

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

**Avaliação do comportamento mecânico de um ECC (*Engineered
Cementitious Composites*) com fibras de polipropileno no
recapeamento de pavimentos.**

Camilo Andrés Muñoz Rodríguez

Porto Alegre
2018

CAMILO ANDRÉS MUÑOZ RODRÍGUEZ

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM
ECC (*ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES*) COM
FIBRAS DE POLIPROPILENO NO RECAPEAMENTO DE
PAVIMENTOS.**

Tese submetida 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 Doutor em Engenharia

Porto Alegre

2018

Muñoz Rodríguez, Camilo Andrés

Avaliação do comportamento mecânico de um ECC (Engineered Cementitious Composites) com fibras de polipropileno no recapeamento de pavimentos / Camilo Andrés Muñoz Rodríguez. -- 2018.

260 f.

Orientador: Washington Peres Núñez.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Compósitos cimentícios. 2. ECC. 3. Simulador de tráfego linear. 4. Recapeamento. 5. Ensaios de fadiga. I. Peres Núñez, Washington, orient. II. Título.

CAMILO ANDRÉS MUÑOZ RODRÍGUEZ

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM
ECC (*ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES*) COM
FIBRAS DE POLIPROPILENO NO RECAPEAMENTO DE
PAVIMENTOS.**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, 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, 26 de março de 2018

Prof. Nilo César Consoli
Coordenador do PPGEC/UFRGS

Prof. Washington Peres Núñez
D. em Eng. pela UFRGS, Brasil
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)
Ph. D. University of Leeds

Prof. José Tadeu Balbo (USP)
D. Sc. pela USP, Brasil

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)
D. Sc. pela COPPE - UFRJ, Brasil

Prof. Ângela Graeff (UFRGS)
Ph. D. University of Sheffield

Dedico este trabalho a todas as pessoas que de uma ou outra forma, com seus conselhos, apoio, ajuda e companhia fizeram possível seu bom termino.

AGRADECIMENTOS

Sinto-me extremamente honrado por ter tido esta oportunidade, esta conquista só foi possível graças ao apoio de diversas pessoas e instituições que merecem aqui serem lembradas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior – CAPES e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa de estudos, sem a qual esta experiência provavelmente não teria sido possível.

Agradeço ao corpo docente, discente e administrativo do PPGEC pelos ensinamentos. Aos responsáveis pelos laboratórios, no LEME a professora Ângela Graeff pelas ajudas, conselhos e acompanhamento, aos técnicos seu Fontes e seu Edgar, e seu José. No LAPAV ao prof. Ceratti pelo apoio, aos técnicos Rodrigo e Armando, muito obrigado, a Douglas e demais companheiros, pelas ajudas e paciência.

Ao meu orientador Prof. Washington Pérez Núñez que acompanhou todo o processo e me motivou a levar a bom termino este projeto, por sua paciência, indicações e apoio.

A meus colegas e amigos que desinteressadamente me ajudaram e acompanharam todos estes anos, principalmente a minhas duas quadrilhas de construção sem os quais a construção dos recapeamentos não teria acontecido: José Brito, Eloide da Silva, Jorge Flórez, Mario Castañeda, Carlos Gonzales, Magnon Donin, Hugo Peña e Camilo Fonseca. Aos fotógrafos do projeto Daniel e Jack. Aos inigualáveis amigos Marco e Lina. A José Luis pelas desinteressadas ajudas.

A minha família e amigos da colômbia por seu apoio e paciência na distância.

A Taís da Silva por seu amor, paciência, carinho e suas repreensões nos momentos justos.

If you're being chased by a tiger, it may comfort you to believe it's a rabbit but it is a tiger and it is going to eat you.

Si te está persiguiendo un tigre, puedes obtener consuelo creyendo que es un conejo. Pero en realidad es un tigre y te va a comer.

Steven Pinker

RESUMO

MUÑOZ RODRÍGUEZ, C. A. Avaliação do comportamento mecânico de um ECC (*Engineered Cementitious Composites*) com fibras de polipropileno no recapeamento de pavimentos. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O *Engineered Cementitious Composite* ou ECC é um compósito cimentício de elevada capacidade de deformação, concebido na Universidade de Michigan. Constituído por agregados miúdos, cimento e fibras, o compósito apresenta elevada ductilidade associada com a capacidade de gerar microfissuras quando submetido a carregamentos, num comportamento conhecido como *strain-hardening*. As pesquisas previamente desenvolvidas no Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME) da UFRGS objetivaram caracterizar um ECC adaptado aos materiais do Brasil, adicionando-se fibras de polipropileno na elaboração do compósito, e estudando-se alternativas para a substituição parcial de cimento. Na pesquisa aqui relatada, adotou-se o traço de referência definido previamente (ECC_{Ref}) e também foi utilizado um traço alternativo com 30% (em volume) de cinza de casca de arroz moída por 4 horas, em substituição parcial do cimento (ECC_{CCA}). A pesquisa foi dividida em duas abordagens. A primeira consistiu na caracterização das propriedades mecânica dos traços em laboratório com a realização de ensaios de resistência à tração na flexão, à compressão simples, avaliação da aderência por cisalhamento direto e da trabalhabilidade, bem como ensaios de fadiga em viga quatro pontos. Em ensaios monotônicos o ECC_{CCA} apresentou uma resistência à tração na flexão média ($f_{t,f}$) de 8,2 MPa e resistência à compressão simples média (f_c) de 50 MPa; já o ECC_{Ref} teve valores médios de 6,8 MPa e 36 MPa, respetivamente. Nos ensaios de aderência obtiveram-se resistências ao cisalhamento de 2050 kPa (ECC_{CCA}) e 1900 kPa (ECC_{Ref}). A avaliação da trabalhabilidade permitiu estabelecer critérios para aprimorar o processo de mistura e manuseio do material em estado fresco, desta forma obteve-se adequada trabalhabilidade no ensaio de *flow table*, que aumentou de 44 para 90, possibilitando a utilização de betoneiras de tombo e obter os volumes de material necessários. Com os resultados dos ensaios dinâmicos foram estabelecidos modelos de fadiga em termos da deformação específica de extensão inicial (ϵ_{ti}), deformação específica de extensão inicial normalizada ($\epsilon_{ti}/\epsilon_{tP}$) e tração inicial (σ_{ti}), assim como da energia dissipada (DE), igualmente foi possível estudar o processo de degradação dos compósitos. A segunda abordagem da pesquisa consistiu na realização de ensaios em verdadeira grandeza, com a utilização do simulador de tráfego do Laboratório de Pavimentação (LAPAV). Foram construídos dois recapeamentos (de 50 e 30 mm de espessura) sobre pavimentos flexíveis que apresentavam idêntico padrão de trincamento. Em cada recapeamento foram aplicados 100 mil ciclos da carga de semi-eixo de 5,5 toneladas. Foram acompanhados, visualmente, o surgimento e evolução de fissuras e outras manifestações patológicas, bem como o desgaste superficial, por meio dos ensaios de Pêndulo Britânico e Altura de Mancha de Areia. Após o fim do tráfego, foram serradas placas das seções trafegadas para verificar a propagação das fissuras e a aderência entre o compósito e o pavimento. Concluiu-se que o controle de qualidade na mistura é fundamental para garantir a qualidade da superfície. Além disso, percebeu-se que a aparição de fissuras está associada com possíveis problemas de aderência ECC-pavimento asfáltico, e em menor escala reflexão de fissuras. Globalmente, constatou-se que é possível produzir ECC's com materiais disponíveis no estado e que este material pode ser aplicado na restauração de pavimentos.

Palavras-chave: Compósitos cimentícios; ECC; Fadiga; Simulador de tráfego linear; Recapeamento.

ABSTRACT

MUÑOZ RODRÍGUEZ, C. A. Mechanical behavior of an ECC (Engineered Cementitious Composites) with Polypropylene fiber as pavement overlay. 2018. Thesis (Doctorate in Civil Engineering) – Postgraduate Program in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

Engineered Cementitious Composite or ECC is a material with a high deformation capacity, designed at the University of Michigan. Composed of fine aggregates, cement and fibres, the composite presents high ductility associated with the ability to generate microcracks when loaded, in a behavior known as strain-hardening. The research previously developed in the Laboratory of Structural Models and Tests (LEME) of UFRGS aimed to characterize an ECC adapted to the materials of Brazil, adding polypropylene fibres in the preparation of the composite, and studying alternatives for the partial replacement of cement. In the research reported here, the previously defined reference mix proportion (ECC_{Ref}) was adopted and an alternative mix proportion was used with 30% (by volume) of unprocessed rice-husk ash grinded for 4 hours, in partial replacement of the cement (ECC_{CCA}). The research was divided into two approaches. The first one consisted in the characterization of the mechanical properties of the ECC's in the laboratory with the execution of tests of flexural behavior and compressive strength, evaluation of adhesion by direct shear tests and the workability, as well as fatigue tests in four point configuration. In monotonic tests ECC_{CCA} showed a resistance to flexural strength of 8.2 MPa and average compression strength of 50 MPa; ECC_{Ref} had mean values of 6.8 MPa and 36 MPa, respectively. In the adhesion tests, shear strengths of 2050 kPa (ECC_{CCA}) and 1900 kPa (ECC_{Ref}) were obtained. The evaluation of the workability allowed for the determination of criteria to improve the process of mixing and handling of the material in fresh state, in this way, adequate workability was obtained in the flow table test, which increased from 44 to 90, permitting the use of concrete mixer machines and to obtain the required volumes of material. With the results of the dynamic tests, fatigue models were stipulated in terms of initial tensile strain (ε_{ti}), normalized initial tensile strain ($\varepsilon_{ti}/\varepsilon_{tP}$) and initial traction (σ_{ti}), as well as the dissipated energy (DE), it was also possible to study the process of degradation of the composites. The second approach of the research consisted in the accomplishment of tests in true greatness, with the use of the Accelerated Loading Facility of the Laboratory of Pavements (LPAV). Two overlays (50 and 30 mm thick) were built over flexible pavements that had the same cracking pattern. At each overlay, 100 thousand cycles of the semi-axle load of 5.5 tons were applied. The appearance and evolution of cracks and other pathologies were monitored visually, as well as surface wear through the British Pendulum and Sand Patch tests. After the end of the traffic simulator, plates of the trafficked sections were sawn to verify the propagation of the cracks and the adhesion between the composite and the pavement. It was concluded that the quality control in the mixture is fundamental to guarantee the quality of the surface. In addition, it was noticed that the appearance of cracks is associated with possible problems of adhesion ECC-asphalt pavement, and to a lesser extent reflective cracking. Overall, it has been found that it is possible to produce ECC's with Brazilian materials and the ECC can be applied in the restoration of pavements.

