, por ser companhia de meus pais na minha ausência. Espero poder lhes compensar todo esse tempo que fiquei longe de vocês.

Ao colega Germán Corredor, grande amigo, quem me compartilhou o edital da OEA-GCUB. Também agradeço aos professores Guillermo Ávila e Dorian Linero pela confiança, e à Universidade Nacional da Colômbia pela formação durante a graduação.

A Arthur, Camila e César por me ter acolhido como parte de sua família durante o início do curso. A Jaqueline Volpato, pela confiança em me ter recebido em sua casa. A Naloan Countinho, por ser um excelente roomie, colega e embaixador da República da Guiné-Bissau.

Aos meus conterrâneos que se tornaram minha família e fizeram possível não me sentir longe de casa: Camilo Alberto, Claudia, Gustavo, Julián, Laura, Milena, Victoria, Viyils. Da mesma forma aos “amigos latinos”: David, Emeline, Ihara, Luci, Sara, e aos meus amigos “colombo-brasileiros”: Cíntia, Daniel, Fernanda e Rochele. Espero reencontrá-los de novo.

Estendo os agradecimentos à Secretaria de Relações Internacionais da UFRGS (RELINTER) pelo apoio na fase inicial do curso, e pela confraternização com inúmeros companheiros de todos os cantos do mundo. Mesmo que agora espalhados pelo mundo, ficaram incontáveis amizades e sorrisos inesquecíveis.

Por fim, agradeço ao povo brasileiro, por me ter acolhido como mais um conterrâneo. Ficou uma língua, muitas histórias, e uma forma brasileira de entender o mundo.

"Una educación alejada del mundo nos lleva a pensar
que una cosa es vivir y otra es aprender"

William Ospina

RESUMO

LOPEZ, M. A. C. Reciclagem de pavimentos flexíveis com adição de cimento Portland: estudo de fadiga através do ensaio de flexão em viga quatro pontos. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland é uma técnica que permite reutilizar estruturas degradadas de pavimentos flexíveis na conformação de uma nova camada estabilizada. Seu dimensionamento, no Brasil, tem sido abordado de forma empírica. Entretanto, os métodos racionais desenvolvidos para pavimentos semirrígidos estão baseados principalmente na previsão da vida de fadiga das camadas cimentadas, associada ao nível de deformação atuante na sua fibra inferior. Com o intuito de contribuir no desenvolvimento de um método de dimensionamento de pavimentos com camadas recicladas com adição de cimento, a pesquisa relatada nesta dissertação teve como objetivo principal o estudo laboratorial do comportamento a fadiga de misturas constituídas por fresado asfáltico (20%, 50% e 70%), brita graduada e cimento Portland (teores de 2% e 4%). O programa experimental foi baseado no protocolo para caracterização de materiais cimentados da *Austroads* (2008; 2012), para ensaios estáticos e de fadiga, além de recomendações para caracterização flexural da JCI (1984), procurando-se avaliar a sua aplicabilidade. Os ensaios de fadiga foram realizados em vigotas com dimensões 10 cm x 10 cm x 40 cm, curadas por pelo menos 28 dias. O modo dos ensaios foi o de tensão controlada como função da resistência à tração na flexão, previamente determinada. O sistema de carregamento é conhecido como fadiga a 4 pontos. Foram obtidos modelos de fadiga em função da tensão de tração atuante, da deformação inicial e da energia dissipada inicial. Os resultados dos ensaios estáticos indicam a predominante influência do teor de cimento na resistência a tração na flexão das misturas (valores entre 0,21 MPa e 1,53 MPa), enquanto a porcentagem de fresado tem efeito significativo na deformação de ruptura, tornando as misturas mais dúcteis, e no Módulo de Elasticidade Flexural (que variou entre 1483 MPa e 12800 MPa). No caso dos ensaios de fadiga, os Módulos de Resiliência Flexural iniciais (valores entre 2913 MPa e 7725 MPa) mostraram-se mais dependentes do teor de cimento e independentes do nível de tensão. Nos modelos de fadiga obtidos, os valores dos expoentes de dano por deformação variaram entre 7 e 15, sendo próximos aos relatados pela *Austroads* para materiais cimentados. Esses modelos foram empregados na modelagem de estruturas de pavimento com camadas de base reciclada, de espessura de 18 cm a 40 cm, visando quantificar o efeito do teor de cimento e da porcentagem de fresado na vida de fadiga, bem como das espessuras da camada reciclada e da nova camada asfáltica sobrejacente. Observou-se que espessuras de camada reciclada inferiores a 30 cm terão curta vida de fadiga. Por outro lado, também ficou evidenciado que a vida de fadiga dessa camada depende significativamente da espessura da nova camada asfáltica sobrejacente, recomendando-se espessuras de no mínimo 10 cm. Finalmente, destaca-se que o volume de dados gerado durante os ensaios de fadiga, e seu processamento por meio de algoritmos desenvolvidos na pesquisa, permitiram abordar conceitos de energia dissipada, como aproximação à definição de critérios de micro e microfissuração, o que mostrou a utilidade deste tipo de abordagem para futuras pesquisas.

Palavras-chave: *dimensionamento de pavimentos; fadiga em quatro pontos; reciclagem com cimento; resistência à tração na flexão; energia dissipada*

ABSTRACT

LOPEZ, M. A. C. Full-depth reclamation of flexible pavements with Portland cement: fatigue study through four-point bending test. 2016. MSc Dissertation – Post-graduation Program in Civil Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil.

Full-depth reclamation with Portland cement (FDR-C), is a technique allowing the reuse of flexible pavements damaged structures, in order to build a new stabilized layer. In Brazil, pavement design with FDR-C has been determined by empirical approaches. However, mechanistic approach developed for semi-rigid pavements mainly use fatigue relationships based on deformations occurring at the bottom of the cemented layer. In order to develop a pavement design method with FDR-C materials, this research work aimed to study, in laboratory, the fatigue behavior of FDR-C mixtures, for three cement grades (2 %, 4 % e 6 %) and three RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) percentages (20 %, 50 % e 70 %). The experimental program was based on the protocol for the characterization of cemented materials of the *Austroroads* (2008; 2012), for static and dynamic tests, and on the recommendations for flexural characterization of concrete reinforced with steel fibers, of the JCI (1984), evaluating the availability of these procedures. Fatigue tests were executed using beams (10 cm x 10 cm x 40 cm), static compacted and with a minimum curing time of 28 days. Stress controlled mode was used, based on flexural strength, previously determined. Loading system was a four-point bending test. Were developed fatigue strain, stress and dissipated energy relationships. Static tests results show that cement is the principal influence on the flexural strength of the mixtures (0.21 MPa up to 1.53 MPa), while the RAP have a major effect in the increasing of the tensile strains making it more ductile (flexural elastic modulus were 1483 MPa up to 12800 MPa). In the case of fatigue tests, flexural modulus were more dependent on the degree of cementation (2913 MPa up to 7725 MPa), and not on the applied stress level. About the fatigue models of FDR-C mixtures, strain damage exponents (7 up to 15) were similar to those reported by *Austroroads*. Laboratory models based on strain were used in modeling of pavement structures, with a FDR-C base layer. Results showed benefits of thickness in FDR-C mixtures and asphalt layers (18 cm up to 40 cm), in order to evaluate the effect of the cement and RAP content on fatigue life, and FDR-C new asphalt thickness as well. This model highlights that FDR-C with a thickness inferior than 30 cm will have a shorter fatigue life. On the other side, was showed that the fatigue life of this layer mainly depends on new hot mix asphalt thickness layer (thickness recommended up to 10 cm). Finally, the volume of data generated during the fatigue tests and his processing through algorithms developed in research allowed using dissipated energy criteria as an approximation of the definition of micro and macro-cracking limits which indicate the utility of this methodology for future research.

Key-words: *pavement design; four point bending test; FDR with cement; flexural strength; dissipated energy*

RESUMEN

LOPEZ, M. A. C. Reciclaje de pavimentos flexibles con adición de cemento Portland: estudio de fatiga a través del ensayo de flexión en viga cuatro puntos. 2016. Disertación (Maestría en Ingeniería). Programa de Posgrado en Ingeniería Civil, Universidad Federal de Rio Grande del Sur, Porto Alegre, Brasil.

El reciclaje de pavimentos con adición de cemento Portland es una técnica que permite la reutilización de estructuras degradadas de pavimentos flexibles para la conformación de una nueva capa estabilizada. Su diseño, en Brasil, ha sido abordado de forma empírica. Sin embargo, métodos racionales desarrollados para pavimentos semirrígidos están basados en la vida de fatiga de las capas cementadas, asociada al estado de deformaciones actuante en su base. Con el objetivo de contribuir al desarrollo de un método de dimensionamiento de pavimentos con capas recicladas con adición de cemento, la investigación relatada en esta disertación tuvo como objetivo principal el estudio laboratorial del comportamiento de fatiga de mezclas constituidas por fresado asfáltico (20%, 50% y 70%), base granular y cemento Portland (2%, 4 % y 6 %). El programa experimental fue basado en protocolos de caracterización de materiales cementados de la *Austroads* (2008, 2012), para ensayos estáticos y de fatiga, además de recomendaciones para caracterización flexural de concreto reforzado con fibras de acero de la JCI (1984), procurando evaluar su aplicabilidad. Los ensayos de fatiga fueron realizados en vigotas con dimensiones de 10 cm x 10 x cm x 40 cm, moldadas estáticamente y curadas por lo menos 28 días. El modo de carga fue de esfuerzo controlado en función de la resistencia de tracción en la flexión, previamente determinada. El sistema de carga es conocido como fatiga 4 puntos. Los resultados de los ensayos estáticos mostraron una influencia predominante del contenido de cemento respecto a la resistencia flexural de las mezclas (valores entre 0,21 MPa y 1,53 MPa), mientras que el material fresado tiene un efecto significativo en la deformación de tracción al tonar más dúctiles las mezclas, afectando módulo de elasticidad flexural (valores entre 1483 MPa y 12800 MPa). En el caso de los ensayos de fatiga, los Módulos de Resiliencia Flexural iniciales (valores entre 2913 MPa y 7725 MPa) mostraron ser más dependientes del grado de cementación e independientes del nivel de esfuerzo aplicado. Los valores de los exponentes de daño por deformación en los modelos de fatiga, que variaron entre 7 y 15, fueron próximos a los relatados por la *Austroads*. Estos modelos fueron usados en la modelación de estructuras de pavimento con capas de base reciclada, de espesor entre 18 cm y 40 cm, buscando cuantificar el efecto del contenido de cemento y de fresado en la vida de fatiga. Se observó que espesores de la capa reciclada inferiores a 30 cm tendrán corta vida de fatiga. Por otro lado, fue evidenciado que la vida de fatiga de esta capa depende significativamente del espesor del nuevo revestimiento asfáltico, recomendándose espesores superiores a 10 cm. Finalmente, se destaca que el volumen de datos generados durante los ensayos de fatiga y su procesamiento por medio de algoritmos desarrollados en la investigación permitieron abordar conceptos de energía disipada, como aproximación a la definición de criterios de micro y macro fractura que mostraron la utilidad de este tipo de metodologías para estudios futuros.

Palabras clave: *diseño de pavimentos; fatiga en cuatro puntos; reciclaje de pavimentos con cemento; resistencia de tracción a la flexión; energía disipada*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	23
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA.....	23
1.2 OBJETIVOS	25
1.2.1 Objetivo geral	25
1.2.2 Objetivos específicos	25
1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....	26
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM CIMENTO PORTLAND.....	27
2.1.1 Materiais empregados.....	28
2.1.2 Fatores de controle da base reciclada com cimento	29
2.1.3 Comportamento mecânico de camadas cimentadas	31
2.1.4 Caracterização mecânica das misturas recicladas com cimento	33
2.1.5 Normas técnicas nacionais de reciclagem	34
2.1.6 Vantagens e desvantagens da técnica	35
2.2 FADIGA EM MATERIAIS CIMENTADOS	36
2.2.1 Fenômeno de fadiga.....	36
2.2.2 Abordagem tradicional	38
2.2.3 Abordagem por energia dissipada	41
2.2.4 Fatores que afetam o desempenho à fadiga de misturas cimentadas.....	43
2.2.5 Configuração do ensaio quatro pontos	46
2.3 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS COM CAMADAS RECICLADAS..	46
2.3.1 Métodos empíricos	47
2.3.2 Métodos mecanicistas.....	49
2.4 NORMATIZAÇÃO DE ENSAIOS.....	52
2.4.1 Resistência à tração na flexão e deformação na ruptura.....	52
2.4.2 Fadiga em quatro pontos	56

3. METODOLOGIA.....	58
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL	58
3.2 MATERIAIS.....	60
3.2.1 Fresado asfáltico com ligante convencional.....	60
3.2.2 Brita Graduada simples	61
3.2.3 Cimento	62
3.3 EQUIPAMENTOS	63
3.3.1 Pórtico de carregamento	63
3.3.2 MTS.....	67
3.3.3 Equipamento para ensaio de fadiga por compressão diametral.....	67
3.4 MÉTODOS	72
3.4.1 Caracterização dos materiais	72
3.4.2 Moldagem e preparação dos corpos de prova	74
3.4.3 Resistência à Tração na flexão	78
3.4.4 Fadiga em quatro pontos e módulo de resiliência flexural.....	84
3.4.5 Análises de energia.....	89
4. PROCESSAMENTO DA INFORMAÇÃO DO ENSAIO DE FADIGA.....	91
4.1 ALGORITMO	91
4.1.1 Algoritmo simplificado	91
4.1.2 Definição de parâmetros de entrada	92
4.1.3 Matriz base	92
4.1.4 Primeira fase do processamento	92
4.1.5 Segunda fase do processamento	93
4.1.6 Exportação dos resultados	93
4.2 IMPLEMENTAÇÃO.....	94
4.2.1 Entrada.....	94
4.2.2 Saída	96
4.3 LIMITAÇÕES	98

5.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	99
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	99
5.1.1	Análise granulométrica.....	99
5.1.2	Teor de ligante	101
5.2	COMPACTAÇÃO.....	102
5.3	MOLDAGEM.....	104
5.4	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	105
5.4.1	Resistência à tração na Flexão.....	105
5.4.2	Deformação na ruptura	107
5.4.3	Módulo estático flexural.....	109
5.5	ENSAIOS DE FADIGA À FLEXÃO EM QUATRO PONTOS	112
5.5.1	Módulo de resiliência flexural.....	112
5.5.2	Modelos de fadiga	114
5.5.3	Degradação das misturas	119
5.6	DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO FLEXÍVEL COM INCLUSÃO DE CAMADAS DE BASE RECICLADAS COM CIMENTO	122
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	126
6.1	CONCLUSÕES	126
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	131
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132
	APÊNDICE A – PROJETO: PÓRTICO DE CARREGAMENTO.....	137
	APÊNDICE B – MODELAGEM VIGA	140
B.1	DISTRIBUIÇÕES DE TENSÕES, DEFORMAÇÕES E DESLOCAMENTOS NO PLANO TRANSVERSAL (MISTURA 2-70*)	141
B.2	COMPARATIVO MEDIÇÕES X MODELAGEM: TENSÕES DE TRAÇÃO (σ_i) ..	142
B.3	COMPARATIVO MEDIÇÕES X MODELAGEM: DEFORMAÇÃO DE TRAÇÃO (ϵ_i)	142
B.4	COMPARATIVO MEDIÇÕES X MODELAGEM: DESLOCAMENTO VERTICAL (δ_i).....	142

APÊNDICE C – ALGORITMOS DE PROCESSAMENTO	143
C.1. SUBPROCESSO 1	144
C.2. SUBPROCESSO 2	145
C.3. SUBPROCESSO 3	146
C.4. SUBPROCESSO 4	147
C.5. SUBPROCESSO 5	148
APÊNDICE D – RESULTADOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	149
D.1. CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO NORMALIZADAS: FUNÇÃO DO TEOR DE CIMENTO E DA PORCENTAGEM DE FRESADO	150
D.2 CURVAS DE VARIAÇÃO DO MÓDULO ELÁSTICO FLEXURAL SECANTE X NÍVEL DE CARGA: FUNÇÃO DO TEOR DE CIMENTO E DA PORCENTAGEM DE FRESADO	151
APÊNDICE E – RESULTADOS ENSAIOS DE FADIGA EM QUATRO PONTOS ...	152
E.1. RESULTADOS ENSAIOS DE FADIGA	153
E.2. CURVAS DE DEGRADAÇÃO: DESLOCAMENTO	156
E.3. CURVAS DE DEGRADAÇÃO: DEFORMAÇÕES DE TRAÇÃO	157
E.4. CURVAS DE DEGRADAÇÃO: REDUÇÃO DO MRF INICIAL (VALORES NORMALIZADOS).....	158
E.5. CURVAS DE DEGRADAÇÃO: ENERGIA DISSIPADA.....	159
APÊNDICE F – DIMENSIONAMENTO DAS ESTRUTURAS DE PAVIMENTO	160
F.1. DIMENSIONAMENTO DAS ESTRUTURAS DE PAVIMENTO: RESPOSTA ESTRUTURAL (DEFORMAÇÕES DE TRAÇÃO) DA FIBRA INFERIOR DA CAMADA RECICLADA	161
F.2. DIMENSIONAMENTO DAS ESTRUTURAS DE PAVIMENTO: RESPOSTA ESTRUTURAL (Tensões de compressão) no topo DA CAMADA RECICLADA	161
F.3. CURVAS DE DIMENSIONAMENTO: EFEITO DA PORCENTAGEM DE FRESADO E DA ESPESSURA DA CAMADA ASFÁLTICA	162

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma da pesquisa global com destaque deste estudo	25
Figura 2. Propagação de trinca no (a) concreto simples e (b) no concreto com RAP (baseado em: HUANG; SHU e LI, 2005).....	29
Figura 3. Mudanças a longo prazo de indicadores funcionais e estruturais de pavimentos flexíveis com base cimentada (baseado em: SARA, 2013).....	32
Figura 4. Mecanismos de falha das camadas cimentadas (baseado em: WIRTGEN, 2012)....	32
Figura 5. Deformações sob cargas repetidas (HUANG, 1993 <i>apud</i> BEHAK, 2013)	37
Figura 6. Fenômeno de (a) deformação permanente e (b) fadiga (baseado em: Di Benedetto <i>et al</i> , 2004).....	37
Figura 7. Exemplo de curvas de fadiga em função da deformação de tração inicial para dois materiais (baseado em Austroads, 2012).....	38
Figura 8. Resposta elástica de camadas cimentadas a longo prazo: MR em função do tráfego (THEYSE <i>et al</i> , 1996 <i>apud</i> BEHAK, 2013)	39
Figura 9. RDEC em função do número de ciclos: (a) curva típica para misturas asfálticas (baseado em WU; HUANG; e SHU, 2014), (b) curva para concreto de cimento Portland (baseado em DANIEL; BISIRRI, 2005).....	42
Figura 10. Características geométricas de ensaios de fadiga empregados em materiais cimentados (baseado em: Di Benedetto <i>et al</i> , 2004)	43
Figura 11. Energia dissipada função do modo de carregamento (baseado em XIAO, 2006) ..	44
Figura 12. Pulso semi-seno-verso (1 Hz)	45
Figura 13. Tensões e momentos da configuração quatro pontos (SALVADOR, 2013)	46
Figura 14. Configuração do ensaio de RTF e tenacidade flexural de concreto reforçado com fibras de aço baseado no método japonês (ASTM, 2013).....	54
Figura 15. Configuração para ensaio RTF (baseado em ASTM, 2015)	55
Figura 16. Configuração ensaio quatro pontos: RTF, MRF e fadiga (AUSTROADS, 2008)..	56
Figura 17. Ciclo empregado – 2,7 kN (baseado em Austroads, 2012).....	56
Figura 18. Esquema do programa experimental da pesquisa	59
Figura 19. Amostra de fresado asfáltico coletado	60
Figura 20. (a) Coleta com auxílio de máquina recicladora, (b) Medição das espessuras, (C) Amostragem do material coletado em pista. (FEDRIGO, 2015)	61

Figura 21. Amostra de brita graduada simples usada na pesquisa	62
Figura 22. Suporte quatro pontos recomendado pela <i>Austroroads</i>	64
Figura 23. Modelo 3D: (a) suporte quatro pontos, (b) suporte yoke	65
Figura 24. Configuração do sistema de medição de deslocamento: LVDTs apoiados (a) na base do equipamento do ensaio e (c) no topo da viga, (c) no suporte tipo <i>yoke</i> (MORGAN, MINDESS, CHEN, 1995, <i>apud</i> GAVA, 2006)	66
Figura 25. Pórtico de carregamento: conjunto.....	67
Figura 26. Configuração do equipamento de MRD e FCD.....	68
Figura 27. Componentes sistema de carregamento para ensaios de MRF e FQP	69
Figura 28. (a) Console de controle SEEPAV 8200, (b), painel traseiro SEEPAV 8200 e (c) conector serial. Fonte: Malysz (2009)	69
Figura 29. Tela da rotina do ensaio de fadiga e detalhes das telas de configurações, prévias ao ensaio (Mistura 4-50)	70
Figura 30. Conformação da Brita Graduada Simples usada na pesquisa	72
Figura 31. Preparação BGS: (a) agregados virgens, (b) mistura e quarteamento	73
Figura 32. Ensaio de refluxo: (a) preparação de amostra, (b) após cinco dias de andamento..	74
Figura 33. Mistura materiais (a) brita graduada simples e fresado, (b) adição de água após adição e mistura do cimento, (c) mistura homogênea (6 % cimento, 20 % de fresado)	75
Figura 34. Prensa para moldagem estática do corpo de prova	76
Figura 35. Cura de corpos de prova.....	76
Figura 36. Configuração do ensaio de RTF quatro pontos.....	79
Figura 37. Curvas tensão tração – deformação flexural CP 2-50 (1): (a) variação de tensões antes e após ruptura, (b) trecho analisado.....	81
Figura 38. Valores estimados do MEF para a mistura 2-50	82
Figura 39. Estado de tensões, deformações e deslocamentos verticais no corpo de prova durante o ensaio de RTF, mistura 2-70. Unidades em N e mm.....	83
Figura 40. Pulso de carga ideal e obtido. Viga 2-20 (3), ciclos 50 a 55.....	85
Figura 41. Pulso de carga e resposta (deformação). Viga 2-20 (3), 1 s de ensaio: ciclos 50 a 55.....	88
Figura 42. Curvas de histereses, viga 2-20 (3): (a) ciclos 150 a 499, (b) ciclo 150, 299, 450 e 399	89

Figura 43. Algoritmo simplificado e subprocessos definidos	91
Figura 44. Parâmetros de entrada e saída do programa.....	94
Figura 45. Relatório gerado pelo <i>software</i> SEEPAV 8200. CP 2-20 (6)	95
Figura 46. Formato dos parâmetros de entrada: (a) dimensões, (b) RTF.....	95
Figura 47. Programa em execução e parâmetros solicitados ao usuário. CP: 2-20 (6)	96
Figura 48. Relatório gerado – CP 2-20 (6).	96
Figura 49. Gráficos tensão, tensão normalizada, deformação e MRF – CP 2-20 (6): (a) primeira e (b) segunda fase de processamento	97
Figura 50. Granulometria dos agregados minerais virgens	99
Figura 51. Curvas granulométricas: agregados virgens e BGS 453	100
Figura 52. Granulometria de materiais utilizados na pesquisa: BGS e fresado	100
Figura 53. Granulometria misturas e enquadramento nas faixas granulométricas.....	101
Figura 54. Granulometria do fresado antes e após o ensaio de refluxo.....	101
Figura 55. Resultados compactações 2% de cimento.....	102
Figura 56. Resultados compactações 4% de cimento.....	102
Figura 57. Resultados compactações 6% de cimento.....	102
Figura 58. Variação da massa específica aparente seca ótima seca em função de: (a) teor de cimento, (b) porcentagem de fresado	104
Figura 59. Comparação: variação de umidade de compactação x GC	104
Figura 60. RTF em função de: (a) teor de cimento, (b) porcentagem de fresado.....	106
Figura 61. Valores de RTF normalizados como função da (a) variação de umidade de compactação e do (b) GC	107
Figura 62. Curvas tensão normalizada x deformação: misturas 4 % de cimento.....	108
Figura 63. Deformação na ruptura em função de: (a) teor de cimento, (b) porcentagem de fresado	108
Figura 64. Redução do MEF-S com o nível de carregamento.....	109
Figura 65. MEF (30 % RTF) em função do: (a) teor de cimento, (b) porcentagem de fresado	110
Figura 66. MEF-S (40 % RTF) em função de: (a) teor de cimento, (b) porcentagem de fresado	111

Figura 67. Comparativo de estimativa do MEF	111
Figura 68. MRF em função do: (a) teor de cimento, (b) porcentagem de fresado	113
Figura 69. Comparativo MEF e MRF	113
Figura 70. Curvas de fadiga em função da tensão de tração inicial: (a) misturas com 2 % de cimento, (b) misturas com 4 % de cimento	115
Figura 71. Variação da vida de fadiga como função da deformação de tração inicial: misturas com (a) 2 % de cimento e (b) 4 % de cimento	116
Figura 72. Curvas de fadiga como função da energia dissipada: misturas com (a) 2 % de cimento e (b) 4 % de cimento	117
Figura 73. Comparativo coeficiente de correlação modelos de fadiga.....	118
Figura 74. Exponentes de dano para misturas (a) 20 % de fresado, (b) 50 % de fresado, (c) 70 % de fresado	118
Figura 75. Exponentes de dano para misturas (a) 2 % de cimento e (b) 4 % de cimento	119
Figura 76. Degradação viga 2-20 (6): (a) Deformações resilientes, (b) Redução MRF.....	119
Figura 77. Incremento da energia dissipada durante o ensaio – Viga 2-20 (6).....	121
Figura 78. Degradação do material Viga 2-20 (6): RDEC x N.....	121
Figura 79. Estruturas de pavimento modeladas – padrão geral: (a) revestimento de 5 cm de espessura, (b) revestimento de 10 cm de espessura, (c) legenda. Medidas em cm	123
Figura 80. Vida de fadiga em laboratório da camada reciclada (20 % de fresado). Revestimento asfáltico: (a) 5 cm e (b) 10 cm.....	124
Figura 81. Vida de fadiga em laboratório da camada reciclada (50 % de fresado). Revestimento asfáltico: (a) 5 cm e (b) 10 cm.....	124
Figura 82. Vida de fadiga em laboratório da camada reciclada (70 % de fresado). Revestimento asfáltico: (a) 5 cm e (b) 10 cm.....	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores típicos de RCS aos 7 dias de cura	33
Tabela 2. Valores RCS e MRF camadas cimentadas, 28 dias de cura (AUSTROADS, 2002)	33
Tabela 3. Valores recomendados de RCD aos 7 dias de cura	34
Tabela 4. Valores de K em função do módulo do material cimentado (<i>Austrroads</i> , 2011).....	51
Tabela 5. Comparativo entre as normas de referência	53
Tabela 6. Resumo das misturas estudadas na pesquisa	60
Tabela 7. Características dos agregado virgens utilizados no estudo (COLPO, 2014).....	61
Tabela 8. Parâmetros de entrada SEEPAV 8200: FCD e FQP.....	71
Tabela 9. Misturas cujos ensaios de compactação foram realizados anteriormente	74
Tabela 10. Características das vigotas ensaiadas.....	77
Tabela 11. Parâmetros de calibração do pulso	86
Tabela 12. Parâmetros de entrada – configuração do ensaio FQP	86
Tabela 13. Vetores complementares considerados no subprocesso 2	92
Tabela 14. Vetores considerados no subprocesso 3	93
Tabela 15. Vetores considerados no subprocesso 4	93
Tabela 16. Resultados ensaios de compactação	103
Tabela 17. Resultados de RTF.....	105
Tabela 18. Resultados de deformação na ruptura, ϵ_b	107
Tabela 19. Resultados de MEF: 30 % e 40 % da RTF	110
Tabela 20. MRF inicial.....	112
Tabela 21. Comparativo MRF inicial x MEF.....	113
Tabela 22. Parâmetros dos modelos de fadiga de tensão	114
Tabela 23. Parâmetros dos modelos de fadiga de deformação.....	115
Tabela 24. Parâmetros dos modelos de fadiga de deformação normalizada.....	115
Tabela 25. Parâmetros dos modelos de fadiga de energia dissipada.....	117
Tabela 26. Parâmetros de entrada no <i>software Everestress</i>	122

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM: *American Society for Testing Materials*

AUSTROADS: *Association of Australasian Road Transport and Traffic Agencies*

BGS: Brita Graduada Simples

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

CBR: *California Bearing Ratio*

CIENTEC: Fundação de Ciência e Tecnologia

CP: Corpo de Prova

CV: Coeficiente de Variação

D_{máx}: Diâmetro Máximo Nominal

DAER: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

DC: Deformação Controlada

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

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

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

ε : Deformação de tração

EDE: *Energy Damage Exponent*

φ : Ângulo de fase

FCD: Fadiga por Compressão Diametral

FQP: Fadiga Quatro Pontos

GC: Grau de Compactação

$\gamma_{máx}$: Peso específico aparente seco máximo

IP: Índice de Plasticidade

IPR/DNIT: Instituto de Pesquisas Rodoviárias do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

JRA: *Japan Road Association*

JCI: *Japan Concrete Institute*

JSCE: *Japanese Society of Civil Engineers*

LAGEOTEC: Laboratório de Geotecnologia - UFRGS

LAMEF: Laboratório de Metalurgia Física - UFRGS

LAPAV: Laboratório de Pavimentação – UFRGS

LDE: *Load Damage Exponent*

LEME: Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais - UFRGS

LVDT: *Linear Variable Differential Transducer*

μ : Coeficiente de Poisson

MEF: Módulo Estático Flexural

MRD: Módulo de Resiliência por Compressão Diametral

MRF: Módulo de Resiliência Flexural

MTS: *Material Testing System*

N: Vida de fadiga

NBR: Norma Brasileira

NCHRP: National Cooperative Highway Research Program

PCA: *Portland Cement Association*

r: taxa de incremento de carga

RAP: *Reclaimed Asphalt Pavement*

RCD: Resistência à Tração por Compressão Diametral

RTF: Resistência à Tração na Flexão

RCS: Resistência à compressão Simples

S: Taxa de incremento de tensão

SAMDM: *South African Mechanistic Design Method*

SARA: *South African Roads Agency*

SDE: *Strain Damage Exponent*

σ_t : Tensão de tração na flexão

T: Temperatura

t: tempo

TC: Tensão Controlada

UR: Umidade Relativa

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

ω_{ot} : teor de umidade ótimo

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados o tema de pesquisa que originou a presente dissertação e sua relevância. Igualmente explicitam-se os objetivos que se visou alcançar e detalha-se a estrutura do documento.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA

O modal rodoviário, por ser o mais utilizado no Brasil, tem sido afetado pelo aumento das solicitações tanto de cargas quanto do número de repetições, reduzindo a vida útil da estrutura do pavimento. Desta forma, é preciso executar um maior número de reparações das estruturas existentes ou projetar novos pavimentos que tenham um melhor comportamento estrutural, para garantir um adequado nível de serventia.

No Brasil, os métodos tradicionais de restauração de pavimentos nem sempre têm o desempenho esperado, além de terem elevados custos e gerarem passivos ambientais. Situação similar acontece para novas estruturas, nas quais o dimensionamento dos pavimentos frequentemente resulta em elevadas espessuras de camadas asfálticas, o que aumenta o risco de ocorrência de deformações permanentes (afundamentos na trilha de roda, afundamentos plásticos, corrugação, escorregamento) ou rupturas por cisalhamento (notadamente os trincamentos que se originam na superfície, conhecidos como “*top-down cracking*”). É assim, que a tendência em países com destacada tecnologia em pavimentação é a inclusão de camadas artificialmente cimentadas em conjunto com revestimentos flexíveis, configurando pavimentos semirrígidos.

Desta forma, a reciclagem profunda de pavimentos com adição de cimento Portland torna-se uma alternativa atrativa em rodovias a serem restauradas estruturalmente, pois além de ser gerada uma camada de base rígida, a técnica visa o reaproveitamento de materiais, reduzindo custos e passivos ambientais, uma vez que o volume do resíduo fresado asfáltico gerado é consideravelmente elevado.

Estruturalmente, a inclusão de camadas cimentadas, com elevada rigidez, permite distribuir as cargas geradas pelo tráfego em áreas maiores o que, além de minimizar as deformações no topo

do subleito, contribui para a redução de espessura de camadas asfálticas, sem prejuízo para o desempenho do pavimento.

No entanto, devido à elevada rigidez da camada cimentada, a aplicação de uma carga vertical no pavimento gera tensões compressivas na metade superior da camada e tensões de tração horizontal na metade inferior da mesma. Assim, as tensões máximas de compressão se apresentam no topo podendo levar à fragmentação superficial, enquanto as máximas tensões de tração acontecem na fibra inferior da camada. Sob cargas repetidas estas últimas levam à fadiga da camada, gerando trincas que se propagam até a superfície, causando a ruptura. Assim, o estudo do fenômeno de fadiga é de fundamental importância, por ser um mecanismo de degradação predominante nos pavimentos com camadas cimentadas.

Contudo, relatos de estudos de fadiga considerando a inclusão de materiais provenientes de processos de reciclagem com cimento não são abundantes, mesmo que as teorias e os ensaios utilizados para estudar o fenômeno em camadas cimentadas possam, em princípio, ser adaptáveis. Desta forma, é preciso avaliar a influência da porcentagem de fresado asfáltico e do teor de cimento nas variáveis associadas à vida a fadiga, isto é, a resistência à tração, a deformação na ruptura, e a redução do módulo de resiliência. Assim, a definição de modelos de vida de fadiga e a sua utilização em conjunto com análises mecânicas, constituem etapas indispensáveis para o dimensionamento racional do pavimento.

Salienta-se que o presente estudo faz parte de um amplo projeto de pesquisa de reciclagem com cimento, que está sendo realizado no Laboratório de Pavimentação (LAPAV/UFRGS), em parceria com o Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME/UFRGS), contando com participação da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), de concessionárias de rodovias, empresas e produtoras de equipamentos para reciclagem.

Na etapa de moldagem e preparação dos corpos de prova contou-se com o apoio da Fundação de Ciência e Tecnologia, CIENTEC, do governo do Estado do Rio Grande do Sul. As etapas da pesquisa global são mostradas na Figura 1, destacando-se com linha contínua as realizadas no estudo realizado nesta dissertação.

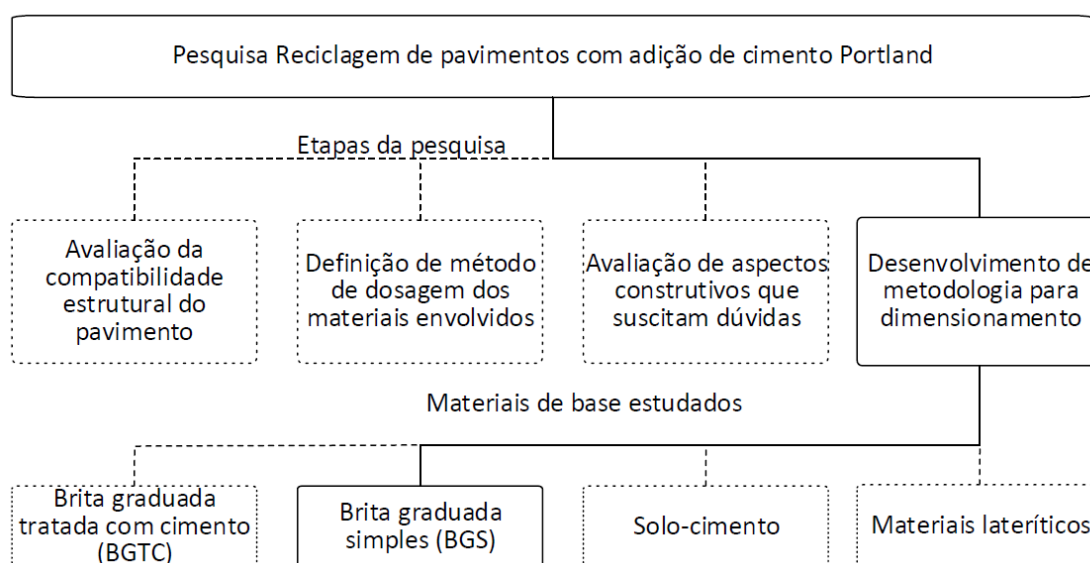


Figura 1. Fluxograma da pesquisa global com destaque deste estudo (adaptado de Fedrigo, 2015)

1.2 OBJETIVOS

É apresentado o objetivo geral e os objetivos específicos necessários para atingi-lo.

1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa foi desenvolvida com o objetivo geral de avaliar o comportamento à fadiga de diferentes misturas resultantes da reciclagem de pavimentos flexíveis (revestimento asfáltico e base de brita graduada) com adição de cimento, analisando este comportamento em função da porcentagem de fresado e do teor de cimento.

1.2.2 Objetivos específicos

Procurando se atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- caraterização física dos materiais de base e revestimento asfáltico empregados;
- definição de procedimentos e execução de ensaios mecânicos em vigas, de Resistência à Tração na Flexão (RTF) e de Fadiga Quatro Pontos (FQP);
- análise do comportamento flexural estático e dinâmico das misturas estudadas e os fatores que o afetam;
- análise mecanística de estruturas de pavimento flexível com inclusão de uma camada reciclada como base, avaliando a sua vida de fadiga em função das respostas estruturais

causadas por diferentes combinações de espessuras do revestimento asfáltico e da base reciclada;

- e) exploração de metodologias de análises de energia dissipada para verificar a sua aplicabilidade na definição de critérios de ruptura, considerando estágios de micro e microfissuração no ensaio de fadiga em viga quatro pontos;

1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Após ter-se apresentado o tema de pesquisa, sua relevância e os objetivos que se propôs alcançar, a dissertação é desenvolvida em mais cinco capítulos.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica, dividida em três partes: uma dirigida à reciclagem de pavimentos com adição de cimentos Portland e variáveis mais relevantes com relação ao dimensionamento; a segunda parte é dirigida à caracterização da fadiga em materiais cimentados: resistência à tração, vida de fadiga, MF e MR; enquanto que a terceira parte é focada nos métodos de dimensionamento de pavimentos com inclusão de camadas cimentadas.

No terceiro capítulo é apresentado o programa experimental desenvolvido, destacando-se os materiais, equipamentos e métodos de ensaio usados, dando-se ênfase ao desenvolvimento e parametrização do ensaio de fadiga.

O desenvolvimento de uma ferramenta para o processamento da informação gerada durante os ensaios de fadiga é relatada no capítulo 4 incluindo a descrição dos algoritmos desenvolvidos e o princípio de funcionamento da implementação dos mesmos.

Os resultados e análises realizadas estão apresentados no capítulo 5. Para finalizar, no capítulo 6 são feitas algumas considerações finais respeito da pesquisa, explicitando as conclusões a que se chegou e fazendo-se algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados assuntos relevantes ao desenvolvimento da pesquisa, divididos em quatro seções. Inicialmente é descrita a técnica de reciclagem a frio *in situ* com adição de cimento Portland indicando os seguintes tópicos: materiais, fatores de controle, comportamento mecânico da camada reciclada e a sua caracterização, normas técnicas nacionais; e vantagens e desvantagens da técnica.

Na segunda parte é feita uma aproximação ao fenômeno de fadiga para este tipo de material ressaltando-se as abordagens para seu estudo e os fatores de afetam a sua avaliação, o que indica o estudo pelo método de quatro pontos.

A seguir são descritos os métodos de dimensionamento, procurando abranger recomendações existentes e sinalando a vantagem da consideração de modelos de fadiga. Por fim, são descritos os ensaios de referência para o estudo: resistência à tração na flexão (RTF) e Fadiga Em Viga Quatro Pontos (FQP).

2.1 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

A reciclagem profunda de pavimentos a frio é uma técnica *in situ* de recuperação estrutural e funcional de pavimentos que permite a reutilização da estrutura do pavimento existente pela adição de um agente estabilizador. Diferentemente da reciclagem a quente, onde é limitada ao material asfáltico, a reciclagem a frio permite reaproveitar tanto camadas asfálticas, quanto camadas de base ou até sub-base (WIRTGEN, 2012).

A técnica consiste na fresagem e mistura na pista, das camadas ou qualquer combinação entre essas com adição de cimento Portland para produzir uma base estabilizada quimicamente. Embora não seja uma técnica nova, ainda não existe uma normatização da técnica no Brasil quanto a aspectos como dosagem e dimensionamento. Porém, o DNIT (2006) indica que a técnica pode ser utilizada em rodovias de baixo tráfego, acostamentos defeituosos de rodovias principais e na utilização do material reciclado como base estabilizada.

2.1.1 Materiais empregados

A utilização do material reciclado como base tem como constituintes o cimento Portland, o material fresado, água e, eventualmente, material adicional como é descrito na sequência:

2.1.1.1 Cimento

A hidratação do cimento produz materiais cimentados (como silicatos de cálcio hidratados ou aluminatos de cálcio hidratados) responsáveis pela geração de ligações entre as partículas, levando à modificação ou estabilização do material, dependendo do grau de cimentação e, conseqüentemente, do ganho de resistência obtido (PCA, 2010).

O teor de cimento a ser empregado é a variável fundamental dentro das técnicas de dosagem pois deve garantir requerimentos de resistência e de estabilidade volumétrica. Neste sentido, a possibilidade de presença de água na camada também pode determinar o teor de cimento a ser empregado dentro dos métodos de dosagem (FEDRIGO, 2015; KLEINERT, 2016).

2.1.1.2 Material reciclado

A mistura dos materiais provenientes da reciclagem deve atender a critérios de contaminação e granulometria que variam de acordo com a especificação empregada. A heterogeneidade em campo indica a necessidade de emprego de técnicas de amostragem e definição de subtrechos homogêneos. O percentual de fresado é limitado a 50% segundo as normas e guias de reciclagem (PCA, 2005; DNIT, 2013a). Neste sentido, KOLIAS (1996) indica que elevadas porcentagens de fresado tornam a mistura suscetível à mudança da temperatura assim como do tipo de carregamento. Adicionalmente, a presença do filme asfáltico produz uma redução do ângulo de atrito interno, aumenta o repique elástico durante o ensaio de compactação e confere ao fresado uma componente de deformação viscosa (DELLABIANCA, 2004).

No caso do concreto por exemplo, a inclusão de fresado ou RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) leva a formação de um filme fino na interface da argamassa do cimento e do agregado que pode retrasar a propagação de trincas como mostrado na Figura 2. Este fato resulta de especial interesse pois ao se desenvolver em torno do agregado, se denota maior dissipação de energia por causa da propagação da trinca, como indicado por SACHET (2012), além de desenvolver maior tenacidade e reduzir o comportamento frágil (HUANG; SHU e LI, 2005).

De forma análoga a *Austroroads* (“*Association of Australasian Road Transport and Traffic Agencies*” 2010) relata este comportamento no caso de materiais cimentados, virgens, sem RAP, sugerindo que esta zona de transição é o componente mais fraco das misturas, relacionando este comportamento com a granulometria das mesmas.

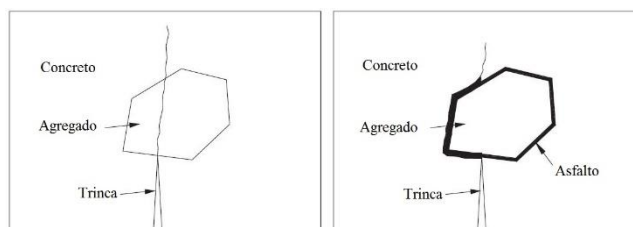


Figura 2. Propagação de trinca no (a) concreto simples e (b) no concreto com RAP (baseado em: HUANG; SHU e LI, 2005)

2.1.1.3 Água

A PCA (2010) indica que a água tem dois propósitos: movimentação dos agregados o que permite atingir maiores níveis de compactação, e a hidratação necessária do cimento. A água utilizada deve ser em quantidades que permitam obter a maior massa específica aparente, como detalhado no item 2.1.2.2, além de assegurar a adequada hidratação do cimento. Aliás, para garantir o adequado processo de hidratação deve-se garantir a não contaminação da água, sendo um fato enfatizado (DER, 2005; DNIT, 2013a; PCA, 2007).

2.1.1.4 Modificação mecânica

As características granulométricas ou de plasticidade da camada de base existente, assim como a disponibilidade de materiais no projeto podem levar à necessidade da modificação mecânica pela adição de um material externo adequado que cumpra requisitos de desgaste, contaminação, índices de forma e durabilidade (DER, 2005).

2.1.2 Fatores de controle da base reciclada com cimento

O comportamento da base reciclada é definido como predominantemente não coesivo pelo incremento de rigidez devido ao cimento (PAIVA; OLIVEIRA, 2014). Já em campo, o desempenho da mistura é avaliada a partir da estabilidade granulométrica e dos parâmetros de compactação, tendo em conta que o controle da umidade também é usado para fins de avaliação da estabilidade volumétrica.

2.1.2.1 Granulometria

A utilização de faixas é o método empregado para controlar a estabilidade granulométrica da mistura. Tais faixas dependem da metodologia empregada, e é um dos critérios que determinam as misturas dentro das técnicas de dosagem (FEDRIGO, 2015; KLEINERT, 2016). No caso do material fresado, a Wirtgen (2012) indica que os fatores que influenciam a granulometria são determinados pela condição do asfalto *in situ* e pela operação de fresagem: composição e uniformidade do material asfáltico existente, temperatura, profundidade de fresagem, velocidade de avanço da fresadora e sentido de corte. Neste sentido, o controle da operação de reciclagem se torna determinante na granulometria da mistura.

2.1.2.2 Compactação

Os métodos de dosagens pesquisados (DER, 2005; DNIT, 2013a; PCA, 2007; WIRTGEN, 2012) empregam métodos normalizados para compactação de misturas de solo-cimento para a determinação dos parâmetros de moldagem. Assim, a partir do incremento do grau de compactação se procura um maior incremento de resistência para o mesmo teor de cimento (PCA, 2010), desta maneira os parâmetros de compactação são determinantes da resistência do material

Usualmente, os procedimentos de compactação empregam a mesma energia de compactação do que o preconizado pelo protocolo de Proctor normal (PCA, 2010) para determinar a quantidade ótima de água que garante o maior grau de compactação para determinado teor de cimento. Assim, se a mistura está abaixo daquele teor de água, a lubrificação insuficiente não permite gerar uma formação mais densa, enquanto que para teores elevados, o excesso de água leva à separação das partículas.

A PCA (2010) adverte que tanto a quantidade de água quanto a de cimento a ser empregada na compactação é função das características granulométricas das misturas assim como das resistências de projeto. Quando se trata de uma mistura fina, por exemplo, é preciso de mais cimento e água devido ao incremento da superfície específica das partículas mais finas.

Aspectos executivos como a densificação, causada pelo aumento da energia de compactação também influencia as propriedades mecânicas da mistura. A PCA (2007) indica que durante muitos anos foi empregada a energia Proctor Normal, mesmo que os graus de compactação em campo eram usualmente 100 % ou maiores para este tipo de energia. Assim, atualmente tem-se mostrado que a energia de compactação pode ter o mesmo efeito do que o cimento quanto ao

incremento de resistência (FEDRIGO, 2015), como produto do aumento dos contatos na matriz da mistura pela redução da porosidade. Neste sentido, a norma mais recente de reciclagem no Brasil tem preconizado a utilização do 98 % da energia Modificada (DNIT, 2013a).