Keywords: Cementitious composites, ECC, Fatigue, Accelerated Loading Facility, Overlay.

RESUMEN

MUÑOZ RODRÍGUEZ, C. A. Evaluación del comportamiento mecánico de un ECC (*Engineered Cementitious Composites*) con fibras de polipropileno en el recapeamiento de pavimentos. 2018. Tesis (Doctorado en Ingeniería) – Programa de Pos-Graduación en Ingeniería Civil, UFRGS, Porto Alegre.

El ECC (*Engineered Cementitious Composites*) es un compósito cementicio de elevada capacidad de deformación desarrollado en la Universidad de Michigan. Conformado por agregados finos, cemento y fibras poliméricas, presenta una alta ductilidad asociada con la capacidad de generar microfisuras durante la aplicación de cargas, comportamiento conocido como *strain-hardening*. Las investigaciones previamente desarrolladas en el *Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais* (LEME) de la UFRGS se direccionaron para caracterizar un ECC adaptado a los materiales brasileros, utilizando fibras de polipropileno y estudiando alternativas para la sustitución parcial del cemento. En la presente investigación se adoptó el trazo de referencia definido previamente (ECC_{Ref}), también fue utilizado un trazo alternativo con 30% (en volumen) de ceniza de cáscara de arroz molida por 4 horas como sustituto parcial del cemento (ECC_{CCA}). La investigación fue dividida en dos abordajes. La primera consistió en la caracterización de las propiedades mecánicas en laboratorio con la realización de ensayos de resistencia a tracción por flexión e compresión simple, evaluación de la adherencia por corte directo y de la trabajabilidad, además de ensayos de fatiga en viga cuatro puntos. En ensayos monotónicos el ECC_{CCA} presentó una resistencia a la tracción por flexión media ($f_{i,f}$) de 8,2 MPa y resistencia a la compresión simple media (f_c) de 50 MPa; ya el ECC_{Ref} tuvo valores medios de 6,8 MPa y 36 MPa, respectivamente. En los ensayos de adherencia se obtuvieron resistencias al corte de 2050 kPa (ECC_{CCA}) y 1900 kPa (ECC_{Ref}). La evaluación de la trabajabilidad permitió establecer criterios para mejorar el proceso de mezcla y manipulación del material en estado fresco, de esa forma se obtuvo una adecuada trabajabilidad en el ensayo de *flow table*, que aumentó de 44 para 90, posibilitando la utilización de mezcladoras de tambor y la obtención de los volúmenes de material necesarios. Con los resultados de los ensayos dinámicos fueron establecidos modelos de fatiga en términos de la deformación específica de extensión inicial (ϵ_{ti}), de la deformación específica de extensión inicial normalizada ($\epsilon_{ti}/\epsilon_{tP}$), de la tracción inicial (σ_{ti}) y de la energía disipada (DE), igualmente fue posible estudiar el proceso de degradación de los compósitos. El segundo abordaje de la investigación consistió en la realización de ensayos en verdadera grandeza con la utilización del simulador de tráfico del *Laboratório de Pavimentação* (LAPAV). Fueron construidos dos recapeamientos (de 50 y 30 mm de altura) sobre pavimentos flexibles que presentaban idéntico patrón de fisuración. En cada recapeamiento fueron aplicados 100 mil ciclos de carga de semi-eje de 5,5 toneladas. Fueron acompañados, visualmente, la aparición y evolución de fisuras y otras patologías, así como el desgaste superficial por medio de los ensayos de Péndulo Británico y Altura de Mancha de Arena. Una vez terminados los ciclos de carga, fueron extraídas placas de las secciones ensayadas para verificar la propagación de las fisuras y la adherencia entre el compósito y el pavimento. Se concluyó que el control de calidad durante el proceso de mezcla es fundamental para garantizar la calidad superficial. Además, fue percibido que la aparición de fisuras está asociada con posibles problemas de adherencia ECC-pavimento asfáltico y en menor escala reflexión de fisuras. Globalmente, se constató que es posible producir ECC's con materiales disponibles a nivel local y que este material puede ser aplicado en la restauración de pavimentos.

Palabras clave: Compósito cementicio, ECC, Fatiga, Simulador de tránsito lineal, recapeamiento.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	31
1.1.	OBJETIVOS	32
1.1.1.	Objetivo Geral	32
1.1.2.	Objetivos Específicos	33
1.2.	ESTRUTURA DA TESE.....	33
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
2.1.	COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS	35
2.2.	ESTUDOS SOBRE ECC’S REALIZADOS NO LEME (UFRGS).....	45
2.3.	COMPORTAMENTO À FADIGA	53
2.3.1.	Fadiga de materiais	53
2.3.2.	Tensão cíclica	55
2.3.3.	Curva de Whöeler ou Curva S-N.....	56
2.3.4.	Tipos de carregamento.....	58
2.3.5.	Modelos de fadiga	59
2.3.6.	Ensaio em vigas quatro pontos – procedimento de ensaio	62
2.3.7.	Fadiga em ECC.....	63
2.4.	ENSAIOS ACELERADOS DE PAVIMENTOS	72
2.5.	REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS	76
3.	MÉTODO E MATERIAIS	81
3.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	81
3.2.	DELINEAMENTOS DA PESQUISA.....	81
3.3.	DEFINIÇÃO DE VARIÁVEIS	83
3.3.1.	Variáveis independentes	83
3.3.2.	Variáveis dependentes	84
3.4.	MATERIAIS.....	84

3.4.1.	Cimento	84
3.4.2.	Agregados	85
3.4.3.	Fibra de Polipropileno	87
3.4.4.	Aditivo	88
3.4.5.	Pozolana	88
3.4.6.	Água	91
3.5.	TRAÇO, MISTURA E FÔRMAS	91
3.5.1.	Traços de ECC utilizados	91
3.5.2.	Processo de mistura	92
3.5.3.	Moldagem dos corpos de prova para ensaios laboratoriais	94
3.5.4.	Cura	95
3.6.	EQUIPAMENTOS	95
3.6.1.	Prensa LAPOL.....	96
3.6.2.	Prensa Shimadzu - LEME	96
3.6.3.	Pórtico de carregamento	96
3.6.4.	Equipamento de fadiga	99
3.6.5.	O Simulador de Tráfego em operação no LAPAV.....	103
3.7.	MÉTODOS DE ENSAIOS	107
3.7.1.	Propriedades mecânicas básicas – ensaios monotônicos.....	107
3.7.2.	Avaliação da Trabalhabilidade	113
3.7.3.	Propriedades Dinâmicas – Fadiga Quatro Pontos	115
3.7.4.	Ensaio em Verdadeira Grandeza com Simulador de Tráfego.....	122
4.	RESULTADOS PRELIMINARES	130
4.1.	EXECUÇÃO DA PLACA DE ECC DE SUPERFÍCIE DE 1 M ²	130
4.1.1.	Considerações iniciais	131
4.1.2.	Mistura.....	132

4.1.3.	Avaliação da Microtextura com o Pêndulo Britânico	135
4.1.4.	Avaliação da Macrotextura com a Altura de Mancha de Areia	136
4.1.5.	Conclusões desta fase do estudo.....	136
4.2.	ESTUDO DE MISTURAS ALTERNATIVAS	137
4.2.1.	Mistura.....	138
4.2.2.	Resultados de Ensaios de Tração na Flexão	140
4.2.3.	Ensaios de Pêndulo Britânico	144
4.2.4.	Ensaios da Altura da Mancha de Areia	145
4.2.5.	Trabalhabilidade	146
4.2.6.	Conclusões desta fase do estudo.....	147
4.3.	MISTURAS COM SUBSTITUIÇÃO DO ADITIVO	147
4.4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS QUANTO AOS ESTUDOS PRELIMINARES	148
5.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	149
5.1.	ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	149
5.1.1.	Ensaios de Resistência à Tração na Flexão ($f_{t,f}$).....	149
5.1.2.	Resistência à Compressão Simples (f_c)	161
5.1.3.	Aderência – Cisalhamento Direto (τ_{rup}).....	163
5.1.4.	Avaliação da Trabalhabilidade (<i>flow table</i>).....	164
5.1.5.	Fadiga Quatro Pontos	166
5.2.	ENSAIOS EM VERDADEIRA GRANDEZA.....	185
5.2.1.	Avaliação do processo construtivo	186
5.2.2.	Análise Visual	192
5.2.3.	Análise da superfície de rolamento	198
6.	CONCLUSÕES	204
6.1.	CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	204
6.2.	CONCLUSÕES DA PESQUISA	204