2.1.2.3 Tempo de Cura

O efeito do tempo de cura no ganho de resistência, causado pela adição do cimento, é um fato reconhecido. No entanto, a PCA (2007) relata experiências nos Estados Unidos, onde a abertura ao tráfego em estágios iniciais de cura foi uma das causas atribuídas ao bom desempenho de trincamento das camadas recicladas. Neste sentido, técnicas como “*microcracking*” ou microfissuração, induzida por compactação (após um ou dois dias da construção para reduzir a reflexão de trincas), são técnicas em desenvolvimento ainda. Contudo, ainda não existem critérios que permitam avaliar estes efeitos, sendo que tempos de cura de 7 e 28 dias são os mais preconizados como padrões de execução e desempenho, respectivamente. Já a abertura ao tráfego depende da especificação empregada.

2.1.3 Comportamento mecânico de camadas cimentadas

A técnica de reciclagem profunda de pavimentos a frio considera a utilização de diferentes tipos de agentes estabilizadores dependendo das propriedades mecânicas que desejam ser melhoradas. A Wirtgen (2012) indica que a principal função do cimento Portland consiste no incremento da resistência à tração e à compressão do material tornando a base reciclada menos dependente do estado de tensões, sendo esta a principal característica deste tipo de materiais.

Ao se comportar como uma camada cimentada, conforme Aranha (2013), as mudanças estruturais e funcionais ao longo prazo de um pavimento flexível com inclusão de uma base reciclada são determinadas por processos de fragmentação superficial, reflexão de trincas (devidas à retração por secagem e ao trincamento por fadiga), além de deformação permanente como descrito pelo SARA “*South African Roads Agency*” (2013), como mostrado na Figura 3.

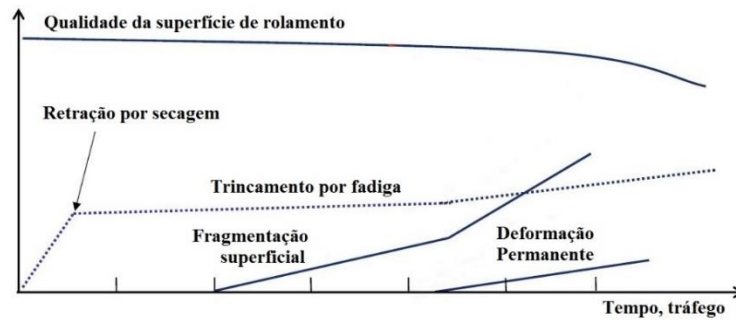


Figura 3. Mudanças a longo prazo de indicadores funcionais e estruturais de pavimentos flexíveis com base cimentada (baseado em: SARA, 2013)

A fragmentação superficial ocorre na parte superior da camada estabilizada com cimento quando ultrapassada a resistência à compressão do material. A Wirtgen (2012) relata que o potencial de geração deste tipo de fratura é função da resistência à compressão da camada, da espessura e da pressão dos pneus.

Como mostrado na Figura 3, a reflexão de trincas acontece no estágio inicial de funcionamento, atribuído ao fenômeno de retração inerente à estabilização com cimento. A longo prazo, associa-se ao processo de fadiga, como função das cargas repetidas do tráfego, o qual é determinante quanto às mudanças estruturais e funcionais da camada.

Um estado avançado de dano pode levar à camada a se comportar como um material granular, uma extensão do dano de fadiga, como será detalhado no item 2.2.1. Entretanto, a deformação permanente pode acontecer em qualquer estágio, sendo causada pela combinação dos outros mecanismos de fratura.

Contudo, os dois mecanismos de falha recomendados dentro do projeto de dimensionamento, como mostrado na Figura 4, são a fragmentação superficial e a fadiga (WIRTGEN, 2012), sendo que as características mecânicas devem abordar tais solicitações.

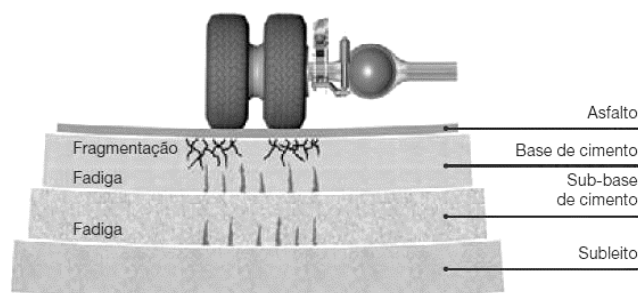


Figura 4. Mecanismos de falha das camadas cimentadas (baseado em: WIRTGEN, 2012)

2.1.4 Caracterização mecânica das misturas recicladas com cimento

Os métodos de dosagem de misturas empregam dois tipos de ensaios de caracterização mecânica das misturas procurando atender os seguintes mecanismos de ruptura: resistência à tração e à compressão, os quais são relatados na sequência.

2.1.4.1 Resistência à compressão

O incremento de resistência da mistura reciclada é avaliado principalmente pela resistência à compressão, avaliada pelo ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS) aos 7 dias como critério de controle mais estendido. Dependendo do método empregado, são definidas as faixas mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Valores típicos de RCS aos 7 dias de cura

Autor	Resistência à compressão simples (MPa)	
	Min	Máx.
PCA (2005, 2007, 2010)	1,0 (2,1, típico)	4,1 (2,8, típico)
DER (2005)	3,5	8,0
DNIT (2013a)	2,1	2,5
JRA (1987)	2,5	3,0

Pelo fato de ser um critério generalizado, a *Austroads* (2002) tem definido níveis de cimentação em função da resistência à compressão da mistura, ampliando-o em função do comportamento resiliente, conforme apresentado na Tabela 2. Vorobieff e Wilmot (2001) relatam que a falta de informações leva ao uso de relações conservadoras, entretanto, indicam que as maiores dificuldades são a sua representatividade e a adoção de um Módulo de Resiliência, Flexural, (MRF) constante, especialmente para camadas espessas.

Tabela 2. Valores recomendados de RCS e MRF para camadas cimentadas, 28 dias de cura (AUSTROADS, 2002)

Nível de cimentação do material	Resistência à compressão simples (MPa)	Módulo de resiliência para dimensionamento (MPa)
Modificado	< 1,0	≤ 1 000
Levemente cimentado	1,0 – 4,0	1 500 – 3 000
Fortemente cimentado	> 4,0	≥ 5 000

A adoção de um valor mínimo de RCS busca assegurar o adequado suporte ao tráfego estimado, assim como reduzir o risco de ruptura por fragmentação superficial. Já o emprego de um valor superior busca restringir a reflexão de trincas por retração e fadiga, além de reduzir a susceptibilidade à presença de água, responsável por mudanças volumétricas. Contudo, a razão principal de limitar a resistência é evitar que a mistura se torne quebradiça, além de reduzir o fenômeno de reflexão de trincas (PCA, 2005).

2.1.4.2 Resistência à flexão

A inclusão de uma base reciclada leva ao incremento de rigidez do pavimento apresentando o comportamento de um pavimento semirrígido. Desta forma, a base trabalha sob compressão no topo enquanto na base é submetida a tensões de flexão (SEVERI 1999 et al, *apud* ARANHA, 2013). Nacionalmente, avalia-se a resistência à tração através do ensaio de Resistência à Compressão Diametral (RCD), conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3. Valores recomendados de RCD aos 7 dias de cura

Autor	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	
	Min	Máx.
WIRTGEN (2012)	0,25	--
DNIT (2013a)	0,25	0,35

Adicionalmente, a RCD permite avaliar questões de durabilidade relacionadas com efeitos potencialmente destrutivos da carbonatação, especialmente em materiais de baixa qualidade com baixos teores de cimento. A Wirtgen (2012) recomenda o valor mínimo de 0,25 MPa para garantir a não desintegração da mistura pelas mudanças volumétricas decorrentes do processo.

2.1.5 Normas técnicas nacionais de reciclagem

Como relatado por Fedrigo (2015), as especificações de serviço da técnica de reciclagem *in situ* com adição de cimento tem sido desenvolvidas pelos Departamento de Estradas de Rodagem, dos estados de Paraná e São Paulo, e pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) como segue.

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

2.1.6 Vantagens e desvantagens da técnica

São descritos os fatores que propiciam e limitam o emprego da técnica desde o ponto de vista econômico, ambiental e técnico.

2.1.6.1 Vantagens

A redução de materiais virgens reduz drasticamente os custos energéticos relacionados com a produção e transporte dos mesmos, além do prolongamento do tempo de exploração das ocorrências existentes. Da mesma forma, são reduzidos os passivos ambientais associados ao descarte dos resíduos gerados. Tais fatores também permitem a redução de custos que em alguns casos chegam ao 50 %, como indicado pela PCA (2007).

Em decorrência do desenvolvimento e padronização de máquinas recicladoras, e dos procedimentos executivos, a técnica garante uma adequada homogeneidade da nova camada mesmo para camadas de maiores espessuras, além da redução dos tempos de construção.

Com relação ao uso de cimento, tem-se uma maior disponibilidade em comparação com outros agentes estabilizantes além de seu amplo uso, evidenciada na disponibilidade de normas.

Por fim, o Manual de restauração de pavimentos asfálticos do DNIT (2006) relata outras vantagens da técnica, como prevenção de problemas relacionados com altura livre em túneis, passagens inferiores, acréscimos de cargas em pontes e viadutos causados por recapamentos sucessivos com relação ao ciclo de vida de outras soluções.

2.1.6.2 Desvantagens

A Wirtgen (2012) indica três principais desvantagens relacionadas com a técnica: geração de trincas por retração, aumento da rigidez em pavimentos flexíveis, e necessidade de proteção do tráfego imediato. Contudo, a primeira é inerente à técnica e existem métodos para reduzir os

seus efeitos. A segunda depende do dimensionamento, devendo ser verificada no projeto. Já a terceira, como comentado, tem sido abordada por técnicas recentes.

O DNIT (2006) relata desvantagens da técnica, relacionadas com reparos frequentes dos equipamentos, interrupção do tráfego, tempo de cura, controle de qualidade e suscetibilidade às condições climáticas, sendo principalmente associados à execução.

Segundo Paiva e Oliveira (2014), a variabilidade de espessuras e materiais das camadas da estrutura a recuperar reflete na heterogeneidade do material reciclado, o que constitui em um grande desafio a reprodução em campo dos parâmetros estabelecidos no projeto de dimensionamento.

2.2 FADIGA EM MATERIAIS CIMENTADOS

Como relatado, o fenômeno de fadiga é um dos principais processos que determina a longo prazo de pavimentos flexíveis com inclusão de bases cimentadas e constitui um dos mecanismos de falha que limita o dimensionamento deste tipo de estrutura. Desta forma, o estudo da degradação causada pelo fenômeno de fadiga é importante para finalidades de projeto.

2.2.1 Fenômeno de fadiga

O fenômeno de fadiga é considerado um processo de deterioração estrutural que um material sofre quando submetido a um estado de tensões e deformações repetidas. Neste sentido, as mudanças estruturais dos materiais cimentados associadas à fadiga são resultado do surgimento e propagação de trincas que são consideradas como mecanismo primário de ruptura de pavimentos com camadas de materiais cimentados (BEHAK, 2013).

É sabido que os materiais de pavimentação não apresentam comportamento puramente elástico, pois acumulam deformações plásticas após cada ciclo de carregamento. A resiliência, definida como a capacidade de um corpo carregado elasticamente de dissipar a energia armazenada, ou potencial, quando cessar o carregamento é a propriedade que determina este comportamento (BRITO, 2006). Desta forma, é possível avaliar o processo de degradação por fadiga em função da redução desta propriedade.

As propriedades de deformabilidade dos materiais de pavimentação são fundamentais para o dimensionamento de pavimentos, sendo avaliada por meio do Módulo de Resiliência, MR,

obtido sob cargas repetidas sendo análogo ao módulo de elasticidade, obtido para carregamentos estáticos. O fenômeno é mostrado na Figura 5, onde se tem que para uma tensão de ensaio constante, a resposta do material varia em função do número de ciclos (BEHAK, 2013). A resposta, em termos de deformação para cada ciclo, corresponde à soma das parcelas recuperável (resiliente, ϵ_r), e plástica (ϵ_p), sendo que esta última pelo fato de se acumular durante o ensaio é a responsável da deformação não recuperável.

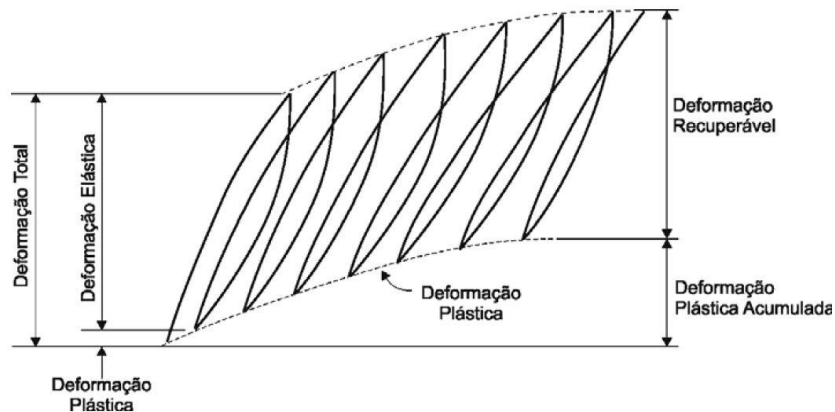


Figura 5. Deformações sob cargas repetidas (HUANG, 1993 *apud* BEHAK, 2013)

A deformação total tende a se estabilizar após um determinado número de ciclos de carga, mas é importante indicar que a deformação permanente, ou plástica, não deve ser confundida com a produzida pelo fenômeno de fadiga. Pois, como comentado, esta é devida à resiliência do material; enquanto que a deformação permanente pode ocorrer quando aplicadas apenas tensões de compressão ou de tração originando deformações irreversíveis que podem ocultar o fenômeno de fadiga (COLPO, 2014). Como mostrado na Figura 6 (a), a deformação permanente não afeta a capacidade de dissipação de energia de um ciclo para outro, enquanto que a fadiga sim, como evidencia o acréscimo da deformação resiliente na Figura 6 (b).

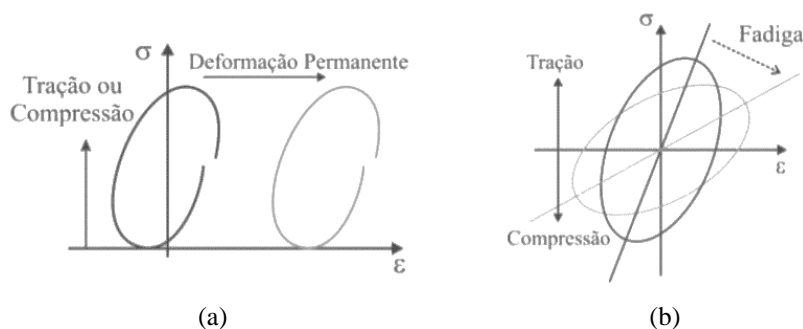


Figura 6. Fenômeno de (a) deformação permanente e (b) fadiga (baseado em: Di Benedetto *et al*, 2004)

Os ensaios de fadiga consistem basicamente na aplicação de um número N de ciclos de carregamento até levar à ruptura, ou até ocorrer uma redução da capacidade resiliente S (em termos de deformação, energia dissipada ou MR) de um conjunto de amostras. Desta forma, as curvas clássicas “ $S \times N$ ”, como ilustrado na Figura 7, são representações gráficas que numa escala logarítmica (ou semi-log) permitem definir a relação do incremento do número de ciclos como função da redução das solicitações consideradas (neste caso deformações iniciais, para dois materiais diferentes). Estas relações são empregadas na definição dos modelos de vida de fadiga como examinado no item 2.2.4.3.

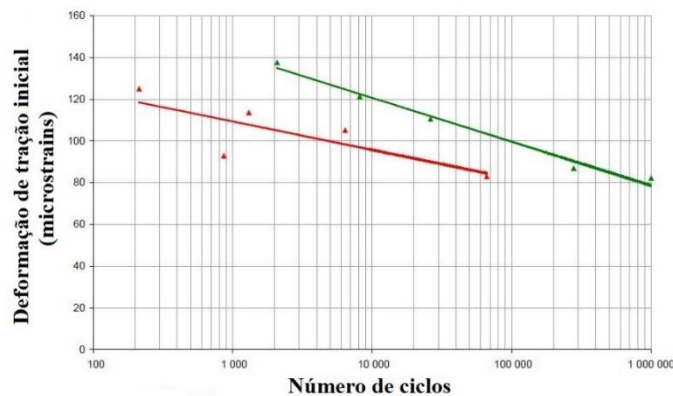


Figura 7. Exemplo de curvas de fadiga em função da deformação de tração inicial para dois materiais (baseado em Austroads, 2012)

A abordagem tradicional considera as análises a partir da tensão de tração inicial e da deformação inicial, avaliando a degradação como função do MR. Aliás, tem-se abordagens em função da energia dissipada inicial.

2.2.2 Abordagem tradicional

A abordagem tradicional do fenômeno de fadiga emprega a tensão de tração na flexão aplicada σ_t e a parcela recuperável da deformação, ε_r , para a definição dos modelos. Adicionalmente emprega-se o módulo de resiliência (Equação 1), para avaliação da degradação. A utilização generalizada do MR é devido ao fato de se poder avaliar para todos os tipos de materiais de uso em pavimentação, dos coesivos aos estabilizados (BRITO, 2006).

$$\text{MR} = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_r} \quad \text{Equação 1}$$

Onde MR é o Módulo de resiliência, σ_t é a tensão de tração aplicada, e ε_r corresponde à parcela de deformação resiliente.

Entretanto, o valor do MR depende do método empregado, sendo influenciado por condições de carregamento e limites de contorno, como mostrado no item 2.2.4. Porém, de forma geral é aceita a existência de três fases de mudança da resposta resiliente a longo prazo como função do tráfego, conforme a Figura 8.

- a) Pré-trincamento (*pre-cracked phase*).
- b) Vida de fadiga efetiva (*post-cracked phase*)
- c) Fase granular equivalente (*equivalent granular phase*)

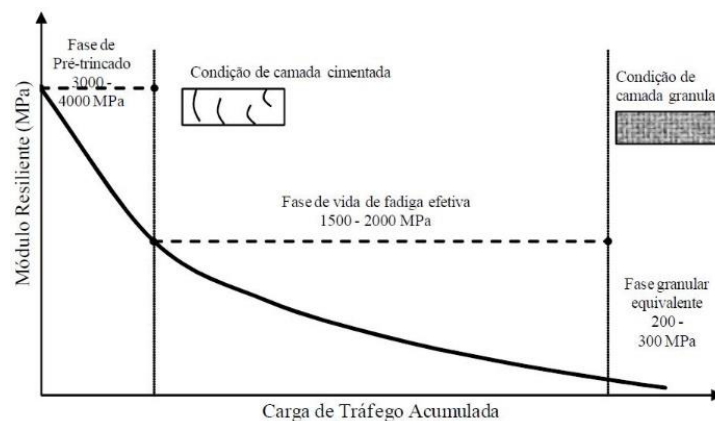


Figura 8. Resposta elástica de camadas cimentadas a longo prazo: MR em função do tráfego (THEYSE *et al*, 1996 *apud* BEHAK, 2013)

Na fase de pré-trincamento a camada atua como uma placa espessa, com deflexões elásticas desconsideráveis se traduzindo em MR altos, que sob carga de tráfego diminuem rapidamente até chegar numa condição de camada cimentada. Neste estágio ocorre um comportamento que obedece os mecanismos de degradação considerados pelos modelos de fadiga.

Quando atinge um estágio de degradação avançado, isto é, a vida de fadiga, considera-se um comportamento granular que pode ser suscetível a processos de deformação permanente causadas por tensões cisalhantes. Contudo, o comportamento não é exatamente o mesmo que o de uma camada granular, pois as trincas geralmente não são visíveis (SARA, 2013).

Em geral, os modelos de fadiga seguem os modelos descritos na Equação 2, em função da deformação de tração inicial ε_i ou da tensão inicial σ_i (Equação 3), como parâmetros fundamentais para a determinação da ruptura do corpo de prova pela aplicação de N ciclos.

$$N_1 = a_1 * \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^b \quad \text{Equação 2}$$

$$N = c * \left(\frac{1}{\sigma_i}\right)^d \quad \text{Equação 3}$$

Os valores de a_1 , b , c e d são constantes de regressão, sendo que os expoentes são denominados $b = \text{SDE}$ (*Strain Damage Exponent*) e $d = \text{LDE}$ (*Load Damage Exponent*).

De forma geral, tem-se indicado que as relações baseadas na deformação estimam melhor a vida de fadiga de materiais cimentados do que as baseadas nas tensões (AUSTROADS, 2010). Desta forma, tem-se incluído, na Equação 2, o valor da deformação de tração na ruptura ε_b obtido a partir do ensaio de RTF (Equação 4), onde a_2 é uma constante de regressão do modelo.

$$N_2 = a_2 * \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_b}\right)^b \quad \text{Equação 4}$$

A inclusão da deformação na ruptura, valor constante para cada mistura, resulta útil nas análises de sensibilidade da ruptura por fadiga em torno de ε_b . Assim, para diferentes valores de ε_b tem-se diferentes modelos do tipo $N = f(\varepsilon_b)$. Isto é, matematicamente a Equação 2 e a Equação 4 estão relacionadas da forma descrita pela Equação 5, que representa uma família de curvas de fadiga em função de ε_b :

$$N[f(\varepsilon_b)] = N * \frac{a_2}{a_1} * \varepsilon_b^b \quad \text{Equação 5}$$

Dentro da prática australiana tem-se definido modelos que consideram a resposta resiliente do material como função do módulo de resiliência, sem ter conseguido representar de forma consistente o seu efeito. Contudo, o uso de relações como a mostrada pela Equação 2 é a mais aceita tanto na Austrália quanto na África do Sul. Relações baseadas em tensões, do tipo semi-logarítmico têm sido abordadas nos Estados Unidos e na França (AUSTROADS, 2010).

Salienta-se que o fato de utilizar modelos de fadiga do tipo exponencial obedece à invariância de escala para curvas deste tipo. Esta propriedade permite que a modelagem tenha um coeficiente de dano constante, e de forma equivalente seja útil na adoção de um fator laboratório-campo “*shift-factor*” (SF). Assim, para uma curva $f(\varepsilon_i) = a * \varepsilon_i^b$, por exemplo, esta propriedade de invariância de escala é mostrada na Equação 6.

$$f(c * \varepsilon_i) = a * (c * \varepsilon_i)^b = a * c^b * \varepsilon_i^b c^b * f(\varepsilon_i) = SF * f(\varepsilon_i) \quad \text{Equação 6}$$

2.2.3 Abordagem por energia dissipada

Em anos recentes, têm sido empregados conceitos de energia dissipada como aproximação à predição da vida de fadiga de concretos asfálticos e concretos de cimento Portland. Como qualquer processo de transferência de energia, têm-se perdas derivadas em calor e vibração. Contudo, os métodos assumem que toda a energia se transforma em dano do material, pelo qual o número de ciclos necessários para levar à ruptura está relacionado com a quantidade de energia dissipada durante o ensaio (XIAO, 2006).

A energia armazenada num material durante um carregamento corresponde à área abaixo da curva tensão-deformação, isto é, o trabalho aplicado no elemento. Como comentado, quando descarregado, nem toda a energia é recuperada e o diagrama de carga-descarga não coincide (Figura 5). A curva formada pela não coincidência entre os dois diagramas forma uma curva histerética como a mostrada na Figura 6, cuja área corresponde à energia dissipada durante o ciclo (DANIEL e BISIRRI, 2005).

Analogamente aos modelos tradicionais, as relações de fadiga baseadas em energia são função da energia dissipada (DE , *Dissipated energy*) no início do ensaio. Da mesma forma, “ e ” e “ DEE ”, *Dissipated Energy Exponent* são constantes de regressão.

$$N = e * \left(\frac{1}{DE_i} \right)^{DEE} \quad \text{Equação 7}$$

WU *et al* (2014) salientam que a partir da tensão σ e deformação ε , e a defasagem entre estes dois ciclos, isto é, o ângulo de fase (φ), também pode-se calcular a energia dissipada de cada ciclo N , segundo a Equação 8. No entanto, o laço histerético é o usualmente mais empregado.

$$DE_N = \pi * \varepsilon_N * \sigma_N * \sin \varphi_N \quad \text{Equação 8}$$

Shen e Lu (2010) abordam a relação de energia (ER, “*energy ratio*”), para avaliação de diferentes estágio de degradação de misturas asfálticas, seguindo a Equação 9, onde DE_0 e DE_N são a energia dissipada no início do ensaio e no ciclo N .

$$ER_N = N * \frac{DE_0}{DE_N} \quad \text{Equação 9}$$

Este conceito é abordado por Behak, (2013), que indica que o máximo valor de ER é relacionado com o estágio de microfissuração do corpo de prova.

WU *et al* (2014) empregaram o conceito de taxa de mudança de energia dissipada entre o ciclo *a* e o ciclo *b* (RDEC, *Ratio of Dissipated Energy Change*), para caracterização da fadiga de uma misturas asfáltica (Equação 10). Uma curva típica de RDEC x Número de ciclos é mostrada na Figura 9 (a).

$$RDEC_a = \frac{DE_b - DE_a}{DE_a * (b - a)} \quad \text{Equação 10}$$

Este conceito também tem sido empregado para o estudo de concreto de cimento Portland por Daniel e Bisirri (2005) cujo resultado também apresenta esse comportamento, como mostrado na Figura 9 (b). Os autores indicam três estágios de degradação: na etapa inicial (I) o dano se acumula rapidamente no material e o valor da RDEC cai rapidamente após os primeiros ciclos; no segundo estágio (II) se apresenta um dano constante onde um consistente nível de energia é convertida em dano. Esta segunda região é chamada região “plateau” caracterizada pela existência de um “plateau value”, que no caso de materiais asfálticos, por exemplo, tende a coincidir com a redução da rigidez em 50 % (N_{f50}) e tem sido empregado para caracterizar a vida de fadiga da mistura. Já o terceiro estágio corresponde ao ponto onde a RDEC desvia-se do PV, isto é, uma maior quantidade de energia tem-se transformado em dano, se evidenciando na microfissuração e ruptura do corpo de prova (WU *et al*, 2014).

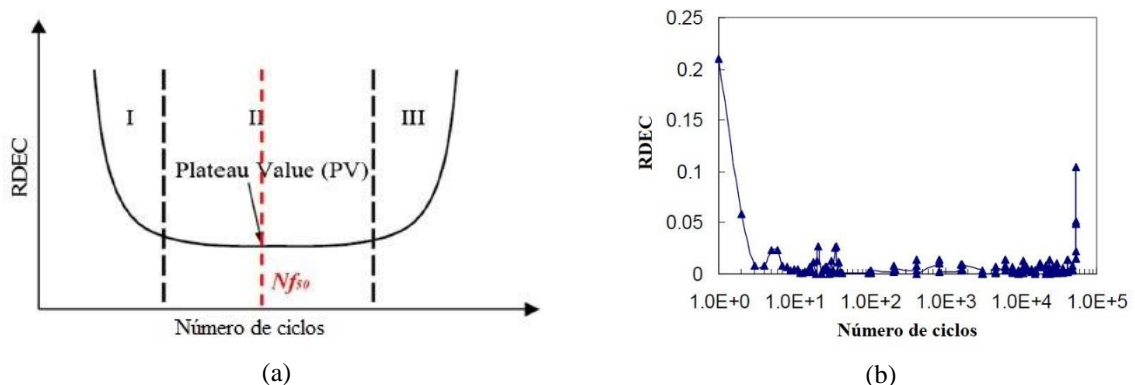


Figura 9. RDEC em função do número de ciclos: (a) curva típica para misturas asfálticas (baseado em WU; HUANG; e SHU, 2014), (b) curva para concreto de cimento Portland (baseado em DANIEL; BISIRRI, 2005)

Por fim, os autores concluem que este tipo de abordagem pode ser empregada em concreto de cimento Portland enfatizando a concordância com as abordagens tradicionais além de indicar o potencial de seu desenvolvimento.

2.2.4 Fatores que afetam o desempenho à fadiga de misturas cimentadas

Os fatores que determinam o comportamento laboratorial de vida de fadiga dos materiais cimentados são as características geométricas, forma de carregamento e tipo de pulso, descritos na sequência.

2.2.4.1 Estado de carregamento

Disfani *et al* (2014) realizaram um estudo de fadiga visando a utilização de tijolos reciclados como material suplementar em misturas contendo concreto reciclado. Os autores indicam métodos que podem ser empregados para estudo de materiais estabilizados com cimento: compressão uniaxial, tração direta, tração indireta e tração na flexão, como mostrado na Figura 10. No entanto, advertem que o ensaio por compressão uniaxial não representa de forma adequada as características de fadiga deste tipo de material. Os autores relatam que ensaios de tração indireta e tração na flexão têm sido empregados em estudos anteriores, mas advertem sobre a falta de normatização. Este fato tem propiciado o foco em métodos de tração indireta e tração na flexão, especialmente no caso australiano.

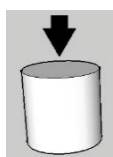
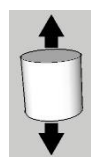
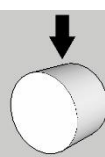
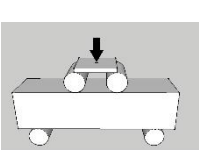
Tipo de carregamento	Compressão uniaxial	Tração direta	Tração indireta	Tração na flexão
Estado de tensões				

Figura 10. Características geométricas de ensaios de fadiga empregados em materiais cimentados
(baseado em: Di Benedetto *et al*, 2004)

A falta de padronização tem sido anotada por Casmer (2011), que indica a tendência internacional na utilização de ensaios de tração na flexão, salientando a existência de protocolos para RTF usando este tipo de configuração, pelo emprego de Módulos de Resiliência na Flexão (MRF). O protocolo 789 da NCHRP (2014), recomenda o desenvolvimento de modelos de fadiga a partir de ensaios de tração na flexão.

2.2.4.2 Controle do carregamento

Os ensaios de fadiga podem ser sob tensão controlada (TC) ou deformação controlada (DC). Nos ensaios sob TC a carga é mantida constante e as deformações aumentam no decorrer do ensaio. No caso dos ensaios sob DC são aplicadas cargas que produzam uma deformação constante ao longo do ensaio, levando à redução das cargas aplicadas (PINTO, 1991). Contudo, o incremento da energia dissipada ao longo do ensaio como mostrado na Figura 11, faz com que os ensaios do tipo TC sejam mais agressivos.

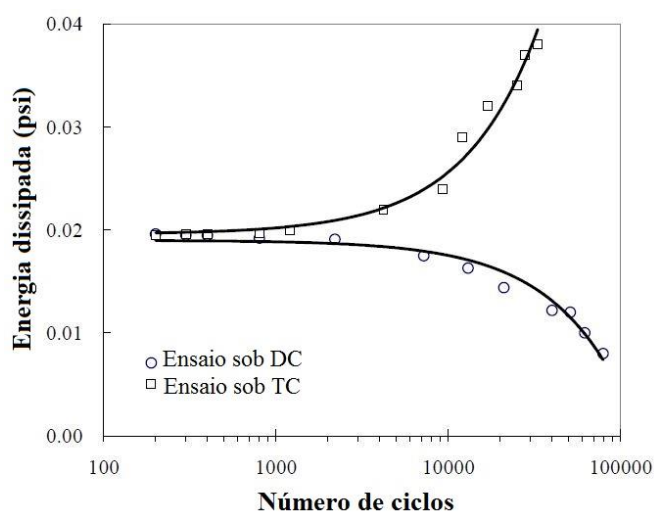


Figura 11. Energia dissipada em função do modo de carregamento (baseado em XIAO, 2006)

Segundo Monismith e Deacon (1969 *apud* PINTO, 1991), os ensaios sob DC se aplicam melhor para camadas fracas em relação ao seu suporte, pois o revestimento contribui com uma pequena rigidez à estrutura, pelo qual a deformação do conjunto é controlada pela deformação das camadas subjacentes. Contudo, o autor indica que o comportamento sob DC ou TC dependerá da espessura e do módulo do revestimento e da estrutura subjacente. De tal forma, como apresentado no item 2.1.3, ao ser dependente da degradação da camada de base reciclada, o emprego de ensaios sob TC nos ensaios de fadiga resulta mais representativo do desempenho de pavimentos flexíveis com inclusão de este tipo de materiais, como evidenciado nos procedimentos pesquisados.

2.2.4.3 Tipo de pulso

A simulação do pulso de carga é função do ponto de análise e da velocidade do veículo. Assim, quando uma carga está distante do ponto de análise a carga é nula, e vai-se incrementando conforme vai-se aproximando. Neste sentido, pulsos do tipo semi-seno-verso (*haversine*) ou até

triangulares aproximam-se a esta condição. A Equação 11 determina um pulso do tipo semi-seno-verso, como função do parâmetro φ , que representa o tempo de aplicação, como mostrado na Figura 12.

$$\sigma_{ssv} = \frac{1}{2} * (1 - \cos \varphi) \quad \text{Equação 11}$$

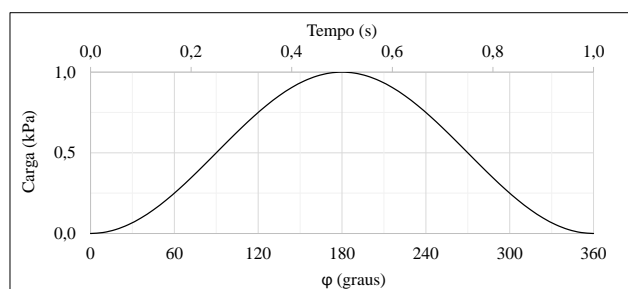


Figura 12. Pulso semi-seno-verso (1 Hz)

Salienta-se que tem-se um uso estendido de outros tipos de ciclo para caracterização de comportamento à fadiga, especialmente senoidais, como no caso de misturas asfálticas, pela necessidade do controle da deformação. Assim, os protocolos pesquisados de ensaio de fadiga por tração na flexão (AUSTROADS, 2008, 2010, 2012) empregam pulsos de tipo semi-seno-verso.

Kolias (1996), estudou o efeito do tipo de carregamento no módulo de elasticidade flexural de misturas recicladas estabilizadas com cimento em corpos de prova prismáticos. No caso de carregamentos dinâmicos (sinusoidais, de 1 Hz e 16 Hz de frequência), o autor conclui que a influência no valor dos módulos pode ser importante para temperaturas acima dos 30°C, e misturas com mais de 50 % de fresado. Aliás, na experiência brasileira recente no estudo de misturas recicladas (PAIVA e OLIVEIRA, 2014) tem-se usado frequências de 5 Hz.

Por outro lado, a redução do tempo de descanso do ensaio de fadiga obedece ao princípio de ocasionar uma degradação acelerada do material estudado. Assim, no caso de ensaios sob tração na flexão, os protocolos pesquisados definem dois tempos de descanso: 0,75 s para 0,25 s, o primeiro para o ensaio de MRF, que é usado para caracterizar a resiliência sem comprometer a estrutura da mistura; e o segundo, usado para a fadiga. Tais critérios laboratoriais variam em função da configuração do ensaio, do tipo de mistura além dos níveis de tensão e do consumo de tempo.

2.2.5 Configuração do ensaio quatro pontos

Como indicado, os tipos de ensaio de fadiga em misturas cimentadas mais estendidos são os de tração indireta e tração na flexão, até mesmo no Brasil. A respeito do tipo de configuração quatro pontos, tem-se experiência nacional no desenvolvimento de equipamentos e procedimentos para estudo de misturas de solo-cimento (CERATTI, 1991).

O ensaio consiste em submeter um corpo de prova em formato prismático bi-apoiado a cargas localizadas no terço médio do vão, conforme mostrado na Figura 13, originando um estado de tração uniforme nessa região, zona onde o momento fletor constante e as tensões cisalhantes são nulas, fato que reduz a variação dos resultados.

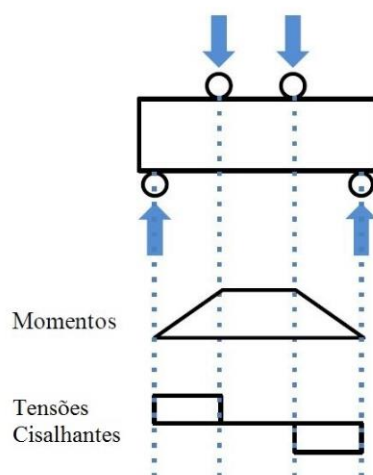


Figura 13. Tensões e momentos da configuração quatro pontos (SALVADOR, 2013)

2.3 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS COM CAMADAS RECICLADAS

Os métodos de projeto de pavimento para recuperação estrutural podem ser abordados de forma empírica ou analítica. Métodos empíricos estão fundamentados em ensaios de laboratório correlacionados com abordagens teóricas, como aqueles baseados no ensaio CBR (método do DNER), no ensaio de penetrômetro dinâmico de cone (deficiências existentes), em coeficientes estruturais (método AASHTO, 1993), ou em catálogos de pavimentos (estruturas típicas). Já os métodos analíticos baseiam-se em considerações teóricas sobre a resposta estrutural do pavimento, conhecidas como funções de transferência.

Contudo, como regra geral os pavimentos com trânsito mais pesado ($> 10^7$ eixos padrão) devem ser projetados com uso de uma abordagem analítica (WIRTGEN, 2012). Por este motivo, métodos empíricos são empregados para níveis baixos de trânsito, ou como aproximação ao projeto.

A respeito, nos Estados Unidos por exemplo, recentemente existe interesse no desenvolvimento de métodos mecanísticos para abranger mais categorias, incluindo vias de baixo tráfego (JONES, LOUW, WU, 2016). Entretanto, no estudo, focado na reciclagem de pavimentos para esta categoria de vias (< 500000 eixos padrão) e sem adição de agentes estabilizantes, os autores fazem recomendações de tipo empírico.

No meio brasileiro, os métodos tradicionalmente empregados são o método AASHTO e método DNER (atual DNIT), este último baseado nos métodos americanos do Corpo de engenheiros dos Estados Unidos. Estes métodos têm-se mostrado eficazes pela rara ocorrência de danos associados a processos de deformação permanente, como afundamentos de trilha de roda, através da redução da capacidade de suporte do subleito. No entanto, como tratado no item 2.1.3, a inclusão de camadas recicladas faz que o comportamento da estrutura seja determinado pelos fenômenos de fragmentação superficial e fadiga, que devem ser consideradas dentro do projeto de dimensionamento.

Entretanto, algumas das recomendações dos guias de reciclagem pesquisados (PCA, 2007, 2010; WIRTGEN, 2012) estão baseadas na consideração de métodos empíricos. Assim, são descritos os pontos mais importantes feitos tanto desde as abordagens empíricas quanto mecanísticas para camadas recicladas.

2.3.1 Métodos empíricos

A PCA (2005, 2010) indica que métodos semiempíricos e empíricos podem ser empregados. Assim, algumas agências dos Estados Unidos determinam espessuras de camadas e teores de cimento a partir de experiências prévias. No caso das camadas de base recicladas, as espessuras típicas variam entre 15 e 30 cm (PCA, 2007; JRA, 1987 *apud* YOSHIDA e NODA, 2001) sendo que o limite superior da faixa obedece às dificuldades de compactar numa passada, técnica não recomendada.

As guias de reciclagem da PCA (2010) e da Wirtgen (2012) consideram que o dimensionamento de uma camada reciclada é similar ao caso de uma camada de base tratada com cimento. A

maioria dos procedimentos incluem a opção de selecionar este tipo de material para análises mecánísticas. Por exemplo, a PCA (2010) recomenda um valor de coeficiente estrutural de solo-cimento para ser usado no método da AASHTO.

A utilização do método AASHTO para dimensionamento de camadas de base recicladas estabilizadas com cinza volante tem sido incentivada na prática indiana (SARIDE, AVIRNENI e JAVVADI, 2015). No estudo, os autores pesquisaram a aplicabilidade deste tipo de mistura para substituir agregados virgens para teores de fresado maiores que 50 % (usualmente restringida a 30 % na prática indiana), para vias de baixo tráfego. A partir de uma das misturas que atendem as especificações locais requeridas, os autores propuseram a sua utilização num projeto de dimensionamento baseado no método AASHTO.

As recomendações japonesas para reciclagem de bases (JRA, 1987 *apud* YOSHIDA e NODA, 2001), limitam a técnica à vias de baixo tráfego, sendo empregado um método de dimensionamento em função do CBR e de coeficientes equivalentes a partir de valores de referência de materiais cimentados virgens, baseados na RCS.

Como indicado no item 2.1.3, parte da capacidade estrutural da camada depende da resistência do material e da sua espessura. Porém, mesmo que teoricamente uma camada delgada e resistente pode suportar a mesma carga do que uma espessa e menos resistente, se tornará frágil (além de aumentar a sua suscetibilidade volumétrica à mudanças de umidade), resultando em processos de reflexão de trincas. Assim, a partir das abordagens semiempíricas da PCA (2010), é recomendada a utilização de camadas espessas com menores resistências, procurando dimensionamentos “equilibrados”.

Esta relação de espessura-resistência também tem sido estudada pelo estudo de diferentes tipos de misturas recicladas por Carbó e Fernandez (2001). A pesquisa, baseada no método AASHTO, diserta sobre a contribuição estrutural do material reciclado, usando diferentes espessuras da camada reciclada pela adoção de coeficientes estruturais de camadas de solo-cimento equivalentes da mistura reciclada. Os autores concluem que maiores espessuras podem compensar baixos teores de cimento.

Além da recomendação a respeito do uso do método AASHTO, a PCA (2005) também indica a possibilidade de empregar o método mecánístico desenvolvido para solo-cimento da PCA, (1970). No entanto, não esclarece a respeito do tipo de solo-cimento equivalente a ser modelado.

2.3.2 Métodos mecanicistas

O cálculo de tensões, deformações e deflexões que se desenvolvem na estrutura do pavimento é realizado a partir das propriedades mecânicas dos materiais (módulo de resiliência, coeficiente de Poisson), da carga (pressão dos pneus, peso do eixo) e da espessura da camada a través de *softwares* que empregam a teoria da elasticidade multicamada (linear, elástica, elastoplástica ou até elementos finitos). Os resultados são relacionados com o desempenho da estrutura a través de funções de transferência.

São descritas abordagens da *Austroads* (2010) e do SARA “*South African Roads Agency*” (2013), para definição de funções de transferência para o fenômeno de fadiga, empregadas como referência para esta pesquisa, por serem recomendadas para dimensionamento de pavimentos com inclusão de camadas recicladas estabilizadas com cimento.

2.3.2.1 SAMDM (1996)

O SAMDM (“*South African Mechanistic-Empirical Design Method*”) tem sido empregado na África do Sul de forma estendida e indica que o incremento da capacidade estrutural de pavimentos degradados pode ser feita por meio de uma reconstrução total ou parcial e preconiza seu emprego nestes casos. Contudo, salienta-se a necessidade de fazer adaptações ao respeito das funções de transferência em função das propriedades mecânicas definidas para cada material empregado.

O método proposto avalia cada camada de forma individual, considerando quatro tipos de camada e que determinam os de modelos de dano a serem utilizados. Assim, no caso de camadas estabilizadas com cimento são verificados os dois mecanismos de falha descritos no item 2.1.3, além da fase granular equivalente (Figura 8). As funções de transferência são definidas como segue:

- a) fragmentação superficial: tensão de compressão vertical no topo da camada cimentada (σ_v) e a RCS;
- b) fadiga: deformação de tração na ruptura do material e deformação de tração proveniente da análise mecanística (ε_b e ε , respetivamente);
- c) fase granular equivalente: estado de tensões.

Entretanto, o esmagamento não é abordado como uma condição terminal do pavimento, pelo qual não é usado para estimativa do estado crítico. Assim, as fases de fadiga efetiva e granular equivalente são usadas para estimar a vida da camada, constituindo duas fases de análise.

Por fim, a vida de fadiga (N) é ajustada por um fator laboratório-campo, *Shift Factor* (SF) que é função do nível de serviço da rodovia, que também determina o valor das constantes c e d , como mostra a Equação 12.

$$N_{eff} = SF * 10^{c * \left(1 - \frac{\epsilon}{d * \epsilon_D}\right)} \quad \text{Equação 12}$$

Contudo, o nível de serviço do projeto, isto é, a confiabilidade do dimensionamento, determina os modelos de fadiga, além das propriedades mecânicas dos materiais.

2.3.2.2 *Austroads* (2004)

Da mesma forma que o SAMDM (1996), a *Austroads Pavement Design Guide* (2004) adota o modelo de fases de fadiga (Figura 8). No entanto, é baseado somente na vida de fadiga da camada cimentada. Aliás, os modelos têm buscado abranger uma faixa representativa de materiais australianos seguindo o tipo de modelo descrito pela Equação 2, prévia à adoção do fator de confiabilidade, RF.

Ao longo do desenvolvimento dos modelos, estes tem sido definidos como função da deformação (Equação 2 e Equação 4). Entretanto, o valor das constantes tem sido discutido amplamente, se associando como função do módulo do material, como relatado pela *Austroads* (2011). Porém, no modelo apresentado pela guia para dimensionamento de pavimentos da *Austroads* (2004) que segue o padrão da Equação 2, conforme mostrado na Equação 13, tem-se adotado um valor do coeficiente de dano (SDE) de 12, enquanto a constante K (a_1) continua sendo definida função do módulo do material como mostrado na

Tabela 4, e de forma implícita na Equação 13.

$$N = RF \left(\frac{\left(\frac{113000}{E^{0,84}} \right) + 191}{\epsilon_i} \right)^{-12} \quad \text{Equação 13}$$

Tabela 4. Valores de K em função do módulo do material cimentado (*Austroads*, 2011)

Módulo do material cimentado (MPa)	K
2000	440
5000	310
15000	240

Contudo, a *Austroads* (2010) definiu as seguintes diretrizes para determinação do modelo de fadiga em laboratório descrito pela Equação 14:

- a) o MRF não é um parâmetro representativo que determine os modelos;
- b) a deformação à tração normalizada ($\varepsilon/\varepsilon_b$) representa de melhor forma o comportamento à fadiga;
- c) necessidade de extrapolar os modelos à faixa 10^6 e 10^9 ciclos, por questões de aplicabilidade do projeto;
- d) adoção do SDE=12;

$$N = 3.38 * \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_b}\right)^{-12} \quad \text{Equação 14}$$

Salienta-se que, dentre as principais dificuldades do método australiano estão a adoção de um MRF constante, mesmo para camadas estabilizadas com espessuras superiores a 350 mm, que pode não ser uma representação realista do comportamento em campo, pelo qual tem sido relatadas modificações como a subdivisão da camada atribuindo valores de MRF maiores à metade superior, reduzindo conseqüentemente a vida útil do projeto (VOROBIEFF e WILMOT, 2001).

2.4 NORMALIZAÇÃO DE ENSAIOS

São descritas as normas de ensaio de RTF e FQP usadas como referência. Salienta-se que o Brasil não possui normatização para ensaios de FQP para materiais cimentados, já para ensaios de RTF possui somente a norma para ensaio de vigas de concreto, pelo qual são abordados protocolos internacionais.

2.4.1 Resistência à tração na flexão e deformação na ruptura

A avaliação do comportamento a tração na flexão através da configuração quatro pontos é amplamente conhecida em concreto reforçado com fibras de aço, pelo fato de se estudar o comportamento pré e pós pico a fim de determinar, entre outros, parâmetros de resistência e tenacidade que precisam a construção de curvas tensão deformação. Como relatado por SALVADOR (2013), os ensaios de tração em vigas são variações do método japonês (JCI, 1984). Em concreto, os ensaios tem sido desenvolvidos para avaliação unicamente da resistência de ruptura, da mesma forma que em misturas solo-cimento e misturas cimentadas. O protocolo da *Austroads* (2008) contém recomendações que abrangem tanto da RTF, quanto medição de deslocamentos. A Tabela 5 resume os principais critérios dos ensaios de referência.

Tabela 5. Comparativo entre as normas de referência: (ABNT, 1991; ASTM, 2012, 2015; AUSTRROADS, 2008; JSCE, 1984; NCHRP, 2014)

Critério/Norma	JSCE-SF4 (1984)	ASTM D1635 (2012)	NCHRP – 789 (2014)	AUSTROADS (2008)	ASTM C78 (2015)	NBR 12142 (1991)
Material	Concreto reforçado com fibras de aço	Solo-cimento	Misturas cimentadas		Concreto	
Modo de carregamento	DC	DC; TC	TC			
Taxa carregamento*	mm/min 0-L/600: 0,06 a 0,12 L/600-L/150: 0,06 a 0,24	mm/min 0,02 kPa/min 690±39	kPa/min 690±39	kPa/min 990	kPa/min 900-1200	kPa/min 900-1100
Dimensões corpo de prova (mm)	100 x 100 x 350; 150 x 150 x 500	76 x 76 x 290	102 x 102 x 400	100 x 100 x 400	100 x 100 x 400; 150 x 150 x 500	150 x 150 x 500
Vão (mm)	300; 450	228	300	300	300; 450	450
Tempo de cura (dias)	Não especifica	28			Não especifica	
Número de LVDTs	2	Nenhum		1	Nenhum	
Suporte LVDTs	<i>yoke</i>	Nenhum		No topo da viga	Nenhum	

- As taxas de carregamento dos ensaio em concreto reforçado com fibras são dadas segundo o deslocamento vertical expressado em função do vão (L)

2.4.1.1 JSCE-SF4 (1984) – Resistência à tração na flexão e tenacidade flexural de concreto reforçado com fibras de aço

Um dos primeiros métodos a prescrever o comportamento flexural de corpos prismáticos de concreto reforçado com fibras é o descrito pelo protocolo JSCE-SF4 (JCI, 1984), sendo que os demais são variantes dele. É importante notar que este método foi pioneiro do uso dos suportes tipo *yoke* para ensaio de CPs prismáticos.

Os suportes devem possuir rotação livre. São usados dois LVDTs (“Linear Variable Differential Transducers”) para registro dos deslocamentos. São presos por suportes tipo *yoke*, procurando que as rotações e deslocamentos registrados só sejam aqueles relativos ao deslocamento da linha neutra (Figura 14). O monitoramento contínuo da tensão aplicada e o deslocamento é empregado para elaboração de curvas tensão-deformação no estágio pré e pós-pico para avaliação de RTF e tenacidade.

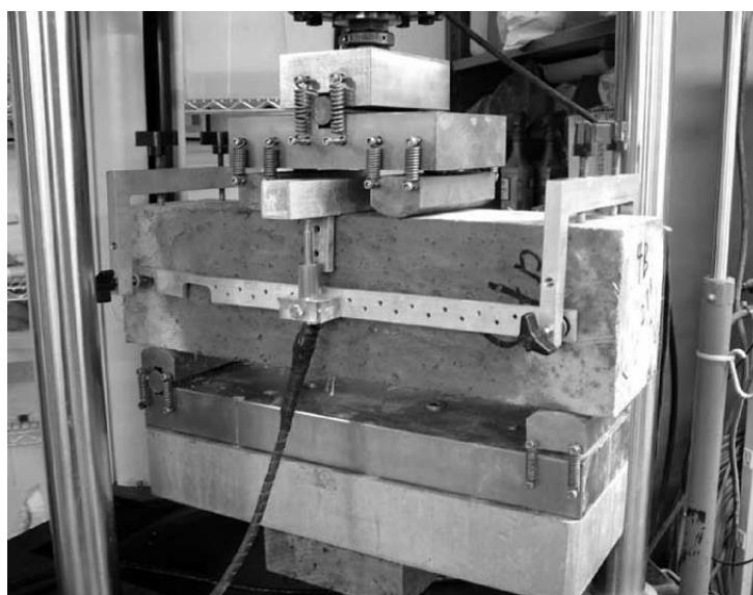


Figura 14. Configuração do ensaio de RTF e tenacidade flexural de concreto reforçado com fibras de aço baseado no método japonês (ASTM, 2013)

2.4.1.2 ASTM C78 (2015) - Resistência à tração na flexão de concreto

O ensaio segue a configuração da norma japonesa de distribuição de cargas, como mostrado na Figura 15. Pelo fato de ser empregado para determinação de resistências, não são medidos deslocamentos. Apresenta só duas modificações respeito do protocolo japonês: carregamento sob TC, e aceitação de resultados de corpos de prova cuja ruptura tenha acontecido até no máximo 5% além do terço médio, após uma correção no cálculo da tensão de tração.

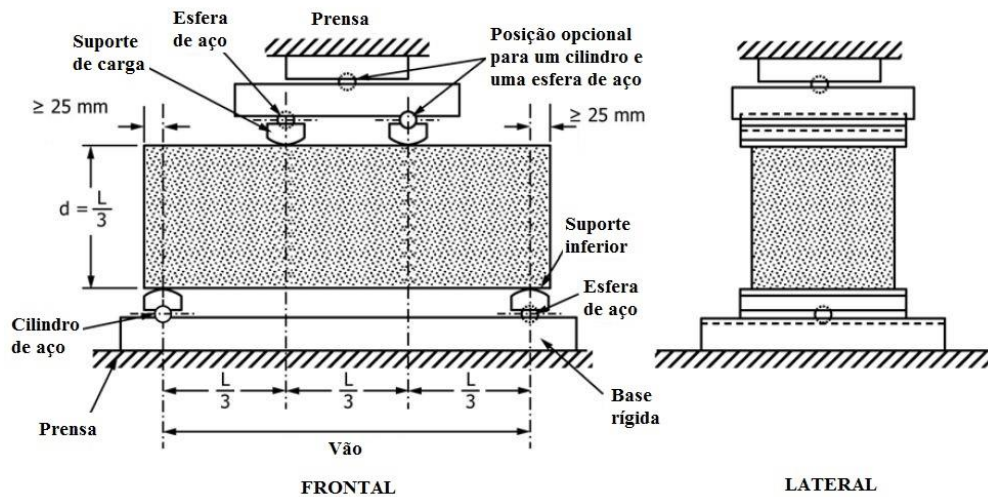


Figura 15. Configuração para ensaio RTF (baseado em ASTM, 2015)

2.4.1.3 NBR 12142 (1991) – Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos

Esta norma é uma adaptação do procedimento da ASTM, seguindo a mesma metodologia de ensaio.

2.4.1.4 ASTM D1635 (2012) – Resistência à tração na flexão de solo-cimento

Segue a mesma configuração e metodologia do protocolo para concreto, se diferenciando pela redução das dimensões (salientando que podem ser diferentes, se mantidas as proporções), redução da taxa de carregamento, adoção de um tipo de carregamento sob DC, e definição de um tempo de cura.

2.4.1.5 NCHRP – 789 (2014) – Resistência à tração na flexão de materiais estabilizados com cimento

Segue a mesma configuração e metodologia que o ensaio para solo-cimento, se diferenciando pelo incremento das dimensões e a não consideração de carregamentos sob DC.

2.4.1.6 AUSTRROADS – AP-T 101 (2008) – Resistência à tração na flexão de materiais estabilizados com cimento

A diferença do protocolo da NCHRP é a inclusão de LVDTs, porém sem considerar o *yoke*, como mostrado na Figura 16. A discussão a respeito de uma ou outra configuração é abordada no item 3.3.1.2. De outra parte, indica que a deformação na ruptura equivale à deformação correspondente a 95 % da RTF, procurando não superestimar seu valor.



Figura 16. Configuração de ensaio quatro pontos: RTF, MRF e fadiga (AUSTROADS, 2008)

Por fim, as leituras de carga e deformações ao longo do ensaio são utilizadas para elaborar curvas tensão-deformação que são empregadas para definição de módulo estáticos flexurais.

2.4.2 Fadiga em quatro pontos

Os procedimentos do ensaio de fadiga em quatro pontos foram baseados no método australiano, originalmente desenvolvido para misturas cimentadas. Os critérios gerais do protocolo são descritos a seguir, sendo discutidos no capítulo de metodologia.

2.4.2.1 AUSTROADS – AP-T 198 (2012) – Ensaio de fadiga flexural

O protocolo desenvolvido pela *Austroroads* (2012) determina procedimentos para obter a vida de fadiga de materiais com diferentes teores de cimento Portland: lamitos (4 %), granito, basalto e concreto reciclado (3 %). Usa a mesma configuração mostrada na Figura 16. Preconiza pulso de carga do tipo semiseno-seno-verso (tempo de carga e de descanso 0,25 s), do tipo TC, na faixa 60 % - 90 % da RTF, como mostrado na Figura 17. Após uma carga de acomodamento, o carregamento recomendado deve produzir uma deformação na faixa de 50 até 100 microstrains (1 microstrain = $1 \mu\epsilon = 10^{-6}$ mm/mm), apontando uma ruptura entre 10^3 e 10^6 ciclos. O MRF inicial corresponde à média dos primeiros 50 ciclos de carregamento. O protocolo não indica um número de vigas a ser utilizado nem o número de níveis de carga.

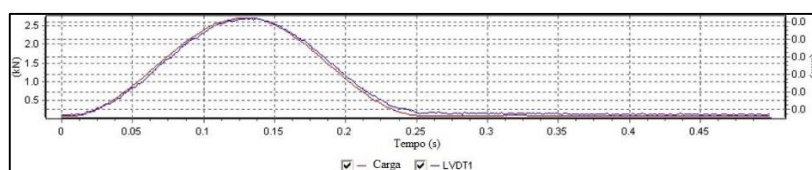


Figura 17. Ciclo empregado – 2,7 kN (baseado em Austroroads, 2012)

O sistema de aquisição de dados deve ser capaz de registrar ciclos de carga e deslocamentos, além de calcular e gravar tensões e deformações de tração máxima, e MRF. A queda do MRF em 50 % ou atingir 10^6 são definidos como critérios de ruptura para os quais o sistema deve parar o ensaio. Pelo fato de ser um método focado a uma abordagem tradicional, não considera o cálculo de ângulo de fase e energia dissipada.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados o programa experimental, equipamentos, materiais e métodos utilizados para atingir os objetivos propostos, isto é, a caracterização laboratorial do comportamento à tração na flexão, sob cargas estáticas e dinâmicas (fadiga), de misturas provenientes de processos de reciclagem a frio *in situ* com adição cimento. Os métodos estão fundamentados nos protocolos da NCHRP - pesquisa 789 (2014) para os ensaios estáticos e da *Austroads* (2008, 2012) para os ensaios dinâmicos. Salienta-se que foi empregado o protocolo da JSCE-SF4 (1984) para configuração do sistema de medição dos deslocamentos.

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental proposto foi elaborado visando avaliar a aplicabilidade dos protocolos australianos, desenvolvidos inicialmente para materiais estabilizados com cimento, a materiais brasileiros produtos da reciclagem de pavimentos flexíveis com adição de cimento Portland.

Foram definidas como variáveis independentes: o teor de cimento e a porcentagem de fresado. Procurou-se gerar três níveis diferentes de cimentação segundo a classificação da *Austroads* (2002), apresentada na Tabela 2, pela utilização de três teores de cimento, em massa: 2%, 4 % e 6 %. Também foram definidas três porcentagens de fresado, em massa: 20%, 50% e 70%, sendo que a primeira pretende simular a reciclagem de um pavimento com uma camada de revestimento asfáltico pouco espessa; a segunda obedece à limitação do uso deste tipo de material definida em normas sobre a técnica (DNIT, 2013a; PCA, 2005). Já a terceira porcentagem corresponde a um maior aproveitamento do fresado, em função da sua disponibilidade em campo, muitas vezes elevada. Desta forma, tem-se um total de nove misturas, como mostrado na Figura 18.

Outras variáveis que poderiam afetar o comportamento das misturas recicladas foram fixadas. Assim, foi usada energia modificada do ensaio de Proctor, de acordo com as recomendações do protocolo NCHRP 789 (NCHRP, 2014). Os ensaios foram realizados sob temperatura controlada e se monitorou a umidade relativa durante os ensaios dinâmicos.

O tempo de cura das vigotas foi de 28 dias para ensaios estáticos e de no mínimo 28 dias para os ensaios dinâmicos, como recomendado pela *Austroroads* (2008). Como exposto no item 3.2.3, o cimento empregado atinge a resistência nominal à compressão para esta idade de cura.

Além da caracterização dos materiais empregados, os ensaios mecânicos foram divididos em dois grupos: ensaios estáticos e ensaios dinâmicos, como mostrado esquematicamente na Figura 18. As limitações de tempo de ensaio e de material disponível impossibilitaram a realização dos ensaios dinâmicos das misturas de 6 % de cimento.

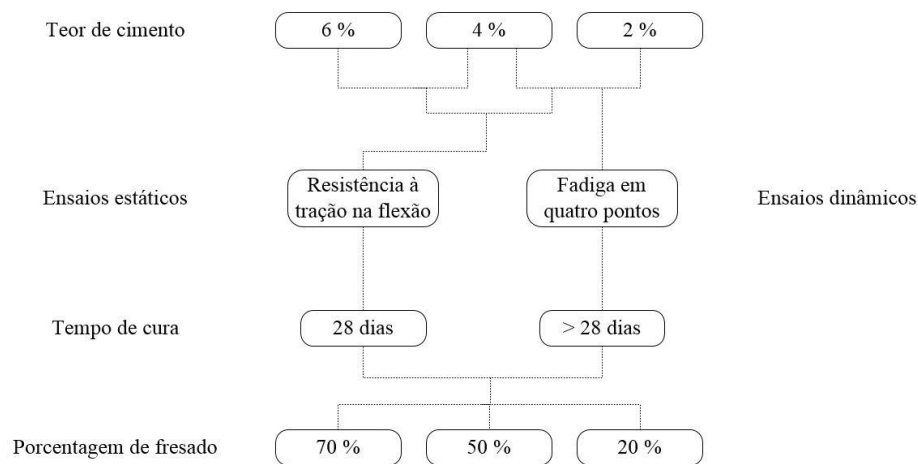


Figura 18. Esquema do programa experimental da pesquisa

A nomenclatura usada para a identificação das misturas ao longo do documento obedece ao teor de cimento e à porcentagem de fresado. Assim, os corpos de prova receberam um código do tipo X-YY-(Z). Onde X representa o teor de cimento, YY, o teor de fresado, ambos em porcentagem, e Z, o número do corpo de prova. Assim, uma mistura 2-20-(3), por exemplo, corresponde à viga 3 da mistura com 2% de cimento e 20% de fresado. Essa identificação será utilizada a partir deste capítulo. A Tabela 6 mostra um resumo das nove misturas estudadas.

Tabela 6. Resumo das misturas estudadas na pesquisa

Cimento (%)	Fresado (%)	Código
2	20	2-20
2	50	2-50
2	70	2-70
4	20	4-20
4	50	4-50
4	70	4-70
6	20	6-20
6	50	6-50
6	70	6-70

3.2 MATERIAIS

Neste item são descritos os materiais empregados na pesquisa: fresado asfáltico com ligante convencional, brita graduada simples como material de base, e cimento Portland.

3.2.1 Fresado asfáltico com ligante convencional

O fresado asfáltico com ligante convencional utilizado foi cedido por uma concessionária de rodovias do Estado do Rio Grande do Sul. Uma imagem do material é apresentada na Figura 19.



Figura 19. Amostra de fresado asfáltico coletado

3.2.2 Brita Graduada simples

Além do material coletado em um antigo pavimento, foi necessária a utilização de agregado mineral virgem com diferente origem e diferentes propriedades, para atingir a quantidade de material requerida para o desenvolvimento do programa experimental.

O material coletado em pista é oriundo da rodovia RSC-453 (km 151+800) no município de Caxias do Sul, no estado do Rio Grande do Sul. A coleta foi realizada durante a reciclagem com auxílio de uma máquina recicladora modelo Wirtgen WR 2500 S. A brita usada corresponde aos 15 cm de base da estrutura do pavimento. Na Figura 20 é apresentado o procedimento de coleta e as espessuras das camadas do material coletado assim como uma amostragem do mesmo.

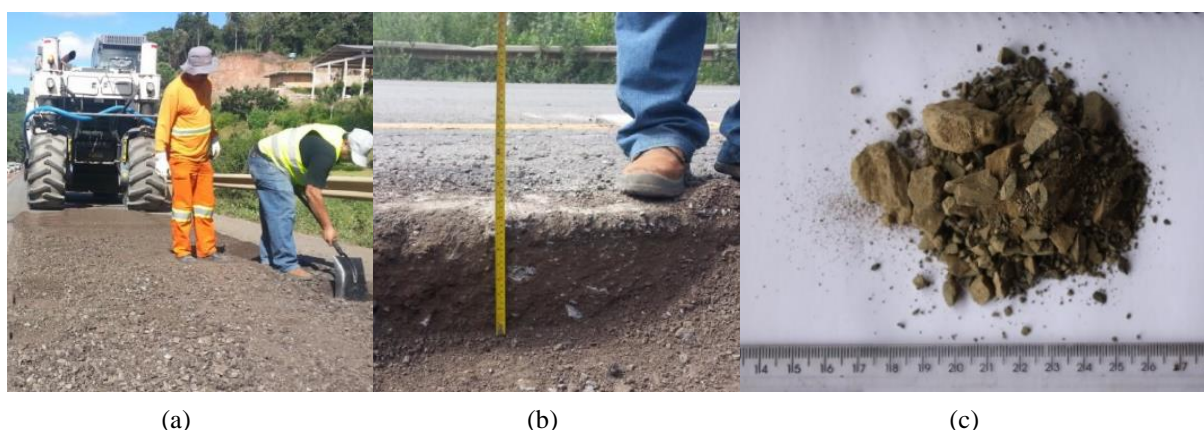


Figura 20. (a) Coleta com auxílio de máquina recicladora, (b) Medição das espessuras, (C) Amostragem do material coletado em pista. (FEDRIGO, 2015)

O agregado mineral virgem utilizado é proveniente de uma pedreira do estado do Rio Grande do Sul e a coleta foi única. O material é de origem basáltica da formação Serra Geral. A caracterização em termos das massas específicas reais e aparentes, absorção, índice de forma e desgaste à abrasão, é mostrada na Tabela 7. Salienta-se que esta caracterização corresponde com a obtida por Colpo (2014), que empregou os mesmos agregados virgens da mesma coleta na sua pesquisa.

Tabela 7. Características dos agregado virgens utilizados no estudo

(COLPO, 2014)

Propriedade	Método	Resultado
Massa específica real – agregado graúdo	DNER-ME 081/98	2831 kg/m ³
Massa específica real – agregado graúdo	DNER-ME 084/95	2860 kg/m ³
Massa específica aparente do grão	DNER-ME 081/98	2764 kg/m ³
Absorção	DNER-ME 081/98	0,9 %
Índice de forma	DNER-ME 086/94	0,8
Desgaste à abrasão	DNER-ME 035/98	10 %

Por fim, após a mistura dos dois tipos de brita, tem-se o material definitivo, utilizado na pesquisa, como mostrado na Figura 21.



Figura 21. Amostra de brita graduada simples usada na pesquisa

3.2.3 Cimento

O cimento usado na pesquisa foi o CP II E 32, isto é, cimento Portland composto com escória de resistência intermediária (RCS = 32 MPa aos 28 dias de cura). O tempo de cura usado na nomenclatura do cimento constitui uma referência respeito ao ganho de resistência mínimo esperado para o primeiro mês de cura, sendo um valor representativo da mesma. É assim que as resistências mínimas à compressão para 3, 7 e 28 dias de cura para este tipo de cimento são 10, 20 e 32 MPa, respectivamente (ABCP, 2002).

Segundo a norma brasileira para cimento Portland composto, NBR 11578 (ANBT, 1997), os cimentos CP II (modificados) são aglomerantes hidráulicos obtidos pela moagem de clínquer

ao qual se adiciona sulfatos de cálcio. No caso do cimento CP II E, além da escória granulada de alto-forno e dos sulfatos, durante a moagem pode ou não ser adicionado material carbonático. Os cimentos compostos geram calor de hidratação menor do que o gerado pelo Cimento Portland Comum, fato importante no caso da aplicação em reciclagem, pois devido ao volume a ser empregado, o aumento da temperatura no interior da estrutura pode levar ao aparecimento de fissuras de origem térmica.

A escolha do tipo de cimento deveu-se ao fato deste ser o mais usado no país, especialmente na região Sudeste, e por existirem experiências de utilização deste tipo de cimento em processos de reciclagem de pavimentos flexíveis (PAIVA; OLIVEIRA, 2014).

3.3 EQUIPAMENTOS

Todos os ensaios foram realizados em equipamentos pertencentes ao Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – LAPAV/UFRGS e são descritos a seguir.

3.3.1 Pórtico de carregamento

Tanto os ensaios estáticos quanto os ensaios dinâmicos foram realizados usando o mesmo equipamento para solicitação de tração na flexão em quatro pontos, constituído por duas partes: o suporte de aplicação de carga (“*loading apparatus*”) e o suporte (“*yoke*”) para fixação dos LVDTs utilizados na medição dos deslocamentos. Adicionalmente, são descritas peças complementares.

As peças para aplicação de carga foram projetadas e usinadas a partir de informações encontradas na literatura e recomendações da equipe do Laboratório de Metalurgia Física – LAMEF/UFRGS. O suporte empregado na medição das flechas e a chapa de referência foram fornecidos pelo Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais - LEME/UFRGS. Os critérios de projeto e o detalhamento dos suportes são descritos a seguir.

3.3.1.1 Suporte quatro pontos

O suporte assegura a aplicação de carga sem excentricidade, permitindo uma aplicação uniforme e perpendicular na face do corpo de prova. A NCHRP (2014) e a *Austroads* (2008, 2012) apresentam esquemas básicos similares para o suporte como mostrado na Figura 22, que alternam entre esferas e cilindros como elementos de apoio dos roletes. De maneira análoga, a

ASTM também indica o mesmo tipo de arranjo para ensaio de vigas de solo-cimento e de concreto (ASTM, 2012, 2015). Já a norma brasileira NBR 12142 (ANBT, 1991), faz recomendações adicionais, incluindo elementos articulados em todas as direções.

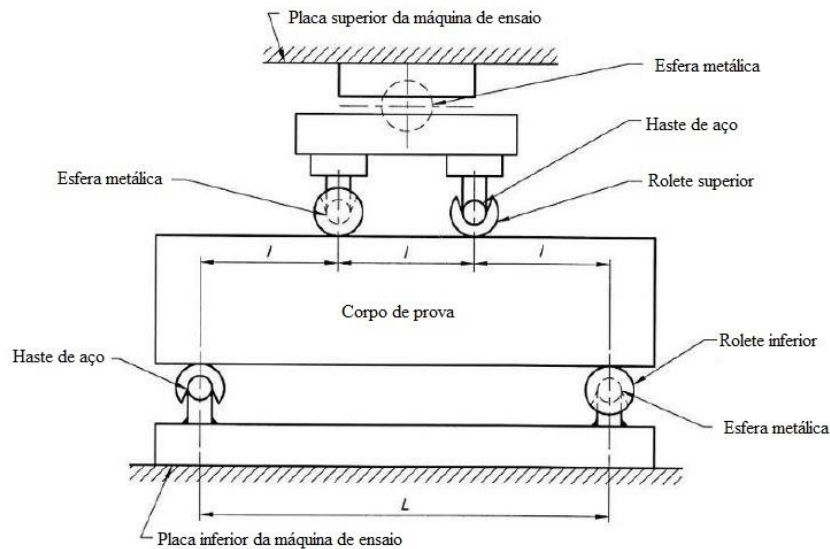


Figura 22. Suporte quatro pontos recomendado pela *Austroads* (Adaptado de AUSTROADS, 2008)

Por fim, foram projetados roletes livres, além de entalhes, para garantir um apoio do tipo simples de primeira ordem e eliminar possíveis componentes axiais. Já a excentricidade é descartada pela inclusão de uma esfera no topo da peça superior.

O modelo do suporte é mostrado na Figura 23 (a). Os quatro tipos de peças projetados, designados como FVC-01, FVC-02, FVC-03 e FVC-04, são detalhados no Apêndice A. A peça FVC-01 corresponde à base com furações que permitem sua fixação na bancada a ser usada, distribuídas de forma simétrica, além de elementos para facilitar o transporte da mesma. As peças tipo FVC-02 são os roletes que estão em contato direto com a viga e a peça FVC-04 é a placa que distribui a carga aos roletes superiores. O uso da peça FVC-03 depende dos equipamentos aplicadores de carga a serem usados, pois a fixação ao embolo aplicador varia de acordo com o equipamento (no caso de estudo, por exemplo, tal peça foi utilizada apenas nos ensaios estáticos). Por fim, tem-se a esfera metálica.

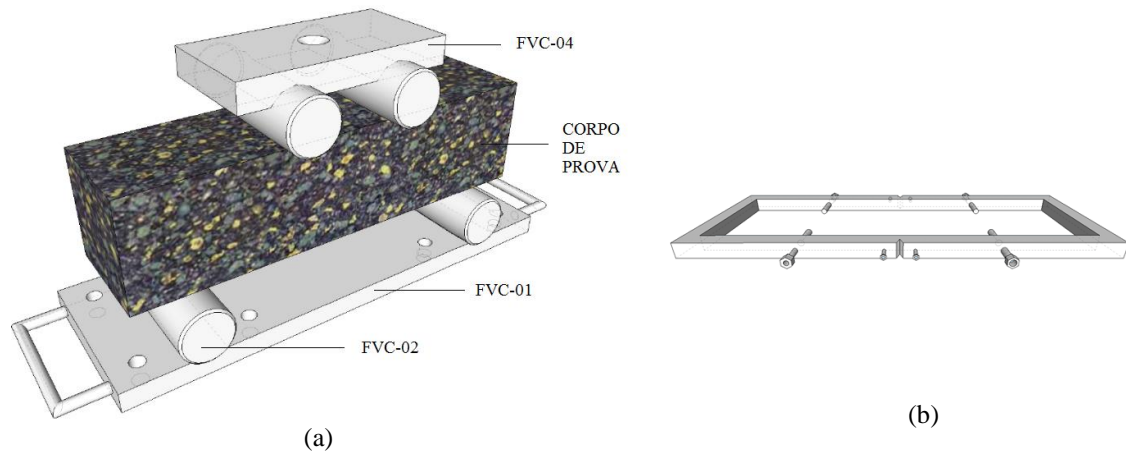


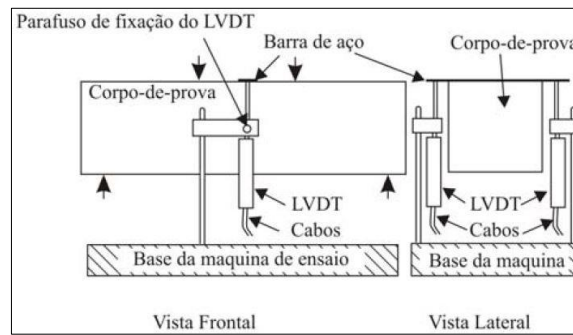
Figura 23. Modelo 3D: (a) suporte quatro pontos, (b) suporte yoke

Com relação ao material empregado na usinagem, a ABNT indica que a região de contato com o corpo de prova deve apresentar dureza mínima de 55 HRC (Dureza Rockwell), pelo qual optou-se por aço tipo 4340 (dureza de 55 a 60 HRC). Este tipo de aço é usualmente aplicado na fabricação de eixos, bielas, virabrequins e peças sujeitas a elevadas solicitações mecânicas. Adicionalmente foi realizado um tratamento de têmpera para proporcionar propriedades de dureza e resistência mecânica elevadas à microestrutura, além de um tratamento térmico de revestimento.

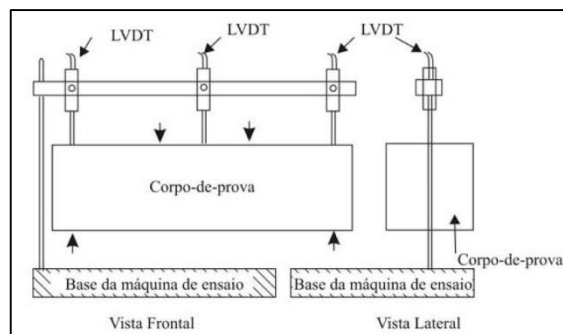
3.3.1.2 Sistema de posicionamento dos LVDTs

Como sinalado por GAVA (2006), que estudou ensaios de flexão em vigas de concreto reforçado com fibras de aço, é comum a medição do deslocamento no centro do vão, onde este apresenta o maior valor. Porém, deve-se ter cuidado para que seja medido o deslocamento real, desconsiderando contribuições externas, que são constituídas por duas parcelas: deformação do pórtico de carregamento (evitada utilizando-se materiais de elevada rigidez) e a deformação da própria viga no ponto de apoio.

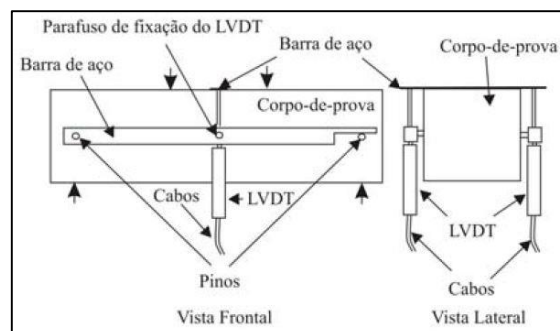
A autora disserta sobre diferentes tipos de configurações de apoio dos LVDTs, especialmente os mostrados na Figura 24, indicando que o sistema mostrado na Figura 24 (a), pelo fato de medir o deslocamento do conjunto incluindo aquela segunda parcela, superestima o valor real, como foi confirmado nesta pesquisa em ensaios teste. A configuração mostrada na Figura 24 (b) pode ser adotada, mas dificuldades relacionadas com disponibilidade de equipamentos e processamento de informação não fazem dela uma solução recorrente. Ao respeito, a autora conclui que na literatura tem um consenso entre os pesquisadores pela eficiência da configuração tipo *yoke*, como apresentada na Figura 24 (c) e sugerido pela JCI.



(a)



(b)



(c)

Figura 24. Configuração do sistema de medição de deslocamento: LVDTs apoiados (a) na base do equipamento do ensaio e (c) no topo da viga, (c) no suporte tipo *yoke* (MORGAN, MINDESS, CHEN, 1995, *apud* GAVA, 2006)

Desta forma, o arranjo usado para medir os deslocamentos verticais foi definido por um suporte tipo “*yoke*” (ver Figura 23 (b)) que fica em torno do corpo de prova e na altura da linha neutra, fixado diretamente acima dos suportes inferiores. O objetivo é que as deflexões medidas na metade do vão não sejam afetadas por giros ou efeitos de assentamento causados pelo suporte de aplicação de carga em quatro pontos. Dois LVDTs foram fixados no suporte, um de cada lado (sendo que apenas um foi usado nos ensaios estáticos). Adicionalmente, foi necessária a confecção de uma chapa de referência para os LVDTs, que é fixada na viga no centro do vão. O esquema do conjunto completo é mostrado na Figura 25.

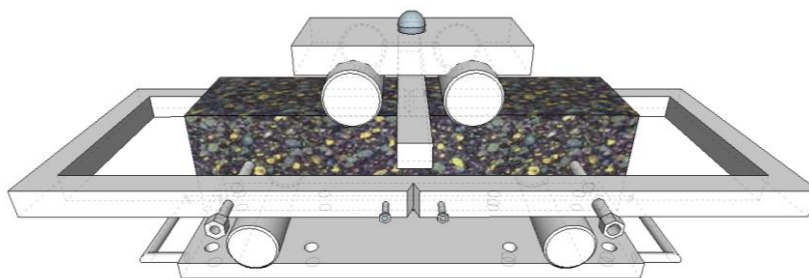


Figura 25. Pórtico de carregamento: conjunto

3.3.2 MTS

O equipamento utilizado nos ensaios estáticos foi uma prensa servo-hidráulica de marca MTS© 810 UTM *Test System*, modelo 318.25, com capacidade de aplicação de carga de 250 kN. Por limitações de disponibilidade, foi usado somente um sensor de deslocamento tipo LVDT, marca Vishay ©, modelo HS5, com um intervalo de deslocamento (curso) de 6,5 mm, empregando uma precisão de 10^{-11} mm.

3.3.3 Equipamento para ensaio de fadiga por compressão diametral

Para realizar os ensaios dinâmicos, foi necessária a adaptação do equipamento existente no LAPAV/UFRGS, originalmente empregado para ensaios de Módulo de Resiliência por Compressão Diametral, MRD (DNER, 1994) e de Fadiga por Compressão Diametral (FCD) em misturas de concreto asfáltico, em corpos de prova cilíndricos de 60 mm de altura e 100 mm de diâmetro. A adaptação do sistema de aplicação de cargas permitiu enquadrar o equipamento aos padrões internacionais relatados para ensaios de Módulo de Resiliência Flexural (MRF) e Fadiga Quatro Pontos (FQP) aos materiais reciclados com cimento. A Figura 26 mostra a configuração da adaptação do equipamento: do lado direito, o computador controlador e o console de ensaio (em conjunto com os dois LVDTs usados) e, do lado esquerdo, o sistema de carregamento.

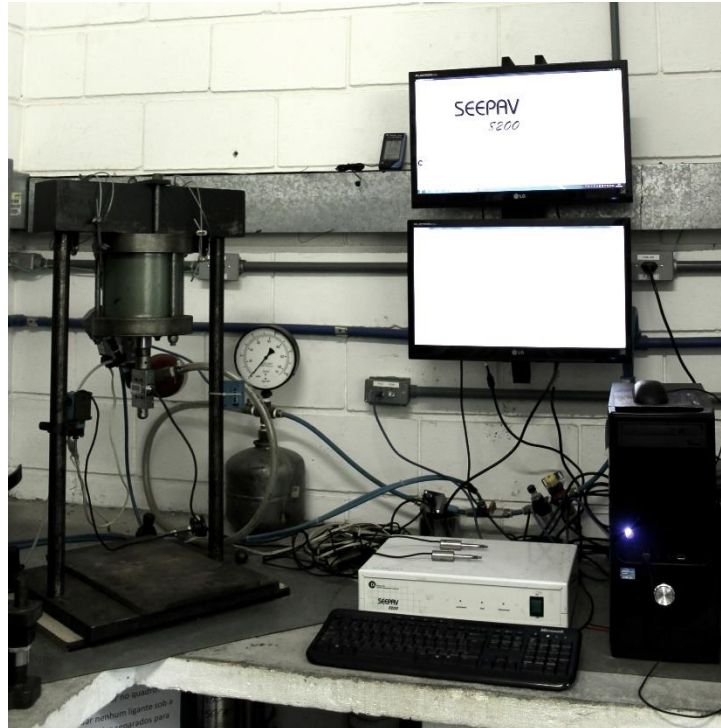


Figura 26. Configuração do equipamento de MRD e FCD

3.3.3.1 Sistema de carregamento

O equipamento é semelhante ao modelo clássico usualmente empregado no Brasil para determinação do módulo de resiliência por compressão diametral, descrito na norma DNER-ME 133/94 (DNER, 1994). Trata-se de um aplicador pneumático apoiado num pórtico metálico, que fornece a tensão desvio pulsante controlada por uma válvula 3 vias (solenóide) conectada a um sistema de controle (regulagem de pressão e temporização). A carga gerada pela ação da pressão liberada pelo solenóide é medida pela célula de carga e então distribuída pelos frisos de carregamento ao corpo de prova. Na Figura 27 são mostrados os componentes do sistema aplicador de carga, já adaptado para o ensaio de MRF e FQP.

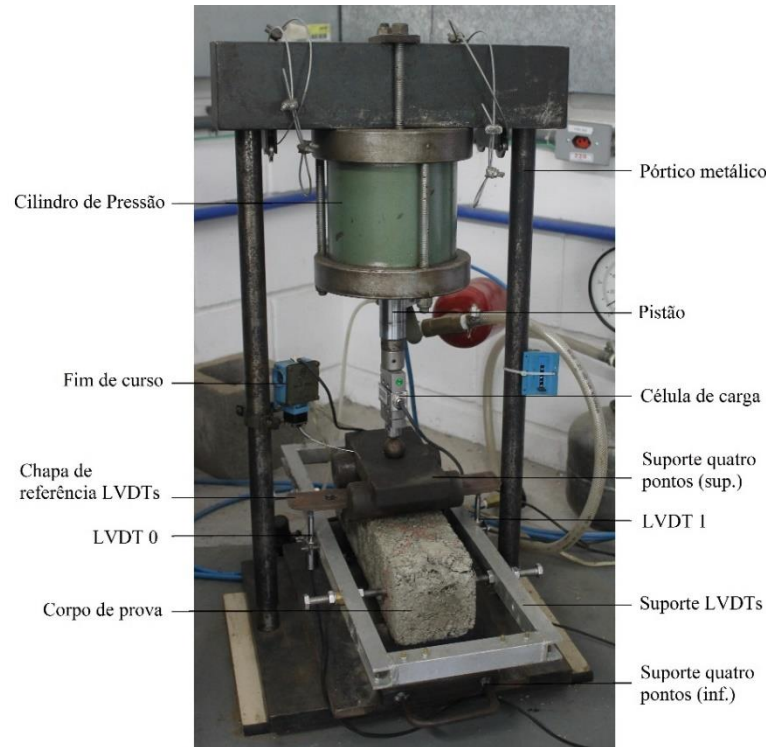


Figura 27. Componentes sistema de carregamento para ensaios de MRF e FQP

3.3.3.2 Software

A resposta do material, como descrito, foi medida por LVDTs, amplificada por um condicionador de sinais e armazenada em um sistema de aquisição de dados, para posterior análise. O sistema utiliza uma interface serial de comunicação, conversores AD e DA de 16 bits, micro controlador tipo CMOS e taxa de aquisição de 200 Hz/canal. O *software* usado é o SEEPAV 8200, desenvolvido para utilização em ensaios de módulo de resiliência triaxial, MRD, FCD, sendo esta última a rotina de ensaio utilizada. No console do sistema, mostrado na Figura 28 (a), foi acoplado tanto o computador quanto a instrumentação por meio de conexões seriais, como mostrado na Figura 28 (b e c).



Figura 28. (a) Console de controle SEEPAV 8200, (b), painel traseiro SEEPAV 8200 e (c) conector serial. Fonte: Malysz (2009)

Na tela inicial do ensaio de FCD do SEEPAV 8200, mostrada na Figura 29, solicitam-se parâmetros de entrada. Adicionalmente, é mostrada a configuração de aquisição de dados: ciclo inicial a partir do qual é registrada a informação, incremento (número de ciclos a partir do ciclo inicial onde se inicia uma nova leitura), número de ciclos gravados e o percentual de R_t aplicado. Tem-se a opção de gravar dados em escala linear ou potencial, em função do volume de dados desejado.

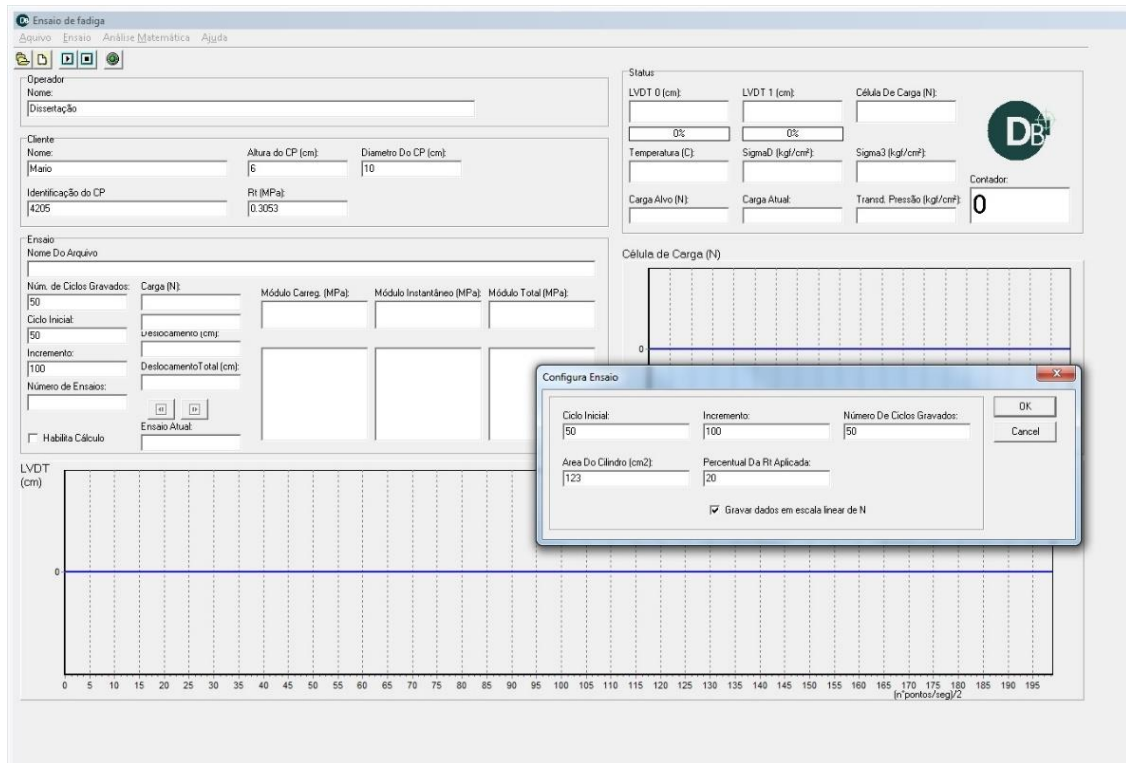


Figura 29. Tela da rotina do ensaio de fadiga e detalhes das telas de configurações, prévias ao ensaio (Mistura 4-50)

Na Tabela 8 são comparados os parâmetros de entrada no *software* SEEPAV 8200 tanto para ensaios de FCD quanto de FQP, indicando aqueles que são iguais ou diferentes. Valores utilizados são detalhados na Tabela 12.

Tabela 8. Parâmetros de entrada SEEPAV 8200: FCD e FQP

Estágio de ensaio	Parâmetro de entrada	Ensaio de FCD	Ensaio de FQP
Configuração equipamento	Tempo de repetição da válvula (s)	✓	
	Tempo de abertura da válvula (s)	✓	
	Número de LVDTs	1, 2	2
	Constantes de calibração LVDTs	Ganho máximo	Ganho mínimo
	Constantes de calibração célula de carga	✓	
Configuração ensaio	Ciclo inicial	✓	
	Incremento	✓	
	Número de ciclos gravados	✓	
	Área do cilindro (cm ²)	✓	
	Gravação de dados	Escala linear/potencial	Escala linear
Análise matemática	--	Considerada	Desconsiderado
Ensaio	Nome operador/cliente	✓	
	Identificação CP	✓	
	Altura (cm)	✓	
	Diâmetro (cm)	✓	
	RCD (MPa)	RCD	RCD (equivalente)

3.3.3.3 Sensores de deslocamento

Foram utilizados dois sensores de deslocamento LVDT tipo DG da *Solartron* com um curso de $\pm 2,5$ mm. Quanto à sensibilidade escolhida (ganhos dos LVDTs), diferente dos ensaios de MRD e FCD, onde a sua zona sensível é reduzida a 10 % do curso (ganho máximo), foi usado o 100 % do curso dos sensores. Assim, tanto o console quanto as constantes de calibração correspondentes foram configurados para o estágio de ganho mínimo: sensibilidade de 10^{-5} mm.

3.4 MÉTODOS

Tanto a caracterização dos materiais utilizados nesta pesquisa, isto é, agregados minerais usados como base e material fresado, quanto ensaios descritos neste item, foram realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – LAPAV/UFRGS. Já a moldagem e cura dos corpos de prova foram realizados na Fundação de Ciência e Tecnologia – CIENTEC/RS.

3.4.1 Caracterização dos materiais

A caracterização dos materiais compreende a análise granulométrica dos materiais, e a determinação do teor de ligante asfáltico do fresado. Como passo prévio à realização de ambos os ensaios, foram reduzidas as amostras usando o protocolo DNER-PRO 199 (DNER, 1996), através do método A (separador mecânico).

3.4.1.1 Análise granulométrica

As análises granulométricas do fresado, da BGS coletada na pista e dos agregados virgens, bem como das composições destes materiais, foram realizadas seguindo o procedimento descrito na norma DNER-ME 083 (DNER, 1998).

A Figura 30 mostra a composição da brita graduada simples utilizada, sendo que a brita coletada em pista constitui 30% do total enquanto que os 70% restantes correspondem ao agregado mineral virgem, com proporções de brita 3/4”, 3/8” e pó de pedra (Figura 31 (a)) cujas granulometrias foram realizadas inicialmente por separado e a partir dos resultados foram definidas as proporções de cada uma, conforme a Figura 31, de forma tal que fosse garantida uma distribuição granulométrica igual à da base original da rodovia RSC-453.

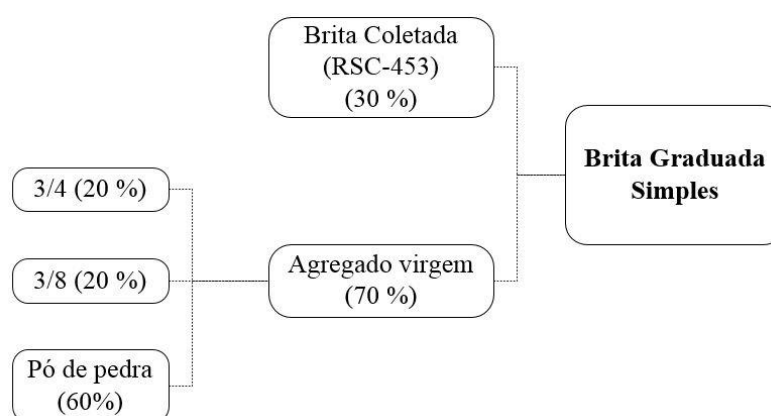


Figura 30. Conformação da Brita Graduada Simples usada na pesquisa

Então, foi feita a mistura do material coletado com os agregados virgens, assim como sua distribuição para armazenamento usando o procedimento descrito na norma DNER-PRO 199 (DNER, 1996), através do método B (quarteamento), como mostrado na Figura 31 (b) e (c). Adicionalmente foram realizadas as análises granulométricas do material definitivo como verificação.