6.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	210
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	212
APÊNDICE A – PROJETO SISTEMA DE POSICIONAMENTO DOS LVDT.....	223
APÊNDICE B – ENSAIOS À FLEXÃO EM VIGAS QUATRO PONTOS.....	226
B.1. RESULTADOS DAS MISTURAS ALTERNATIVAS	227
B.2. RESULTADOS ENSAIOS TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	231
B.3. RESULTADOS ENSAIOS TRAÇÃO NA FLEXÃO - ADICIONAIS	239
APÊNDICE C – ENSAIOS DE FADIGA	243
C.1. ENSAIOS DE FADIGA – GENERALIDADES	244
C.2. CURVAS DE DEGRADAÇÃO – DEFLEXÃO.....	244
C.3. CURVAS DE DEGRADAÇÃO – DEFLEXÃO (NÚMERO DE CICLOS NORMALIZADO – N/N_i)	249
C.4. CURVAS DE DEGRADAÇÃO – DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DE EXTENSÃO	250
C.5. CURVAS DE DEGRADAÇÃO – REDUÇÃO DO MÓDULO À FLEXÃO.....	251
C.5. CURVAS DE DEGRADAÇÃO – REDUÇÃO DO MÓDULO À FLEXÃO (NORMALIZADO).....	252
C.6. CURVAS DE DEGRADAÇÃO – ENERGIA DISSIPADA (DE).....	253
C.7. CURVAS DE DEGRADAÇÃO – ENERGIA DISSIPADA (DE) (NÚMERO DE CICLOS NORMALIZADO – N/N_i)	261

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Classificação dos materiais cimentícios. Fonte: <i>JCI-DFRCC Committee</i> (2003).	36
Figura 2.2: Três tipos de comportamento na ruptura observados em materiais cimentícios. Fonte: Li (1998).	37
Figura 2.3: Comportamento de carga versus deformação para vigas compostas com três tipos de recapeamentos. Fonte: Lim e Li (1997).	38
Figura 2.4: Resultados ensaios de resistência à tração. Fonte: Kanakubo (2006).	39
Figura 2.5: Curvas tensão-deformação à tração características de um ECC e um concreto convencional. Fonte: Weimann e Li (2003).	40
Figura 2.6: Aspecto de fissuração de um compósito cimentício de elevada deformação. Fonte: Li e Kanda (1998).	40
Figura 2.7: Curvas de histerese de vigas produzidas: (a) concreto; (b) PVAECC. Fonte: Fukuyama et al. (2000).	41
Figura 2.8: Comportamento ao dano: (acima) viga de concreto, (abaixo) viga em PVAECC, ambas com aço de reforço simples. Fonte: Fukuyama et al. (2000).	42
Figura 2.9: Ilustração do processo de <i>self-healing</i> para dois elementos de PVAECC: (acima) fissuras antes de expor a umidade; (meio) fissuras depois de 30 dias de exposição a umidade; (abaixo) fissuras depois de 90 dias de exposição a umidade. Fonte: Özbay et al. (2013).	43
Figura 2.10: Curvas tensão de flexão-deflexão dos corpos de prova de PECC5, ensaio de flexão quatro pontos. Fonte: Garcez (2009).	46
Figura 2.11: Curvas de fadiga características de misturas de concreto convencional, PPECC e PVAECC. Fonte: Garcez (2009).	47
Figura 2.12: Viga composta com recapeamento de PPECC sob carregamento de flexão. Fonte: Garcez (2009).	48
Figura 2.13: Curvas tensão-deslocamento do ensaio a flexão quatro pontos (a) traço de referência, (b) 30% 8 horas e (c) 30% 4 horas. Fonte: Righi (2015).	50
Figura 2.14: Curvas de carga deflexão de PVAECC com relações de adição de cinzas volantes do 50%, 60%, 70% e 80% em relação ao material cimentante total. Fonte: Zhu et al. (2014).	51
Figura 2.15: Fissuração na região da junta da viga composta compósito/concreto: altura de 5 cm (a) traço de referência, (b) 30% 8 h e (c) 30% 4 h. Fonte: Righi (2015).	51
Figura 2.16: Curva de liberação de calor de hidratação: (a) termopar no centro do volume de 1,8 litros, (b) termopar na extremidade no volume de 1,8 litros. Fonte: Righi (2015).	52
Figura 2.17: Carga cíclica típica de período T.	55

Figura 2.18: Influência da tensão média na vida de fadiga. Fonte: modificado de Mayugo (2003).	57
Figura 2.19: Curvas S-N em função do Índice de Reversão (IR). Fonte: modificado de Mayugo (2003).	58
Figura 2.20: Evolução da tensão e da deformação no ensaio de fadiga no modo tensão controlada.	59
Figura 2.21: Evolução da tensão e da deformação no ensaio de fadiga no modo deformação controlada.	59
Figura 2.22: Diagrama de tensão de flexão versus deflexão no ponto médio para vigas compostas para carga estática. Fonte: Zhan e Li (2001).	64
Figura 2.23: Esforço máximo a flexão e relações de vida de fadiga para diferentes materiais de viga composta e diferentes características da interface. Fonte: Zhan e Li (2001).....	64
Figura 2.24: Configuração de ensaio a flexão quatro pontos para vigas compostas concreto simples/PVAECC. Fonte: Leung et al. (2007).	65
Figura 2.25: Esforço máximo a flexão e relações de vida de fadiga para diferentes espessuras de PVAECC. Fonte: Leung et al. (2007).....	65
Figura 2.26: Resultados dos ensaios de resistência a flexão: diagrama tensão – deflexão no ponto médio: (a) PCMA, (b) PCMB, (c) PVAECC. Fonte: Suthiwarapirak et al. (2002).	66
Figura 2.27: Resultados dos ensaios estáticos da resistência a flexão, tensão-deflexão no ponto médio: (a) PEECC, (b) FRC. Fonte: Suthiwarapirak et al. (2004).	67
Figura 2.28: Relações da vida de fadiga com: (a) tensões, (b) nível de tensões. Fonte: Suthiwarapirak et al. (2002).	69
Figura 2.29: Relações da vida de fadiga com: (a) tensões, (b) nível de tensões. Fonte: Suthiwarapirak et al. (2004).	70
Figura 2.30: Número de fissuras-nível de carga, ECC's. Fonte: Suthiwarapirak et al. (2004).	71
Figura 2.31: Padrão de fissuração na superfície inferior de vigas em PVAECC (esquerda) e PEECC (direita): (a) ensaio estático, (b) ensaio de fadiga para nível de carga de $S = 0,9$ e (c) ensaio de fadiga para nível de carga de $S = 0,6$. Fonte: Suthiwarapirak et al. (2004).	71
Figura 2.32: Simulador de tráfego circular do <i>Canterbury Accelerated Pavement Testing Indoor Facility (CAPTIF)</i> – Nova Zelândia. Fonte: Arnold et al. (2005).	75
Figura 2.33: Simulador de tráfego móvel, modelo HVS (<i>Heavy Vehicle Simulator</i>) do <i>Central Road Research Institute</i> -Deli (Índia). Imagem disponível em http://www.crridom.gov.in/content/accelerated-pavement-testing-facility	76

Figura 2.34: Exemplo da conformação de recapeamentos aderidos. Fonte: modificado do CP Tech Center, 2014.....	78
Figura 2.35: Comportamento mecânico da estrutura composta: (a) sem aderência, (b) com aderência. Fonte: modificado do CP Tech Center, 2014.....	79
Figura 3.1: Estratégia de pesquisa.....	82
Figura 3.2: Cimento utilizado na pesquisa. Fonte: foto do autor.....	85
Figura 3.3: Areia fina seca utilizada na pesquisa. Fonte: foto do autor.....	85
Figura 3.4: Curva granulométrica da areia de Osório.....	86
Figura 3.5: Areia média para misturas alternativas. Fonte: foto do autor.....	86
Figura 3.6: Curva granulométrica da areia média.....	87
Figura 3.7: Fibra de polipropileno: (a) aspecto de fábrica; (b) utilizadas na pesquisa. Fonte: fotos do autor.....	88
Figura 3.8: Moinho de bolas usado para moer a CCA. Fonte: foto do autor.....	89
Figura 3.9: Cinza de casca de arroz (CCA) moída por 4 horas, utilizada na pesquisa. Fonte: foto do autor.....	89
Figura 3.10: Distribuição granulométrica CCA 4h.....	90
Figura 3.11: Resultado da Difração de Raio-X (DRX) da CCA 4h.....	91
Figura 3.12: Processo de mistura, materiais secos. Fonte: fotos do autor.....	93
Figura 3.13: Processo de mistura, água e aditivo químico. Fonte: fotos do autor.....	93
Figura 3.14: Processo de mistura, adição da fibra. Fonte: fotos do autor.....	93
Figura 3.15: Mesa vibratória utilizada na concretagem dos corpos de prova. Fonte: foto do autor.....	94
Figura 3.16: Formas para a concretagem de vigas dos ensaios estáticos e dinâmicos. (a) 50x100x400 mm; (b) 100x100x400 mm. Fonte: fotos do autor.....	94
Figura 3.17: Forma e exemplo de concretagem para ensaios de aderência. Fonte: fotos do autor.....	95
Figura 3.18: Modelo 3D: Suporte quatro pontos. Fonte: Castañeda (2016).....	97
Figura 3.19: Suporte para ensaios à flexão quatro pontos. (a) suporte inferior; (b) aplicador de carga; (c) elementos juntos. Fonte: fotos do autor.....	97
Figura 3.20: Pórtico para posicionamento dos LVDT's. Fonte: foto do autor.....	98
Figura 3.21: (a) detalhe parafuso que fixa o pórtico no corpo de prova; (b) detalhe suporte dos LVDT's. Fonte: fotos do autor.....	98
Figura 3.22: Chapa de aço para referência dos LVDT's na medição das deflexões. Fonte: foto do autor.....	99