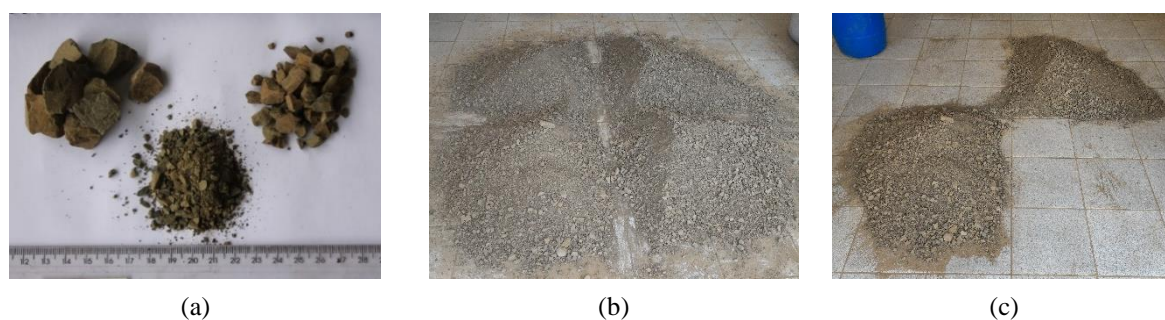


Figura 31. Preparação BGS: (a) agregados virgens, (b) mistura e quarteamento

Por fim, após serem determinadas as granulometrias do fresado e da BGS, foram estimadas as curvas granulométricas das misturas (20%, 50% e 70% de fresado) e verificou-se que se enquadram na faixa granulométrica adotada (WIRTGEN, 2012). Tal faixa foi escolhida em decorrência da aceitação que tem no meio da reciclagem de pavimentos com cimento.

3.4.1.2 Teor de ligante do material de fresado

A determinação do teor de ligante do revestimento asfáltico reciclado foi realizada através da utilização do extrator por refluxo (Figura 32), segundo a norma DAER/RS-EL (DAER, 2001).

A partir do quarteamento, foram separadas e peneiradas quatro amostras de aproximadamente 250 g de material fresado. Foram secadas, pesadas, depositadas em cones de papel secos de massa conhecida, como mostrado na Figura 32 (a), e colocadas em suportes metálicos dentro do extrator. Foi usado Tricloroetileno como solvente, sendo que este é aquecido até sua evaporação e posterior condensação, que vai lavando o material fresado até a completa extração do ligante asfáltico. Na Figura 32 (b) é apresentado o ensaio após 5 dias de extração; observa-se que o solvente do fundo tem coloração preta. A partir da massa inicial e final nas amostras é calculado o teor de ligante, em porcentagem. Por fim, é realizado o peneiramento do material limpo.



Figura 32. Ensaio de refluxo: (a) preparação de amostra, (b) após cinco dias de andamento

3.4.1.3 Compactação

Foi usado o procedimento descrito na norma DNIT 164/2013-ME (DNIT, 2013b), empregando-se a energia modificada, para a determinação da massa específica aparente seca máxima e do teor de umidade ótima de cada uma das misturas estudadas, valores que foram considerados na moldagem das vigas. Os ensaios de compactação foram realizados seguindo o procedimento descrito na norma DNIT 164/2013 (DNIT, 2013a).

Os parâmetros de compactação de algumas das misturas estudadas foram tomados de estudos já realizados, como mostrado na Tabela 9.

Tabela 9. Misturas cujos ensaios de compactação foram realizados anteriormente

Pesquisa	Misturas
Fedrico, (2015)	2-20, 2-50, 4-50, 4-20
Ely, (2014)	4-70

3.4.2 Moldagem e preparação dos corpos de prova

O procedimento descrito neste item foi usado para a moldagem de todos os corpos de prova que fazem parte do estudo, seguindo recomendações do NCHRP (2014). As dimensões nominais das vigas foram 100 mm x 100 mm x 400 mm, sendo definidas em função do diâmetro máximo nominal das misturas ($D_{max} = 25$ mm), adotando o critério do protocolo da *Austroroads* (Equação 15) (AUSTROADS, 2008):

$$d \geq 3D_{max}$$

Equação 15

Onde d é a dimensão mínima do corpo de prova (neste caso, 100 mm).

De forma similar ao ensaio de compactação, determinou-se a umidade higroscópica do material fresado e do material de base. Assim partir dos pesos secos de cada um dos materiais e das proporções dos mesmos, foram calculadas as quantidades de água e de cimento a serem adicionados para atingir o teor ótimo de umidade. A mistura dos materiais, como mostrado na Figura 33 foi realizada manualmente até se obter uma mistura homogênea. Imediatamente após a mistura, foi realizada a compactação, sendo o tempo de moldagem de cada viga próximo a 20 minutos.



Figura 33. Mistura materiais (a) brita graduada simples e fresado, (b) adição de água após adição e mistura do cimento, (c) mistura homogênea (6 % cimento, 20 % de fresado)

Anteriormente ao processo de compactação, era aplicada uma fina camada de óleo mineral para auxiliar na desforma. As vigotas foram compactadas estaticamente, usando uma prensa hidráulica com capacidade de 600 kN. O material foi compactado em três camadas, de forma a se alcançar a massa específica aparente seca máxima através do controle da altura e do peso da camada, como mostrado na Figura 34 (régua do lado esquerdo). Na figura, também é possível verificar que foi usada uma chapa metálica para assegurar a adequada distribuição da carga na área do molde. Durante a compactação, as interfaces entre as camadas foram escarificadas, de modo a promover uma melhor aderência. Após compactada a última camada, o material restante foi usado para determinação da umidade de moldagem.

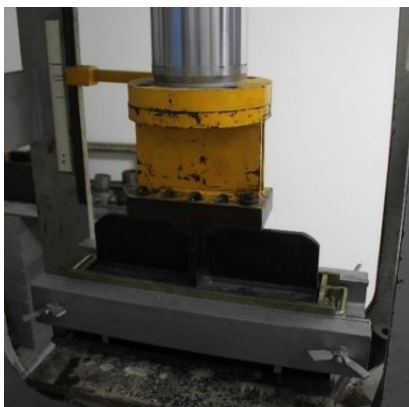


Figura 34. Prensa para moldagem estática do corpo de prova

Os corpos de prova foram mantidos embalados em sacos plásticos para proteção contra intempéries durante as primeiras 48 horas com a finalidade de evitar a perda de umidade neste estágio inicial de cura. Após este tempo, os corpos de prova foram desmoldados, identificados (número de viga, data de moldagem, face superior), e levados à câmara úmida.

A cura foi realizada sob condições controladas de temperatura e umidade relativa (21 ± 2 °C e 90 %, respectivamente) em câmara úmida, como mostrado na Figura 35. Entre o fim da cura em câmara úmida e a realização dos ensaios estáticos transcorreu pouco tempo (apenas em alguns dos ensaios estáticos a demora para a realização dos ensaios chegou a dois dias); já no caso dos ensaios dinâmicos, o tempo decorrido entre a retirada das vigotas da câmara úmida e a realização do ensaio chegou, em alguns casos, a uma semana. Nas duas situações, durante esse tempo de espera, as vigas ficaram embaladas em sacos plásticos e mantidas a temperatura de 21 ± 2 °C.



Figura 35. Cura de corpos de prova

É importante destacar que dadas as características heterogêneas das misturas e as perdas de material durante a manipulação, foi desconsiderada a pesagem dos CPs como controle da variação da umidade. Este aspecto pode ter relevância no caso de misturas que atinjam maior tempo de ensaio, pois não é possível ter um controle da umidade relativa ao longo do mesmo.

A Tabela 10 resume as características das vigotas compactadas para os ensaios realizados. Foram moldadas 91 vigas, consumindo-se 416 kg de fresado e 484 kg de BGS, além de 9 vigas teste empregadas para calibração dos procedimentos durante a fase inicial do programa experimental.

Tabela 10. Características das vigotas ensaiadas

Ensaio	Molde	Número de misturas	Número total de CPs	Fresado (kg)*	BGS (kg)*	Tempo total ensaio (h)
RTF	Prismático (100x100x400)	9	27 (3/mistura)	122	153	--
FQP	mm	6	64	294	331	836

* Sem incluir vigas teste

As tolerâncias de aceitação para os corpos de prova foram função da variação em torno da umidade ótima ($\pm 1.0\%$), das dimensões nominais de altura e largura ($\pm 3.0\text{ mm}$) e do grau de compactação (maior ao 95%).

A preparação das vigas para ensaios estáticos e dinâmicos foi idêntica, identificando-se a camada inferior, de forma que se assegurasse o posicionamento destas para que ficassem sujeitas à máxima tensão de tração nos ensaios. Os ensaios foram realizados sob condições controladas de temperatura e umidade relativa ($24\pm 3\text{ }^\circ\text{C}$ e $55\pm 15\%$, respectivamente), mas sem utilização da câmara climática. O procedimento de preparação é descrito abaixo:

- a) medição de largura e altura do corpo de prova. Foram tomadas três medidas de altura e largura com aproximação de $0,1\text{ mm}$ (o vão de 300 mm é garantido pelo pórtico de carregamento);
- b) marcação dos pontos de referência e fixação do suporte “yoke” e da chapa de referência;
- c) verificação do paralelismo longitudinal do suporte “yoke” em relação à viga em cada um dos quatro parafusos e da horizontalidade do mesmo e da chapa de referência em todas as direções;
- d) posicionamento e centralização do corpo de prova no sistema de carregamento em relação ao roletes inferiores, com ajuda das marcas. Colocação das peças FVC-02 (superiores), FVC-04, chapa de referência e esfera;

- e) o peso devido a estas peças (82,78 N) foi considerado como parte do pré-carregamento do ensaio;
- f) para a aplicação da carga, a peça FVC-03 foi aparafusada na MTS, no caso dos ensaios estáticos. Já no caso dos ensaios dinâmicos, devido à disposição do equipamento, esta peça não foi necessária;
- g) como proteção dos LVDTs, foi usado um disco metálico de 4 cm de altura embaixo da viga, no centro do vão. Esta altura garante que os LVDTs não ultrapassem 100 % do seu curso após a ruptura do corpo de prova.

3.4.3 Resistência à Tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão (RTF) consiste na aplicação de um carregamento estático sob tensão controlada, a uma taxa constante, nas vigotas. Este ensaio permite estabelecer níveis de carga a serem usados nos ensaios dinâmicos. Além dessa caracterização, é possível fazer análises das curvas tensão-deformação, isto é em termos de tensão na flexão, da deformação específica de tração ao longo do ensaio até a ruptura (ϵ_b), do Módulo Estático Flexural (MEF).

Os ensaios estáticos foram realizados seguindo os procedimentos descritos na norma D1635-M (ASTM, 2012) e no relatório 789 da NCHRP (2014), sendo que o primeiro é recomendado para solo-cimento, enquanto o segundo é recomendado para materiais estabilizados com cimento, cinza, cal ou combinações destes e usados em bases ou sub-bases, ou até mesmo subleitos de pavimentos.

Após a preparação do corpo de prova, o conjunto constituído pela vigota e suportes foi posicionado na prensa MTS, como mostrado na Figura 36. O pistão foi posicionado e uma pré-carga de aproximadamente 20 N (adicionais ao peso das peças superiores do suporte quatro pontos) foi aplicada. A partir disto, foram zerados os LVDTs e iniciada a etapa de carregamento.



Figura 36. Configuração do ensaio de RTF quatro pontos

Foram ensaiados três corpos de prova para cada uma das nove misturas estudadas, de tal forma que os cálculos descritos a seguir corresponderam aos valores médios.

3.4.3.1 Carregamento

As duas normas citadas indicam uma taxa de carregamento de 690 ± 39 kPa/min, até a ruptura do corpo de prova. Adaptando-se para a geometria definida dos corpos de prova (Equação 16) tal valor é equivalente a uma taxa constante de 2,3 kN/min, valor de entrada no *software* de controle da prensa MTS.

$$r = \frac{Sbh^2}{L} \quad \text{Equação 16}$$

Na Equação 16: r (N/min) é a taxa de carregamento, S (MPa/min) é a taxa de incremento de tensão, e b , h e L (mm) são a largura, altura e vão da viga, respectivamente.

Após a ruptura, mede-se a distância entre a local de formação da trinca e a extremidade mais próxima da viga (L_t), com aproximação de 1 mm.

3.4.3.2 Tensões de tração

A tensão de tração na flexão, σ_i , ao longo do ensaio, para carga aplicada P_i (N) é calculada usando-se a Equação 17. Já a RTF (σ_t) é o máximo valor de tração na flexão. Salienta-se que a Equação 17 é válida somente se a ruptura acontecer no terço médio da viga.

$$\sigma_i(\text{MPa}) = \frac{P * L}{b * h^2} \quad \text{Equação 17}$$

Se a ruptura acontecer fora do terço médio, a uma distância inferior a 5 % de L (15 mm), a Equação 17 deve ser substituída pela Equação 18, onde a (mm) é a distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo (Equação 19).

$$\sigma_t(MPa) = \frac{3 * P * a}{b * h^2} \quad \text{Equação 18}$$

Assim,

$$a (mm) = L_t - 50 \quad \text{Equação 19}$$

Desta forma, tanto para ensaios estáticos quanto dinâmicos é registrada a localização da trinca, sendo que o valor de a deve maior do que 85 mm, isto é, L_t maior do que 135 mm. Caso contrário, o resultado do ensaio é descartado.

3.4.3.3 Deformações de tração

A Equação 20 é usada para estimar a deformação da fibra inferior da viga (ε_i) associada a determinado estado de tensões σ_i , a partir do deslocamento δ_i registrado pelos LVDT. Salienta-se que a Equação 20, adotada pela *Austroroads* (2008, 2012), é deduzida da Teoria da Elasticidade e desconsidera os efeitos das tensões cisalhantes. A sua aplicabilidade é verificada no item 3.4.3.5

$$\varepsilon_i = \frac{108 * h * \delta_i * 10^6}{23 * L^2} \quad \text{Equação 20}$$

Na Equação 20, ε_i expressa em microstrains é a deformação de tração na flexão associada a um deslocamento δ_i (em mm) no centro da viga sobre a linha neutra, causado por uma tensão de tração σ_i . Desta forma é construída uma curva tensão na tração-deformação flexural, como a mostrado na Figura 37. Os cálculos e análises correspondem ao estágio prévio à ruptura, desconsiderando-se o estado pós-pico, como na Figura 37 (b).

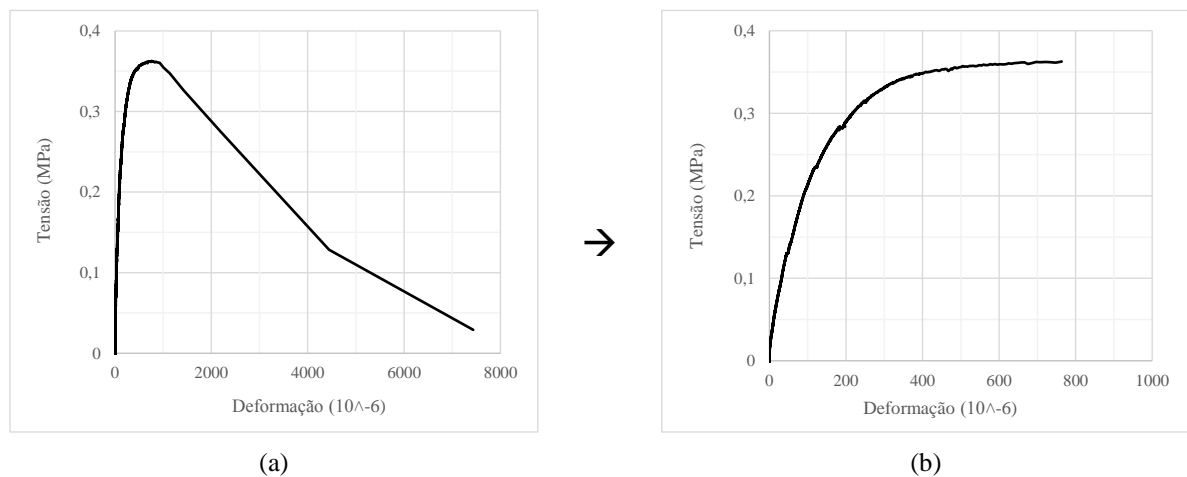


Figura 37. Curvas tensão tração – deformação flexural CP 2-50 (1):
(a) variação de tensões antes e após ruptura, (b) trecho analisado

Por fim, a deformação na ruptura é definida como a deformação correspondente a 95 % da RTF (AUSTRoads, 2008).

3.4.3.4 Módulo Estático Flexural

A partir destas curvas tensão-deformação, é estimado o MEF para cada mistura. Para tal fim, emprega-se a Equação 21, que depende do ponto j (tensão de tração normalizada).

$$E_j(\text{MPa}) = \frac{\sigma_j}{\varepsilon_j} * 10^6 \quad \text{Equação 21}$$

Foram usados dois critérios diferentes para a estimativa do limite ponto j , ambos os dois com base em Módulos secantes, como mostrado na Figura 38. Assim:

- a) Graeff, 2011: O MEF é o máximo valor obtido do gráfico MEF (secante) x carga no trecho de $j=30\%$ a $j=60\%$ da carga última;
- b) Austroads (2008): O MEF corresponde ao módulo secante para $j = 40\%$ da carga última.

Pelo fato de se considerar o trecho maior do que 30 % da RTF, além de se obter valores de deformação muito baixos, e, conseqüentemente valores de módulo muito altos, para tensões menores do que 20 % da RTF, os gráficos MFE x tensão de tração normalizada abrangem o trecho 20 % - 100 % da RTF (ver Figura 38).

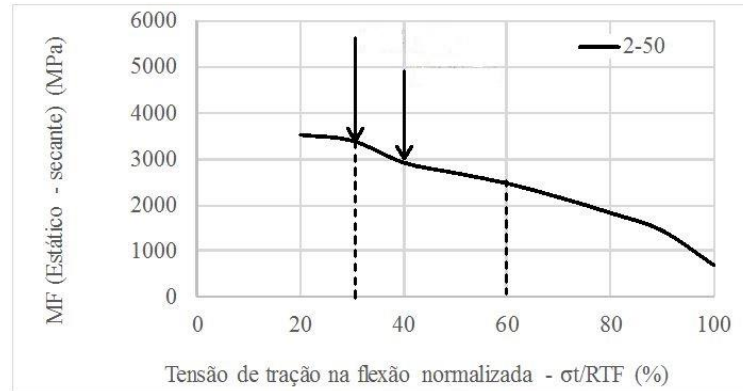


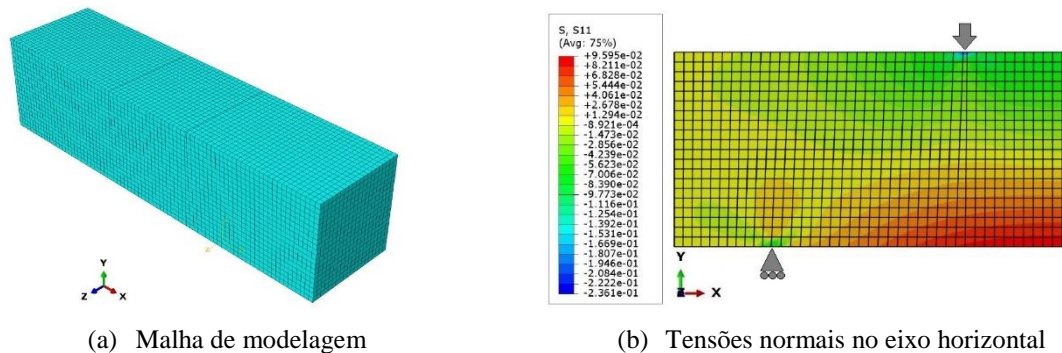
Figura 38. Valores estimados do MEF para a mistura 2-50

3.4.3.5 Avaliação da estimativa de deformações de tração

Como verificação dos métodos considerados para a estimativa das deformações de tração (Equação 20), foram realizadas modelagens pelo método de elementos finitos de corpos de prova com as mesmas características geométricas dos utilizados nos ensaios utilizando o software *Abaqus*© 6.13-1, considerando condições estáticas e um material homogêneo de comportamento elástico. O tipo de elemento usado foi o quadrilátero composto por 8 nós, de 5 mm de lado aproximadamente.

A malha de moldagem foi modelada por elementos finitos de 2 mm x 2 mm x 100 mm, sendo que a carga aplicada foi modelada como uma pressão uniforme equivalente a uma força concentrada (com magnitude dentro da faixa elástica do material), numa área de contato de 2 mm x 100 mm (largura nominal do corpo de prova).

Na Figura 39 são mostrados os estados de tensões, deformação de tração e deslocamentos verticais da modelagem do corpo de prova da mistura 2-70. Pelo fato de ser um carregamento simétrico é mostrada uma seção equivalente à metade do modelo.



(a) Malha de modelagem

(b) Tensões normais no eixo horizontal

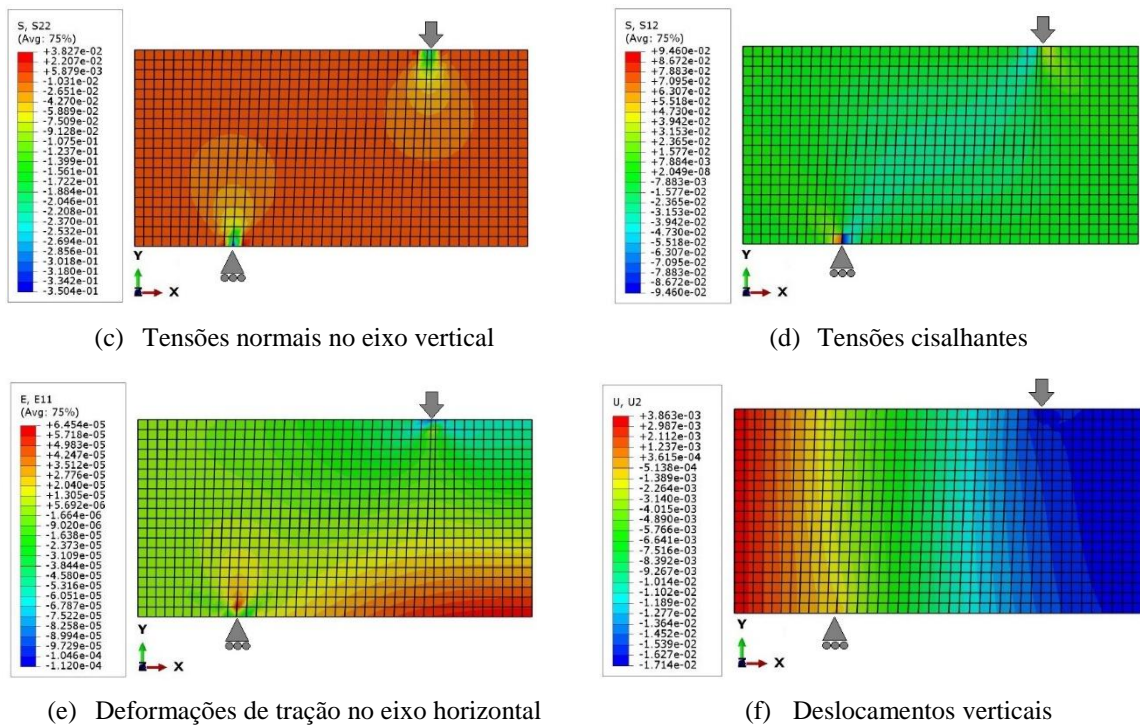


Figura 39. Estado de tensões, deformações e deslocamentos verticais no corpo de prova durante o ensaio de RTF, mistura 2-70. Unidades em N e mm.

Foram comparados os resultados das tensões e das deformações de tração experimentais para todas as vigas ensaiadas com os resultados das modelações. O erro percentual, foi menor do 2 %, já no caso dos deslocamentos verticais medidos x calculados este valor atinge 14 % (Apêndice B). Estes resultados permitiram verificar as seguintes hipóteses empregadas na estimativa de tensões e deformações de tração:

- desconsideração das parcelas de tensões cisalhantes e deformações associadas, como componentes das tensões e deformações de tração na flexão, isto é, a comprovação da Equação 20;
- verificação da invariância transversal (eixo z) dos deslocamentos verticais, das tensões normais no eixo vertical y e no eixo horizontal x , e das deformações de tração na flexão, como mostrado no Apêndice B.

3.4.4 Fadiga em quatro pontos e módulo de resiliência flexural

Os ensaios seguem recomendações da *Austroads* (2008; 2012). Consiste na aplicação de carregamentos cíclicos de magnitude constante (tensão controlada), e do registro de informação tanto dos ciclos de carga quanto de deslocamento. Salienta-se que ensaios preliminares mostraram que nos ensaios de MRF, usando os níveis de tensão recomendados, resultaram em danificação prematura das viga pelo qual foi decidido avaliar o MRF a partir do ensaio de fadiga.

São descritos o pulso de carga, a parametrização do mesmo, a rotina definida, critérios de ruptura utilizados e cálculos requeridos nas análises.

3.4.4.1 Pulso de carga

Os protocolos referidos definem um pulso do tipo semi-seno-verso (*haversine*) com uma duração de 0,25 s tanto para MRF quanto para FQP. A diferença entre ambos os pulsos consiste na redução do tempo de descanso de 0,75 s (MRF) para 0,25 s (FQP), isto é, o incremento da frequência de 1 Hz para 2 Hz. Para o ensaio de FQP o equipamento foi calibrado para aplicar ciclos de carregamento com uma frequência de 5 Hz, reduzindo ao mínimo o tempo de descanso.

Com relação aos níveis de tensão aplicados, as normas australianas indicam uma faixa de 60 % a 90 % da RTF para ensaios de FQP (que causaria a degradação do material) e do 40 % da RTF para MRF (que teoricamente não deve gerar dano permanente no corpo de prova). Ensaios preliminares desta pesquisa mostraram que um valor do 40 % da RTF causa danos prematuros das vigotas pelo qual não permite caracterizar o comportamento resiliente de forma adequada. Assim, em algumas das misturas com carregamentos de 15 % da RTF, se evidenciam danos permanentes. A dificuldade na estimativa de um nível de carga que não gere dano permanente nos corpos de prova motivou a consideração do protocolo de FQP para definição do MRF, considerando a média da resposta resiliente dos ciclos 50 a 100.

Como aproximação aos níveis de tensão a serem usados foram tomados como referência os resultados dos ensaios estáticos. Assim, seguindo o critério da *Austroads* (2012) tem-se que as tensões a serem aplicadas nos ensaios de fadiga devem ser tais que gerem deformações de 50 a 100 microstrains.

3.4.4.2 Parametrização do pulso

Foi necessário definir os valores dos parâmetros usados para a execução do ensaio do ensaio FQP como adaptação dos usados no ensaio de FCD.

O equipamento não possui um gerador de forma de onda, no entanto, consegue-se gerar dois formatos (Brito, 2006): um próximo ao formato quadrado que só é possível para pulsos com duração maior a 0,15 s, é outro do tipo semi-seno-verso. Como descrito no item 3.4.4.1, a frequência do ensaio corresponde ao inverso da duração do pulso.

Tanto a calibração do pulso quanto o seu controle foi realizado através da válvula solenoide. Assim, o tempo de abertura e a forma com que o ar é inserido no sistema determinam a forma e o tempo do pulso. Para curtos períodos de tempos, como no caso do pulso padrão do ensaio de MRD (0,10 s), a sensibilidade é alta, como indicado por Brito (2006). Já para o caso de estudo (tempo de pulso de 0,20 s), foi preciso verificar a vazão e o tempo de abertura da solenoide para obter um pulso de carga próximo ao ideal. Desta forma, o tempo de abertura da válvula de controle de 0,025 s foi adaptado do ensaio diametral, pois mostrou uma boa aproximação, evitando a geração de pulsos com formato quadrado. O volume de ar mobilizado no cilindro (diâmetro = 125 mm) foi de $5,63E+05 \text{ mm}^3$, que correspondem a um avanço de 45,9 mm do embolo.

O pulso resultante e o pulso ideal são mostrados na Figura 40. Salienta-se que mesmo o tempo da abertura for 1/8 da duração do pulso, o tempo de repetição da válvula e o formato foram atingidos. Na Tabela 11 são mostrados os parâmetros de calibração do pulso definidos para o equipamento utilizado.

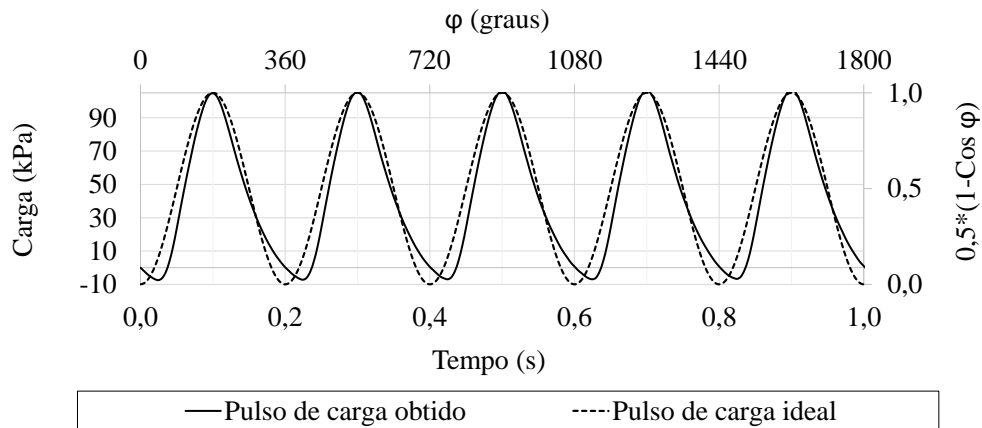


Figura 40. Pulso de carga ideal e obtido. Viga 2-20 (3), ciclos 50 a 55.

Tabela 11. Parâmetros de calibração do pulso

Parâmetro de entrada	Ensaio de FQP
Tempo de repetição da válvula (s)	0,20
Tempo de abertura da válvula (s)	0,025
Número de LVDTs	2
Constantes de calibração LVDT 0 e LVDT 1	[Ganhos mínimos]
Constante de calibração célula de carga	0,8639

3.4.4.3 Rotina de ensaio

Após a preparação dos corpos de prova e sua disposição no equipamento, o pistão é posicionado. É iniciado o programa SEEPAV 8200 na sub-rotina de fadiga, “F” (nomenclatura do *software*, ver Figura 29). Como passo inicial é configurado o equipamento e o ensaio através dos parâmetros descritos na Tabela 8 (FQP) e mostrados na Tabela 12, descritos a seguir:

Tabela 12. Parâmetros de entrada – configuração do ensaio FQP

Etapa do ensaio	Parâmetro de entrada	Ensaio de FQP
Configuração ensaio	Ciclo inicial	50
	Incremento	100
	Número de ciclos gravados	50
	Área do cilindro (cm ²)	123
	Gravação de dados	Escala linear
Análise matemática	Desconsiderada	
Ensaio	Nome operador/cliente	✓
	Identificação CP	✓
	Altura (cm)	6
	Díâmetro (cm)	10
	RCD (MPa)	Rt (equivalente)

- a) ciclo inicial, incremento e número de ciclos gravados: 50, 100 e 50, respectivamente para todos os ensaios, podendo ser diferentes em próximos programas experimentais dependendo das necessidades dos mesmos. O número de ciclos gravados definido corresponde à metade do valor do incremento (foi definido salvar a metade dos dados do ensaio, por questões de rendimento no processamento dos dados). Assim, para estes valores se tem que cada tramo de valores registrados corresponde aos ciclos 50-99, 150-199, 250-299, etc.;
- b) área do cilindro: fixo, depende do equipamento;
- c) escala linear: procurou-se gerar um banco de dados no mesmo formato linear (a intervalos constantes) para ser processados;
- d) análise matemática: como mencionado, não é realizado o monitoramento do módulo, por este fato a análise matemática é desconsiderada;
- e) identificação CP: a nomenclatura estabelecida no item 3.1 é utilizada tanto para identificação quanto para salvar o arquivo relatório *.txt*, no entanto sem hífen, parênteses, nem espaços: por exemplo, 2203. Esta nomenclatura foi respeitada pois é usada pelo código de processamento (ver item 4.1.2 e 4.2.1.3);
- f) altura ($L_c = 60 \text{ mm}$) e diâmetro ($D = 100 \text{ mm}$) do corpo de prova: são inseridos valores padrão do ensaio FCD. Isto, para poder usar a equação no cálculo da carga equivalente $RCD_{eq} \text{ (MPa)}$, como descrito a seguir;
- g) $RCD_{eq} \text{ (MPa)}$. Uma mesma força alvo $P \text{ (N)}$ gera uma distribuição de tensões de tração diferente num corpo de prova cilíndrico (compressão diametral, CD) e numa viga quatro pontos (Tração na Flexão, TF). Já que o valor dessas tensões é função somente da geometria do CP e da disposição das cargas, as equações são igualadas em função da força $P \text{ (N)}$ para obter um valor de RCD equivalente que é usado como valor de entrada para determinação dos níveis de tensão (força alvo), como mostrado na Equação 22.

$$P_{CD} = P_{TF} \rightarrow \frac{RCD_{eq} * \pi * L_c * D}{2} = \frac{RTF * b * h^2}{L}$$

$$\rightarrow RCD_{eq} = \frac{2 * RTF * b * h^2}{\pi * L_c * D * L} \approx 0.35368 * RTF \quad \text{Equação 22}$$

Desta forma podem ser inseridos os valores de tensão alvo como porcentagens, da mesma forma que no ensaio de FCD.

3.4.4.4 Critério de ruptura

As limitações do sistema de aquisição e processamento de dados não permitiram fazer o monitoramento do Módulo de Resiliência Flexural (MRF) durante o ensaio, pelo qual foi necessário limitar o número de ciclos ($N=10^6$ ciclos) em caso não acontecer a ruptura da viga e fazer o processamento após o término do ensaio, como relatado no Capítulo 4.

3.4.4.5 Módulo de resiliência flexural

Os cálculos da tensões aplicadas foram realizados usando a Equação 17 e a Equação 18, em função da localização da trinca. As deformações resilientes forma calculadas através da Equação 20 e a partir dos deslocamentos registrados. Tanto as tensões de tração, σ_i (kPa) quanto as deformações resilientes ε_i (microstrain) correspondem à amplitude da onda de carga e de deformação, como é mostrado na Figura 41.

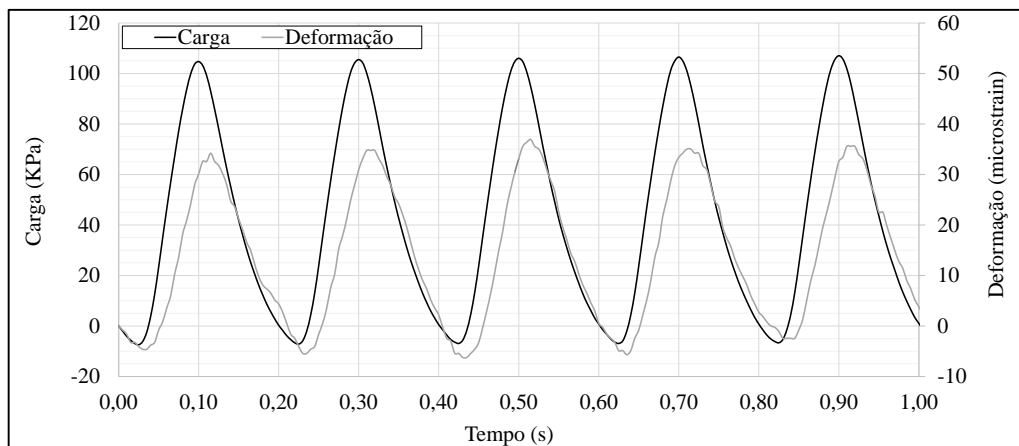


Figura 41. Pulso de carga e resposta (deformação). Viga 2-20 (3), 1 s de ensaio: ciclos 50 a 55.

Enquanto aos valores de MRF correspondem à relação tensão-deformação de cada ciclo (ou conjunto de ciclos) k , conforme a Equação 23.

$$E_k(MPa) = \frac{\sigma_k}{\varepsilon_k} * 10^6 \quad \text{Equação 23}$$

3.4.4.6 Energia dissipada

A energia dissipada em cada ciclo (*dissipated energy, DE*) é calculada a partir das curvas de histereses. Na Figura 42 (a) são mostradas três séries de curvas histeréticas desde o ciclo 150 até o 399 da viga 2-20 (3) (150-199, 250-299, 350-399, 450-499), já a Figura 42 (b) mostra as curvas do ciclo 150, 299, 450 e 499. O deslocamento no eixo horizontal corresponde à deformação permanente entre os dois ciclos. Salienta-se que as alturas constantes das curvas são devidas ao fato de ser um ensaio sob TC. Da mesma forma, a degradação associada à fadiga é evidenciada pelo incremento da área da curva, isto é, o aumento da energia dissipada durante o ensaio, como foi discutido no item 2.2.3.

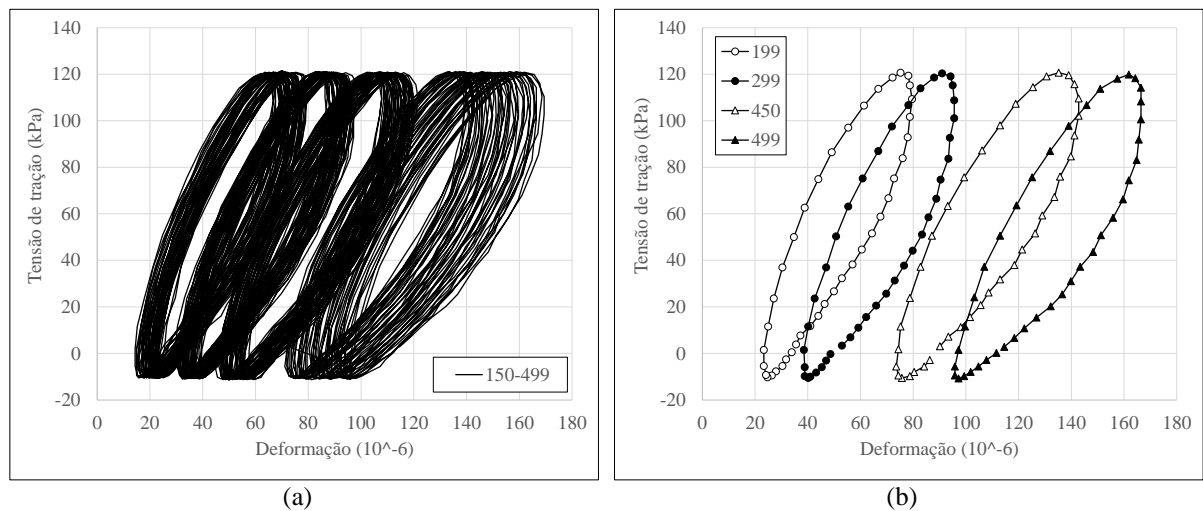


Figura 42. Curvas de histereses, viga 2-20 (3): (a) ciclos 150 a 499, (b) ciclo 150, 299, 450 e 499

A energia dissipada em cada ciclo foi calculada a partir da área de cada curva histeréticas, por integração numérica (método do trapézio) de cada um dos pontos que a conformam, seguindo a Equação 24

$$DE_N (N * mm/mm^3) = \sum_{j=0}^{j=40} \frac{(\varepsilon_j - \varepsilon_{j-1}) * (\sigma_j + \sigma_{j-1})}{2} \quad \text{Equação 24}$$

3.4.5 Análises de energia

A partir do cálculo da energia dissipada durante o ensaio, procurou-se verificar critérios para definição da micro e macrofissuração, como descrito por Shen e Lu (2010). Os autores que estudaram diferentes aproximações para avaliação de diferentes estágios de degradação de

misturas asfálticas, em concordância com o relatado no item 2.2.3. Dentre os métodos abordados pelos autores foram desenvolvidos os descritos na sequência:

3.4.5.1 Relação de energia

A relação de energia, *energy ratio* (ER), é definida como a relação entre a energia dissipada no ciclo inicial (DE_0) e a energia dissipada e no ciclo N , DE_N , segundo a Equação 25.

$$ER = N * \frac{DE_0}{DE_N} \quad \text{Equação 25}$$

Assim, no caso hipotético de ser testado um material que não apresente perdas de energia sob os carregamentos, $ER = N$. Esta relação representa a Linha de Não Dano (LND).

3.4.5.2 Relação de mudança de energia dissipada, RDEC

Foi realizada uma aproximação da estimativa da micro e da macrofissuração a partir da relação de mudança da energia dissipada (*ratio of dissipated energy change*, RDEC) entre dois ciclos, como mostrado no item 2.2.3, pela Equação 10.

4 PROCESSAMENTO DA INFORMAÇÃO DO ENSAIO DE FADIGA

O volume de informação gerado durante o ensaio de fadiga exigiu o desenvolvimento de uma ferramenta que possibilitasse o seu processamento como passo prévio às análises dos resultados. Neste capítulo são descritos o algoritmo simplificado e os subprocessos definidos, assim como a sua implementação e suas limitações.

4.1 ALGORITMO

O algoritmo simplificado é mostrado na sequência, realizando a identificação e descrição dos subprocessos, cujos fluxogramas são apresentados no Apêndice C.

4.1.1 Algoritmo simplificado

Dentro do algoritmo, foram definidos cinco subprocessos os quais são apresentados na Figura 43: parâmetros de entrada, definição da matriz base, duas fases de processamento, e a exportação dos resultados.

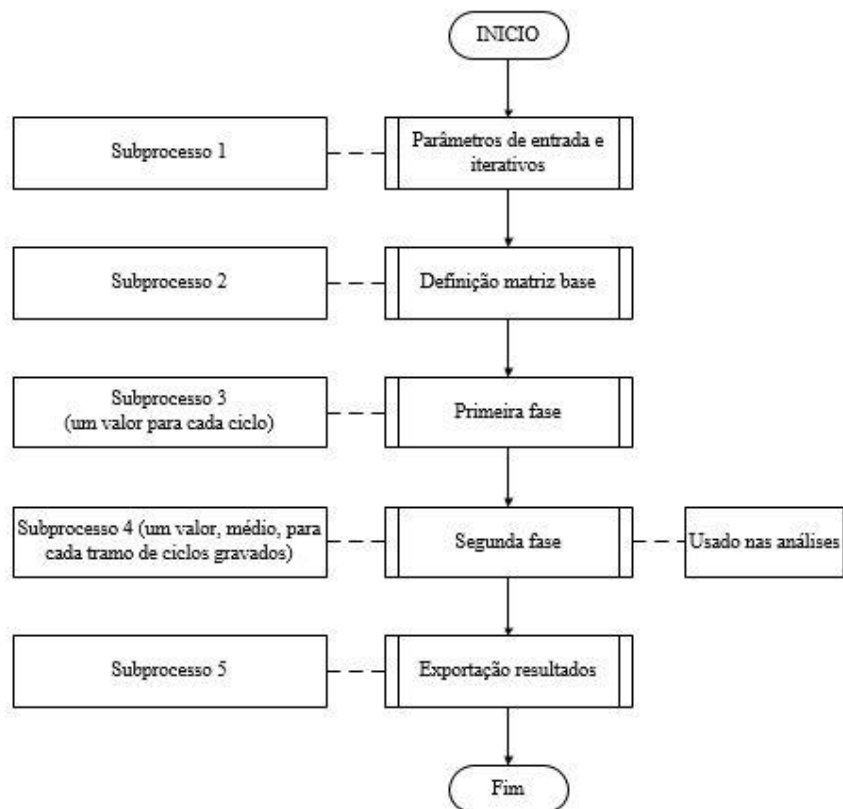


Figura 43. Algoritmo simplificado e subprocessos definidos

4.1.2 Definição de parâmetros de entrada

O primeiro subprocesso, detalhado no Apêndice C.1, é definido pelos parâmetros iterativos (ver item 3.4.4.1 (a)), além dos parâmetros de identificação do CP (ver item 3.1). A partir destes últimos são definidos os valores de largura, altura e RTF; assim como a localização da trinca, e do relatório base (gerado pelo SEEPAV).

4.1.3 Matriz base

O subprocesso 2, mostrado no Apêndice C.2, é um procedimento de adição de vetores complementares ao relatório base. Desta forma, a matriz usada durante este subprocesso contém um valor para cada ponto que define cada ciclo gravado, sendo adicionados os vetores complementares mostrados na Tabela 13. Desta forma, é obtida a matriz base (“*e*”). Adicionalmente verifica-se a localização da trinca de ruptura como critério de aceitação do ensaio e de cálculo das tensões de tração.

Tabela 13. Vetores complementares considerados no subprocesso 2

Variável	Unidade	Cálculo
Tensão de tração	MPa	Ver item 3.4.3.2
Deformação	microstrains	Ver item 3.4.3.3
Energia dissipada (parcial)	N*mm/mm ³	Ver item 3.4.4.6

Salienta-se que nos subprocessos 2, 3 e 4 cada variável sujeita às leituras dos LVDTs foi calculada de forma independente, assim como média, possibilitando a desconsideração de algum deles caso ocorrer problemas de leituras durante o ensaio.

4.1.4 Primeira fase do processamento

O subprocesso 3, detalhado no Apêndice C.3, é um procedimento iterativo que atribui um valor para cada um dos ciclos gravados. A partir da matriz base (“*e*”) é formada uma nova matriz (“*i*”) que contém os vetores de força, deslocamento e energia dissipada, calculados de acordo com a Tabela 14.

Tabela 14. Vetores considerados no subprocesso 3

Variável	Unidade	Cálculo
Força aplicada	N	Amplitude de onda
Deslocamento	mm	Amplitude de onda, conversão de unidades
Energia dissipada	N*mm/mm ³	Somatória de energia dissipadas parciais de cada ciclo gravado

4.1.5 Segunda fase do processamento

O subprocesso 4, mostrado no Apêndice C.4, é um procedimento iterativo que atribui um valor para cada intervalo de ciclos gravados, cujos valores são utilizados nas análises. Assim, a partir da matriz “*i*”, é gerada uma nova matriz (“*v*”) pela adição de vetores complementares agrupados em duas categorias: primárias e secundárias, como mostrado na Tabela 15.

Tabela 15. Vetores considerados no subprocesso 4

Categoria	Variável	Unidade	Cálculo
Vetores primários	Carga	N	Média do tramo de ciclos gravados (matriz <i>i</i>)
	Deslocamento	mm	
	Energia dissipada	J/m ³	Somatória do tramo de ciclos gravados (matriz <i>i</i>)
	Tensão de tração	MPa	Ver item 3.4.3.2
	Carga normalizada	--	A partir da RTF
	Deformação	microstrains	Ver item 3.4.3.3
	MRF	MPa	Ver item 3.4.4.5
	MRF normalizado	--	A partir do MRF inicial
Vetores secundários	ER	--	Ver item 5.5.3
	RDEC	--	

4.1.6 Exportação dos resultados

Por fim, no subprocesso 5 a nova matriz “*v*”, é exportada. Adicionalmente o algoritmo propõe a geração de gráficos de alguns dos vetores, como detalhado no Apêndice C.5.

4.2 IMPLEMENTAÇÃO

A implementação dos algoritmos descritos foi realizada pela programação no *software MatLab v. R2015a*, o qual tem um uso amplo, permite a criação e manipulação de matrizes sem a necessidade de dimensionamento prévio, além da manipulação de variáveis de forma interativa. Contudo, a implementação pode ser feita em outras linguagens de programação. É apresentado o princípio de funcionamento do código (*script*) programado, a partir da descrição dos parâmetros de entrada e saída, como mostrados na Figura 44.

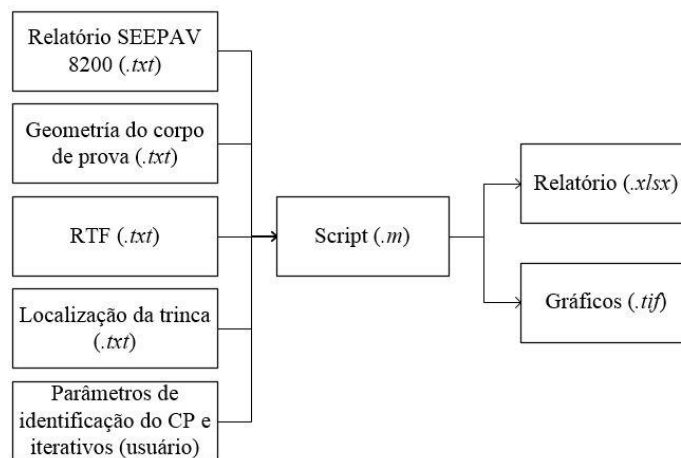


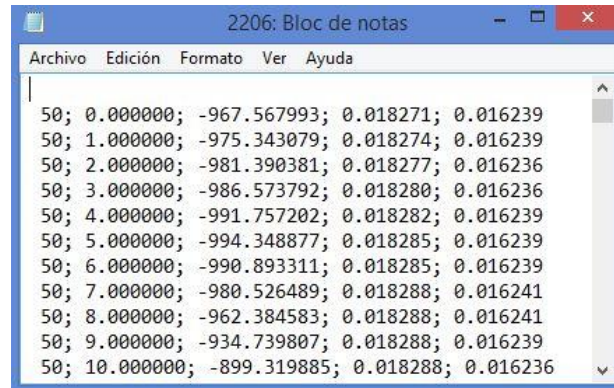
Figura 44. Parâmetros de entrada e saída do programa

4.2.1 Entrada

São descritos os parâmetros de entrada requeridos pelo código para o processamento da informação

4.2.1.1 Relatório SEEPAV

O *software* do sistema SEEPAV 8200 na sub-rotina de fadiga gera um relatório do tipo *.txt* onde são registrados (ver Figura 45, da esquerda para a direita): número do ciclo, identificação do ponto, e leitura da célula de carga, do LVDT 0 e do LVDT 1 para cada um dos pontos analisados.



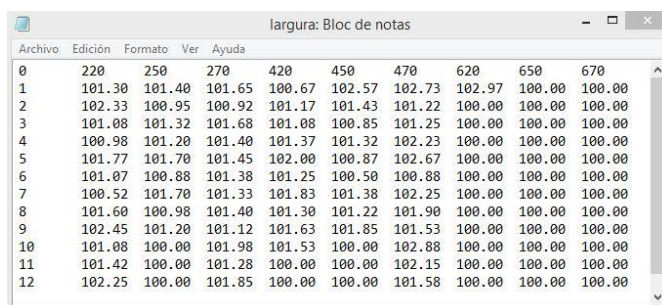
Row	Value 1	Value 2	Value 3	Value 4
50;	0.000000;	-967.567993;	0.018271;	0.016239
50;	1.000000;	-975.343079;	0.018274;	0.016239
50;	2.000000;	-981.390381;	0.018277;	0.016236
50;	3.000000;	-986.573792;	0.018280;	0.016236
50;	4.000000;	-991.757202;	0.018282;	0.016239
50;	5.000000;	-994.348877;	0.018285;	0.016239
50;	6.000000;	-990.893311;	0.018285;	0.016239
50;	7.000000;	-980.526489;	0.018288;	0.016241
50;	8.000000;	-962.384583;	0.018288;	0.016241
50;	9.000000;	-934.739807;	0.018288;	0.016239
50;	10.000000;	-899.319885;	0.018288;	0.016236

Figura 45. Relatório gerado pelo *software* SEEPAV 8200. CP 2-20 (6)

Na Figura 45 é mostrado o relatório gerado pelo SEEPAV a partir do qual é construída a matriz base. A segunda coluna é função da frequência do ensaio e da resolução do equipamento sendo que, por exemplo, a Figura 40 e a Figura 41 constituem a representação gráfica de 200 pontos. Pelo fato de ser um ensaio feito a 5 Hz, no caso de estudo o sistema assigna 40 pontos para definir cada um dos pulsos.

4.2.1.2 Geometria, localização de trinca e RTF

Como indicado no item 3.4.2, são registrados os valores da largura e altura de cada uma das vigas. A média dos três valores medidos são salvos como um arquivo *.txt* no formato $m \times n$ (ver Figura 46 (a)) para ser empregado pelo código. De forma similar, é feito com os valores de localização da trinca de cada ensaio de fadiga (como descrito no item 3.4.3.1), e da RTF de cada mistura (Figura 46 (b))



	220	250	270	420	450	470	620	650	670
0	220	250	270	420	450	470	620	650	670
1	101.30	101.40	101.65	100.67	102.57	102.73	102.97	100.00	100.00
2	102.33	100.95	100.92	101.17	101.43	101.22	100.00	100.00	100.00
3	101.08	101.32	101.68	101.08	100.85	101.25	100.00	100.00	100.00
4	100.98	101.20	101.40	101.37	101.32	102.23	100.00	100.00	100.00
5	101.77	101.70	101.45	102.00	100.87	102.67	100.00	100.00	100.00
6	101.07	100.88	101.38	101.25	100.50	100.88	100.00	100.00	100.00
7	100.52	101.70	101.33	101.83	101.38	102.25	100.00	100.00	100.00
8	101.60	100.98	101.40	101.30	101.22	101.90	100.00	100.00	100.00
9	102.45	101.20	101.12	101.63	101.85	101.53	100.00	100.00	100.00
10	101.08	100.00	101.98	101.53	100.00	102.88	100.00	100.00	100.00
11	101.42	100.00	101.28	100.00	100.00	102.15	100.00	100.00	100.00
12	102.25	100.00	101.85	100.00	100.00	101.58	100.00	100.00	100.00

(a)



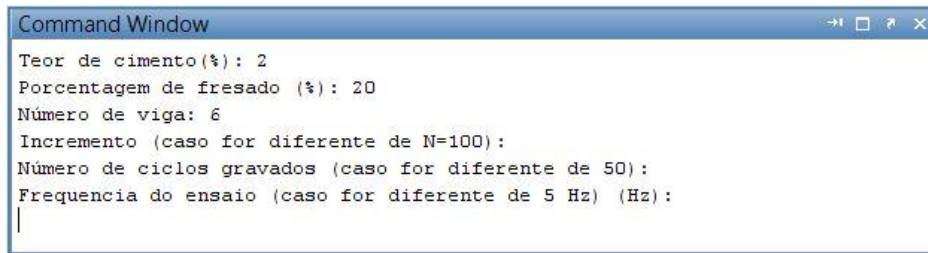
Value	RTF
220	0.255393
250	0.322113
270	0.210200
420	0.866187
450	0.774585
470	0.804125
620	1.529336
650	1.213349
670	1.112713

(b)

Figura 46. Formato dos parâmetros de entrada: (a) dimensões, (b) RTF

4.2.1.3 Parâmetros solicitados ao usuário

Como último passo antes de iniciar o processamento, o código solicita ao usuário as informações descritas no item 4.1.2. Os parâmetros iterativos foram os definidos no item 3.4.4.3, podendo ser mudados em função das necessidades do programa experimental. A Figura 47 mostra o programa (código) em andamento e os parâmetros descritos.



```

Command Window
Teor de cimento(%): 2
Porcentagem de fresado (%): 20
Número de viga: 6
Incremento (caso for diferente de N=100):
Número de ciclos gravados (caso for diferente de 50):
Frequencia do ensaio (caso for diferente de 5 Hz) (Hz):
|
  
```

Figura 47. Programa em execução e parâmetros solicitados ao usuário.
CP: 2-20 (6)

4.2.2 Saída

São descritos os dados de saída como resultado do processamento, seguindo o proposto no subprocesso 5, descrito no Apêndice C.5.

4.2.2.1 Relatório

O programa gera um relatório (.xlsx), como o mostrado na Figura 48, sendo que as unidades correspondem às mostradas na Tabela 15. São indicadas as colunas correspondentes: ciclo inicial e final (A e B), carga (C), deslocamentos (D e E), tensão de tração (F), carga normalizada (G), deformações (H, I e J), MRF (K, L e M) e energia dissipada (N, O e P). Da mesma forma também estão incluídas as variáveis secundárias.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	50	99	382,7	6,14E-03	6,68E-03	0,105	0,41	31,9	34,7	33,3	3294	3028	3161	1,47	1,22	1,34
2	150	199	443,5	7,04E-03	8,45E-03	0,122	0,48	36,6	43,9	40,3	3328	2775	3051	1,90	1,74	1,82
3	250	299	450,4	7,40E-03	8,75E-03	0,124	0,48	38,5	45,5	42,0	3215	2721	2968	1,98	1,85	1,91
4	350	399	453,5	7,53E-03	8,92E-03	0,125	0,49	39,2	46,4	42,8	3181	2687	2934	2,03	1,95	1,99
5	450	499	456,2	7,66E-03	9,18E-03	0,125	0,49	39,9	47,7	43,8	3146	2626	2886	2,07	2,03	2,05
6	550	599	455,9	7,70E-03	9,26E-03	0,125	0,49	40,0	48,1	44,1	3129	2603	2866	2,07	2,03	2,05
7	650	699	454,8	7,71E-03	9,27E-03	0,125	0,49	40,1	48,2	44,1	3118	2594	2856	2,07	2,01	2,04
8	750	799	453,6	7,78E-03	9,21E-03	0,125	0,49	40,5	47,9	44,2	3082	2602	2842	2,07	2,02	2,04
9	850	899	452,1	7,76E-03	9,24E-03	0,124	0,49	40,3	48,1	44,2	3081	2584	2833	2,06	2,01	2,03
10	950	999	450,7	7,82E-03	9,17E-03	0,124	0,49	40,7	47,7	44,2	3046	2596	2821	2,06	2,02	2,04
11	1050	1099	449,3	7,77E-03	9,22E-03	0,123	0,48	40,4	48,0	44,2	3057	2575	2816	2,07	2,00	2,03
12	1150	1199	447,9	7,75E-03	9,21E-03	0,123	0,48	40,3	47,9	44,1	3054	2570	2812	2,04	1,98	2,01
13	1250	1299	447,2	7,72E-03	9,38E-03	0,123	0,48	40,1	48,8	44,5	3062	2519	2791	2,06	1,98	2,02
14	1350	1399	446,8	7,79E-03	9,26E-03	0,123	0,48	40,5	48,2	44,3	3031	2550	2791	2,06	2,00	2,03

Figura 48. Relatório gerado – CP 2-20 (6).

No caso do exemplo mostrado, CP 2-20 (6), cuja ruptura foi no ciclo 48881 (48799 registrados), o relatório do SEEPAV contém 976000 filas de dados (48800 ciclos x 40 pontos/ciclo x 0,5 incremento/número de ciclos gravados) que são reduzidas a 488 (976000 pontos ÷ 40 pontos/ciclo ÷ 50 ciclos/tramo), possibilitando a utilização de programas como Microsoft Excel para a análise dos resultados.

Salienta-se que no caso dos ensaios que atingiram $N = 10^6$ ciclos, sob os parâmetros iterativos definidos, o relatório do SEEPAV gera $2 \cdot 10^7$ filas de dados, sendo que após o processamento o número de filas geradas é 10000

4.2.2.2 Resultados gráficos do processamento

O programa gera gráficos da resposta média dos LVDTs: tensão, tensão normalizada, deformação, MRF e energia dissipada. Como fins ilustrativos da filtragem resultado do processamento, a Figura 49 (b) mostra os dados empregados nas análises, junto a aqueles resultados da primeira fase de processamento opcionais indicada na Figura 49 (a), onde é evidente a redução do volume informação.

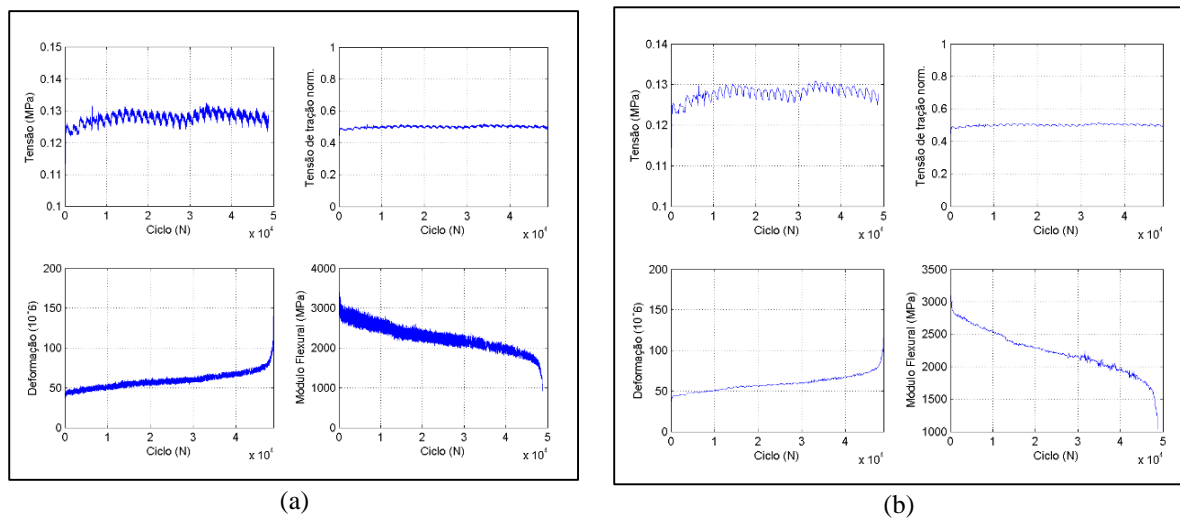


Figura 49. Gráficos tensão, tensão normalizada, deformação e MRF – CP 2-20 (6): (a) primeira e (b) segunda fase de processamento

4.3 LIMITAÇÕES

Os parâmetros iterativos definidos no item 3.4.4.1 podem ser modificados, sendo que o código considera as seguintes limitações:

- a) O número de ciclos gravados deve ser menor do que o incremento;
- b) A frequência de aquisição de dados deve ser múltiplo da frequência do ensaio. Isto é causado porque o código foi desenvolvido a partir da geração de matrizes cujas dimensões são função da resolução do sistema. Assim, as iterações asseguram o mesmo número de pontos para cada ciclo.

Como descrito, o código permite gerar um relatório similar para o primeiro segmento do processamento, isto é, um valor para cada ciclo, no entanto foi desconsiderado pelo tempo de processamento e pelas necessidades do programa experimental. Da mesma forma, os gráficos não foram considerados durante o processamento realizado, devido à exigência de recursos de memória para a geração dos mesmos. Os gráficos mostrados no capítulo 5 são produto do pós-processamento, no programa Microsoft Excel.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos na pesquisa. São divididos em seis itens: caracterização dos materiais, ensaios de compactação, avaliação do método de moldagem das vigas, ensaios de RTF, ensaios de fadiga, e avaliação dos modelos por meio do dimensionamento de estruturas de pavimento.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

São apresentados os resultados da análise granulométrica dos materiais empregados: fresado e BGS, bem como a BGS da rodovia RSC-453, os agregados minerais virgens (separadamente e misturados). Da mesma forma são mostradas as granulometrias estimadas das misturas estudadas. Por fim, são apresentados resultados do teor de ligante asfáltico extraído.

5.1.1 Análise granulométrica

As granulometrias dos agregados minerais virgens são apresentadas na Figura 50. A partir destes resultados, foram definidas as proporções de cada graduação a ser usada, como relatado no item 3.4.1.1.

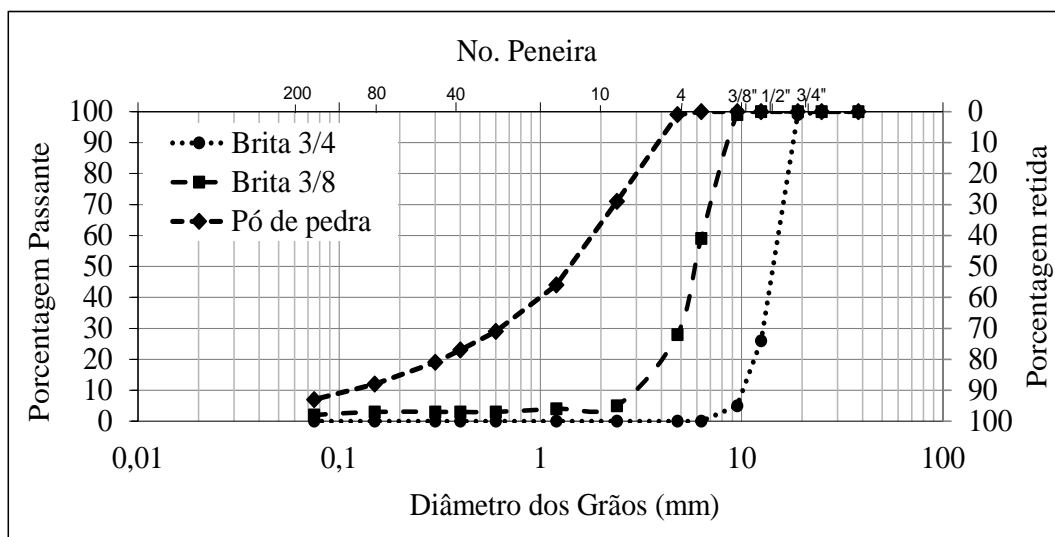


Figura 50. Granulometria dos agregados minerais virgens

A granulometria dos material formado, e do material coletado (BGS 453) são apresentadas na Figura 51, mostrando que ambas as curvas tem distribuições granulométricas muito próximas.

A mistura destes dois tipos de brita constitui a BGS utilizada na pesquisa, sendo que as granulometrias da BGS definitiva e do fresado são mostradas na Figura 52.

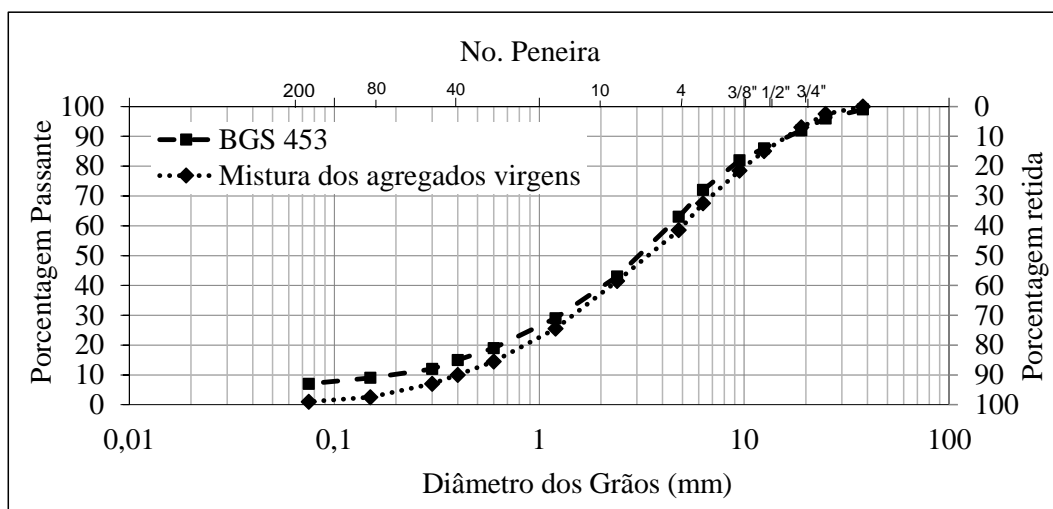


Figura 51. Curvas granulométricas: agregados virgens e BGS 453

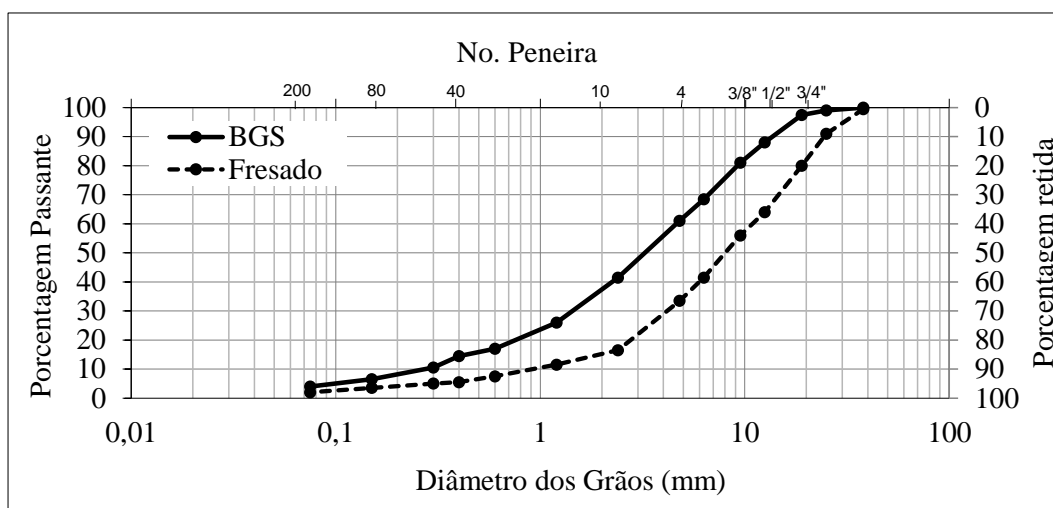


Figura 52. Granulometria de materiais utilizados na pesquisa: BGS e fresado

A partir das granulometrias individuais foram calculadas as granulométricas correspondentes às misturas estudadas. Adicionalmente, como pode-se verificar na Figura 53, estas granulometrias compostas se encaixam na faixa granulométrica adotada na pesquisa (WIRTGEN, 2012), mostrando que não foi necessário realizar estabilizações mecânicas adicionais.

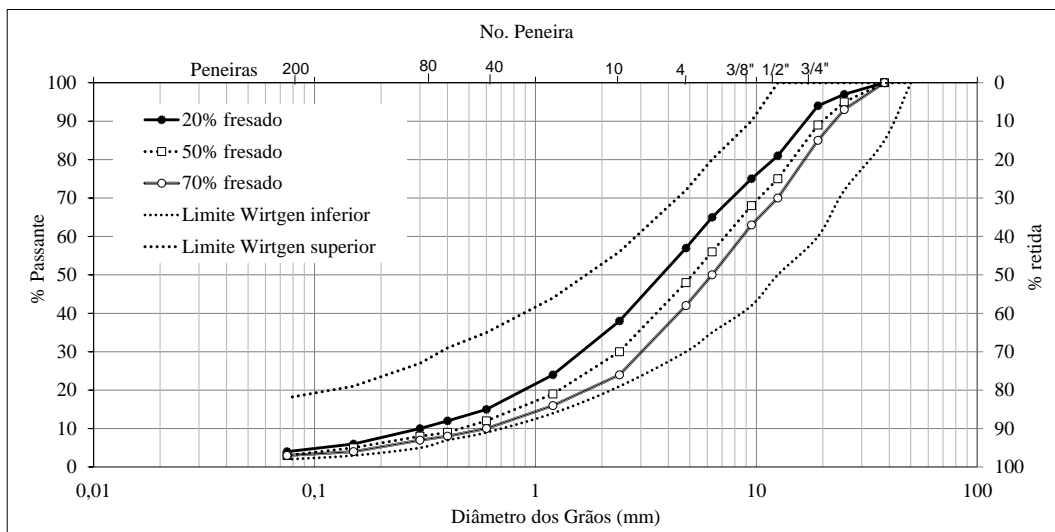


Figura 53. Granulometria misturas e enquadramento nas faixas granulométricas

5.1.2 Teor de ligante

O teor de ligante médio obtido foi de 3,84 %. Aliás, tanto antes, quanto depois do ensaio foi realizado o ensaio de análise granulométrica por peneiramento cujos resultados são mostrados na Figura 54, evidenciando uma graduação originalmente densa. A variação, causada pelo efeito aglutinante do ligante asfáltico, atinge 42,75% (6,3 mm) e no caso do material menor de 0,075 mm a diferença percentual atinge 9,10%.

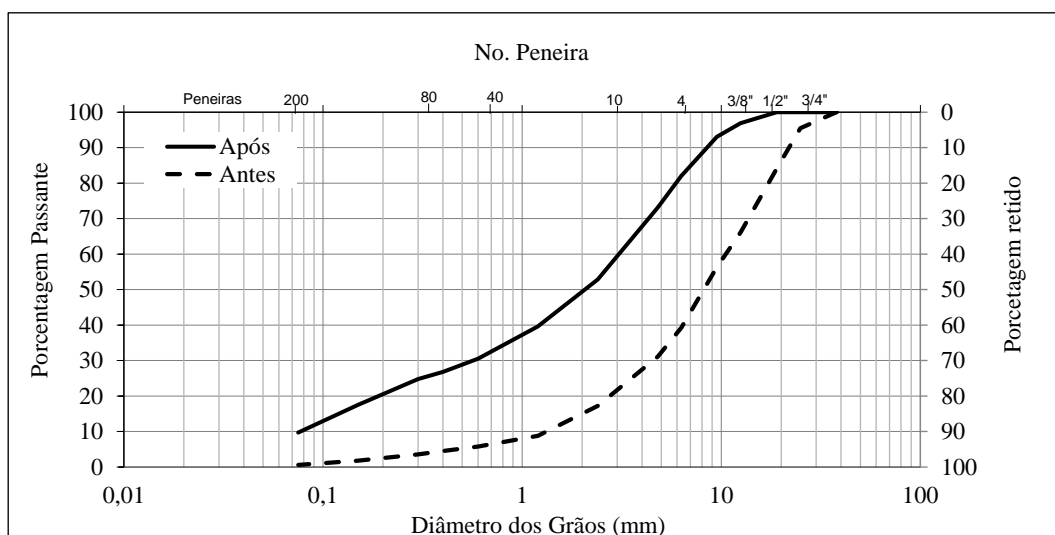


Figura 54. Granulometria do fresado antes e após o ensaio de refluxo

5.2 COMPACTAÇÃO

Para melhor visualização dos resultados dos ensaios de compactação, são agrupados segundo o teor de cimento na Figura 55 (2 %), na Figura 56 (4 %) e na Figura 57 (6 %) e apresentados para cada uma das misturas na Tabela 16. Como indicado na Tabela 9, as compactações realizadas nesta pesquisa correspondem às misturas 2-70, 6-20, 6-50 e 6-70.

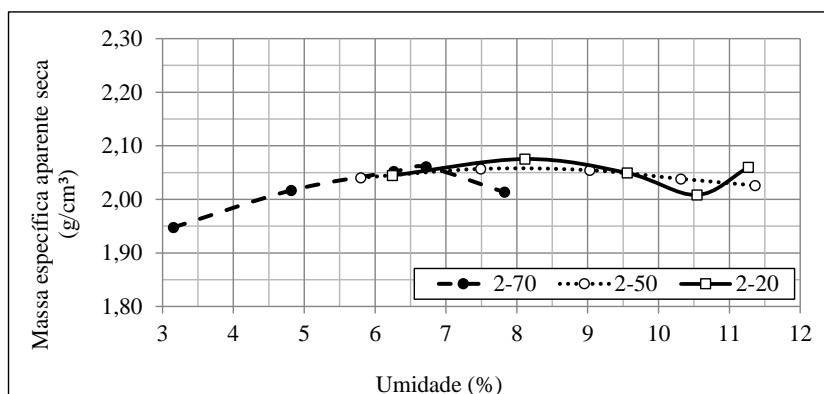


Figura 55. Resultados compactações 2% de cimento

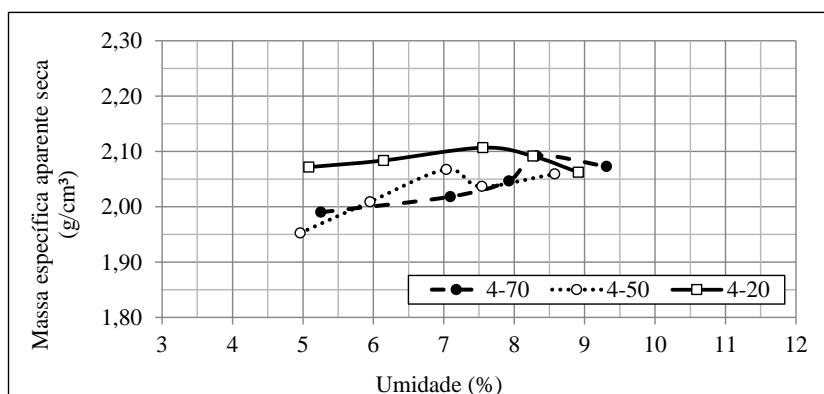


Figura 56. Resultados compactações 4% de cimento.

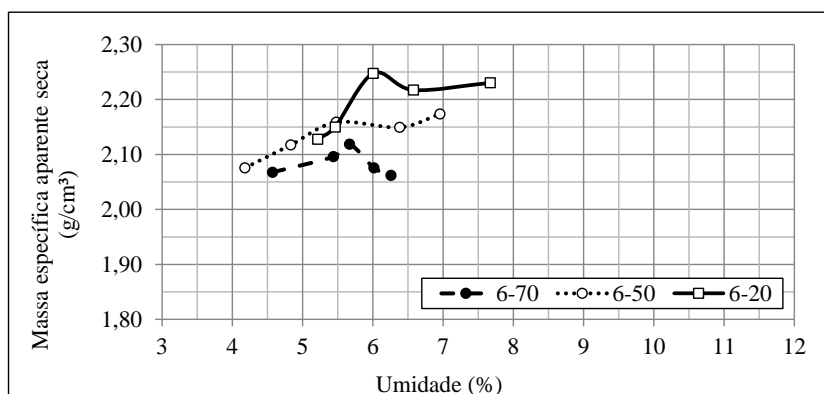


Figura 57. Resultados compactações 6% de cimento

Tabela 16. Resultados ensaios de compactação

Mistura	Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)	Umidade ótima (%)
2-20	2,08	8,1
2-50	2,06	8,0
2-70	2,06	6,7
4-20	2,11	7,6
4-50	2,07	7,0
4-70	2,09	8,3
6-20	2,25	6,0
6-50	2,16	5,5
6-70	2,12	5,7

Nas curvas de compactação é possível observar o efeito da umidade de compactação em função do incremento no teor de cimento, assim, o valor massa específica aparente seca das misturas com 2 % tem uma dependência menor do que o caso das misturas 6 %, isto é, apresentam menor variação de massa específica aparente seca máxima. Este comportamento indica que a incorporação de água exerce pouca influência na compatibilidade de misturas com baixos teores de cimento, como relatado por Kleinert (2016). Salienta-se que no caso de se apresentar um segundo pico em algumas das curvas, este foi desconsiderado devido à exsudação, que não representa condições ótimas de compactação.

Contudo, os resultados não mostraram uma maior influência do teor de cimento e da porcentagem de fresado sobre a massa específica aparente seca máxima. Assim, com relação a este parâmetro, como apresentado na Figura 58 (a), o conteúdo de cimento é a variável que maior influência apresenta, especialmente de 4 % para 6 %. No entanto, como mostrado na Figura 58 (b), a graduação mais aberta do RAP reduz os valores da massa específica aparente ótima seca, principalmente para misturas com maior conteúdo de cimento. Este comportamento foi relatado por Dellabianca (2004) e por Taha *et al* (2001) para materiais reciclados, sendo que em ambos os casos, os autores advertem o aumento do valor da massa específica aparente seca máxima com a redução do conteúdo de fresado e o aumento do teor de cimento.

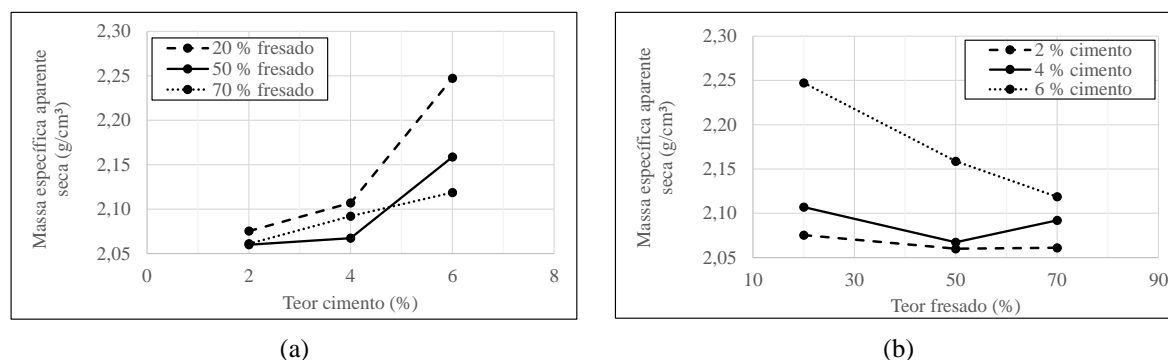


Figura 58. Variação da massa específica aparente seca ótima seca em função de: (a) teor de cimento, (b) porcentagem de fresado

Globalmente os valores de massa específica aparente seca ótima seca tem variações pequenas (2,06 a 2,25 g/cm³), contrário do caso de umidades ótimas (5,5 % a 8,3 %).

5.3 MOLDAGEM

Procurando avaliar o método de compactação empregado, o método de compactação estático empregado na moldagem das vigas foi comparado com relação aos resultados dos ensaios de compactação mostrados no item anterior, através do grau de compactação (GC) de cada mistura. Como mostrado na Figura 59, nenhuma das 94 vigas moldadas atingiu o GC de 100 %, porém, somente 3 tiveram um GC menor do que 95 %, evidenciando que dentro dos critérios estabelecidos o método de compactação tem um desempenho satisfatório. Aliás, são sinaladas as vigas cujos resultados foram desconsiderados (“x”).

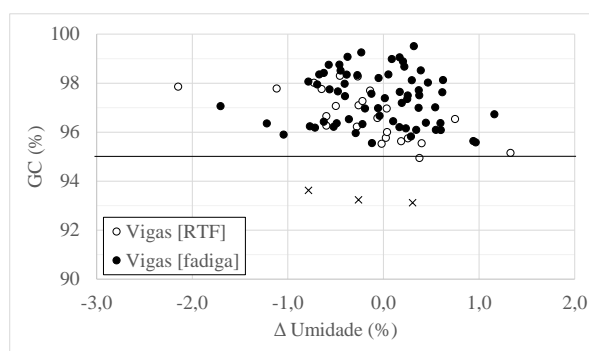


Figura 59. Comparação: variação de umidade de compactação x GC

De outra parte, foi avaliado o efeito da variação da umidade de moldagem e do GC a partir dos resultados do ensaio RTF, como mostrado no item 5.4.1.

5.4 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Neste item são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios estáticos: resistência à tração na flexão, deformação na ruptura e módulos flexurais estáticos secantes.

5.4.1 Resistência à tração na Flexão

A Tabela 17 apresenta os valores médios dos resultados de três corpos de prova para cada mistura, além do desvio padrão e do coeficiente de variação (CV). Como mostrado na Figura 61, foram desconsiderados cinco corpos de prova, estabelecendo um critério de (± 30 % da média). Os valores do CV foram no máximo do 25,8 %, no entanto, os resultados não indicam influência entre composição da mistura e a variação dos resultados.

Tabela 17. Resultados de RTF

Mistura	Média RTF (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
2-20	0,26	0,03	13,0
2-50	0,32	0,05	15,1
2-70	0,21	0,02	7,6
4-20	0,87	0,08	9,2
4-50	0,78	0,15	19,0
4-70	0,80	0,00	0,3
6-20	1,53	0,22	14,4
6-50	1,21	0,22	18,2
6-70	1,11	0,29	25,8

O efeito da inclusão do teor de cimento e de fresado é mostrado na Figura 60. Sendo claro o incremento de resistência causado pelo acréscimo de cimento, contrário do efeito do acréscimo de fresado, que causou uma redução na RTF para o teor mais alto de cimento empregado.

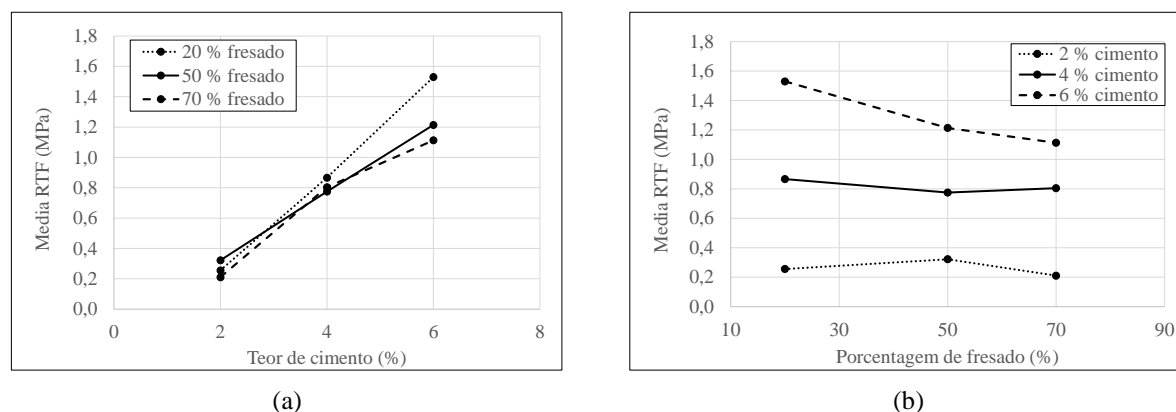


Figura 60. RTF em função de:
(a) teor de cimento, (b) porcentagem de fresado

A influência do acréscimo de fresado na RTF de misturas recicladas com cimento tem sido relatado por KOLIAS, KATSAKOU e KALIODAS (2001). No estudo, corpos de prova das mesmas dimensões, para misturas recicladas de 3 % e 5 % de cimento e 1 e 60 dias de cura foram submetidos a ensaios de RTF. Mesmo que as misturas não sejam iguais do que as estudadas nesta pesquisa, os autores indicam o maior incremento da RTF como função do tempo de cura e do teor de cimento. Aliás, o valor da resistência só decresce para conteúdos maiores ao 50 % de RAP.

De outra parte, os resultados de tensão de tração (valores normalizados pela RTF para cada viga dependendo da mistura) foram empregados para avaliar a influência dos parâmetros de compactação, como mostrado na Figura 61. A área delimitada corresponde aos critérios de aceitação definidos e os pontos representados como “x” indicam vigas desconsideradas. Inicialmente a comparação foi realizada por cada mistura, no entanto não foram encontradas variações em função da composição da mistura, pelo qual foram comparadas todas em conjunto. Assim, de forma geral pode-se concluir que o GC tem um maior efeito do que a variação da umidade de sobre a RTF.

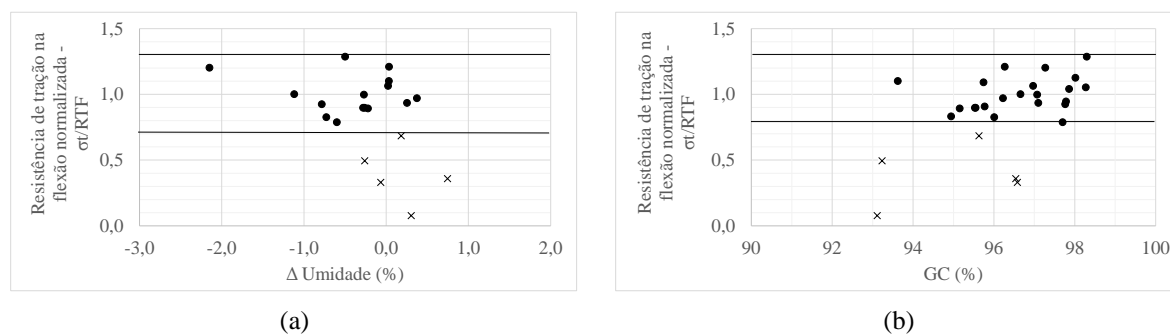


Figura 61. Valores de RTF normalizados como função da (a) variação de umidade de compactação e do (b) GC

5.4.2 Deformação na ruptura

A média da deformação na ruptura (ε_b) é mostrada na Tabela 18, além do desvio padrão e o CV. Salienta-se que problemas de leitura de deslocamentos das vigas 4-20 levaram a que só um dos resultados fosse considerado, pelo qual não foi possível verificar a variabilidade nesta mistura. Os coeficientes de variação indicam uma variabilidade que atinge um CV de 31 %, evidenciando as dificuldades de obtenção de um valor representativo.

Tabela 18. Resultados de deformação na ruptura, ε_b

Mistura	Média deformação (microstrain)	Desvio padrão (microstrain)	CV (%)
2-20	117	18	16
2-50	262	82	31
2-70	371	92	25
4-20	194	--	--
4-50	288	49	17
4-70	566	23	4
6-20	193	19	10
6-50	286	47	16
6-70	409	110	27

Os resultados indicam um maior efeito da inclusão de fresado do que o teor de cimento sobre os valores de deformação na ruptura. De forma geral, como mostrado na Figura 63 (a), para cada teor de cimento empregado as deformações de tração são determinadas principalmente pela porcentagem de fresado. Na Figura 62 apresentam-se como exemplo as curvas tensão

normalizada x deformação das misturas 4 % de cimento, que permitem visualizar este comportamento. As curvas das demais misturas são apresentadas no Apêndice D.1.

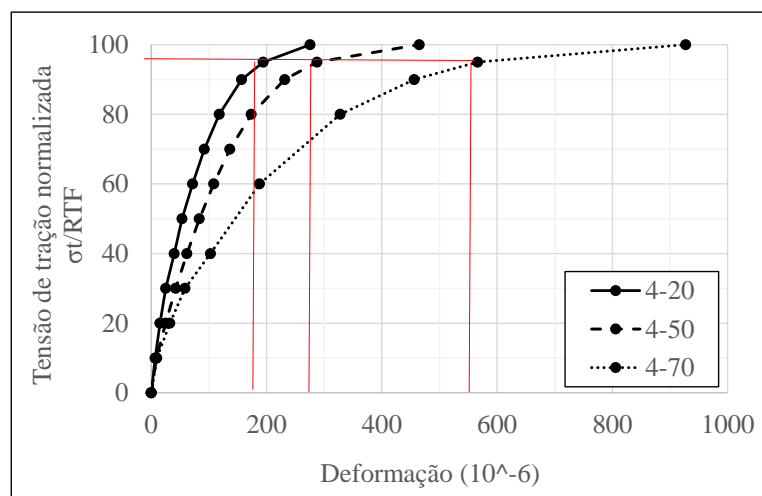


Figura 62. Curvas tensão normalizada x deformação: misturas 4 % de cimento

Aliás, a Figura 63 (b) permite ver o incremento da deformação de ruptura em função do teor de fresado. Entre as causas deste comportamento, como relatado no item 2.1.1.2, está o efeito da possível interface entre o fresado e o cimento, ou a granulometria da mistura. Contudo, a evidência mostra o aumento da viscosidade da mistura como resultado do conteúdo de fresado.

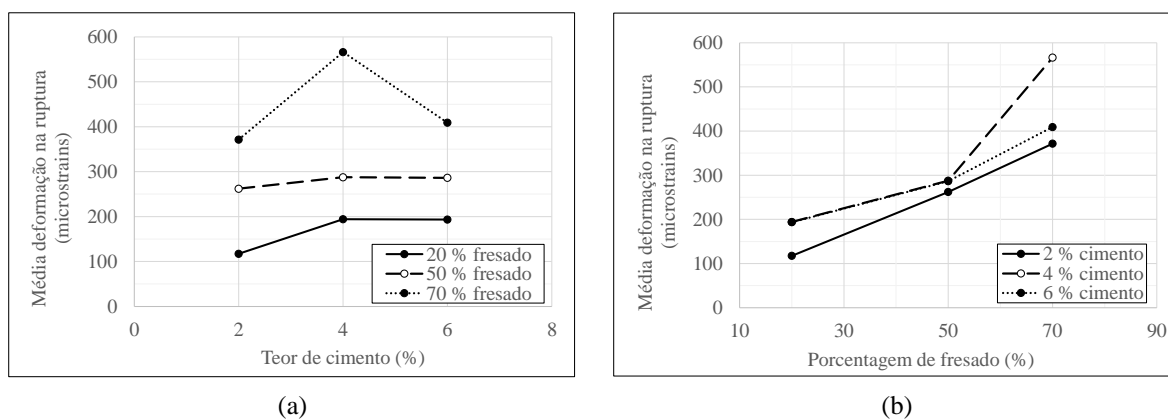


Figura 63. Deformação na ruptura em função de: (a) teor de cimento, (b) porcentagem de fresado

5.4.3 Módulo estático flexural

Como anteriormente mencionado, no Apêndice D.1 são mostradas as curvas tensão-deformação. Todas as curvas apresentam um comportamento inicialmente elástico, indicando que não se apresentam fissuração. Após a geração das primeiras fissuras, um comportamento não linear é observado evidenciado pela mudança de rigidez que rapidamente leva a uma ruptura frágil. Desta forma, foi preciso estabelecer um critério que permita caracterizar adequadamente a faixa correspondente ao comportamento elástico das curvas tensão-deformação, tendo como referência o MEF secante. São mostrados os resultados da média dos MEF, além do desvio padrão e CV correspondentes.

5.4.3.1 Módulos secantes

Todas as curvas de variação dos MEF, apresentadas no Apêndice D.2 seguem o padrão mostrado na Figura 64, evidenciado a dependência do estado de tensões no comportamento flexural estático da mistura. Assim, a redução do valor do MEF como função do nível de carga é constante com o aumento do nível de carregamento. Assim, o valor máximo no tramo de carga analisado (30 % a 60 %) corresponde ao 30 % da RTF.

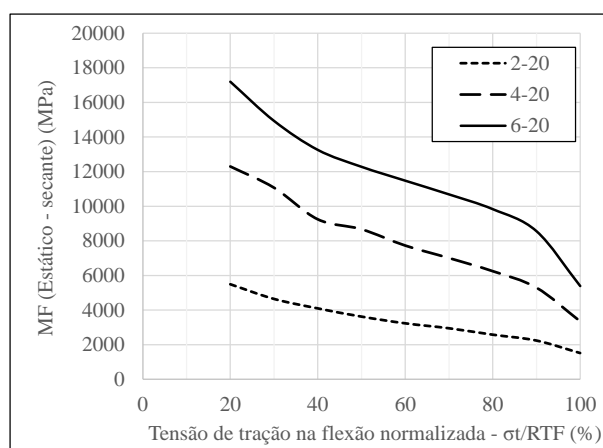


Figura 64. Redução do MEF-S com o nível de carregamento

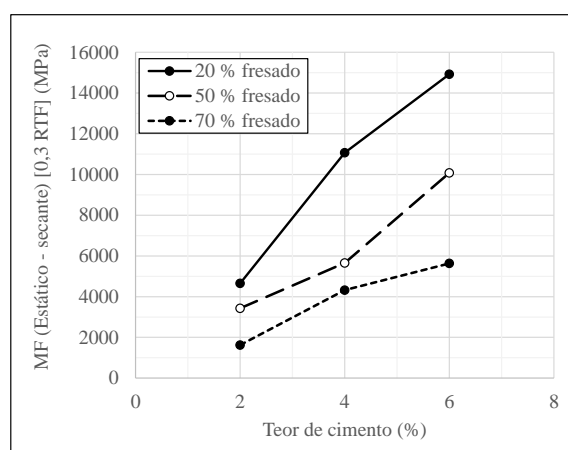
A redução no valor do módulo pela adição de fresado foi mais evidente para misturas com altos teores de cimento, e da mesma forma, o ganho no valor do módulo foi mais notória para misturas com menos conteúdo de fresado.