Figura 3.23: Vista geral do equipamento para ensaios de fadiga. Fonte: foto do autor.	100
Figura 3.24: Componentes do sistema de carregamento. Fonte: foto do autor.	101
Figura 3.25: LVDT utilizado para medir deflexões nos ensaios dinâmicos. Fonte: foto do autor.	102
Figura 3.26: Extensores para o pistão de carga. Fonte: fotos do autor.	102
Figura 3.27: Extensor (132 mm) acoplado na célula de carga. Fonte: foto do autor.	103
Figura 3.28: Simulador de tráfego do LAPAV. Fonte: foto do autor.	104
Figura 3.29: Detalhe do trem de carga do simulador linear de tráfego. Fonte: fotos do autor.	105
Figura 3.30: Execução da calibração do sistema de carga do simulador. Fonte: foto do autor.	105
Figura 3.31: Gráfico resumo da calibração do sistema de carga do simulador.	106
Figura 3.32: Impressão dos pneus com carga de eixo de 11 toneladas. (a) pneu esquerdo, (b) pneu direito.	106
Figura 3.33: Exemplo dos parâmetros de cálculo apresentados na ASTM C1609 C1609M-12. Gráfico adaptado da mesma norma.	108
Figura 3.34: Configuração do ensaio de resistência à tração na flexão. (a) viga de 100 mm; (b) viga de 50 mm. Fonte: foto do autor.	109
Figura 3.35: Esquema das geometrias para os ensaios à flexão quatro pontos.	110
Figura 3.36: Croqui dos cortes requeridos para cada placa. Concreto asfáltico recapeado com ECC. Modificado de Fortes (1999).	112
Figura 3.37: Esquema de corpo de prova para ensaios de aderência. Modificado de Fortes (1999).	112
Figura 3.38: Corpo de prova disposto na prensa para o ensaio de cisalhamento direto. Fonte: foto do autor.	113
Figura 3.39: Sequência da execução de ensaios de <i>flow table</i> : (a) elementos para o ensaio; (b) cone cheio e nivelado; (c) retirada do cone; (d) final do ensaio. Fonte: fotos do autor.	115
Figura 3.40: Pulso de carga ideal e obtido. Viga 2, ECC_{Ref} 50% $f_{t,FP}$, ciclo 50.	117
Figura 3.41: Curvas de histereses, viga ECC_{Ref} 502 ciclos 50 até 299.	121
Figura 3.42: Curvas de histerese dos ciclos 50, 299 e 3999. Viga ECC_{Ref} 502.	121
Figura 3.43: Vista dos recapamentos conformados para os ensaios em verdadeira grandeza: direita 50 mm, esquerda 30 mm. Fonte: foto do autor.	124
Figura 3.44: Detalhe da fixação da madeira no pavimento existente. Fonte: foto do autor. ...	125
Figura 3.45: Croqui do esquema da conformação dos recapamentos – vista superior.	125

Figura 3.46: Croqui do detalhe dos cortes realizados nas seções N°. 3, N°. 5 e N°. 7 de ambos recapamentos na pista para simulação de fadiga nos antigos revestimentos asfálticos e avaliação de reflexão de trincas nos recapamentos em ECC.....	126
Figura 3.47: (a) Corte do pavimento existente para simulação de fadiga e (b) trincas preenchidas com argila. Fonte: fotos do autor.....	126
Figura 3.48: Ensaio de Pêndulo Britânico no recapamento de 50 mm. Fonte: foto do autor.	128
Figura 4.1: Betoneira de eixo vertical, baixo volume de capacidade. Fonte: foto do autor. ..	131
Figura 4.2: (a) marcação do nível para concretagem. (b) forma impregnada com óleo mineral. Fonte: fotos do autor.....	132
Figura 4.3: Vista dos equipamentos e materiais prontos para a concretagem. Fonte: foto do autor.	132
Figura 4.4: Sequência do processo de mistura de ECC: (a) mistura de materiais secos; (b) adição de água e aditivo; (c) com material homogêneo inicia-se adição de fibras; (d) adição de fibras; (e) processo final de mistura; (f) material final. Fonte: fotos do autor.....	133
Figura 4.5: Sequência que mostra a acomodação do ECC na forma: (a-b) disposição de material na forma; (c-d) espalhamento e vibração; (e) acabamento final; (f) textura final. Fonte: fotos do autor.	134
Figura 4.6: Aspecto final da placa. Fonte: fotos do autor.....	135
Figura 4.7: Execução do ensaio de Pêndulo Britânico na placa. Fonte: fotos do autor.	135
Figura 4.8: Distribuição dos ensaios de altura da mancha de areia na placa de ECC. Fonte: foto do autor.	136
Figura 4.9: Sequência que mostra o lançamento das misturas alternativas de ECC nas formas: (a) argamassadeira; (b) formas; (c-d) materiais para a concretagem; (e) ECC após terminar a mistura; (f) material nas formas. Fonte: fotos do autor.	139
Figura 4.10: Configuração dos equipamentos para realizar os ensaios de resistência à tração na flexão em vigas quatro pontos. Fonte: foto do autor.	140
Figura 4.11: Croqui do ensaio de resistência à tração na flexão em viga quatro pontos.....	140
Figura 4.12: Detalhe da instalação de LVDT para registrar deslocamentos horizontais. Fonte: fotos do autor.	141
Figura 4.13: Exemplos de corpos de prova no momento final do ensaio de resistência à tração na flexão. Fonte: fotos do autor.	141
Figura 4.14: Corpos de prova ensaiados, notam-se as microfissuras. Fonte: fotos do autor..	142
Figura 4.15: Tensão de tração <i>versus</i> Deflexão no ponto médio –Misturas Alternativas.	143

Figura 4.16: Módulo Elástico à Flexão secante <i>versus</i> Tensão de tração normalizada – Misturas Alternativas.....	144
Figura 4.17: Equipamento para a execução do ensaio de Pêndulo Britânico nas vigas das misturas alternativas. Fonte: foto do autor.	145
Figura 4.18: Execução do ensaio de Altura de Mancha de Areia nas vigas das misturas alternativas. Fonte: foto do autor.	146
Figura 5.1: Tensão de tração <i>versus</i> Deflexão no ponto médio – Traço de referência, viga 100 mm de altura.	152
Figura 5.2: Tensão de tração <i>versus</i> Deflexão no ponto médio – Traço de alternativo, viga 100 mm de altura.	153
Figura 5.3: Tensão de tração <i>versus</i> Deflexão no ponto médio – Traço de referência, viga 50 mm de altura.	153
Figura 5.4: Tensão de tração <i>versus</i> Deflexão no ponto médio – Traço de alternativo, viga 50 mm de altura.	154
Figura 5.5: Módulo Elástico à Flexão secante <i>versus</i> Tensão de tração normalizada – Traço de referência, vigas 100 mm de altura.....	156
Figura 5.6: Módulo Elástico à Flexão secante <i>versus</i> Tensão de tração normalizada – Traço alternativo, vigas 100 mm de altura.	156
Figura 5.7: Módulo Elástico à Flexão secante <i>versus</i> Tensão de tração normalizada – Traço de referência, vigas 50 mm de altura.....	157
Figura 5.8: Módulo Elástico à Flexão secante <i>versus</i> Tensão de tração normalizada – Traço alternativo, vigas 50 mm de altura.....	157
Figura 5.9: Tensão de tração <i>versus</i> Deflexão no ponto médio, ensaios adicionais.	159
Figura 5.10: Módulo Elástico à Flexão secante <i>versus</i> Tensão de tração normalizado, ensaios adicionais.....	159
Figura 5.11: Tensão de tração <i>versus</i> Deflexão no ponto médio – Traço de referência, viga Ref. 302.....	160
Figura 5.12: Módulo Elástico à Flexão secante <i>versus</i> Esforço à tração normalizado, viga ECC _{Ref} 302.....	161
Figura 5.13: Cilindros rompidos no ensaio f_c : (a) ECC _{Ref} , (b) ECC _{CCA} . Fonte: fotos do autor.	162
Figura 5.14: Resultados da Resistência ao Cisalhamento Direto como indicador da Aderência com concreto asfáltico.	164

Figura 5.15: Aparência final do ensaio <i>flow table</i> : (a) ECC_{Ref} produzido com plastificante Glenium 54, (b) ECC_{Ref} produzido com plastificante Tec-flow 8000. Fonte: fotos do autor.	165
Figura 5.16: Face inferior da viga ECC_{Ref} 302 após terminado o ensaio de fadiga. Fonte: foto do autor.	167
Figura 5.17: Vista lateral da Viga ECC_{Ref} 401 após terminado o ensaio de fadiga. Fonte: foto do autor.	167
Figura 5.18: Comparação entre resultados de ensaios de fadiga realizados nesta pesquisa e os realizados na Universidade de Tóquio, modelos S-N.	168
Figura 5.19: Modelos de fadiga em função da deformação específica de extensão inicial, ECC_{Ref} e ECC_{CCA} .	171
Figura 5.20: Modelos de fadiga em função da deformação específica de extensão inicial normalizada, ECC_{Ref} e ECC_{CCA} .	171
Figura 5.21: Modelos de fadiga em função da tensão de tração inicial, ECC_{Ref} e ECC_{CCA} .	172
Figura 5.22: Modelos de fadiga em função da energia dissipada, ECC_{Ref} e ECC_{CCA} .	173
Figura 5.23: Comparação dos resultados da presente pesquisa e os resultados de Castañeda (2015) para os modelos de fadiga em termos da energia dissipada.	174
Figura 5.24: Deformações específicas de extensão na fibra inferior dos recapeamentos.	177
Figura 5.25: Tensão de tração na fibra inferior dos recapeamentos.	177
Figura 5.26: Vida de fadiga estimada para os recapeamentos em ECC, condição sem aderência com a camada asfáltica.	178
Figura 5.27: Evolução do Módulo de Resiliência na Flexão em função do Número de ciclos, ECC_{Ref} .	179
Figura 5.28: Evolução do Módulo de Resiliência na Flexão em função do Número de ciclos, ECC_{CCA} .	179
Figura 5.29: Relação entre o módulo de resiliência à flexão inicial e a tensão de tração.	180
Figura 5.30: Evolução da Deflexão no ponto médio da viga em função do Número de ciclos, ECC_{Ref} .	180
Figura 5.31: Evolução da Deflexão no ponto médio da viga em função do Número de ciclos, ECC_{CCA} .	181
Figura 5.32: Relação entre a deflexão inicial e a tensão de tração.	181
Figura 5.33: Evolução da Energia dissipada em função do Número de ciclos normalizados, ECC_{Ref} .	182
Figura 5.34: Evolução da Energia dissipada em função do Número de ciclos normalizados, ECC_{CCA} .	182