São apresentados os resultados de MEF para 30 % e 40 % da RTF na Tabela 19, e mostrados graficamente na Figura 65 e na Figura 66. A variação dos resultados é menor para níveis de

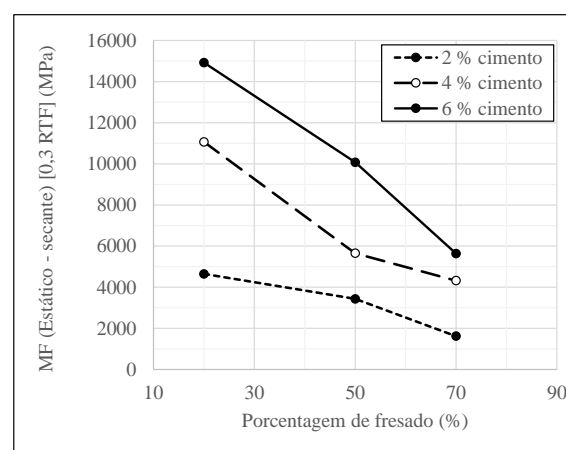
tensão maiores. Se adverte do incremento do valor do módulo como função do incremento do teor de cimento e a sua redução pelo acréscimo do conteúdo de fresado.

Tabela 19. Resultados de MEF: 30 % e 40 % da RTF

Mistura	MEF 30 % RTF	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	MEF 40 % RTF	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
2-20	4649	1437	31	4103	964	24
2-50	3432	552	16	2957	330	11
2-70	1622	350	22	1422	224	16
4-20	11072	--	--	9246	--	--
4-50	5655	1051	19	5110	782	15
4-70	4323	1293	30	3183	570	18
6-20	14928	4624	31	13255	3093	23
6-50	10075	3986	40	9095	3092	34
6-70	5631	1146	20	5301	1022	19



(a)



(b)

Figura 65. MEF (30 % RTF) em função do: (a) teor de cimento, (b) porcentagem de fresado

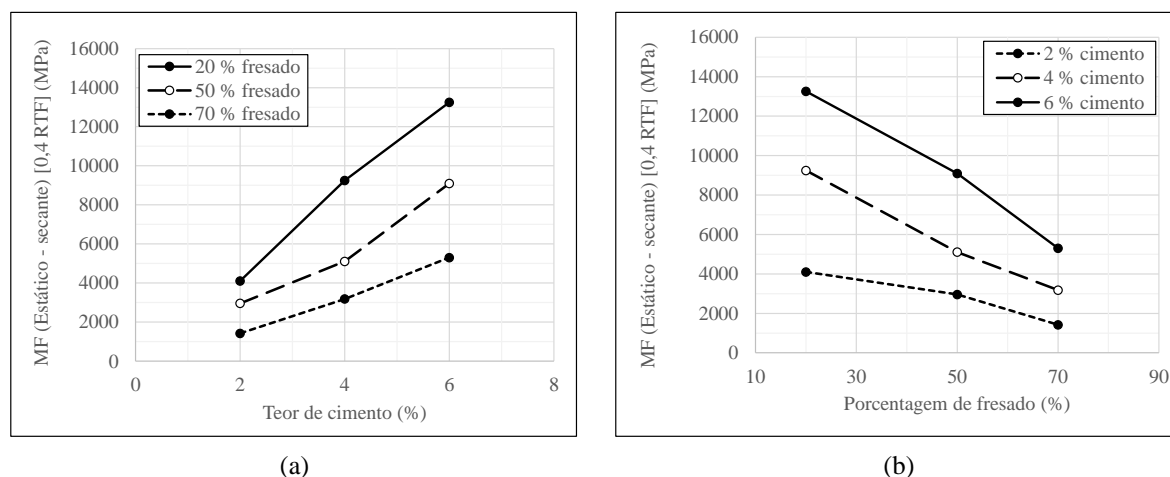


Figura 66. MEF-S (40 % RTF) em função de: (a) teor de cimento, (b) porcentagem de fresado

Tem-se sinalado a redução do módulo de elasticidade com o acréscimo do conteúdo de fresado (KOLIAS; KATSAKOU; KALIODAS, 2001). Neste sentido, tem-se apontado que o incremento de agregado virgem em substituição do RAP forma um esqueleto mineral mais rígido e conseqüentemente, um módulo de elasticidade maior (KOLIAS, 1996).

5.4.3.2 Comparação dos métodos de cálculo do MEF

O comparativo é representado na Figura 67. Tem-se que o nível de tensão definido pelo primeiro método sobreestima os módulos em comparação com o método da *Austroads* (2008). Este método, além de simples, é uma boa aproximação à caracterização do comportamento elástico dos materiais estudados.

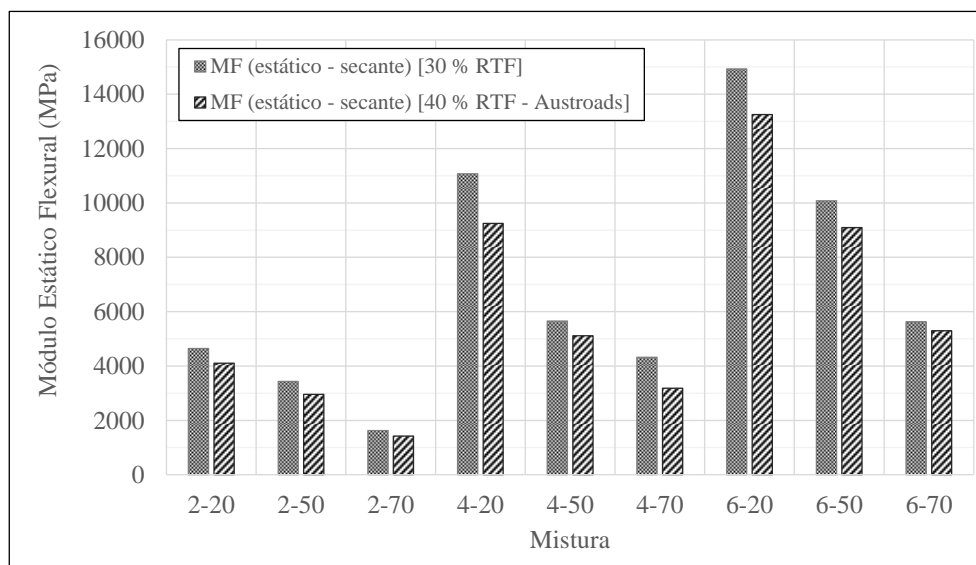


Figura 67. Comparativo de estimativa do MEF

5.5 ENSAIOS DE FADIGA À FLEXÃO EM QUATRO PONTOS

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios de fadiga. São apresentados os módulos de resiliência flexurais (MRF), modelos de vida de fadiga e por fim, a avaliação da degradação das misturas a partir de uma abordagem tradicional e de energia dissipada.

5.5.1 Módulo de resiliência flexural

Foi empregada a média dos MRF iniciais das vigas testadas no ensaio de fadiga. Salienta-se que o MRF inicial foi definido como a média obtida dos ciclos 50 a 99. Os resultados individuais são detalhados no Anexo E.1 enquanto, os valores médios, o desvio padrão e o CV são mostrados na Tabela 20. Os baixos valores dos CV evidenciam a invariância do MRF com respeito do nível de tensão empregado, como é considerado pelos métodos de dimensionamento relatados.

Tabela 20. MRF inicial

Mistura	Média MRF inicial (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
2-20	2955	274	9
2-50	2986	433	15
2-70	2913	442	15
4-20	7725	667	8
4-50	4772	683	14
4-70	4871	654	13

De acordo com a classificação da *Austroads* (2002) mostrada na Tabela 2, para definição do nível de cimentação das misturas estudadas, todas as misturas correspondem a misturas “levemente cimentadas”, com exceção da mistura 4-20 que corresponderia a um material “fortemente cimentado”. De forma similar ao caso dos MEF, o efeito do fresado é menor com relação ao incremento do teor de cimento. Adverte-se do comportamento muito próximo das misturas 50 % e 70 % de fresado.

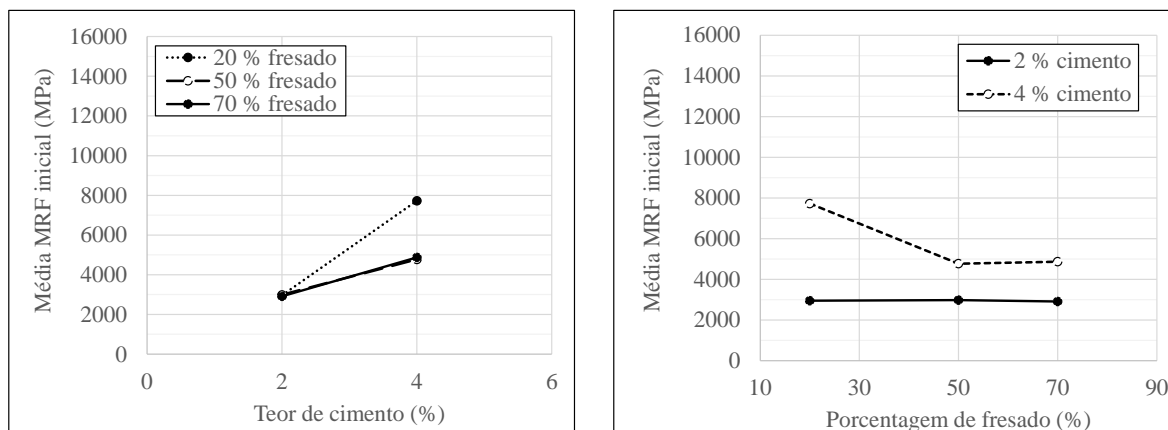


Figura 68. MRF em função do: (a) teor de cimento, (b) porcentagem de fresado

Foi avaliado o comportamento elástico e resiliente do material pela comparativa do MEF (40 % da RTF) e do MRF inicial na Figura 69 e na Tabela 21. Os valores dos CV são mais altos no caso das misturas com o maior conteúdo de fresado. Contudo, os resultados mostram a correlação entre o comportamento resiliente e elástico das misturas estudadas.

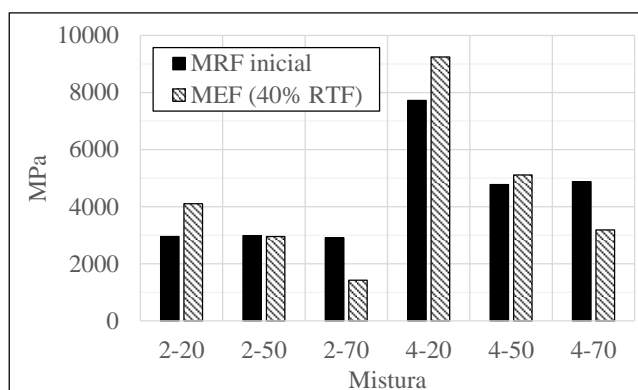


Figura 69. Comparativo MEF e MRF

Tabela 21. Comparativo MRF inicial x MEF

Mistura	Média MRF inicial e MEF (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
2-20	3529	704	20
2-50	2972	61	2
2-70	2167	1011	47
4-20	8486	265	3
4-50	4941	138	3
4-70	4027	1323	33

5.5.2 Modelos de fadiga

São apresentados os modelos de fadiga obtido em função das tensões e deformações de tração inicial, além da energia dissipada inicial. Adicionalmente foi realizada a comparação dos três tipos de modelos em função dos coeficientes de correlação e dos expoentes de dano. Entretanto, os resultados detalhados são apresentados no Apêndice E.1.

Salienta-se que a análise direta dos modelos ou das curvas de forma direta buscando comparar a vida de fadiga pode levar a conclusões equivocadas, em função de que cada mistura possui MRF e RTF diferentes, como foi apresentado, tendo respostas estruturais diferenciadas. Neste sentido, no item 5.6, foram empregadas modelagens mecânicas para avaliação dos modelos.

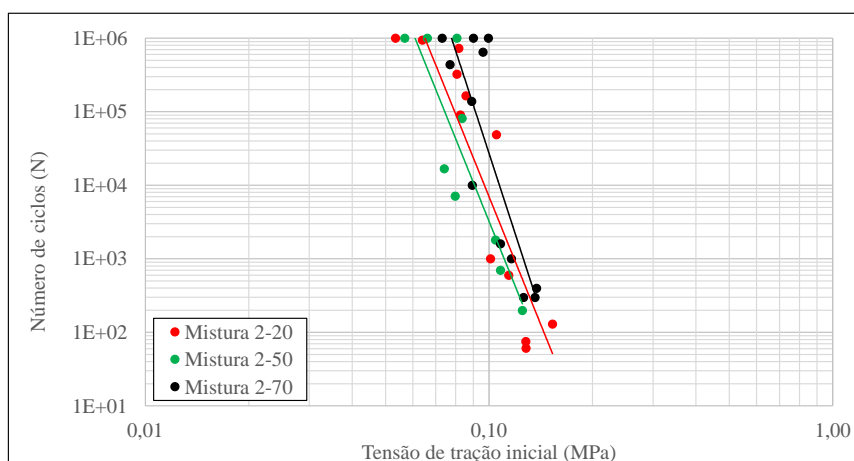
Na sequência são apresentadas as curvas de fadiga agrupadas por teor de cimento:

5.5.2.1 Tensão

Os parâmetros obtidos para os modelos de fadiga das misturas estudadas como função da tensão de tração são mostradas na Tabela 22. As curvas de fadiga são apresentadas na Figura 70 para 2 % e 4 % de cimento. O deslocamento de esquerda para direita pode ser causado pelo incremento de resistência devida ao aumento do teor de cimento.

Tabela 22. Parâmetros dos modelos de fadiga de tensão

Misturas	$N = a * \sigma^{-LDE}$					
	2-20	2-50	2-70	4-20	4-50	4-70
a	1,95E-08	8,78E-09	1,21E-10	1,76E-03	1,69E-02	1,86E-07
LDE	11,6	11,6	14,4	8,9	7,4	13,4
R ²	0,81	0,76	0,72	0,73	0,68	0,90



(a)

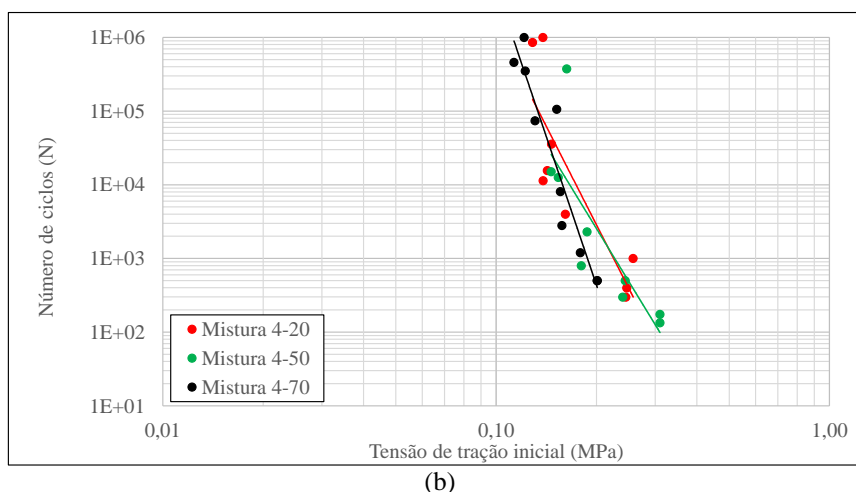


Figura 70. Curvas de fadiga em função da tensão de tração inicial: (a) misturas com 2 % de cimento, (b) misturas com 4 % de cimento

5.5.2.2 Deformação

Os parâmetros dos modelos de fadiga são mostrados na Tabela 23 e na Tabela 24 para modelos baseados na deformação inicial e na deformação inicial normalizada, respectivamente. Como indicado no item 2.2.2, a correlação de ambos os modelos faz com que a previsão do N seja a mesma, sendo que a diferença entre eles seja o valor das constantes de regressão a_1 e a_2 . As curvas de fadiga são apresentadas na Figura 71.

Tabela 23. Parâmetros dos modelos de fadiga de deformação

Mistura	$N = a_1 * \epsilon_i^{-SDE}$					
	2-20	2-50	2-70	4-20	4-50	4-70
a1	3,05E+15	7,24E+17	6,58E+19	1,82E+16	2,15E+21	1,83E+27
SDE	7,3	9,2	9,9	9,0	11,1	15,4
R ²	0,57	0,86	0,78	0,81	0,85	0,56

Tabela 24. Parâmetros dos modelos de fadiga de deformação normalizada

Mistura	$N = a_2 * (\epsilon_i/\epsilon_b)^{-SDE}$					
	2-20	2-50	2-70	4-20	4-50	4-70
a2	2,59E+00	4,06E-05	1,97E-06	3,78E-05	9,87E-07	8,39E-16
SDE	7,3	9,2	9,9	9,0	11,1	15,4
R ²	0,57	0,86	0,78	0,81	0,85	0,56

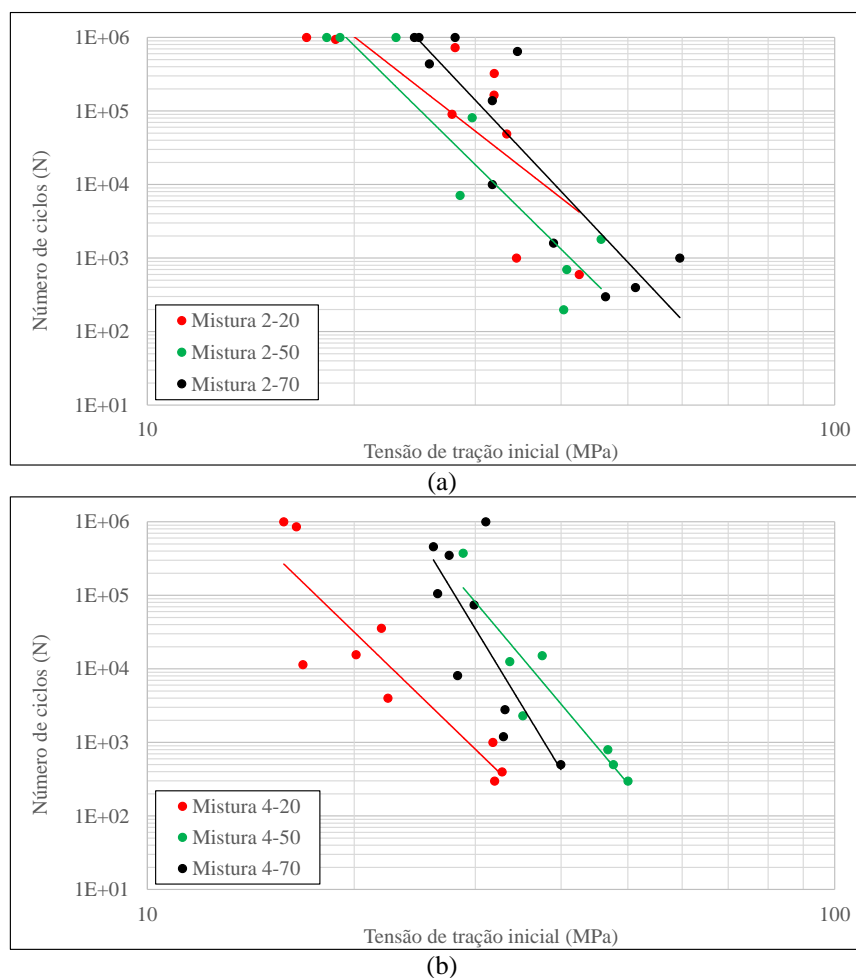


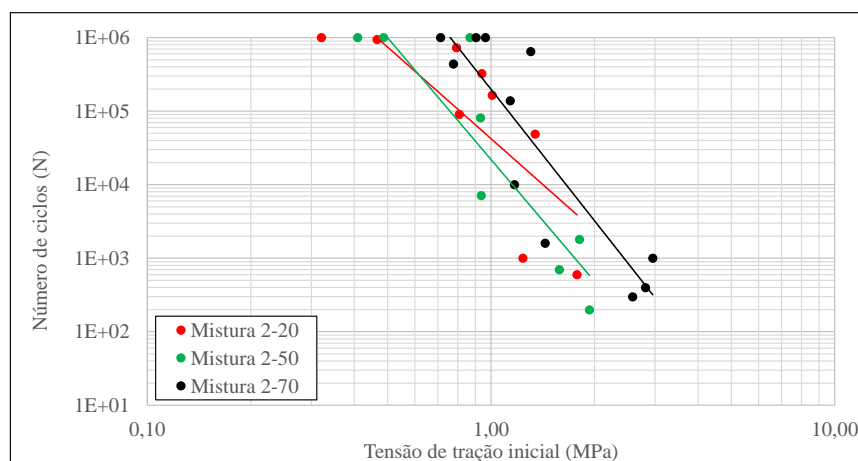
Figura 71. Variação da vida de fadiga como função da deformação de tração inicial: misturas com (a) 2 % de cimento e (b) 4 % de cimento

5.5.2.3 Energia Dissipada

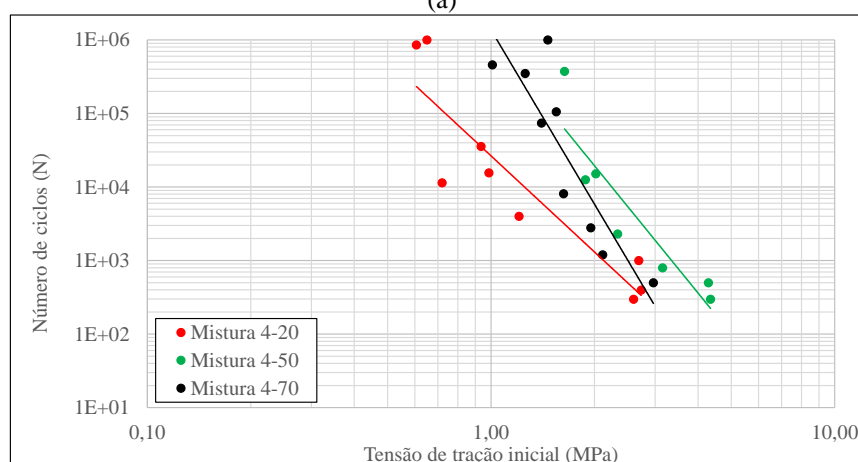
A Tabela 25 mostra os parâmetros dos modelos de fadiga de energia dissipada. As curvas, mostradas na Figura 72, são representações análogas dos modelos de deformação mostrados na Figura 71, fato evidenciado pela semelhança de ambos. Estes resultados mostram a correlação entre a deformação de tração como produto do dano e o fenômeno de dissipação de energia. Adicionalmente, pode-se indicar que, de maneira geral, o incremento do teor de cimento leva a uma maior dissipação de energia.

Tabela 25. Parâmetros dos modelos de fadiga de energia dissipada

Mistura	$N = a * DE_i^{-DEE}$					
	2-20	2-50	2-70	4-20	4-50	4-70
a	4,22E+04	2,19E+04	1,98E+05	2,65E+04	1,04E+06	1,37E+06
DEE	4,1	5,5	5,9	4,3	5,7	7,9
R ²	0,61	0,81	0,79	0,82	0,83	0,78



(a)



(b)

Figura 72. Curvas de fadiga como função da energia dissipada: misturas com (a) 2 % de cimento e (b) 4 % de cimento

5.5.2.4 Comparativos dos modelos de vida de fadiga

A significância estatística dos modelos apresentados, avaliada a partir do coeficiente de determinação R^2 é mostrada na Figura 73. Como indicado pela *Austroroads* (2010), tanto os modelos de tensão quanto de deformação representam de forma similar o fenômeno. Aliás, os modelos de energia dissipada têm coeficientes muito próximos dos obtidos por deformação, evidenciando a correlação entre ambas as abordagens.

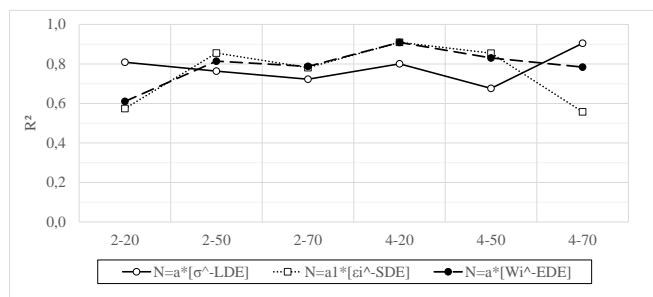


Figura 73. Comparativo coeficiente de correlação modelos de fadiga

Os expoentes de dano são comparados na Figura 75 e na Figura 74 em função da porcentagem de fresado e do teor de cimento, respectivamente. Koliyas, Katsakou e Kaliodas (2001) realizaram uma aproximação ao comportamento de fadiga de misturas de fresado e BGS estabilizadas com cimento em função da tensão, indicando que adição de fresado faz da curva de fadiga menos inclinada, isto é, o incremento do LDE. No entanto, no caso do LDE não se apresenta este comportamento, mas sim no SDE e o EDE.

Neste caso, tanto como função dos incrementos da porcentagem de fresado quanto do teor de cimento, se tem incrementos do SDE e do EDE. Os valores do SDE variaram entre 7,3 e 15,4, sendo próximos aos relatados pela *Austrroads* (2010), que indica uma variação entre 14 e 27, para modelos de fadiga em laboratório.

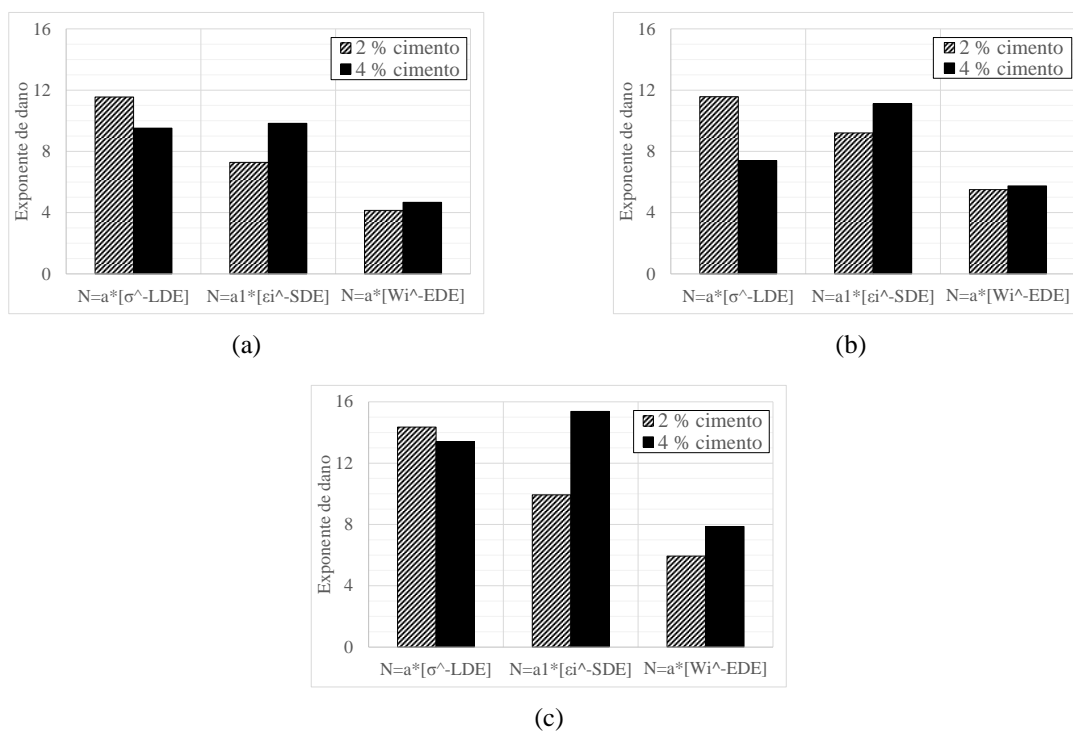


Figura 74. Expoentes de dano para misturas
(a) 20 % de fresado, (b) 50 % de fresado, (c) 70 % de fresado

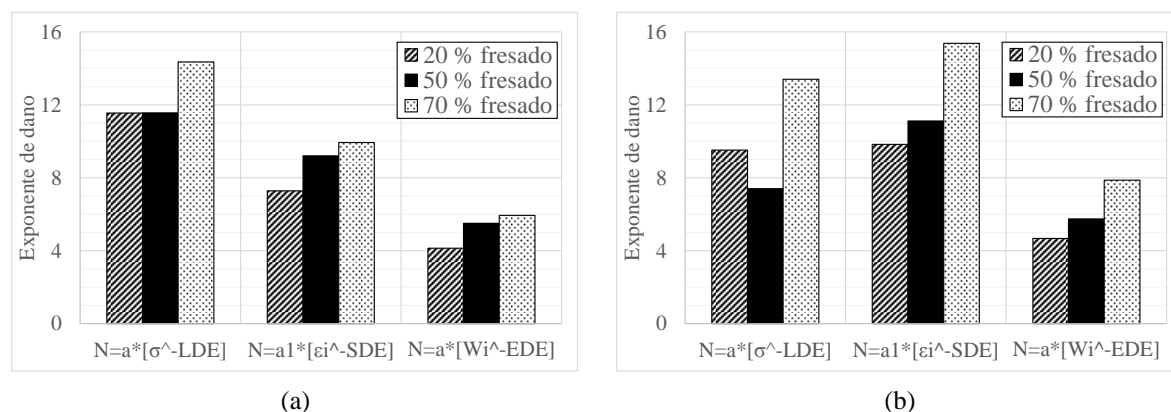


Figura 75. Exponentes de dano para misturas
(a) 2 % de cimento e (b) 4 % de cimento

5.5.3 Degradação das misturas

O dano causado durante os ensaios de fadiga foi avaliada em termos de deslocamentos, deformações resilientes, queda do MRF inicial, e energia dissipada, como mostrado no Apêndice E. Salienta-se que foram desconsideradas as curvas de degradação das vigas que atingiram 10^6 ciclos por não representar estágios de degradação representativos.

5.5.3.1 Deformações e MRF

Conforme relatado no item 2.2.2, pela abordagem tradicional do fenômeno de fadiga, a degradação avalia-se pela redução do MRF inicial. Assim, como mostrado na Figura 76 (a), o incremento das deformações resilientes ao longo do ensaio, no caso de um ensaio sob TC, determinam a queda do MRF como mostrado na Figura 76 (b).

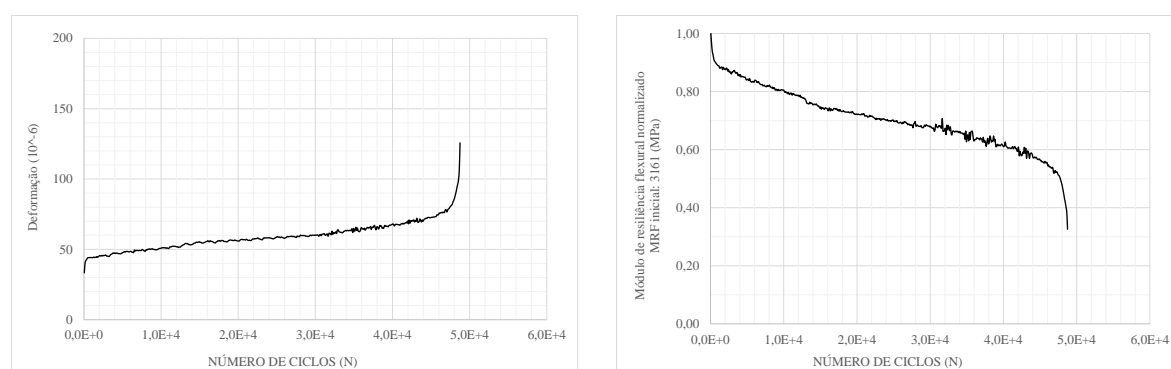


Figura 76. Degradação do material viga 2-20 (6): (a) Deformações resilientes, (b) Redução do MRF

No Apêndice E.2 e E.3 estão detalhadas as curvas de incremento dos deslocamentos e das deformações, respectivamente, para todas as vigas ensaiadas de cada mistura. O incremento das

deformações resilientes de tração (análogas aos deslocamentos) se mostraram dependentes do nível de tensão aplicado (avaliado como porcentagem da RTF). Assim por exemplo, no caso das vigas com o menor nível de carga aplicada, a deformação foi a menor tanto no início como ao longo do ensaio.

O formato típico das curvas de MRF ao longo do ensaio é o mostrado na Figura 77 mostrando um comportamento característico de materiais cimentados, detalhado no Apêndice E.4, consistente em três fases de dano. Como relatado pela Austroads (2012), se tem um microtrincamento inicial durante os primeiros ciclos onde o valor do MRF diminui rapidamente desde o início do ensaio (“*beeding-phase*”) após da qual o MRF se reduz a uma taxa constante até um ponto denominado “*turning point*”, onde inicia uma redução acelerada do módulo até a ruptura do corpo de prova.

Desde o ponto de vista mecânico, a ruptura envolve a iniciação e propagação de microfissuras na face submetida a tensões de tração, já o segundo estágio de degradação não pode ser definido pela pois não são geradas macrofissuras. Assim, não é observado o incremento de dano neste segundo estágio. Finalmente, as microfissuras se tornam numa trinca localizada que leva a uma ruptura frágil do material, que caracteriza o terceiro estágio.

A Austroads (2012) não define um critério para definir o limite da *beeding-phase*, no entanto, indica que o *turning point* se encontra a aproximadamente 80 % do MRF inicial. Aliás, indica que a ruptura do corpo de prova acontece perto de uma redução de 50 % do MRF inicial. No caso de estudo, não foi identificado o *turning point* no 80 % do MRF inicial, mesmo para as misturas com menos conteúdo de fresado. Contudo, um critério de ruptura de redução de 50 % do MRF inicial parece razoável, principalmente, para misturas com 4 % de cimento (misturas com 2 % de cimento atingem valores perto de 40 % e até 30 % do MRF inicial).

5.5.3.2 Energia dissipada

O padrão bi-linear típico do incremento da energia dissipada, DE, ao longo do ensaio é o mostrado na Figura 77, como indicado por Xiao (2006) para o caso de ensaios sob TC. As curvas de todos os ensaios de fadiga são detalhadas no Apêndice E.5, sendo que da mesma forma do que as curvas de deslocamento e deformação, seu valor depende do nível de tensão aplicado. Adicionalmente, os resultados indicam que o aumento do teor de cimento leva ao incremento da DE para mesmos conteúdos de fresado.

Aliás, foi possível constatar que o máximo valor da ER tem relação com o início da microfissuração, como mostrado na Figura 77. Sendo que o formato típico da curva ER x Número de ciclos é similar das encontradas na literatura para o caso de concreto asfálticos (SHEN e LU, 2010).

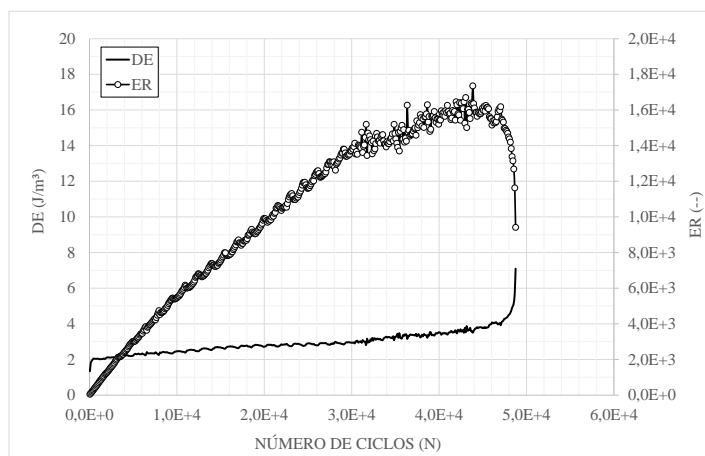


Figura 77. Incremento da energia dissipada durante o ensaio – Viga 2-20 (6)

5.5.3.3 Relação de mudança de energia dissipada, RDEC

Da mesma forma que a ER, foi empregada a RDEC para avaliar a sua aplicabilidade na determinação dos estágios de degradação, sendo que o padrão da Figura 78. Os valores negativos, diferente do relatado na literatura (DANIEL e BISIRRI, 2005; SHEN e LU, 2010), são devidos ao fato de ser um ensaio sob TC isto é, a energia dissipada no ciclo i com relação ao ciclo $i+1$ é menor. Não obstante, foi evidenciada a existência de um “valor platô” que corresponde a um estágio de degradação constante onde a taxa de mudança de energia de um ciclo respeito do próximo não varia.

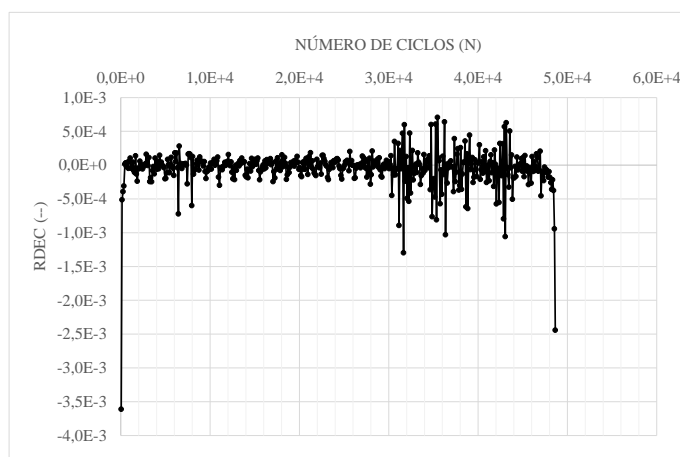


Figura 78. Degradação do material Viga 2-20 (6): RDEC x N

Porém, a RDEC mostrou ser um parâmetro altamente sensível com respeito a pequenas variações nas leituras de deslocamento, como pode-se verificar se por exemplo, se comparar a Figura 76 (a) e a Figura 78 entre os ciclos $N=3,0 \cdot 10^4$ e $N=3,0 \cdot 10^4$. Neste sentido, a determinação de um PV característico das misturas estudadas pode dar lugar a considerações erradas. Entretanto, fica claro que nos materiais estudados o PV fica num ponto anterior à queda de 50 % do MRF inicial. Contudo, as curvas RDEC representam estágios de micro e macrofissuração como relatado por Daniel e Bisirri (2005).

5.6 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO FLEXÍVEL COM INCLUSÃO DE CAMADAS DE BASE RECICLADAS COM CIMENTO

A partir de análises mecânicas empregando o *software Everstress* v 5.11 (1999) ©, desenvolvido pelo “*Washington State Department of Transportation*” foram modeladas as estruturas de pavimentos mostradas na Figura 79, para avaliar o desempenho da camada reciclada. Como indicado no item 2.3.2, na análise foi empregada a teoria da elasticidade multicamada (linear, no caso de estudo) a partir das condições de carga e dos parâmetros de comportamento mecânico de cada material, como mostrado na Tabela 26.

Tabela 26. Parâmetros de entrada no *software Everstress*

Material	Coefficiente de Poisson	Módulo de Resiliência (MPa)	γ (kN/m ³)
Revestimento asfáltico [CAP 50/70]*	0,30	4432*	23,5
Camada reciclada: BGS+RAP [para cada mistura]	0,26**	ver item 5.5.1	ver item 5.2
Subbase granular: BGS	0,40	*** $MR = 200 * \left(\frac{\theta}{P_{atm}}\right)^{0,6}$	20,0
Subleito	0,35	100	18,0

* (Bock, 2012)

** (Kleinert, 2016)

*** LPAV/UFRGS

O módulo de resiliência do revestimento asfáltico foi tomado da pesquisa de Bock (2012), que corresponde ao valor do MR de uma mistura com CAP 50/70 a 25 °C. Já o modelo do MR da subbase granular foi adotado do empregado no LPAV/UFRGS.

A estrutura padrão modelada é mostrada na Figura 79. Foram modeladas 12 estruturas de pavimentos para cada uma das 6 misturas analisadas, agrupadas em dois tipos de estrutura: camada asfáltica espessa (10 cm) e delgada (5 cm); se variando a espessura da camada reciclada: 18, 20, 25, 30, 35 e 40 cm. Já a espessura da subbase granular foi considerada igual em todos os casos.

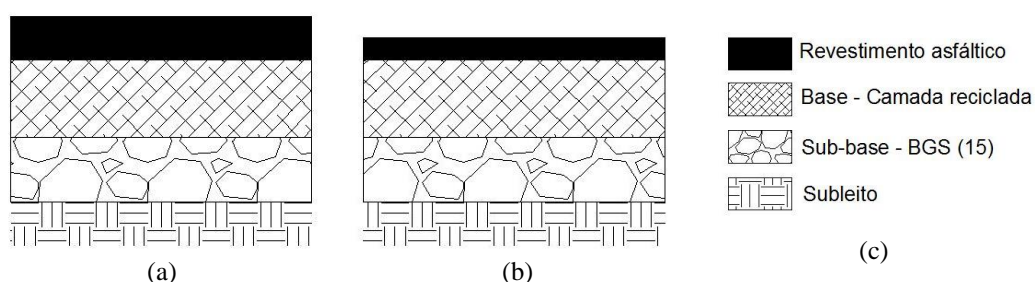


Figura 79. Estruturas de pavimento modeladas – padrão geral: (a) revestimento de 5 cm de espessura, (b) revestimento de 10 cm de espessura, (c) legenda. Medidas em cm

Os carregamento modelados correspondem ao padrão brasileiro para eixo tipo simples, roda dupla: carga de 82 kN/eixo, pressão de contato 560 kPa e separação de 34 cm entre as rodas. Os pontos de análise foram a uma profundidade equivalente da face inferior da camada reciclada, embaixo do centro geométrico de contato de cada roda e no ponto médio das duas rodas. No entanto, as análises mostraram que este último ponto corresponde ao ponto crítico.

A adoção de um fator laboratório-campo resulta necessária para implementar os modelos de fadiga propostos em torno de um tráfego de projeto. No entanto, pela invariância de escala do tipo de modelo desenvolvido, as recomendações realizadas podem se constituir numa aproximação preliminar do projeto de dimensionamento. Salienta-se que não foram considerados processos de fragmentação superficial.

A partir da resposta estrutural em termos de deformações (detalhadas no Apêndice F.1), foram empregados os modelos de fadiga, baseados na deformação de tração inicial para a estimativa da vida de fadiga da camada reciclada. Assim, na Figura 80, Figura 81 e Figura 82 são apresentadas as previsões da vida de fadiga para as misturas 20 %, 50 % e 70 % de fresado, respectivamente. As curvas em função do teor de cimento são apresentadas no Apêndice F.3.

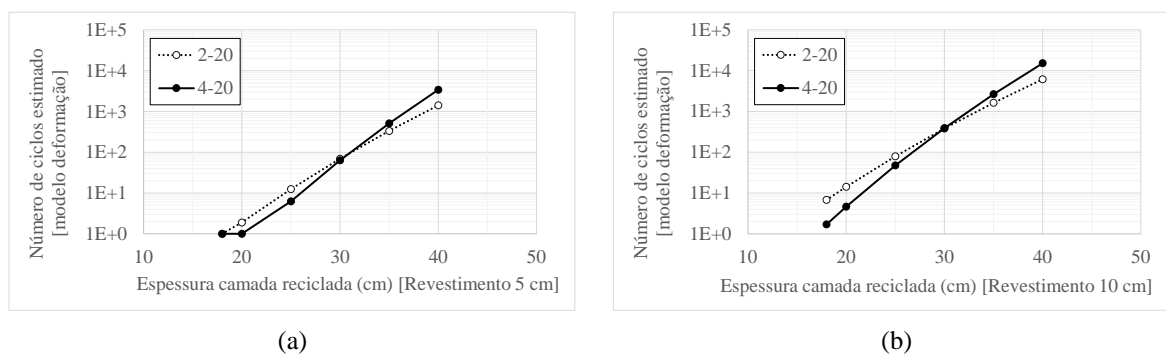


Figura 80. Vida de fadiga em laboratório da camada reciclada (20 % de fresado). Revestimento asfáltico: (a) 5 cm e (b) 10 cm

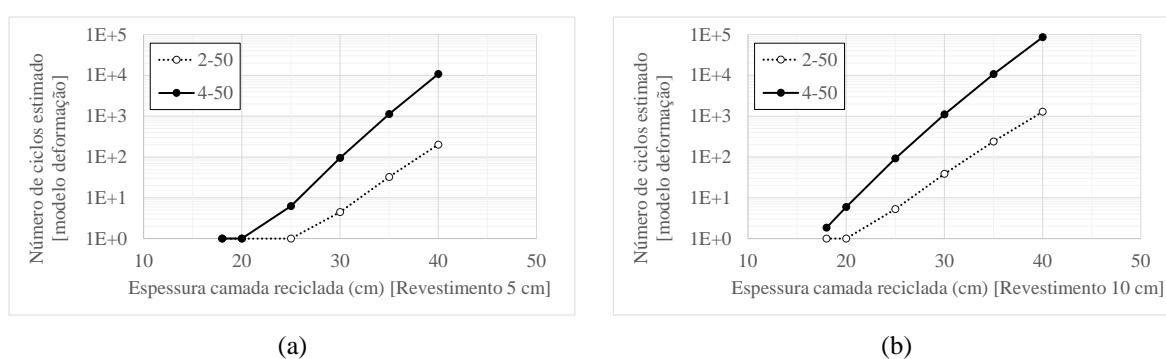


Figura 81. Vida de fadiga em laboratório da camada reciclada (50 % de fresado). Revestimento asfáltico: (a) 5 cm e (b) 10 cm

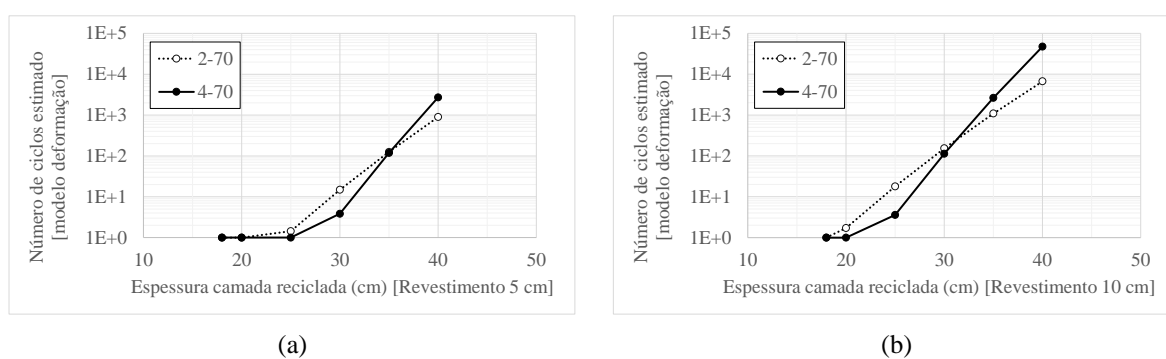


Figura 82. Vida de fadiga em laboratório da camada reciclada (70 % de fresado). Revestimento asfáltico: (a) 5 cm e (b) 10 cm

Globalmente, o incremento da vida de fadiga da estrutura proposta obedece a quatro fatores determinantes: espessura do revestimento asfáltico, espessura da camada reciclada, teor de cimento e porcentagem de fresado, sendo a relevância destes dois últimos depende da espessura da camada reciclada. Assim, a alternativa a ser escolhida é função das necessidades específicas do projeto.

O incremento da vida de fadiga pelo incremento da espessura do revestimento asfáltico é evidente para todas as misturas. Porém, o incremento da espessura da camada reciclada, dependendo do tipo de mistura, pode ter o mesmo efeito. De forma preliminar pode-se indicar que resulta fatível se reduzir espessuras de camadas asfálticas aumentando a espessura da camada reciclada. Entretanto, deve ser ter em conta que independentemente do tipo de mistura, camadas recicladas inferiores a 20 cm podem não ser recomendáveis.

Para baixas e altas porcentagens de fresado existe uma espessura da camada reciclada característica que muda o seu comportamento a fadiga. Assim por exemplo, no caso das misturas 20 % de fresado (Figura 80) corresponde a 30 cm (tanto para camadas asfálticas delgadas como para espessas). Neste sentido, para espessuras menores de 30 cm, camadas com maiores teores de cimento reduzem a vida de fadiga, já para espessuras maiores se tem o efeito contrário. Este fato pode ser explicado pelo incremento se rigidez excessivo que não é recomendável para camadas recicladas delgadas, como relatado pela PCA (2010).

Neste mesmo sentido, camadas recicladas, espessas, com altos conteúdos de fresado podem ter uma vida de fadiga comparável de misturas com altos teores de cimento ou baixos conteúdos de fresado.

Para níveis intermédios de fresado, a vida de fadiga aumenta com o teor de cimento e a espessura da camada reciclada.

Por fim, os guias de reciclagem recomendam espessuras máximas de 30 cm sendo que esta limitação é devida a dificuldades executivas. No entanto, a melhora das técnicas, equipamentos e processos de compactação podem levar à execução de camadas com espessuras maiores, aumentando consideravelmente a vida de fadiga das estruturas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões decorrentes da pesquisa, além das sugestões para trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

A partir dos resultados laboratoriais e das análises apresentadas, conclui-se que o comportamento à fadiga das misturas resultantes da reciclagem de pavimentos flexíveis (revestimentos asfálticos e bases granulares) com adição de cimento é fortemente dependente tanto do teor de cimento quanto da porcentagem de fresado asfáltico. Acrescenta-se, ainda, que a vida de fadiga de camadas recicladas com cimento, é extremamente dependente das tensões de tração atuantes e das deformações de extensão na fibra inferior da camada cimentada, as quais dependem da estrutura do pavimento e, de forma muito significativa, da espessura da camada reciclada.

No desenvolvimento do programa experimental verificou-se que os procedimentos empregados pela *Austroroads* podem ser usados como modelo para a estimativa da vida de fadiga de misturas recicladas com adição de cimento Portland. Dada a peculiaridade dos equipamentos disponíveis e de *softwares* empregados, algumas modificações foram necessárias.

Para melhor compreensão, optou-se pelo detalhamento das demais conclusões, as quais são apresentadas na sequência:

Em relação ao desenvolvimento da metodologia:

- O pórtico de carregamento projetado e o sistema de posicionamento dos LVDTs mostraram um desempenho adequado tanto nos ensaios estáticos quanto nos dinâmicos.
- A adaptação do equipamento de fadiga a compressão diametral (FCD) e do *software* SEEPAV 8200 para a execução de ensaios de fadiga a quatro pontos foi satisfatório, sendo que a parametrização do ensaio teve que ser ajustada em função das necessidades do projeto;
- As modelagens pelo método de elementos finitos permitiram verificar que o erro na estimativa de deformações de extensão (ou tração) é mínimo. Adicionalmente

as modelagens permitiram comprovar a hipótese da invariância transversal de tensões e deformações de tração nas vigas;

- O código programado mostrou ser uma ferramenta que possibilitou a extensão do estudo. O fato de que nenhuma das variáveis depende do tipo de material analisado, permite que seu uso não seja limitado apenas para o estudo de misturas recicladas. Adaptações e possíveis desenvolvimentos futuros podem fazer parte de próximas pesquisas, como exposto no próximo item.

Quanto à caracterização dos materiais e das misturas:

- O efeito aglutinante causado pelo ligante asfáltico na granulometria do material fresado, como evidenciado no ensaio de refluxo, é uma das causas pelas quais o material fresado se torna mais grosseiro. Desta forma, misturas com maiores porcentagens de fresado ficam próximas do limite inferior da faixa granulométrica adotada. O processo executivo de fresagem é o fator mais determinante neste aspecto.
- A influência da umidade nos parâmetros de compactação aumenta com o teor de cimento empregado. A massa específica aparente seca máxima foi o parâmetro mais afetado pelas variações no teor de cimento e na porcentagem de fresado. Contudo, os valores de massa específica aparente seca ótima seca têm variações pequenas (2,06 a 2,25 g/cm³);

Com respeito ao método de moldagem:

- Com o método de compactação estática conseguiu-se, quase sempre, alcançar o Grau de Compactação de 95%, definido como mínimo para aceitação das vigas;
- O controle do grau de compactação foi o parâmetro mais importante na etapa de moldagem, pois afetou mais a RTF do que a variação de umidade. Adicionalmente, a composição das misturas (teor de cimento e porcentagem de fresado) não mostrou influência neste aspecto.

Quanto aos ensaios de RTF:

- Os valores da RTF (entre 0,21 MPa e 1,53 MPa) dependeram mais do teor de cimento do que a porcentagem de fresado;
- O aumento da deformação na ruptura foi influenciado, de forma determinante, pela porcentagem de fresado asfáltico, que torna a mistura menos rígida. Assim, por exemplo, para as misturas com 4% de cimento, a deformação na ruptura alcançou os valores de 194, 288 e 566 microstrains para porcentagens de fresado iguais a 20%, 50% e 70%, respectivamente;
- Para as misturas estudadas, o critério da *Austroads* para definição do módulo de elasticidade flexural (módulo secante entre 0 e 40 % da RTF) pode ser adotado para caracterização do trecho elástico das curvas tensão x deformação;
- Para condições estáticas de carregamento foram identificados três grupos de misturas com comportamento flexural similar: 2-50 e 4-70, 2-20 e 6-70, 4-20 e 6-50;

Com relação aos ensaios de fadiga:

- Em ensaios preliminares verificou-se que o critério da *Austroads* de se adotar o nível de tensão do 40 % da RTF para estimativa do MRF levou, em alguns casos, a degradações precoces que não podem ser empregadas para estimação da capacidade resiliente do material.
- Os resultados indicam que o ensaio de FQP permite, de forma preliminar, uma avaliação do MRF;
- Os valores dos MRF iniciais (que variaram entre 2913 MPa e 7725 MPa) mostraram pouca dependência do nível de tensão aplicado, assim a modelagem da estrutura de pavimento empregando um valor constante de MR parece razoável, como foi relatado no caso de camadas cimentadas segundo o SAMDM (1996);
- O número de corpos de prova, que variou entre 9 e 12 por mistura, permitiu uma adequada caracterização do fenômeno de fadiga, como evidenciam os valores dos coeficientes de determinação (R^2) para cada tipo de modelo: tensão (média de 0,77), deformação (média de 0,74), e energia dissipada (média de 0,77);

- De forma similar que relatado pela *Austroads* (2010), modelos de fadiga baseados em tensões e deformações tem significância estatística similar. No entanto, modelos baseados em deformações podem ser associados a valores de MFE, como feito pela *Austroads*;
- Os modelos de deformação e deformação normalizada levaram aos mesmos resultados, em termos do expoente de dano de deformação. Os valores dos coeficientes de dano por deformação obtidos (entre 7,3 e 15,4), se encontraram dentro das faixas relatadas pela *Austroads* (2008, 2010, 2012).
- Corpos de prova com deformações iniciais menores que 50 microstrains levaram a rupturas em menos de 10^6 ciclos, o que sugere que o critério preconizado pela *Austroads* (2008) para definição de níveis de tensão para o ensaio de fadiga resultou não ser adequado para o tipo de materiais estudados;
- A definição de um critério de ruptura em função da redução (50%) do MRF não se mostrou consistente, sendo aconselhável levar à ruptura do corpo de prova;
- O método de cálculo da energia dissipada, através de integração numérica, levou a bons resultados, permitindo abordar temas decorrentes do dano causado pela aplicação do carregamentos dinâmicos. Assim, as curvas de degradação em função deste parâmetro foram consistentes com as encontradas na literatura;
- Neste sentido, fica claro que a energia dissipada tem um incremento bi-linear cujo segundo trecho está relacionado com a microfissuração prévia à ruptura. Os resultados indicam que o teor de cimento é o fator que mais afeta a dissipação de energia ao longo do ensaio, sendo que de forma geral as misturas com 4 % de cimento a energia dissipada foi maior;
- O valor máximo da relação de energia, ER, resulta útil como aproximação ao estágio de microfissuração, mas não para estágio de microfissuração. Já o caso do RDEC (relação de cambio da energia dissipada), pode representar adequadamente ambos os estágios.
- A utilização do RDEC permitiu mostrar a existência de um PV “*Plateau Value*” associado à degradação por fadiga nos materiais estudados. Contudo, a sua quantificação foge dos objetivos da pesquisa.

Quanto ao dimensionamento de pavimento com inclusão de base reciclada:

- As recomendações empíricas da PCA (2010) de se utilizarem camadas recicladas espessas (até 30 cm) para aumentar a vida de fadiga foram validados;
- A adoção de um fator laboratório-campo resulta necessária para se fazerem recomendações respeito da implementação dos modelos de fadiga propostos, considerando um tráfego de projeto. Em termos laboratoriais, globalmente, os resultados indicam que a vida de fadiga de uma camada reciclada com cimento é função de quatro fatores determinantes: a espessura do revestimento asfáltico sobrejacente, a espessura da camada de base reciclada, o teor de cimento e a porcentagem de fresado;
- Para qualquer das misturas ensaiadas, camadas com espessuras menores a 20 cm terão vidas de fadiga muito curtas, mesmo se a nova camada asfáltica sobrejacente for espessa. Aliás, de forma geral, a vida de fadiga da camada reciclada aumenta exponencialmente com sua espessura. Desta forma, pequenos incrementos na espessura da camada reciclada têm efeitos muito significativos na sua vida de fadiga. Por exemplo: para a mistura 4-50, ao aumentar-se a espessura da camada reciclada (subjacente a 10 cm de concreto asfáltico) de 25 para 30 cm a vida de fadiga da mesma se torna 10 vezes maior;
- O incremento da espessura do revestimento asfáltico, independentemente do tipo de mistura, tem efeitos marcantes na vida de fadiga da camada reciclada. Por exemplo: considerando-se a mistura 4-50, com espessura de 30 cm, o aumento da espessura da nova camada asfáltica de 5 cm para 10 cm aumentará a vida de fadiga da camada reciclada em 10 vezes;
- Finalmente, não se identificou uma tendência clara do efeito da porcentagem de fresado na vida de fadiga da camada reciclada, que dependerá da estrutura do pavimento.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O tema de pesquisa que originou a presente dissertação abrangeu um conjunto de objetivos que podem ser ampliados com base nas metodologias desenvolvidas e nos resultados obtidos. A seguir, são feitas algumas sugestões para estudos futuros:

- a) Avaliar o mecanismo de esmagamento superficial da camada reciclada, como parte do projeto de dimensionamento;
- b) Avaliar o comportamento de fadiga de misturas com 6 % de cimento. A partir dos resultados, estabelecer a correlação entre os MRF e os MEF assim como os parâmetros dos modelos de fadiga.
- c) Realização de estudos da mecânica de fratura procurando avaliar a influência da granulometria e do fresado na propagação de fissuras;
- d) Adaptar o algoritmo de processamento de dados desenvolvido nesta pesquisa no *software* SEEPAV 8200 como sub-rotina, para monitoramento contínuo das variáveis estudadas;
- e) Adaptar o algoritmo no ensaio de FCD. Uma análise pós-ruptura como a realizada nesta pesquisa pode ser realizado pela modificação do código, sendo a alternativa mais viável;
- f) Realizar retroanálise, a partir da DE calculada por integração numérica, para estimativa dos ângulo de fase;
- g) Incluir análises estatísticas, visando a redução de número de ensaios, além de ensaiar os demais materiais (solo-cimento BGTC e materiais lateríticos) definidos na pesquisa, com o objetivo de abranger materiais presentes em bases de pavimentos brasileiros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002.

ASOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland Composto - Especificação: NBR 11578**. Rio de Janeiro, 5p, 1997.

ASOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Determinação da Resistência à Tração em Corpos de Prova Prismáticos: NBR 12142**. Rio de Janeiro, 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading): ASTM C78/C78M-15a**. 4p, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard Test Method for Flexural Strength of Soil-Cement Using Simple Beam with Third-Point Loading: ASTM D1635/D1635M-12**. 3p, 2012.

ARANHA, L.A. **Avaliação laboratorial e de campo da tecnologia de reciclagem de base com cimento para a reabilitação de pavimentos**. 2013. 127p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, São Paulo.

ASSOCIATION OF AUSTRALASIAN ROAD TRANSPORT AND TRAFFIC AGENCIES. **Cost effective structural treatments for rural highways: cemented materials: Austroads Publication AP-T168**. Sydney, 188p. 2010.

ASSOCIATION OF AUSTRALASIAN ROAD TRANSPORT AND TRAFFIC AGENCIES. **Mix design for stabilized pavement materials: Austroads Publication AP-T16**. Sydney, 43p. 2002.

ASSOCIATION OF AUSTRALASIAN ROAD TRANSPORT AND TRAFFIC AGENCIES. **Technical Basis of Austroads Pavement Design Guide: Austroads Publication AP-T33**. Sydney, 226p. 2011.

ASSOCIATION OF AUSTRALASIAN ROAD TRANSPORT AND TRAFFIC AGENCIES. **Preliminary Investigation of the Influence of Micro-cracking on Fatigue Life of Cemented Materials: Austroads Publication AP-T198**. Sydney, 65p. 2012.

ASSOCIATION OF AUSTRALASIAN ROAD TRANSPORT AND TRAFFIC AGENCIES. **The Development and Evaluation of Protocols for the Laboratory Characterisation of Cemented Materials: Austroads Publication AP 101/08**. Sydney, 109p. 2008.

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

BOCK, A. **Efeitos da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado**. 2012. 143p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BRITO, L. A. T. **Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas**. 2006. 180p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CARBÓ, C.; FERNANDEZ, L. Un criterio racional para la optimización del reciclado en frío de pavimentos asfálticos en profundidad total. In: 1er Simposio Internacional sobre estabilización de explanadas y reciclado in situ de firmes con cemento, 2001, Salamanca, España. **Anais...** Salamanca: IECA, 2001. p. 592-608.

CASMER, J. D. **Fatigue cracking of cementitiously stabilized pavement layers through large-scale model experiments**. 2011. 96p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Geológica). University of Wisconsin-Madison, Wisconsin.

CERATTI, J. A. P. **Estudo do Comportamento a fadiga de Solos Estabilizados com Cimento para Utilização em Pavimentos**. 1991. 338p. Tese de Doutorado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

COLPO, G. B. **Análise de Fadiga de Misturas Asfálticas Através do Ensaio de Flexão em Viga Quatro Pontos**. 2014. 155p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DANIEL, J.S.; BISIRRI, W. Characterizing Fatigue in Pavement Materials Using a Dissipated Energy Parameter. **Advances in Pavement Engineering**, 2005

DELLABIANCA, L. **Estudo do Comportamento de Material Fresado em Revestimento Asfáltico Visando sua Aplicação em Reciclagem de Pavimentos**. 2004. 128p. Tese de Doutorado (Geotecnia). Universidade de Brasília, Brasília.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos**: DNER-EM 035/95. Rio de Janeiro, 6 p. 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório**: DNER-PRO 199/96. Rio de Janeiro, 7 p. 1996.

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

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **Reciclagem de pavimento asfáltico in situ com cimento e brita**: DER/PR ES-P 035/05. Curitiba, 22 p., 2005.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Determinação do Teor de Asfalto de Misturas Betuminosas Utilizando o Extrator por Refluxo:** DAER/RS EL 213/01. Rio Grande do Sul, 7 p. 2001.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência:** DNER-ME 133/94. Rio de Janeiro, 5p. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação – Reciclagem de Profunda de Pavimentos “in situ” com adição de cimento Portland – Especificação de serviço:** DNIT 167/2013. Rio de Janeiro, 11p. 2013a.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos:** DNIT-IPR-720. Rio de Janeiro, 313 p. 2006.

DI BENEDETTO, H.; DE LA ROCHE, C.; BAAJ, H.; PRONK, A.; LUNDSTROM, R. **Fatigue of Bituminous Mixtures.** Material and Structures, v. 37, p. 202-216, 2004.

DISFANI, M. et al. Flexural beam fatigue strength evaluation of crushed brick as supplementary material in cement stabilized recycled concrete aggregates. **Construction and building materials**, n 68, 2014, p.667-676. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.007> >. Acesso em 8 fev. 2016.

ELY, V. **Influência da energia de compactação na resistência e na rigidez de mistura reciclada com cimento e com elevado teor de fresado.** 2014. 59p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

FEDRIGO, W. **Reciclagem de Pavimentos com Adição de Cimento Portland: Definição das bases para um Método de Dosagem.** 2015. 162p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

GAVA, G.P. **Análise teórica-experimental do comportamento à flexão de vigas de concreto reforçado com fibras de aço.** 2016. 301p. Tese de Doutorado (Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

GRAEFF, A. G. **Long-Term Performance of Recycled Steel Fiber Reinforced Concrete for Pavement Applications.** 2011. 501p. Tese de Doutorado (Engenharia). University of Sheffield, Sheffield.

HUANG, B; SHU, X; LI, G. Laboratory Investigation of Portland Cement Concrete Containing Recycled Asphalt Pavements. **Cement and Concrete Research**, v. 35, No 10, p. 2008-2013, 2005. DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.05.002

JAPAN CONCRETE INSTITUTE. **Method of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete: JSCE SF4.** Tokio, 3p. 1987.

JAPAN ROAD ASSOCIATION. **Technical Guidelines for in-situ recycling of base course:** JRA. 1984.

JONES, D.; LOUW, S; WU, R. Full depth reclamation: a cost-effective rehabilitation strategy for low-volume roads. In: 95th Transportation Research Board Annual Meeting, 2016, Washington, D.C. **Anais...** Washington: TRB, 2016.

KLEINERT, T. **Reciclagem de pavimentos semirrígidos com adição de cimento: contribuição ao desenvolvimento de uma metodologia de dosagem.** 2016. 177p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

KOLIAS, S. The influence of type loading and temperature on the modulus of elasticity of cement-bound mixes of milled bituminous concrete and crushed aggregates. **Materials and structures**, v. 29, p. 543-551, nov. 1996.

KOLIAS, S; KATSAKOU, M; KALIODAS, V. Mechanical properties of flexible pavement materials recycled with cement. In: 1er Simposio Internacional sobre estabilización de explanadas y reciclado in situ de firmes con cemento, 2001, Salamanca, España. **Anais...** Salamanca: IECA, 2001. p. 659-674.

MALYSZ, R. **Desenvolvimento de um equipo triaxial de grande porte para avaliação de agregados utilizados como camada de pavimentos.** 2009. 350p. Tese de Doutorado Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Characterization of Cementitiously Stabilized Layers for Use in Pavement Design and Analysis: NCHRP – Report 789.** Washington, D.C. 82p. 2014.

PAIVA, C. E. L.; OLIVEIRA, P. C. A. Impacto da Atividade do CAP e do Percentual de Asfalto Fresado na Resistência a Fadiga de uma Base Reciclada com Cimento. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis. In: 21º Encontro de Asfalto, 2014. Rio de Janeiro **Anais...**Rio de Janeiro: 2014

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Design of Full-Depth Reclamation with Portland Cement (FDR-PC) Pavements.** Annual Conference of the Transportation Association of Canada Halifax, Nova Scotia, Canada, 2010.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Full-Depth Reclamation using Portland Cement: A Study of Long-Term Performance.** Illinois, E.U.A, 2007.

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

PINTO, S. **Estudo do Comportamento a fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos.** 1991. 489p. Tese de Doutorado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SACHET, T. **Estudo de propriedade mecânicas de concretos compactados com incorporação de fresados para bases de pavimentos**. 2012. 186p. Tese de Doutorado (Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, São Paulo.

SALVADOR, R.P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras**. 2013. 201p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, São Paulo.

SHEN, S; LU, XI. Energy based laboratory fatigue failure criteria for asphalt materials. **Journal of Testing and Evaluation**, Washington, D.C., v. 39, n. 3, novembro 2010. Disponível em <www.astm.org>. Acesso em 10 fev. 2016.

SARA. **South African Engineering Manual**. 1. Ed. 2013. ISBN 978-1-920611-00-2.

SARIDE, S.; AVIRNENI, D; JAVVADI, S.C.P. Utilization of reclaimed asphalt pavements in indian Low-volume roads. **Journal of materials in civil engineering**, ISSN 0899-1561/04015107(10)

SUTHIWARAPIRAK, P.; MATSUMOTO, T.; KANDA, T. **Flexural fatigue failure characteristics of an engineered cementitious composite and polymer cement mortars** Tóquio, 2002.

TAHA, R. et al. Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases. **Journal of materials in civil engineering**, vol. 14, n 3, 2002, p.239-245, ISSN 0899-1561/2002/3-239-245

VOROBIEFF, G; WILMOT, T. Australian experience on subgrade stabilization and pavement recycling. In: 1er Simposio Internacional sobre estabilización de explanadas y reciclado in situ de firmes con cemento, 2001, Salamanca, España. **Anais...** Salamanca: IECA, 2001. p. 104-132.

THEYSE, H. L.; DE BEER, M.; RUST, F.C. **Overview of South African Mechanistic Pavement Design Method**. Transport Research Record, n. 1539, p. 6-17, Washington D.C., 1996.

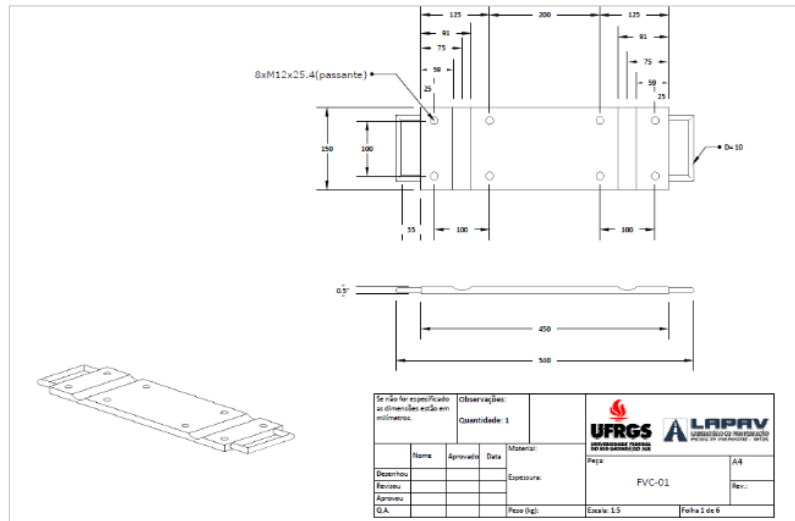
WIRTGEN. **Tecnologia de Reciclagem a Frio**. 1. ed. Windhagen: Wirtgen GmgH, 2012.

WU, H.; HUANG, B.; SHU, X. Characterizing fatigue behavior of asphalt mixtures utilizing loaded wheel tester. **Journal of materials in civil engineering**, vol. 26, n 1, 2014, p.667-676, ISSN 0899-1561/2014/1-159

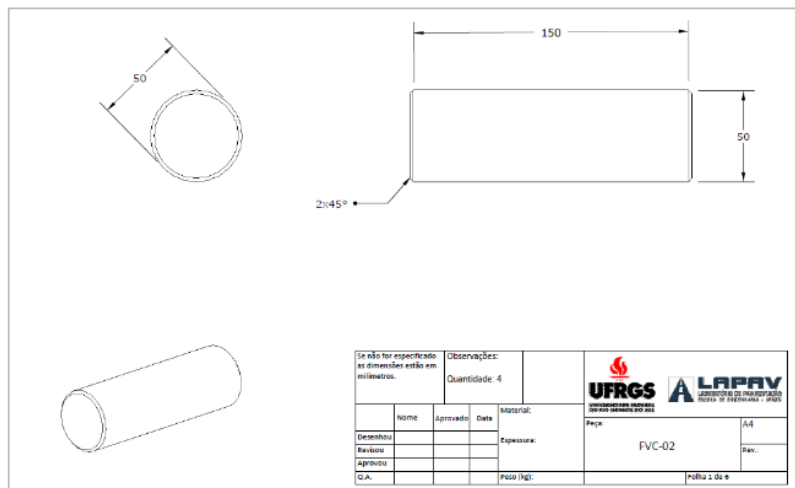
XIAO, F. **Development of fatigue predictive models of rubberized asphalt concrete (RAC) containing reclaimed asphalt pavement (RAP)**. 2006. 213p. Tese de Doutorado (Engenharia Civil). Clemson University, Clemson.

YOSHIDA, T.; NODA, E. Technical guidelines for in-situ recycling of base courses in Japan. In: 1er Simposio Internacional sobre estabilización de explanadas y reciclado in situ de firmes con cemento, 2001, Salamanca, España. **Anais...** Salamanca: IECA, 2001. p. 694-707.

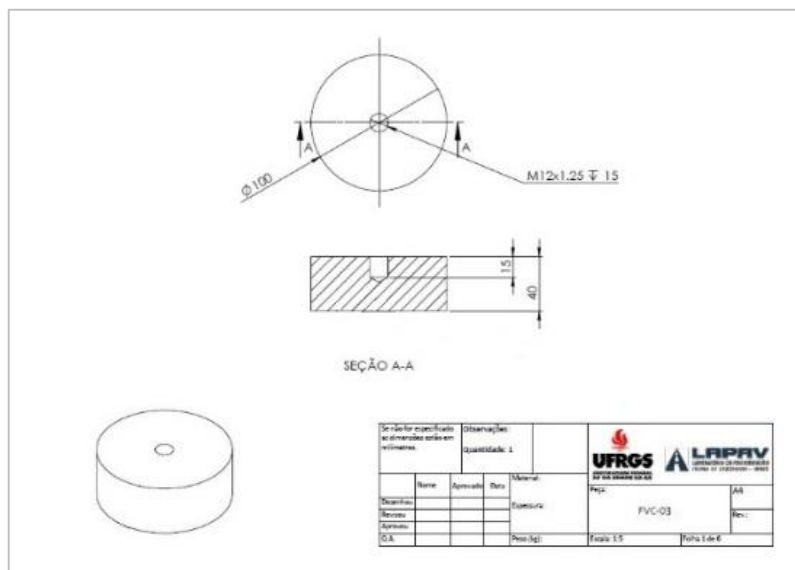
APÊNDICE A – PROJETO: PÓRTICO DE CARREGAMENTO



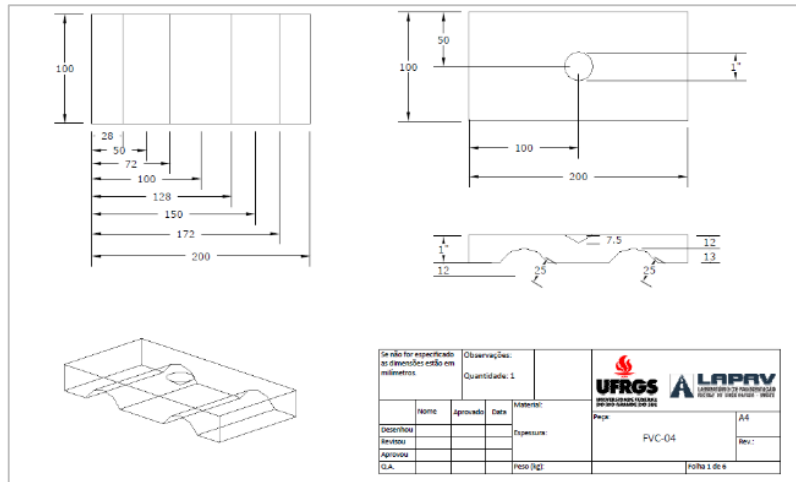
FVC-01



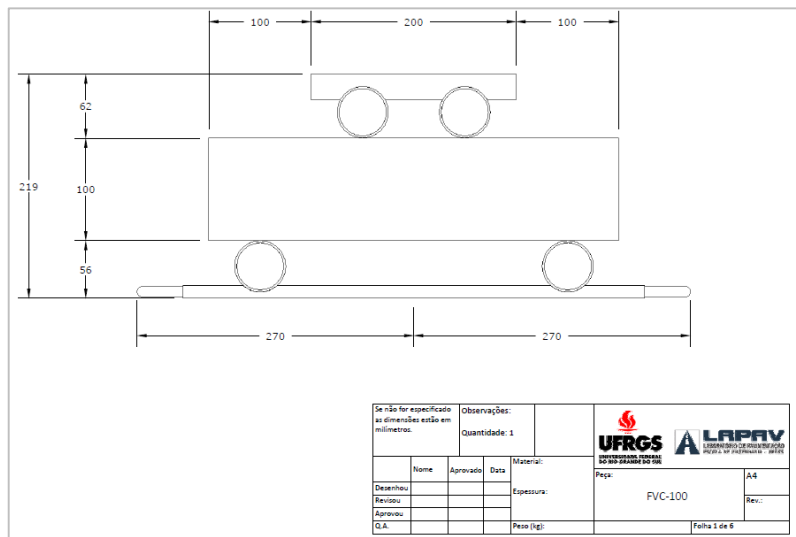
FVC-02



FVC-03



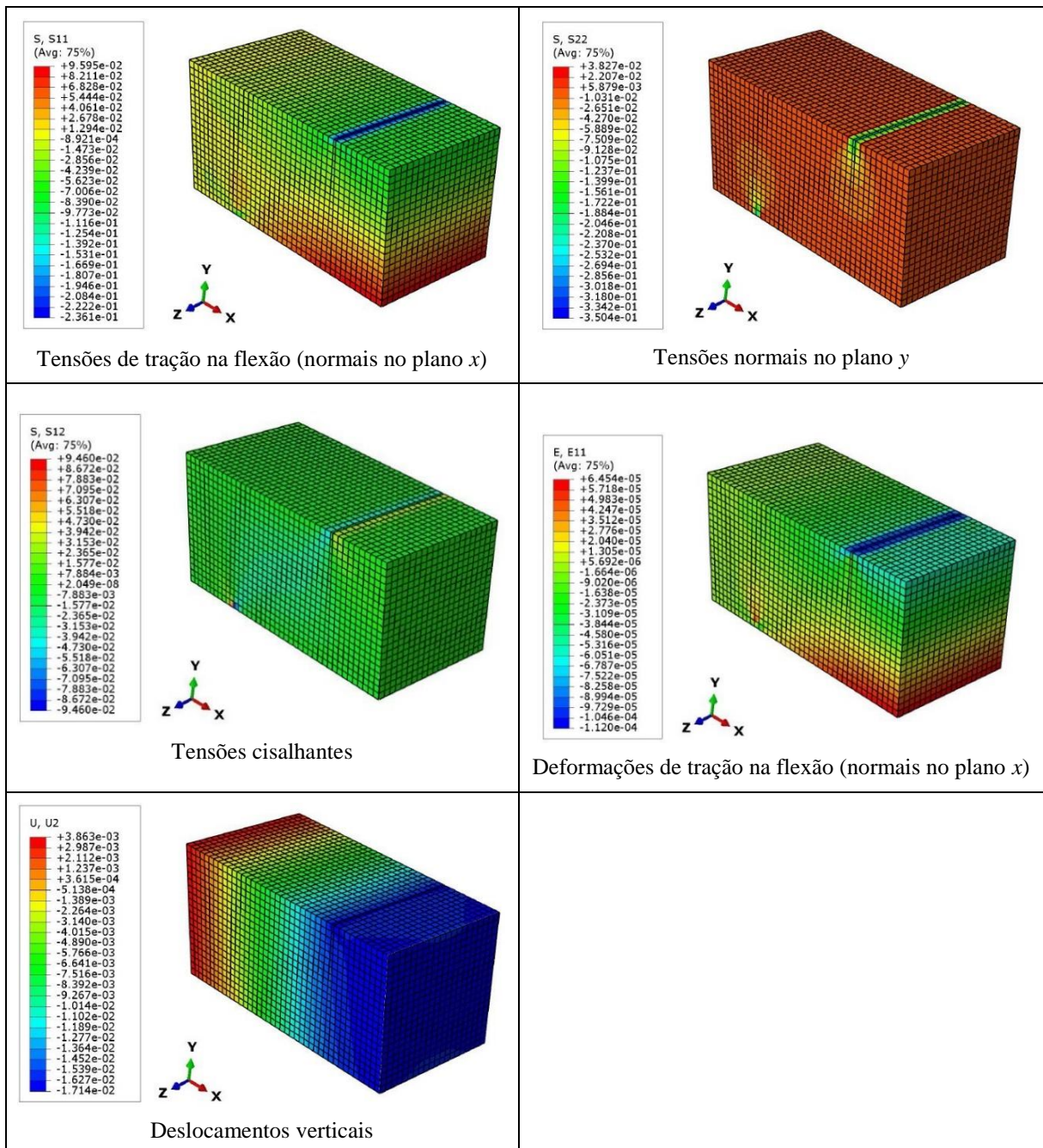
FVC-04



CONJUNTO

APÊNDICE B – MODELAGEM VIGA

B.1 DISTRIBUIÇÕES DE TENSÕES, DEFORMAÇÕES E DESLOCAMENTOS NO PLANO TRANSVERSAL (MISTURA 2-70*)



*As distribuições de tensões, deformações e deslocamentos das demais misturas seguem o mesmo padrão.

B.2 COMPARATIVO MEDIÇÕES X MODELAGEM: TENSÕES DE TRAÇÃO (σ_i)

MISTURA	MEF (MPa)	CARGA APLICADA (N)	PRESSÃO (N/mm ²) (MODELAGEM)	σ_i APLICADA (MPa)	σ_i ABAQUS (MPa)	$\Delta\sigma_i$ (%)
2-20	3950	500	1,25	1,52E-01	1,49E-01	<u>-1,97%</u>
2-50	2900	400	1	1,21E-01	1,19E-01	<u>-1,97%</u>
2-70	1483	300	0,75	9,09E-02	8,91E-02	<u>-1,97%</u>
4-20	8100	1500	3,75	4,55E-01	4,46E-01	<u>-1,97%</u>
4-50	4967	1000	2,5	3,03E-01	2,97E-01	<u>-1,97%</u>
4-70	3000	1000	2,5	3,03E-01	2,97E-01	<u>-1,97%</u>
6-20	12800	3000	7,5	9,09E-01	8,91E-01	<u>-1,97%</u>
6-50	6767	2000	5	6,06E-01	5,94E-01	<u>-1,97%</u>
6-70	5067	2000	5	6,06E-01	5,94E-01	<u>-1,97%</u>

B.3 COMPARATIVO MEDIÇÕES X MODELAGEM: DEFORMAÇÃO DE TRAÇÃO (ε_i)

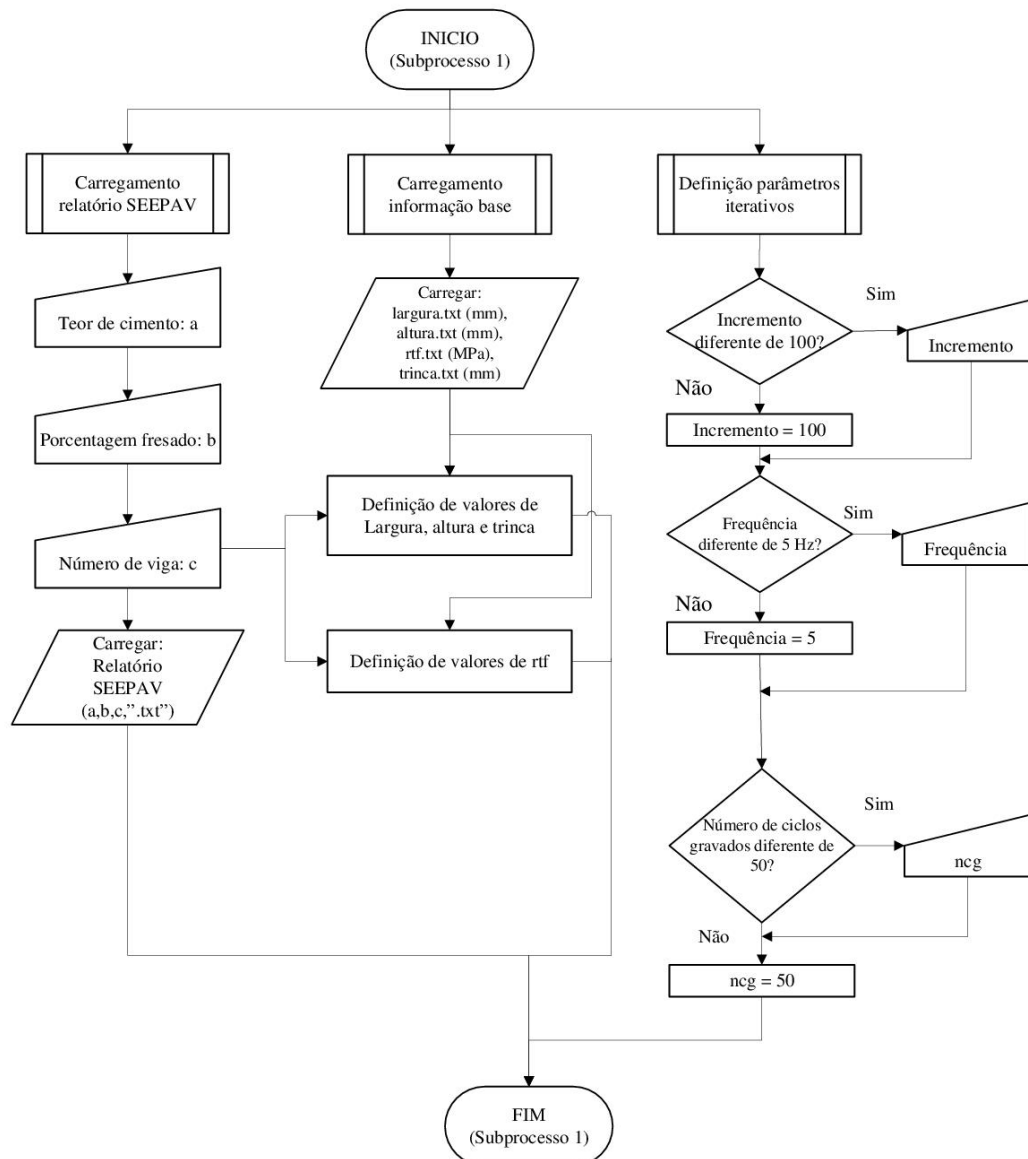
MISTURA	MEF (MPa)	CARGA APLICADA (N)	PRESSÃO (N/mm ²) (MODELAGEM)	ε_i MEDIDA (mm/mm)	ε_i ABAQUS (mm/mm)	ε_i ABAQUS (microstrain)	$\Delta \varepsilon_i$ (%)
2-20	3950	500	1,25	3,84E-05	3,76E-05	37,6	<u>-1,97%</u>
2-50	2900	400	1	4,18E-05	4,10E-05	41,0	<u>-1,97%</u>
2-70	1483	300	0,75	6,13E-05	6,01E-05	60,1	<u>-1,95%</u>
4-20	8100	1500	3,75	5,61E-05	5,50E-05	55,0	<u>-1,97%</u>
4-50	4967	1000	2,5	6,10E-05	5,98E-05	59,8	<u>-1,98%</u>
4-70	3000	1000	2,5	1,01E-04	9,90E-05	99,0	<u>-1,97%</u>
6-20	12800	3000	7,5	7,10E-05	6,96E-05	69,6	<u>-1,97%</u>
6-50	6767	2000	5	8,96E-05	8,78E-05	87,8	<u>-1,98%</u>
6-70	5067	2000	5	1,20E-04	1,17E-04	117,3	<u>-1,98%</u>

B.4 COMPARATIVO MEDIÇÕES X MODELAGEM: DESLOCAMENTO VERTICAL (δ_i)

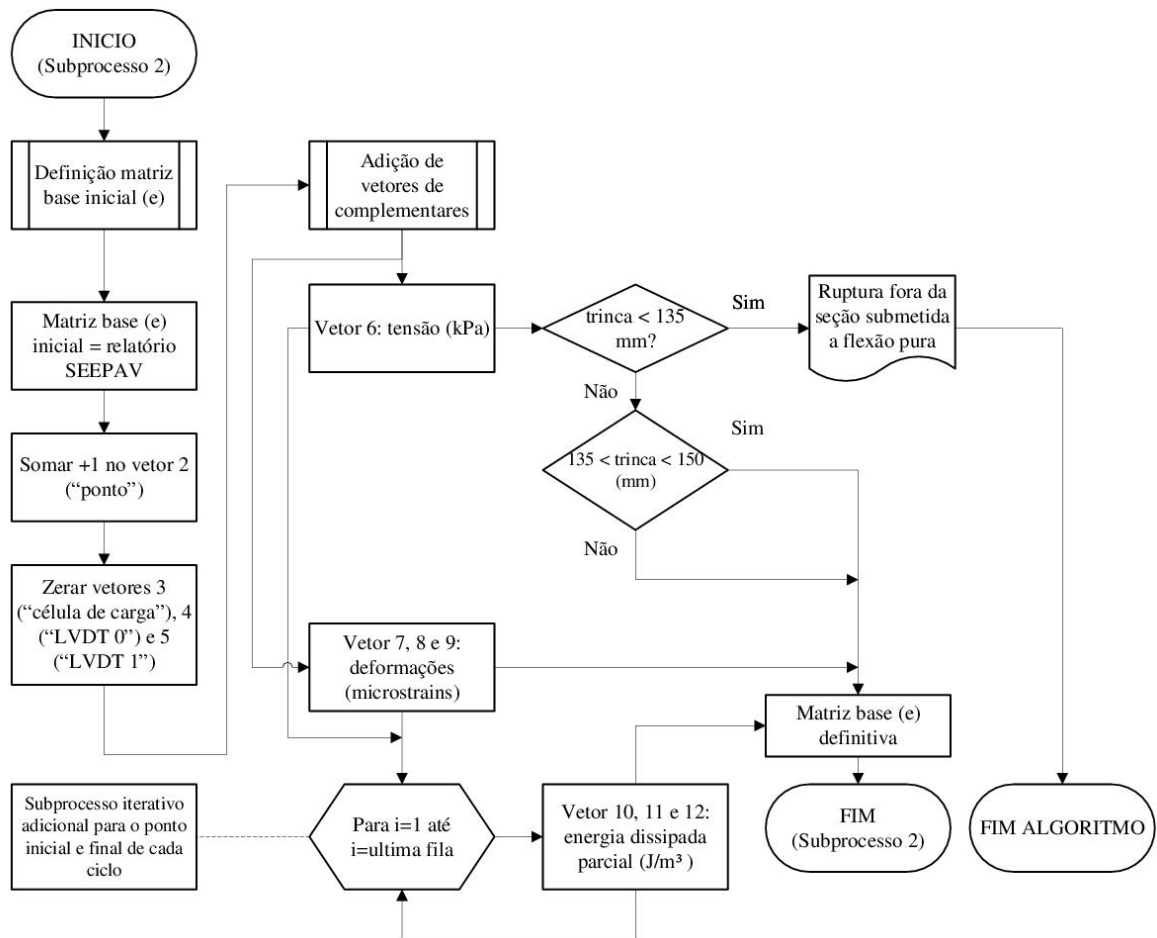
MISTURA	MEF (MPa)	CARGA APLICADA (N)	PRESSÃO (N/mm ²) (MODELAGEM)	δ_i MEDIDO (mm)	δ_i ABAQUS (mm)	$\Delta \delta_i$ (%)
2-20	3950	500	1,25	7,50E-03	8,60E-03	<u>14,71%</u>
2-50	2900	400	1	8,50E-03	9,37E-03	<u>10,29%</u>
2-70	1483	300	0,75	1,30E-02	1,37E-02	<u>5,76%</u>
4-20	8100	1500	3,75	1,10E-02	1,26E-02	<u>14,42%</u>
4-50	4967	1000	2,5	1,20E-02	1,37E-02	<u>14,03%</u>
4-70	3000	1000	2,5	2,00E-02	2,27E-02	<u>13,28%</u>
6-20	12800	3000	7,5	1,40E-02	1,59E-02	<u>13,78%</u>
6-50	6767	2000	5	1,80E-02	2,01E-02	<u>11,60%</u>
6-70	5067	2000	5	2,50E-02	2,68E-02	<u>7,31%</u>