Figura 5.35: Esboço da evolução da dissipação de energia (DE). Fonte: Adaptado de Graeff (2011).	183
Figura 5.36: Evolução da dissipação de energia (DE) nos dois compósitos, para um nível de carga (S) igual a 30%.....	184
Figura 5.37: Relação de energia (ER) no ECC _{Ref} , para um nível de carga (S) igual a 30%. .	185
Figura 5.38: Relação de energia (ER) no ECC _{CCA} , para um nível de carga (S) igual a 30%. .	185
Figura 5.39: Processo de lançamento do material na conformação dos recapeamentos. Fonte: fotos do autor.....	187
Figura 5.40: Disposição do material sobre o pavimento existente. Fonte: fotos do autor.....	188
Figura 5.41: Exsudação observada na construção do recapeamento de 50 mm. Fonte: foto do autor.....	189
Figura 5.42: Vibrado do compósito na construção do recapeamento de 30 mm. Fonte: foto do autor.....	189
Figura 5.43: Processo de acabamento do recapeamento de 30 mm. Fonte: fotos do autor....	190
Figura 5.44: Aparência dos recapeamentos recém terminados de concretar: (a) recapeamento de 50 mm, (b) recapeamento de 30 mm. Fonte: fotos do autor.....	190
Figura 5.45: Acabamento superficial: (a) pista 50 mm, (b) pista 30 mm. Fonte: fotos do autor.	191
Figura 5.46: Surgimento de nata de cimento sobre a superfície dos recapeamentos: (a) 50 mm, (b) 30 mm. Fonte: fotos do autor.....	192
Figura 5.47: Material surgido na superfície do recapeamento com espessura de 50 mm, secado ao forno. Fonte: foto do autor.....	193
Figura 5.48: Croqui do levantamento das fissuras nos recapeamentos.	194
Figura 5.49: Exemplo de fissuras no recapeamento de 50 mm. Fonte: fotos do autor.....	195
Figura 5.50: Exemplo de fissuras no recapeamento de 30 mm. Fonte: fotos do autor.....	195
Figura 5.51: Extração de secções no recapeamento de 30 mm. Fonte: foto do autor.	195
Figura 5.52: Vistas laterais dos cortes executados no recapeamento de 30 mm. Fonte: fotos do autor.....	197
Figura 5.53: Comparativo entre resultados dos ensaios de Pêndulo Britânico nos dois recapeamentos.	202
Figura 5.54: Comparativo de resultados dos ensaios de Altura de Mancha de Areia nos dois recapeamentos.	203

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Resultados ensaios flexão 4 pontos para 4 tipos de compósitos. Adaptado de Kanakubo (2006).	38
Tabela 2.2: Propriedades das fibras de Poli-Vinil-Álcool (PVA) e Polipropileno (PP). Modificado de Garcez (2009).	45
Tabela 2.3: Traços estudados por Garcez (2009). Modificado de Garcez (2009). Proporções em volume.	46
Tabela 2.4: Traço definido por Qian (2007) do PVAECC (M45).	46
Tabela 2.5: Dosagem do traço de referência com as proporções em volume. Fonte: Righi (2015).	49
Tabela 2.6: Dimensões dos corpos de prova para ensaios a flexão quatro pontos segundo o AP-T101/08, unidade em [mm].	62
Tabela 3.1: Exigências físicas e mecânicas. Fonte: Norma NBR 5733.	84
Tabela 3.2: Propriedades das fibras de polipropileno de alta tenacidade fornecida pelo fabricante. Fonte Garcez (2009).	87
Tabela 3.3: Consumo de materiais na produção de cada m ³ de ECC, traço Referência.	91
Tabela 3.4: Consumo de materiais na produção de cada m ³ de ECC, traço 30% de CCA.	92
Tabela 3.5: Parâmetros de calibração do pulso de carga.	117
Tabela 3.6: Parâmetros de entrada, configuração do ensaio FQP.	118
Tabela 3.7: Classes de microtextura pelo método do Pêndulo Britânico (DNIT, 2006).	128
Tabela 3.8: Avaliação da macrotextura pelo método da Altura de Areia (DNIT, 2006).	129
Tabela 4.1: Quantidades de materiais para elaborar 30 litros de ECC.	131
Tabela 4.2: Resultados dos ensaios do Pêndulo Britânico e classificação da Microtextura.	135
Tabela 4.3: Resultados dos ensaios de Altura de Mancha de Areia e classificação da Macrotextura.	136
Tabela 4.4: Relação de misturas ensaiadas.	138
Tabela 4.5: Resistência à Tração na Flexão das Misturas Alternativas.	142
Tabela 4.6: Deflexões e deformações específicas nas resistências máximas medidas no LVDT vertical, Misturas Alternativas.	142
Tabela 4.7: Deformações específicas de tração na fibra inferior nas resistências máximas medidas no LVDT horizontal, Misturas Alternativas.	142
Tabela 4.8: Módulo Elástico à Flexão secante das Misturas Alternativas.	144

Tabela 4.9: Resultados dos ensaios do Pêndulo Britânico e classificação da Microtextura das vigas das Misturas Alternativas.....	145
Tabela 4.10: Resultados dos ensaios de altura de Mancha de Areia e classificação da Macrotextura das vigas de Misturas Alternativas.....	146
Tabela 4.11: Resultados do <i>flow table</i> das Misturas Alternativas.....	147
Tabela 4.12: Resultado <i>flow table</i> mistura de prova novo aditivo.	148
Tabela 5.1: Resistência à Tração na Flexão ($f_{t,f}$).	150
Tabela 5.2: Faixa de valores da $f_{t,f}$, obtidos por alguns autores.	151
Tabela 5.3: Resistência à Tração na Flexão na abertura da primeira fissura ($f_{t,fl}$).	151
Tabela 5.4: Deformação específica de extensão na resistência máxima (ϵ_{1P}) nos ensaios de tração na flexão.....	154
Tabela 5.5: Deformação específica de extensão na abertura da primeira fissura (ϵ_{1l}) nos ensaios de tração na flexão.	155
Tabela 5.6: Módulo Elástico à Flexão secante, critério de Che (2010).....	155
Tabela 5.7: Resistência à Tração na Flexão, ensaios adicionais.	158
Tabela 5.8: Resistência à Tração na Flexão na abertura da primeira fissura, ensaios adicionais.	158
Tabela 5.9: Resistência à Tração na Flexão, ECC _{Ref} 302.....	159
Tabela 5.10: Resultados de Resistência à Compressão Simples (f_c).	161
Tabela 5.11: Relação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão simples.	162
Tabela 5.12: Resistência ao cisalhamento-aderência.	163
Tabela 5.13: <i>Flow table</i> das misturas.	165
Tabela 5.14: Parâmetros modelo de fadiga em função da deformação específica de extensão inicial.	170
Tabela 5.15: Parâmetros modelo de fadiga em função da deformação específica de extensão inicial normalizada.	170
Tabela 5.16: Parâmetros modelo de fadiga em função da tensão de tração.	172
Tabela 5.17: Parâmetros modelo de fadiga em função da energia dissipada de energia.....	172
Tabela 5.18: Resumo dos resultados dos ensaios de fadiga.	174
Tabela 5.19: Características das camadas do pavimento.....	176
Tabela 5.20: Resultados de ensaios do Pêndulo Britânico e classificação da Microtextura. Leitura inicial, recapeamento de 50 mm.	198

Tabela 5.21: Resultados de ensaios do Pêndulo Britânico e classificação da Microtextura. Leitura final, recapeamento de 50 mm.	199
Tabela 5.22: Resultados de ensaios do Pêndulo Britânico e classificação da Microtextura. Leitura inicial, recapeamento de 30 mm.	199
Tabela 5.23: Resultados de ensaios do Pêndulo Britânico e classificação da Microtextura. Leitura final, recapeamento de 30 mm.	199
Tabela 5.24: Resultados de ensaios de Altura de Mancha de Areia e classificação da Macrotextura. Leitura inicial, recapeamento de 50 mm.	200
Tabela 5.25: Resultados de ensaios de Altura de Mancha de Areia e classificação da Macrotextura. Leitura final, recapeamento de 50 mm.	200
Tabela 5.26: Resultados de ensaios de Altura de Mancha de Areia e classificação da Macrotextura. Leitura inicial, recapeamento de 30 mm.	200
Tabela 5.27: Resultados de ensaios de Altura de Mancha de Areia e classificação da Macrotextura. Leitura final, recapeamento de 30 mm.	201
Tabela 5.28: Resumo valores do VRD no ECC.	201
Tabela 5.29: Resumo valores da HS no ECC.	202

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

a	Constantes calculadas nos ajustes dos modelos de fadiga
A	Área da seção de ruptura ao cisalhamento direto
A	Fator para cálculos ensaios <i>flow table</i>
AASHO	<i>American Association of State Highway Officials</i>
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACE-MRL	<i>Advanced Cementitious Materials – Materials Research Laboratory</i>
ACL	<i>Accelerated Loading Facility</i>
APA	<i>Asphalt Pavement Analyzer</i>
ARRB	<i>Australian Road Research Board</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATR	Afundamento de Trilha de Roda
b	Largura média da amostra
BCOA	<i>Bonded Concrete Overlay on Asphalt</i>
BNP	<i>British Number Pendulum</i> equivalente ao VRD
CA	Concreto Asfáltico
CAAL	Cooperativa Agroindustrial Alegrete Ltda
CALTRANS	<i>California Department of Transportation</i>
CCA	Cinza de Casca de Arroz
COPPE	Coordenação dos Programas de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
CP	Corpo de Prova
C-S-H	Silicatos hidratados de cálcio
CV	Coefficiente de Variação
D	Diâmetro do corpo de prova cilíndrico
DCT	Ductal©

DE	<i>Dissipated Energy</i> – Energia Dissipada
DEE	<i>Dissipated Energy Exponent</i> – Exponente Energia Dissipada
DFRCC	<i>Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites</i>
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	Difração de Raios-X
DSP	<i>Densified Small Particle</i>
E*	Módulo Complexo
ECC	<i>Engineered Cementitious Composites</i>
ECC _{CCA}	<i>Engineered Cementitious Composites</i> traço com Cinza de Casca de Arroz
ECC _{Ref}	<i>Engineered Cementitious Composites</i> traço de referência
ER	<i>Energy Ratio</i> – Relação de Energia
E _{sec}	Módulo Elástico à Flexão secante
EVOH-ECC	ECC reforçado com fibras de Etileno-Vinil-Álcool
f _c	Resistência à Compressão Simples
FCD	Fadiga por Compressão Diametral
FQP	Fadiga Quatro Pontos
FRC	<i>Fiber Reinforced Concrete</i>
FRM	<i>Fiber Reinforced Mortar</i>
f-sAPT	<i>Full-scale Accelerated Pavement Testing</i>
f _{t,D}	Resistência à Compressão Diametral
f _{t,Deq}	Resistência à Compressão Diametral equivalente
f _{t,f}	Resistência à tração na flexão
f _{t,f1}	Resistência à tração na flexão na abertura da primeira fissura
f _{t,fP}	Resistência à tração na flexão na resistência máxima
h	Altura média da amostra

HBECC	ECC com uma mistura de fibras de aço e Polietileno
HDFRC	<i>High Ductility Fiber Reinforced Concrete</i>
HDFRCC	<i>High Ductility Fiber Reinforced Cementitious Composites</i>
HPFRC	<i>High Performance Fiber Reinforced Concrete</i>
HRB	<i>Highway Research Board</i>
HS	Altura média de Mancha de Areia
HVS	<i>Heavy Vehicle Simulator</i>
IFSTTAR	<i>Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de L'Aménagement et des Réseaux</i>
IR	Índice de reversão ou relação de amplitude de tensões, ensaios dinâmicos
K	Parâmetros de fadiga determinados experimentalmente
JCI	<i>Japan Concrete Institute</i>
<i>l</i>	Separação entre aplicadores de carga - ensaio quatro pontos
L	Separação entre suportes inferiores – ensaio quatro pontos
LACER	Laboratório de Materiais Cerâmicos
LAPAV	Laboratório de Pavimentação
LAPOL	Laboratório de Materiais Poliméricos
L_c	Altura do corpo de prova cilíndrico
LDE	<i>Load Damage Exponent</i> – Exponente de Dano
LEME	Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais
LN	Linha Neutra
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transducers</i>
MA	Misturas Alternativas
MDF	<i>Macro Defect Free</i>
MnROAD	<i>Minnesota Department of Transportation</i>
MRF	Módulo de Resiliência à Flexão

MRD	Módulo de Resiliência por compressão Diametral
n	Parâmetros de fadiga determinados experimentalmente
N	Número de ciclos, ensaios dinâmicos
NCAT	<i>National Center for Asphalt Technology</i>
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
N _e	Número de ciclos no limite de fadiga, ensaios dinâmicos
N _t	Número de ciclos na ruptura, ensaios dinâmicos
P	Carga vertical aplicada nos ensaios monotônicos
P ₁	Carga na abertura da primeira fissura
P _{CD}	Carga alvo – Compressão Diametral
PCM	<i>Polymer Cement Mortar</i>
PE	Polietileno
PEECC	ECC reforçado com fibras de Polietileno
POMECC	ECC reforçado com fibras de Poliacetal
PP	Polipropileno
P _P	Carga máxima para ensaios monotônicos
PPECC	ECC reforçado com fibras de Polipropileno
P _{rup}	Carga de ruptura ao cisalhamento direto
PSI	<i>Present Serviceability Index</i>
P _{TF}	Carga alvo – Tração na Flexão
PVA	Poli-Vinil-Álcool
PVAECC	ECC reforçado com fibras de Poli-Vinil-Álcool
PWRI	<i>Public Works Research Institute</i>
Q	Índice de reversão alternativo, ensaios dinâmicos
R	Intervalo de tensões, ensaios dinâmicos
S	Nível de carregamento, ensaios dinâmicos

S_0	Rigidez inicial
S_c	Módulo de ruptura do concreto
SDE	<i>Strain Damage Exponent</i> – Exponente de dano
S_e	Nível de carregamento no limite de fadiga, ensaios dinâmicos
SIFCON	<i>Slurry Infiltrated Fibered Concrete</i>
SIMCON	<i>Slurry Infiltrated Mat Concrete</i>
S_u	Nível de carregamento na resistência quase-estática, ensaios dinâmicos
T	Período
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
UCPRC	<i>University of California Pavement Research Center</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
V_f	Volume de fibras
VRD	Valor da Resistência a Derrapagem
W	Energia dissipada
WASHO	<i>Western Association of Highway Officials</i>
WTT	<i>Weel Tracking Test</i>
δ_h	Deflexão no ponto médio da viga
δ_{h1}	Deflexão na abertura da primeira fissura
δ_{hp}	Deflexão na resistência máxima
ϵ	Deformação específica registradas
ϵ_t	Deformação específica de extensão
ϵ_{t1}	Deformação específica de extensão na abertura da primeira fissura
ϵ_{ti}	Deformação específica de extensão inicial, ensaios de fadiga
ϵ_{tP}	Deformação específica de extensão na resistência máxima
σ	Tensões aplicadas
σ_a	Amplitude das tensões ou tensão alternada, ensaios dinâmicos

σ_m	Tensão média, ensaios dinâmicos
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima, ensaios dinâmicos
$\sigma_{m\acute{i}n}$	Tensão mínima, ensaios dinâmicos
σ_t	Tensão de tração
σ_{ti}	Tensão de tração inicial, ensaios de fadiga
τ_{rup}	Resistência ao cisalhamento

1. INTRODUÇÃO

O professor Victor Li, junto com o grupo de pesquisa do ACE-MRL (*Advanced Cementitious Materials – Materials Research Laboratory*) da Universidade de Michigan, nos Estados Unidos, desenvolveu um compósito cimentício de elevada capacidade de deformação com adição de fibras chamado *Engineered Cementitious Composites* (Li, 2003). Esse compósito é conhecido de forma abreviada como ECC e constituído mediante a adição de 2% de fibra polimérica a sua composição com relação ao volume total de material. Esses compósitos foram desenvolvidos de maneira a resistir a elevados esforços de tração e cisalhamento, apresentam a capacidade de sofrer deformações elevadas sem romper.

Um número significativo das pesquisas em ECC's têm sido executadas com PVAECC (ECC reforçado com fibras de Poli-Vinil-Álcool) e PEECC (ECC reforçado com fibras de Polietileno) (Suthiwarapirak et al., 2004; Kanakubo, 2006; Leung et al., 2007; Zhoua et al., 2012; Ranade et al., 2014; Said et al., 2015; entre outros). Entretanto, estes dois tipos de fibras sintéticas não são as únicas que têm sido ensaiadas no intuito de conseguir compósitos cimentícios. A pesquisa de Nishiwaki et al. (2012) utilizou EVOH-ECC (ECC reforçado com fibras de Etileno-Vinil-Álcool), POMECC (ECC reforçado com fibras de Poliacetal), PPECC (ECC reforçado com fibras de Polipropileno).

As pesquisas realizadas no LEME-UFRGS consistiram na caracterização de um ECC adaptado aos materiais disponíveis a nível nacional, o que é particularmente importante tendo em vista o tipo de fibra a ser utilizado. A pesquisa de Garcez (2009), pioneira no Brasil, teve como uma de suas conclusões principais a possibilidade de se elaborar um ECC com adição de fibras de Polipropileno (PP); salientando, ainda, que um dos aspectos mais importantes da utilização de um ECC é a viabilidade econômica do projeto.

Na produção dos ECC's o fator econômico é refletido principalmente nas altas quantidades de cimento requeridas e no consumo de fibra, aproximadamente 1000 kg de cimento e 18 kg de fibra por metro cúbico de ECC produzido. O caminho para a proposta de um traço de ECC brasileiro considera a utilização de fibras de Polipropileno (PP) produzidas no país, além de promover a incorporação de materiais substitutivos para o cimento na sua composição.