APÊNDICE C – ALGORITMOS DE PROCESSAMENTO

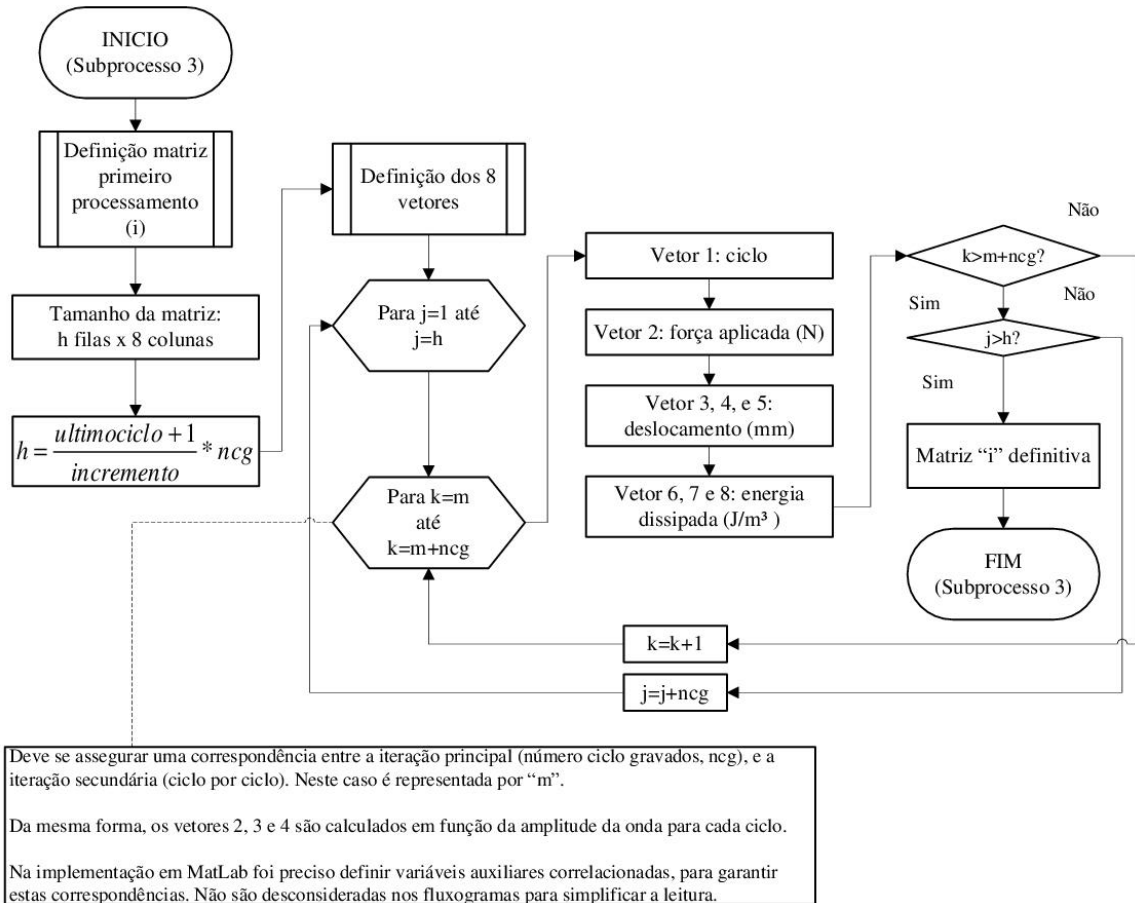
C.1. SUBPROCESSO 1



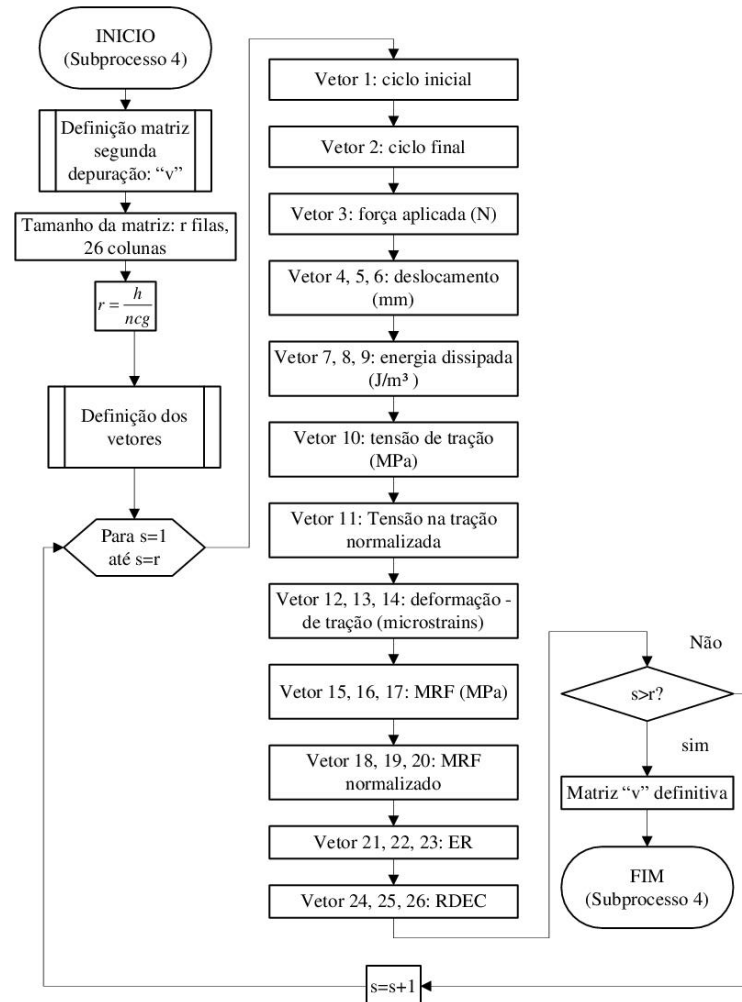
C.2. SUBPROCESSO 2



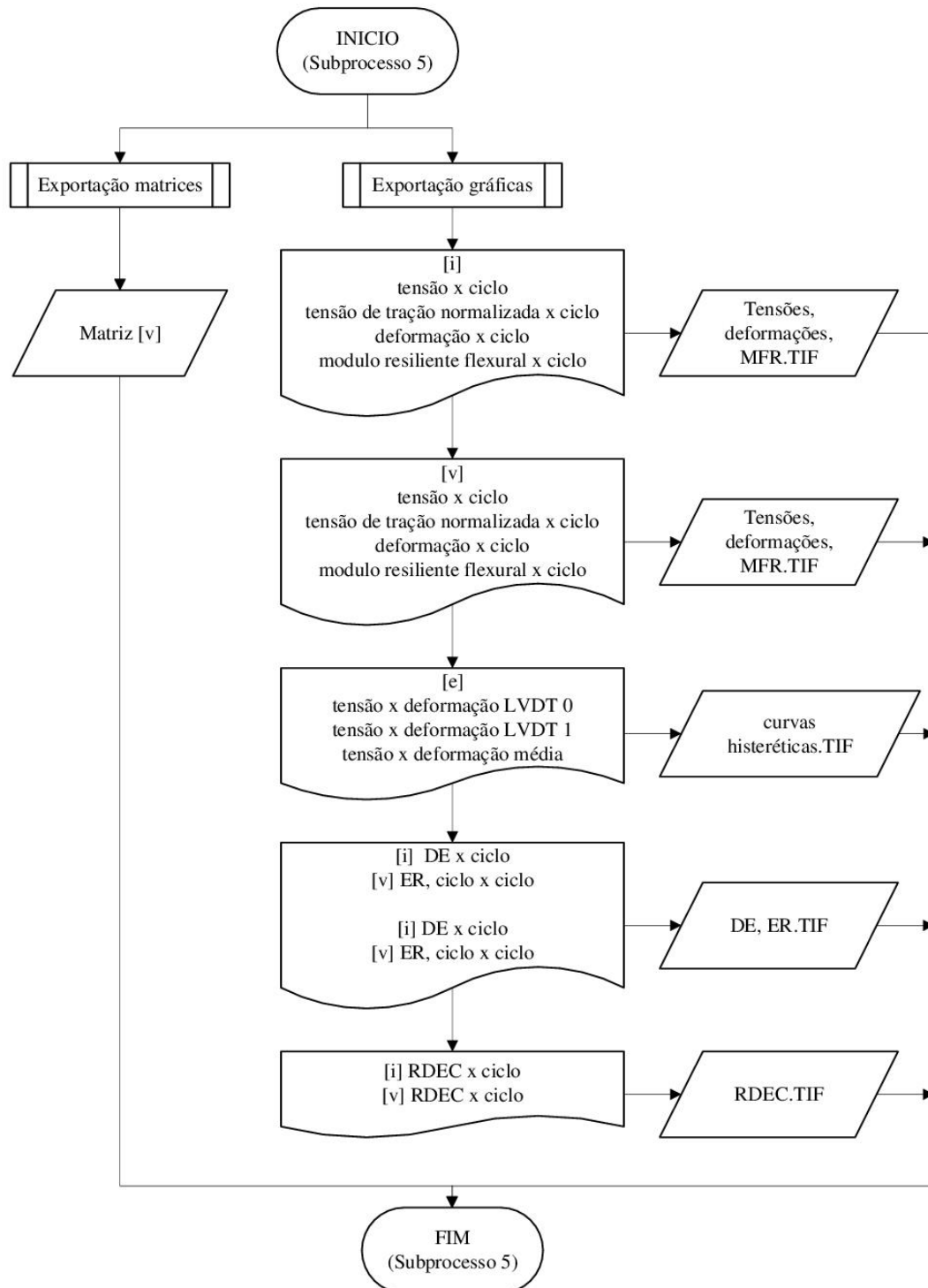
C.3. SUBPROCESSO 3



C.4. SUBPROCESSO 4

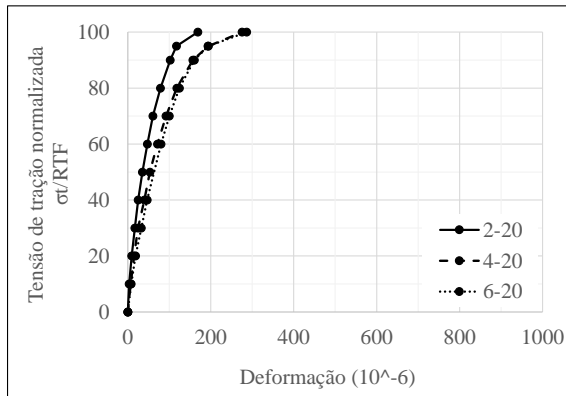


C.5. SUBPROCESSO 5

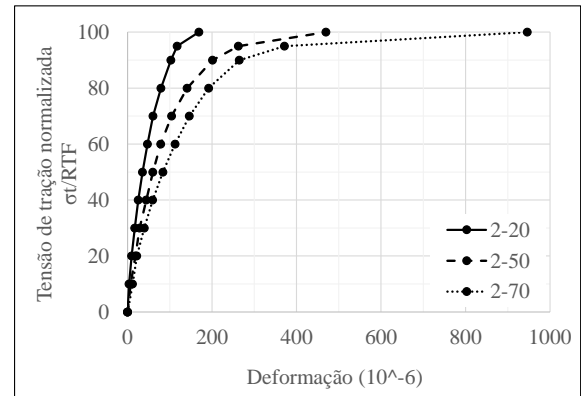


**APÊNDICE D – RESULTADOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À
TRAÇÃO NA FLEXÃO**

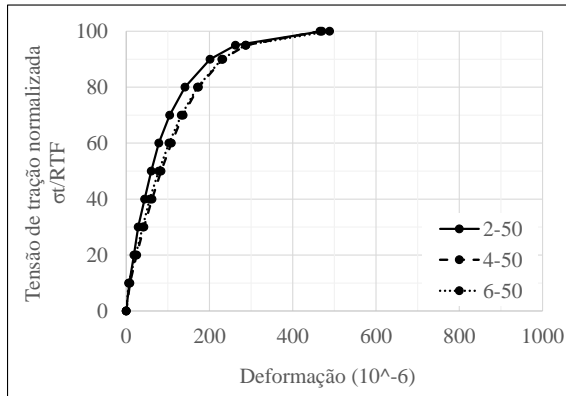
D.1. CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO NORMALIZADAS: FUNÇÃO DO TEOR DE CIMENTO E DA PORCENTAGEM DE FRESADO



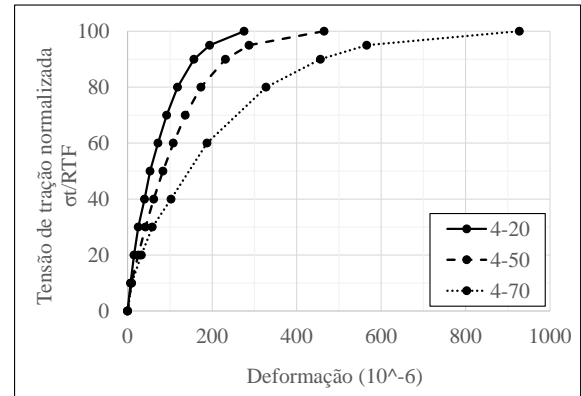
20 % de fresado



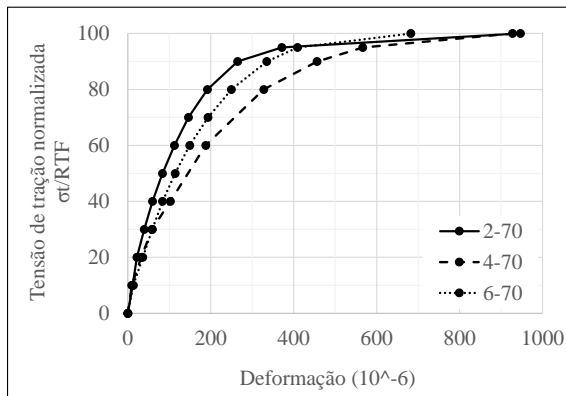
2 % de cimento



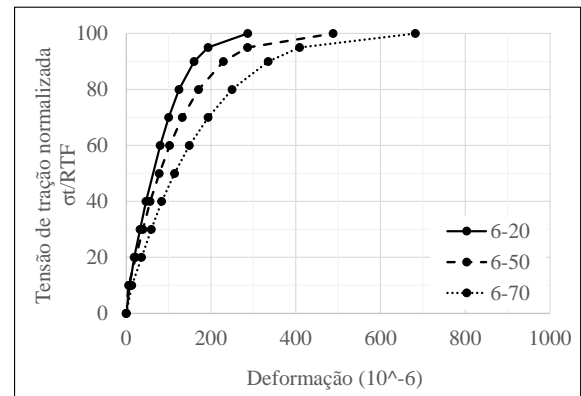
50 % de fresado



4 % de cimento

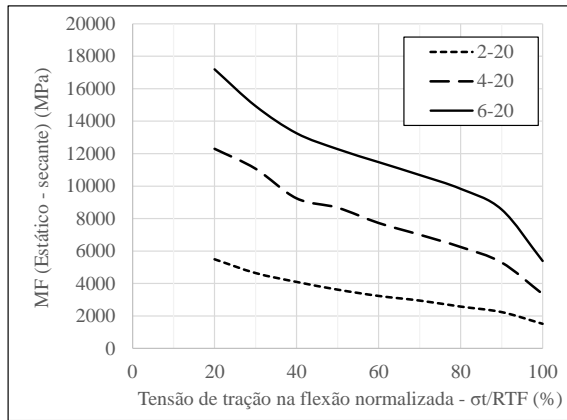


70 % de fresado

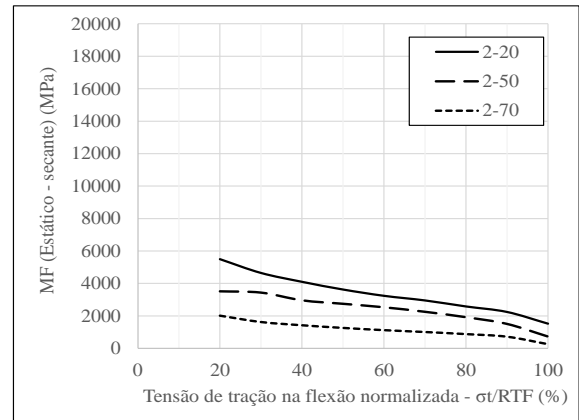


6 % de cimento

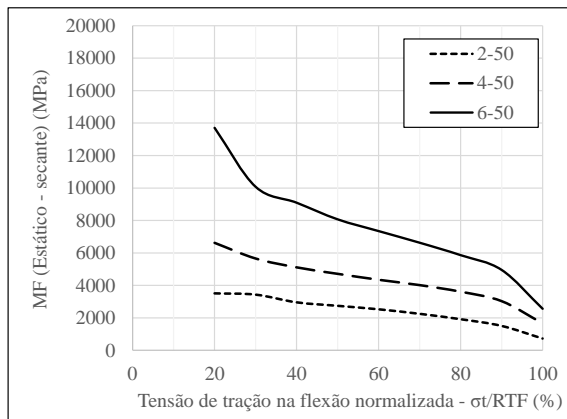
D.2 CURVAS DE VARIAÇÃO DO MODULO ELÁSTICO FLEXURAL SECANTE X NÍVEL DE CARGA:
FUNÇÃO DO TEOR DE CIMENTO E DA PORCENTAGEM DE FRESADO



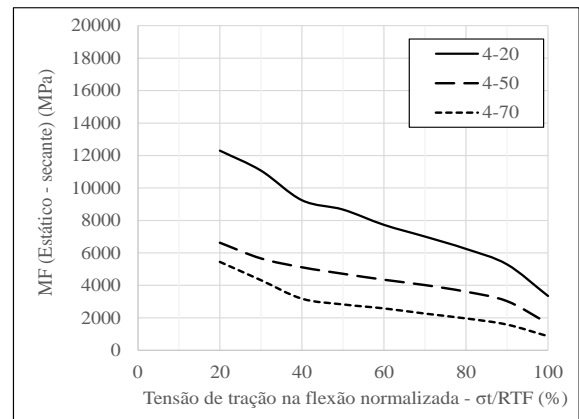
20 % de fresado



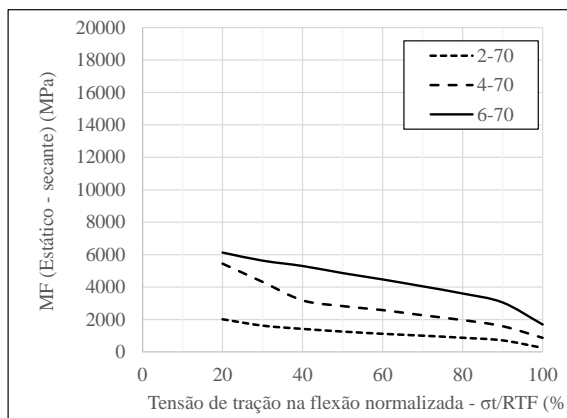
2 % de cimento



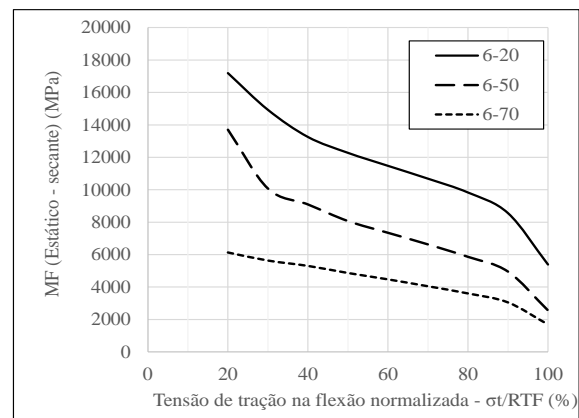
50 % de fresado



4 % de cimento



70 % de fresado



6 % de cimento

**APÊNDICE E – RESULTADOS ENSAIOS DE FADIGA EM QUATRO
PONTOS**

E.1. RESULTADOS ENSAIOS DE FADIGA

MISTURA	CP	σ/RTF (%)	σ (MPa)	ε_I (microstrains)	MRF _i (MPa)	$\varepsilon_I/\varepsilon_B$	DE_I (J/m ³)	N
2-20	1	38	0,086	32	2703	27,2	1,01	1,64E+05
	2	60	0,153	--	--	--	--	1,30E+02
	3	50	0,114	42	2706	36,2	1,78	5,99E+02
	4	50	0,128	--	--	--	--	7,50E+01
	5	39	0,081	32	2528	27,3	0,94	3,24E+05
	6	50	0,105	33	3161	28,4	1,34	4,88E+04
	7	50	0,128	--	--	--	--	6,10E+01
	8	43	0,101	34	3071	29,4	1,24	9,99E+02
	9	23	0,053	17	3134	14,5	0,32	1,00E+06
	10	39	0,082	28	2915	23,9	0,79	7,27E+05
	11	40	0,083	28	2975	23,7	0,81	9,05E+04
	12	29	0,064	19	3406	16,0	0,47	9,42E+05
2-50	1	47	0,108	41	2677	15,6	1,58	6,99E+02
	2	32	0,104	46	2294	17,4	1,81	1,80E+03
	3	33	0,084	30	2891	11,3	0,93	8,13E+04
	4	34	0,081	23	3507	8,8	0,87	1,00E+06
	5	36	0,074	--	--	--	--	1,68E+04
	6	34	0,080	29	2805	10,9	0,94	7,10E+03
	7	26	0,057	19	2984	7,3	0,41	1,00E+06
	8	25	0,066	18	3630	7,0	0,49	1,00E+06
	9	42	0,125	40	3097	15,4	1,93	1,99E+02

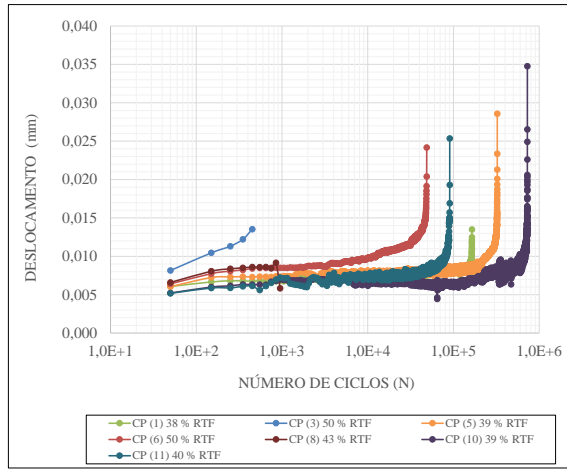
E.1. RESULTADOS ENSAIOS DE FADIGA (CONTINUAÇÃO)

MISTURA	CP	σ/RTF (%)	σ (MPa)	ε_I (microstrains)	MRF _i (MPa)	$\varepsilon_I/\varepsilon_B$	DE_I (J/m ³)	N
2-70	1	61	0,096	35	2798	9,3	1,30	6,45E+05
	2	59	0,077	26	2996	6,9	0,78	4,38E+05
	3	81	0,136	46	2976	12,5	2,58	2,99E+02
	4	85	0,138	51	2693	13,8	2,81	3,99E+02
	5	60	0,126	--	--	--	--	2,99E+02
	6	56	0,116	60	1963	16,0	2,95	9,99E+02
	7	46	0,073	24	2988	6,6	0,71	1,00E+06
	8	63	0,089	32	2855	8,6	1,17	1,00E+04
	9	59	0,089	32	2805	8,6	1,14	1,38E+05
	10	72	0,108	39	2774	10,5	1,44	1,60E+03
	11	54	0,090	25	3627	6,7	0,96	1,00E+06
	12	65	0,100	28	3571	7,6	0,90	1,00E+06
4-20	1	42	0,258	32	8099	16,4	2,69	9,99E+02
	2	36	0,245	32	7749	16,5	2,60	2,99E+02
	3	37	0,247	33	7529	16,9	2,74	3,99E+02
	4	32	0,161	22	7211	11,5	1,21	4,00E+03
	5	32	0,142	20	7093	10,4	0,99	1,56E+04
	6	22	0,138	16	8740	8,1	0,65	1,00E+06
	7	28	0,138	17	8565	8,7	0,72	1,14E+04
	8	25	0,147	22	6740	11,3	0,94	3,57E+04
	9	19	0,129	16	7801	8,5	0,61	8,55E+05

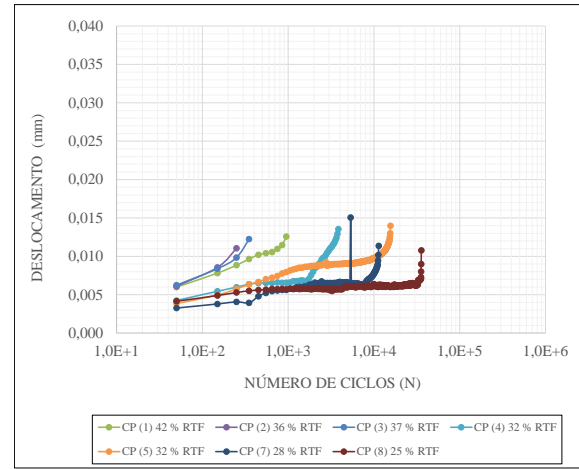
E.1. RESULTADOS ENSAIOS DE FADIGA (CONTINUAÇÃO)

MISTURA	CP	σ/RTF (%)	σ (MPa)	ε_I (microstrains)	MRF _i (MPa)	$\varepsilon_I/\varepsilon_B$	DE_I (J/m ³)	N
4-50	1	40	0,310	--	--	--	--	1,75E+02
	2	36	0,240	50	4881	17,4	4,35	2,99E+02
	3	41	0,244	48	5131	16,6	4,29	4,99E+02
	4	31	0,163	29	5654	10,0	1,64	3,74E+05
	5	40	0,310	--	--	--	--	1,34E+02
	6	35	0,180	47	3867	16,3	3,15	7,99E+02
	7	38	0,187	35	5338	12,2	2,33	2,30E+03
	8	29	0,146	38	3929	13,1	2,02	1,51E+04
	9	30	0,154	34	4605	11,7	1,88	1,26E+04
4-70	1	28	0,158	33	4870	5,9	1,95	2,80E+03
	3	28	0,152	26	5763	4,7	1,55	1,06E+05
	4	32	0,156	28	5658	5,0	1,62	8,10E+03
	5	19	0,121	31	3905	5,5	1,46	1,00E+06
	6	25	0,131	30	4375	5,3	1,40	7,41E+04
	7	23	0,113	26	4339	4,6	1,01	4,59E+05
	8	25	0,201	--	--	--	--	4,99E+02
	9	34	0,201	40	5029	7,1	2,97	4,99E+02
	10	37	0,179	33	5454	5,8	2,11	1,20E+03
	11	24	0,122	27	4445	4,9	1,26	3,51E+05

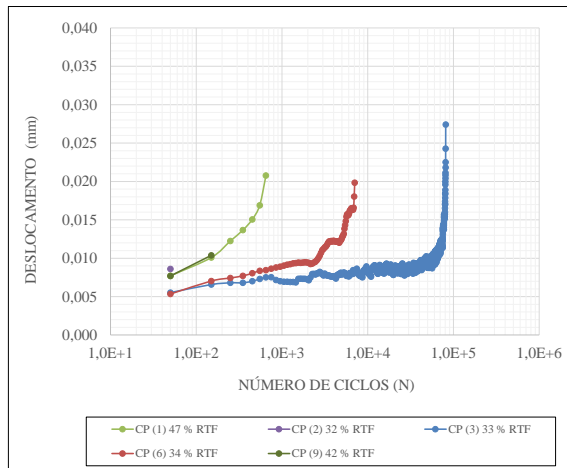
E.2. CURVAS DE DEGRADAÇÃO: DESLOCAMENTO



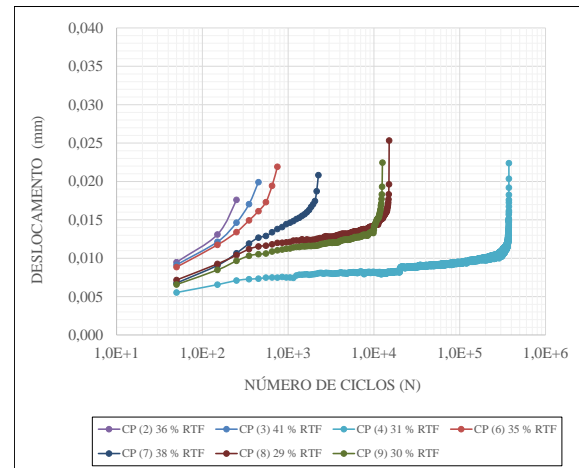
Mistura 2-20



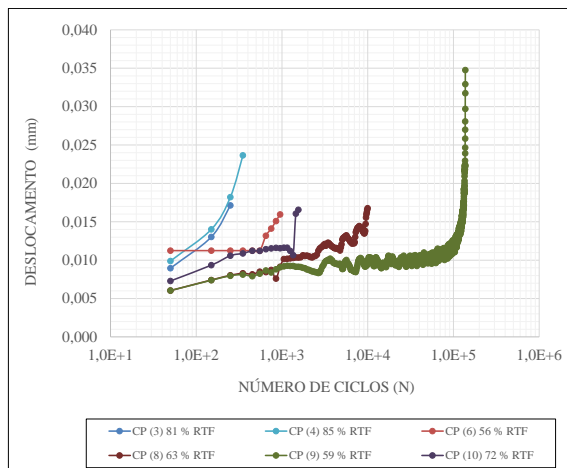
Mistura 4-20



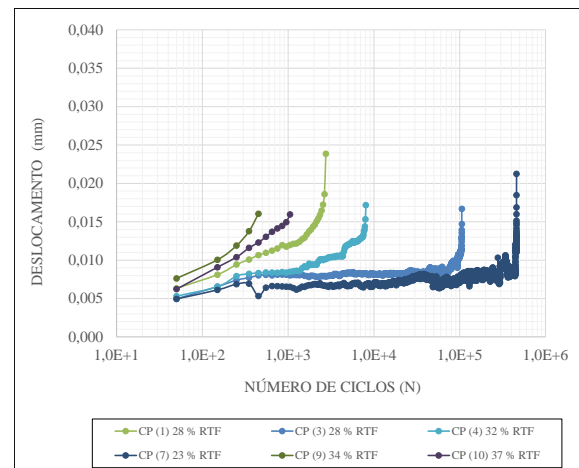
Mistura 2-50



Mistura 4-50

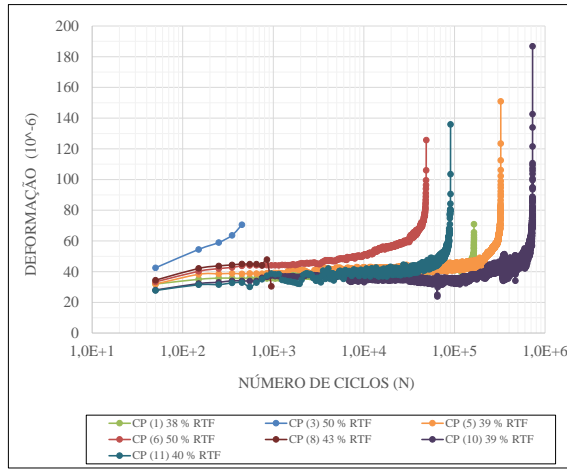


Mistura 2-70

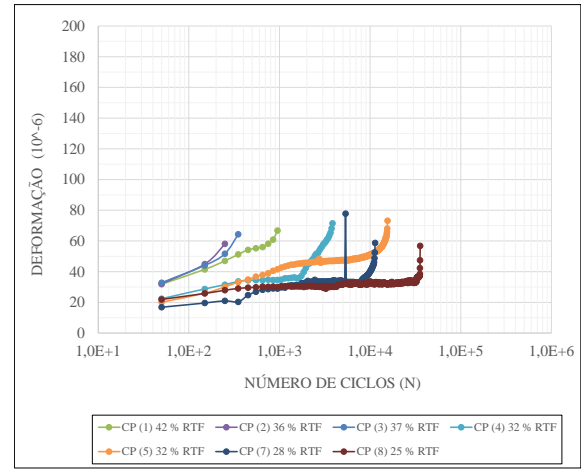


Mistura 4-70

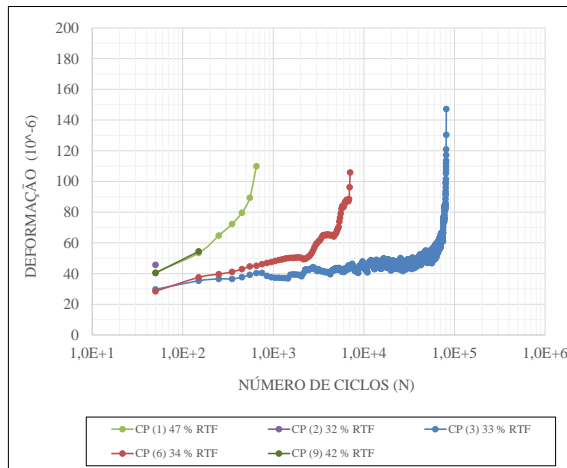
E.3. CURVAS DE DEGRADAÇÃO: DEFORMAÇÕES DE TRAÇÃO



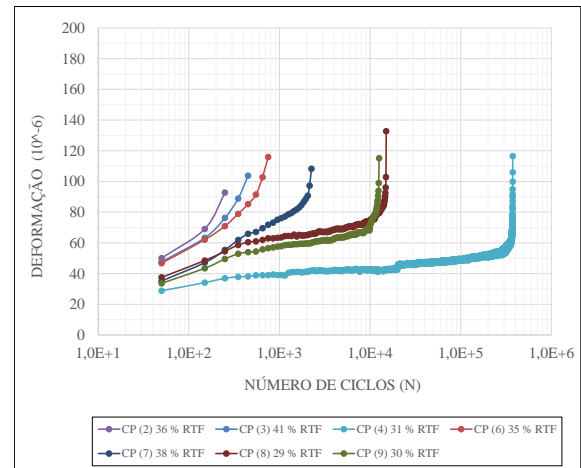
Mistura 2-20



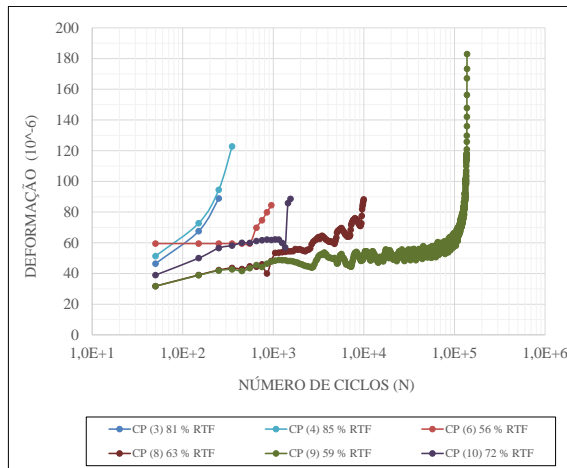
Mistura 4-20



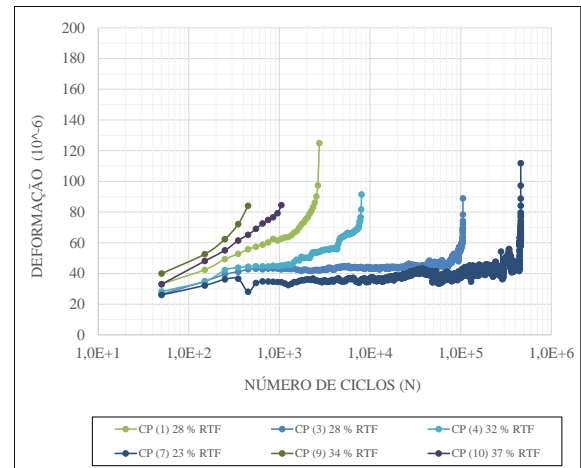
Mistura 2-50



Mistura 4-50

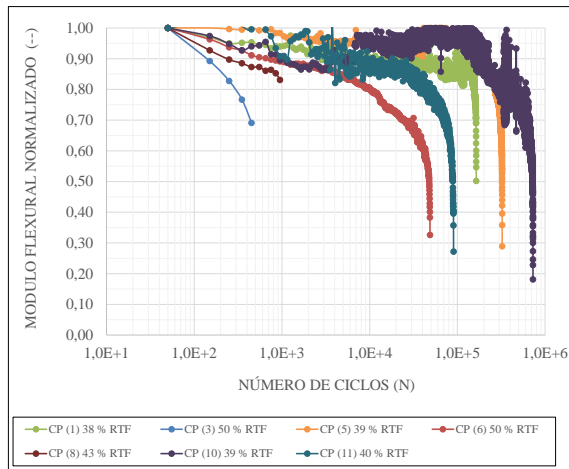


Mistura 2-70

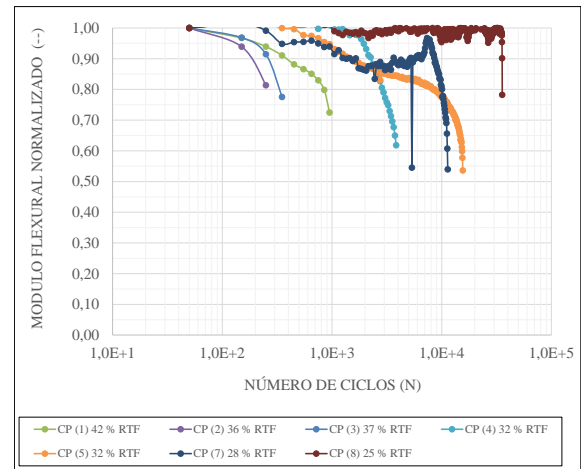


Mistura 4-70

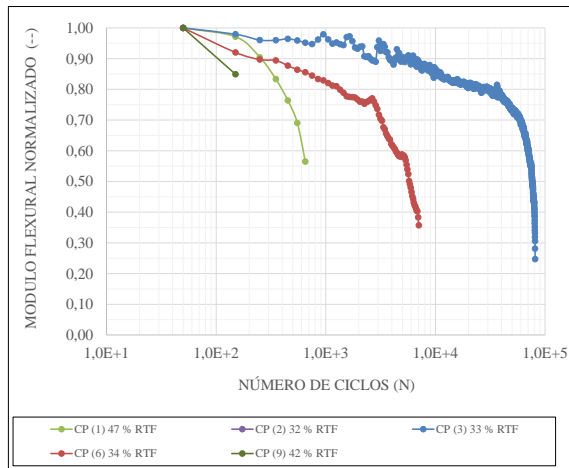
E.4. CURVAS DE DEGRADAÇÃO: REDUÇÃO DO MRF INICIAL (VALORES NORMALIZADOS)



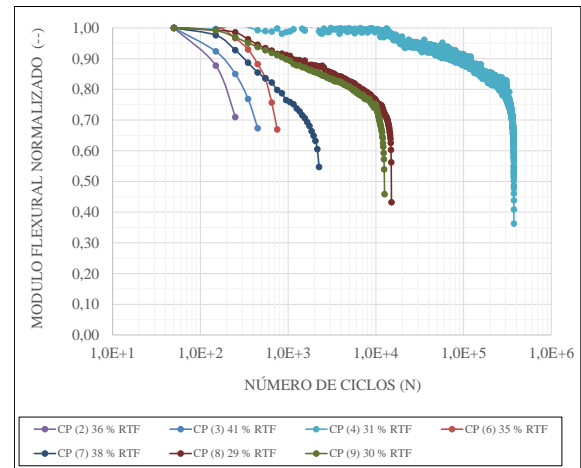
Mistura 2-20



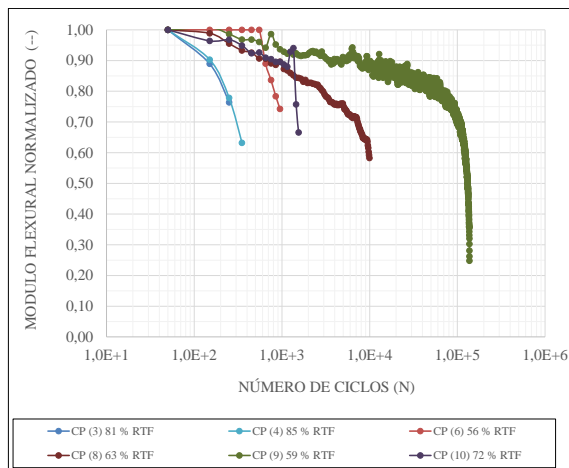
Mistura 4-20



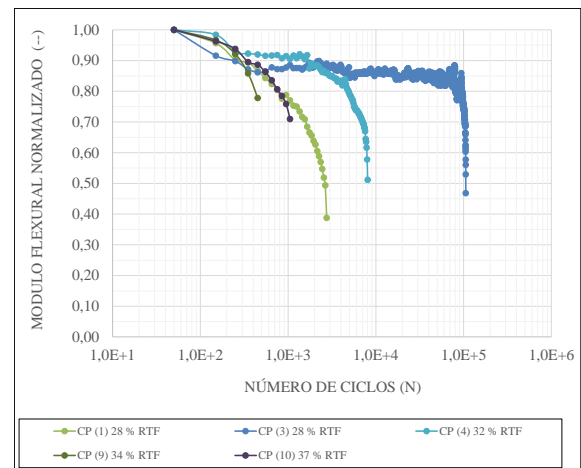
Mistura 2-50



Mistura 4-50

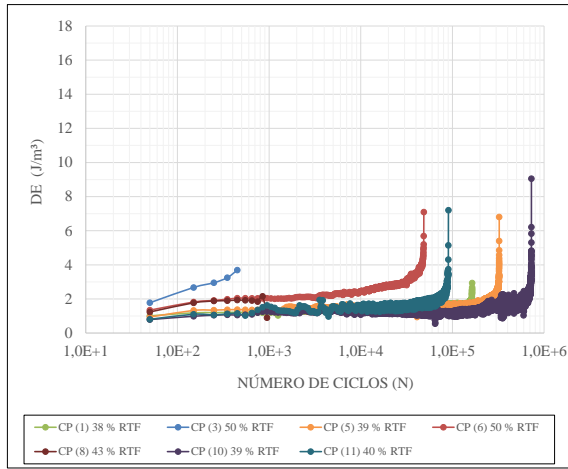


Mistura 2-70

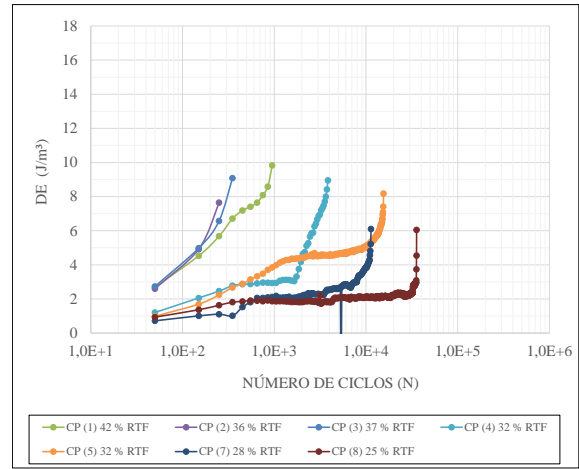


Mistura 4-70

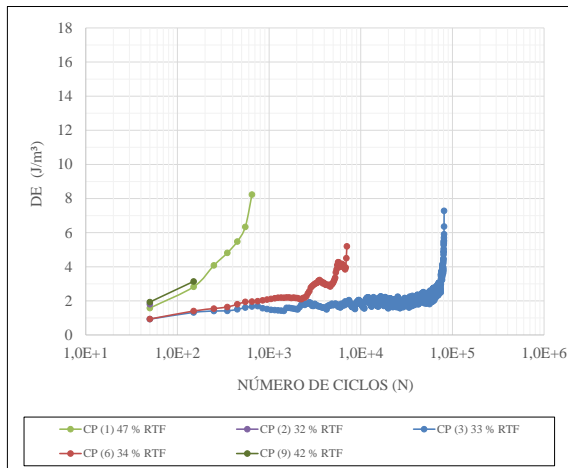
E.5. CURVAS DE DEGRADAÇÃO: ENERGIA DISSIPADA



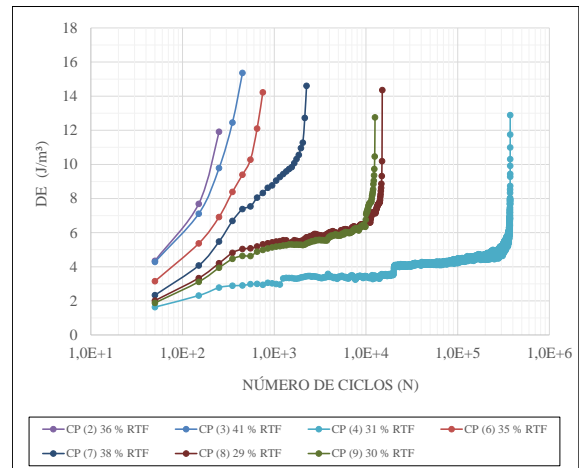
Mistura 2-20



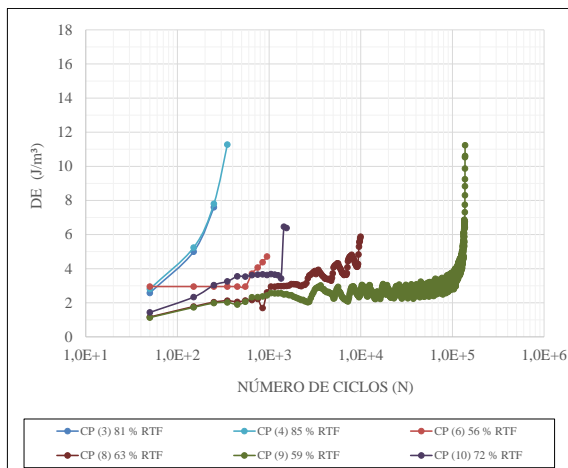
Mistura 4-20



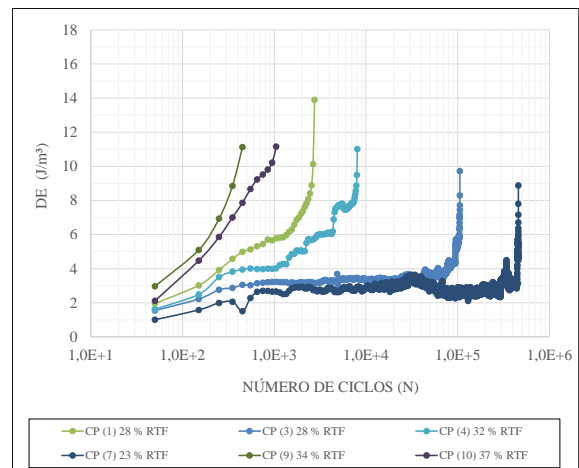
Mistura 2-50



Mistura 4-50



Mistura 2-70



Mistura 4-70

**APÊNDICE F – DIMENSIONAMENTO DAS ESTRUTURAS DE
PAVIMENTO**

F.1. DIMENSIONAMENTO DAS ESTRUTURAS DE PAVIMENTO: RESPOSTA ESTRUTURAL
(DEFORMAÇÕES DE TRAÇÃO) DA FIBRA INFERIOR DA CAMADA RECICLADA

Espessura camada asfáltica (cm)	Espessura camada reciclada (cm)	Deformações (microstrains)					
		Misturas					
		2-20	2-50	2-70	4-20	4-50	4-70
5	18	136,71	135,92	137,85	77,40	103,63	102,35
	20	122,42	121,70	123,47	68,36	92,21	91,05
	25	94,53	93,96	95,38	51,36	70,31	69,38
	30	74,69	74,22	75,38	39,76	55,03	54,27
	35	60,20	59,82	60,78	31,57	44,04	43,42
	40	49,39	49,07	49,87	25,59	35,93	35,42
10	18	102,79	102,21	103,63	59,33	78,49	77,56
	20	92,92	92,39	93,69	53,11	70,62	69,76
	25	73,35	72,91	73,98	41,06	55,20	54,51
	30	59,09	58,74	59,62	32,54	44,14	43,56
	35	48,47	48,17	48,91	26,33	35,98	35,50
	40	40,38	40,13	40,76	21,70	29,83	29,42

F.2. DIMENSIONAMENTO DAS ESTRUTURAS DE PAVIMENTO: RESPOSTA ESTRUTURAL
(TENSÕES DE COMPRESSÃO) NO TOPO DA CAMADA RECICLADA

Espessura camada asfáltica (cm)	Espessura camada reciclada (cm)	Tensões de compressão (MPa)					
		Misturas					
		2-20	2-50	2-70	4-20	4-50	4-70
5	18	0,487	0,488	0,487	0,413	0,501	0,502
	20	0,491	0,491	0,491	0,516	0,505	0,505
	25	0,497	0,497	0,497	0,524	0,511	0,511
	30	0,500	0,501	0,500	0,524	0,514	0,514
	35	0,502	0,503	0,502	0,525	0,515	0,514
	40	0,503	0,504	0,503	0,526	0,516	0,517
10	18	0,494	0,495	0,494	0,527	0,512	0,513
	20	0,496	0,497	0,496	0,529	0,514	0,515
	25	0,499	0,500	0,499	0,531	0,517	0,518
	30	0,501	0,501	0,500	0,533	0,519	0,519
	35	0,502	0,502	0,501	0,534	0,520	0,520
	40	0,503	0,503	0,502	0,534	0,520	0,521

F.3. CURVAS DE DIMENSIONAMENTO: EFEITO DA PORCENTAGEM DE FRESADO E DA ESPESSURA DA CAMADA ASFÁLTICA