A utilização de cinzas volantes como substituto parcial do cimento para a produção de compósitos cimentícios tem sido amplamente documentada na literatura (Suthiwarapirak et al.,

2002, 2004; Li et al., 2004; Wang e Li, 2007; Garcez, 2009; Quissini, 2012; Yücel e Şahmaran, 2013; Alam, 2016; entre outros), mas considerando a realidade atual do mercado brasileiro na qual esse material possivelmente já não se encontra mais disponível, as pesquisas de Righi (2015) e Costa (2015) contribuíram com o estudo de um material alternativo: a utilização da cinza de casca de arroz moída e incorporada na mistura como um substituto parcial do cimento.

Embora os resultados referentes às propriedades mecânicas do PPECC, em termos de resistência a tração na flexão e capacidade de deformação, sejam inferiores aos correspondentes ao PVAECC, relatados na literatura, deve ser levado em consideração que os traços propostos por Garcez (2009) foram preliminares, sendo que pesquisas posteriores realizaram um aprimoramento dos mesmos, obtendo-se um traço de trabalho (Righi, 2015 e Costa, 2015).

A utilização de um material como o ECC mostra-se promissor em aplicações tão variadas como recobrimento e proteção de taludes, reforços estruturais, fundações para equipamentos sometidos a vibrações, recobrimento em sistemas de armazenamento, entre outros. A presente pesquisa se justifica pela ausência de informações sobre o emprego e o desempenho de ECC em pavimentos, no Brasil, e às escassas informações em âmbito universal.

Para pavimentos expostos ao tráfego moderado ou pesado, uma das alternativas de reabilitação estrutural consiste na execução de uma camada de reforço, ou simplesmente recapeamento. Entretanto, um mecanismo de degradação típico para estas estruturas compostas é a reflexão de fissuras, que acontece quando as fissuras presentes no material pré-existente são transmitidas ao novo material pela aplicação das cargas do tráfego e variações da temperatura do pavimento. A reflexão de fissuras reduz a capacidade de carga do recapeamento e pode levar à falha por fadiga (Zhan e Li, 2001). Por isso, Balbo e Rodolfo (1998) sugeriram um estudo aprofundado do módulo de deformação e comportamento à fadiga de cada tipo de concreto utilizado em recapeamentos.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral da pesquisa é analisar a aplicabilidade de um ECC com materiais disponíveis comercialmente no estado (Rio Grande do Sul – RS) em processos de recapeamento de pavimentos.

1.1.2. Objetivos Específicos

- determinar as propriedades mecânicas do ECC-LEME mediante a execução de ensaios de resistências à tração na flexão em vigas 4 pontos e à compressão simples;
- investigar a aderência entre o ECC e pavimentos asfálticos;
- avaliar a trabalhabilidade do ECC e suas implicações nos processos construtivos;
- implementar as modificações convenientes para o desenvolvimento dos processos experimentais propostos no equipamento para ensaios de fadiga em vigas quatro pontos do LAPAV;
- investigar o comportamento do ECC à fadiga em ensaios de flexão quatro pontos, estabelecendo modelos de fadiga para o compósito;
- estimar as exigências para concretagem de elevados e médios volumes de ECC, estudando os rendimentos dos equipamentos e ferramentas necessários para o lançamento, nivelamento e acabamento superficial do ECC na conformação de trechos experimentais de vias;
- avaliar o desempenho do ECC em ensaios de verdadeira grandeza, acompanhando o processo de degradação do material aplicado como recapeamento sobre pavimentos asfálticos trincados, empregando o simulador de tráfego em operação no LAPAV;
- avaliar o processo de reflexão de trincas dos pavimentos existentes nos recapeamentos.

1.2. ESTRUTURA DA TESE

O presente documento está organizado em sete capítulos, correspondendo o primeiro à descrição do tema da pesquisa, sua justificativa e à apresentação dos objetivos.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica considerada da maior relevância, com a intenção de fornecer elementos conceituais sobre o desenvolvimento de compósitos cimentícios, assim como sobre ensaios de fadiga.

No Capítulo 3 é feita uma descrição da metodologia adotada para a execução do programa experimental, a definição dos materiais utilizados e as informações sobre os procedimentos de ensaio.

Os resultados obtidos mediante experiências preliminares são descritos no Capítulo 4, onde são apresentados os processos experimentais e as conclusões que ajudaram a definir o programa experimental definitivo desenvolvido na pesquisa.

Os resultados dos ensaios são apresentados e discutidos no Capítulo 5, onde também são descritos os processos construtivos dos recapeamentos executados sobre pistas experimentais já existentes no LAPAV.

As conclusões e considerações finais são apresentadas no Capítulo 6, assim como as sugestões para futuras pesquisas.

Ao final do documento encontra-se anexada a lista de referências bibliográficas utilizada ao longo do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

No final do Século XX, as pesquisas desenvolvidas na área de concreto buscavam, através de métodos alternativos, aumentar o desempenho mecânico do material. Com destaque para duas abordagens, que tiveram sucesso nesse propósito.

A primeira corresponde ao desenvolvimento de concretos com altos teores de superplastificante e adições de sílica ativa, relações de água-aglomerante muito baixas e utilização de agregados extremamente resistentes, resultando nos *Densified Small Particle* (DSP), com resistência a compressão da ordem de 150-400 MPa. Contudo, esse tipo de materiais mantêm uma relação baixa entre as resistências à tração e à compressão.

O segundo corresponde com o material genericamente classificado como *Macro Defect Free* (MDF), conseguido pela utilização de argamassas modificadas pela adição de polímeros. Este tipo de material possui uma matriz resistente, onde os polímeros preenchem os poros do concreto, mantendo as partículas aderidas. Nesta abordagem foram obtidos melhores resultados quanto à resistência à flexão quanto comparados com os DSP (Donatello et al., 2008).

Embora esses dois tipos de materiais alcancem altas resistências, apresentam um comportamento frágil na ruptura, comportamento indesejado para elementos estruturais. Levando esse fato em consideração foi natural tentar se conseguir materiais mais flexíveis, pela adição de fibras.

Os MDF apresentam matrizes altamente viscosas dificultando o processo de adição das fibras, além de afetar a trabalhabilidade, entre outras propriedades da mistura. Assim, os pesquisadores se concentraram nos DSP. O fato de adicionar fibras aos DSP resultou nos materiais conhecidos como HPFRC (*High Performance Fiber Reinforced Concrete*) – Compósitos cimentícios de alto desempenho reforçados com fibras.

Entre os HPFRC destaca-se os HDFRC (*High Ductility Fiber Reinforced Concrete*) que têm como principais características a múltipla fissuração (ductilidade) e o comportamento de *strain-hardening*, que é o aumento da resistência mecânica à medida que ocorre deformação plástica. Estas características os diferenciam dos concretos reforçados com fibras tradicionais, conhecidos como *Fiber Reinforced Concrete* (FRC) e os *Fiber Reinforced Mortar* (FRM).

Seguindo essa linha de raciocínio, foram desenvolvidos os *Engineered Cementitious Composites* (ECC), também conhecidos como *High Ductility Fiber Reinforced Cementitious Composites* (HDFRCC). Buscando aumentar a ductilidade sem ter que adicionar teores elevados de fibra, esses materiais procuram resolver a deficiência da resistência à tração dos concretos convencionais. Na Figura 2.1 é apresentado o gráfico que segundo o *JCI-DFRCC Committee* (2003) resume a classificação dos materiais cimentícios em termos de seu desempenho. No conjunto dos DFRCC (*Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites*) junto com os ECC's destacam-se os SIFCON¹ e os SIMCON², compósitos com altos teores de fibras, que apresentam comportamento dúctil, mas não atingem resistências tão elevadas quanto os HPFRCC do tipo Ductal, além de requerer técnicas complexas para a incorporação das fibras.

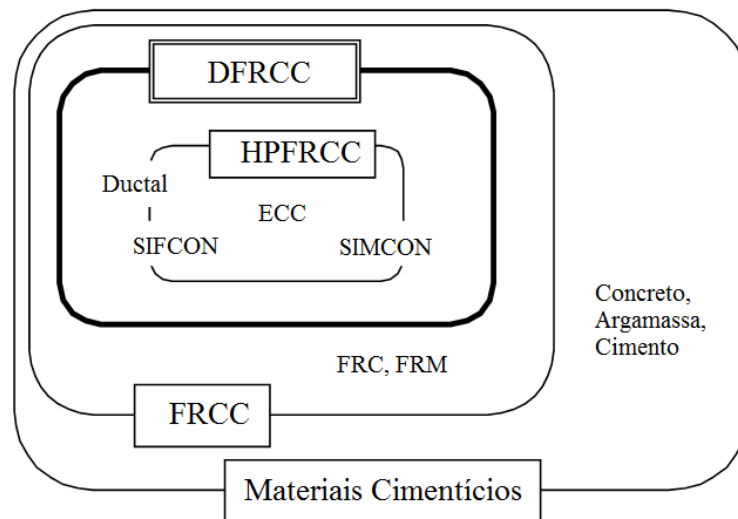


Figura 2.1: Classificação dos materiais cimentícios. Fonte: *JCI-DFRCC Committee* (2003).

Li (1998) descreve que têm sido observados três tipos de comportamento na ruptura em materiais cimentícios (Figura 2.2): Frágil, Pseudo-Frágil e *Strain-hardening*.

¹ *Slurry Infiltrated Fibered Concrete*: $4\% \leq V_f \leq 6\%$.

² *Slurry Infiltrated Mat Concrete*: $4\% \leq V_f \leq 15\%$.

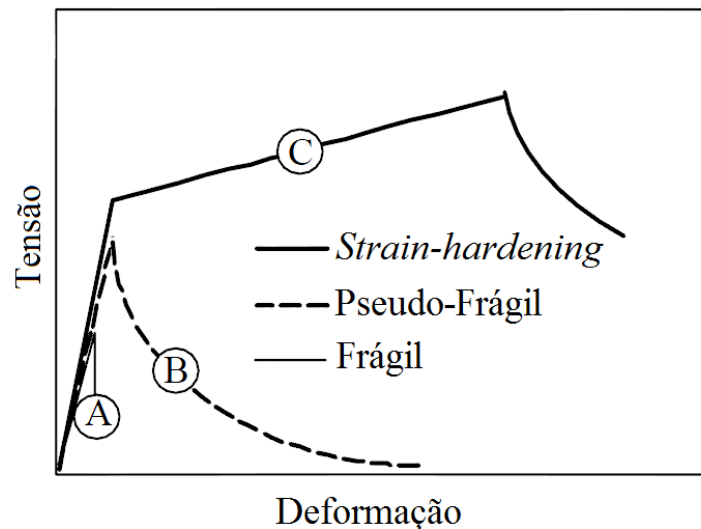


Figura 2.2: Três tipos de comportamento na ruptura observados em materiais cimentícios. Fonte: Li (1998).

As fraturas frágeis podem ser observadas em materiais como os concretos convencionais, esses materiais têm uma curva tensão-deslocamento caracteristicamente bilinear (curva A) até a ruptura, seguida por uma queda súbita de tensão com o surgimento da primeira fissura, a uma deformação específica última da ordem de 0,01%.

Rupturas pseudo-frágeis podem ser observadas na maior parte dos concretos reforçados com fibras. São caracterizados por uma curva linear (curva B) seguida por uma relaxação depois de acontecer a primeira fissura, causada pela interação dos agregados, ligações de cimento e as fibras.

Os materiais com comportamento de *strain-hardening* são caracterizados pela capacidade para sustentar níveis crescentes de carregamento após a primeira fissura, e experimentar elevadas deformações antes de romperem definitivamente (curva C). Nesses materiais a deformação específica última pode ser de magnitude muito superior às alcançadas por materiais frágeis e pseudo-frágeis.

Li e Kanda (1998) descrevem que, em termos de materiais constituintes, nos ECC's os agregados grossos não são utilizados porque afetam a ductilidade do compósito. Geralmente, uma adição de 2% fibras poliméricas em relação ao volume total é adequada ($V_f \leq 2\%$).

Devido à sua ductilidade, os ECC possuem elevadas capacidades de absorção de energia e de deformação, sob tensões de tração, resultantes da formação de múltiplas fissuras de pequena abertura, durante o processo de ruptura. Devido à sua alta capacidade de deformação os ECC

são chamados pelo professor Victor Li, pioneiro no desenvolvimento destes compósitos, como *bendable concretes* (concretos flexíveis).

Lim e Li (1997) executaram ensaios quatro pontos com vigas compostas por uma base de concreto simples e variando o material de recapeamento. Os recapeamentos testados foram concreto simples, um tipo de FRC e um ECC. Na Figura 2.3 pode-se verificar o comportamento típico dos materiais utilizados, é considerado apenas o comportamento do material de recapeamento dado que o concreto de base não ajuda na resistência do elemento ensaiado.

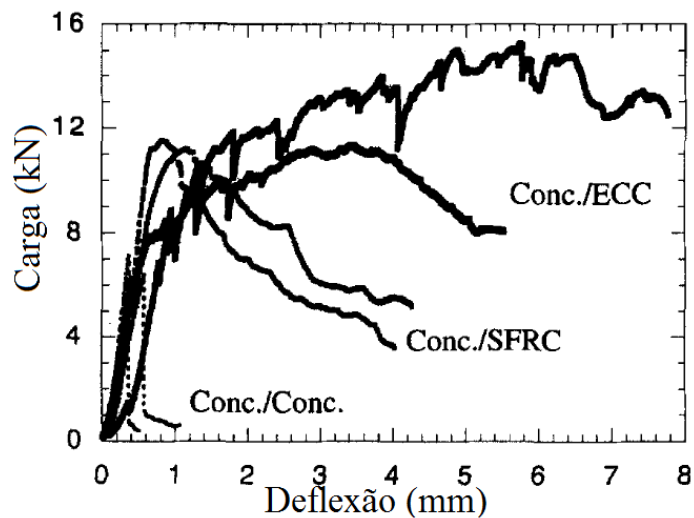


Figura 2.3: Comportamento de carga versus deformação para vigas compostas com três tipos de recapeamentos. Fonte: Lim e Li (1997).

Kanakubo (2006), executou ensaios de resistência à flexão a quatro pontos comparando 4 tipos de compósitos: PVAECC (ECC com adição de fibras de Poli-Vinil-Álcool), PEECC (ECC com adição de fibras de Polietileno), HBECC (ECC com uma mistura de fibras de aço e Polietileno) e DCT (Ductal©, compósito cimentício de alto desempenho comercial de ampla difusão no mercado). Os resultados são apresentados na Tabela 2.1. Pode ser visto que o Ductal© apresenta resistência à tração superior, mas baixas deformações no momento da ruptura. Na Figura 2.4 é possível visualizar os resultados.

Tabela 2.1: Resultados ensaios flexão 4 pontos para 4 tipos de compósitos. Adaptado de Kanakubo (2006).

Designação	Resistência a tração [MPa]	Deformação na ruptura [%]
PVAECC	5,00	2,70
PEECC	4,85	1,28
HBECC	4,37	0,71
DCT	15,27	0,53

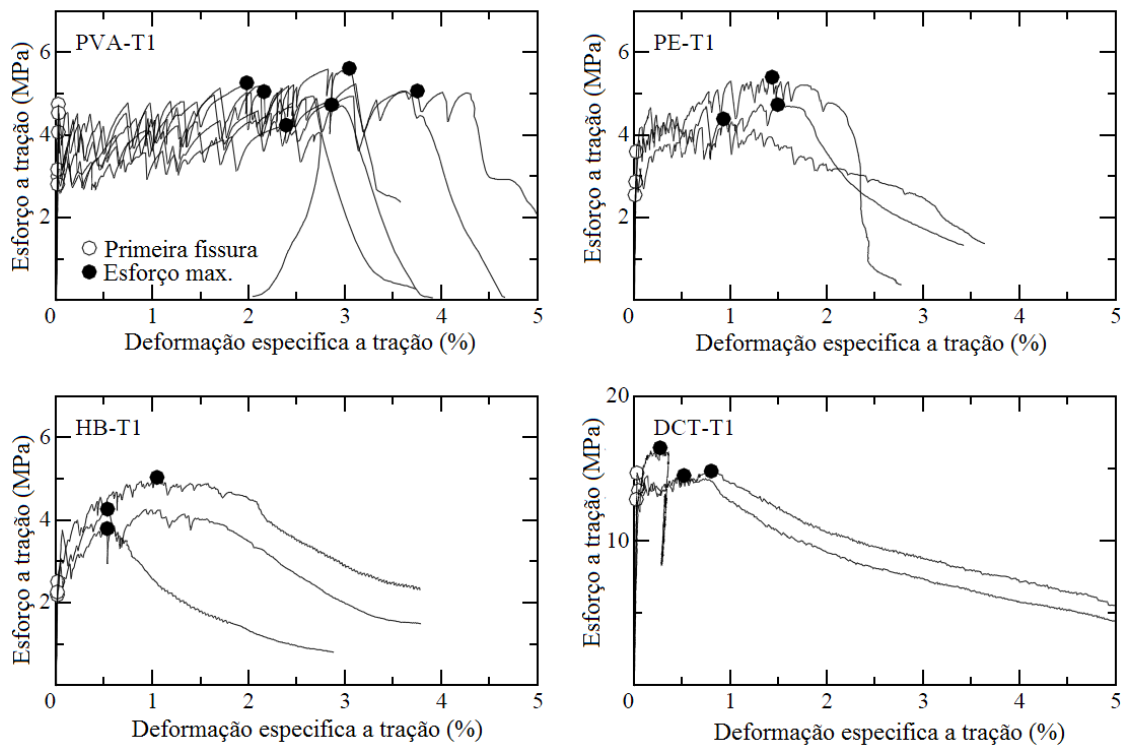


Figura 2.4: Resultados ensaios de resistência à tração. Fonte: Kanakubo (2006).

O desenvolvimento dos ECC foi baseado nos princípios da micromecânica, estabelecendo relações entre o comportamento do compósito e as propriedades individuais dos componentes: fibra, matriz e interface fibra-matriz. Li (2003) afirma que os conceitos da micromecânica levaram à adoção de estratégias de dosagem racionais, fundamentadas em critérios de mecânica da fratura.

Os traços de ECC geralmente apresentam teores elevados de cimento, 2 a 3 vezes superiores que nos concretos convencionais. No traço de ECC-LEME, sem adição de cinza volante, o consumo de cimento é de aproximadamente 1100 kg por m³. Os elevados teores de argamassa facilitam a dispersão das fibras e permite o controle da tenacidade da matriz, sendo este um fator responsável pelo comportamento de *strain-hardening* (Wang e Li, 2007).

Para os compósitos do tipo ECC, depois da primeira fissura acontece uma estabilização da capacidade de carga. Isto acontece porque os esforços, inicialmente suportados pela matriz, são transferidos para uma grande quantidade de fibras que interceptam a fissura. As fibras conseguem suportar os esforços e transferi-los para outro ponto da matriz, gerando uma nova fissura, que por sua vez irá mobilizar a capacidade de carga das fibras que atravessam essa nova fissura. O processo é repetido sucessivamente permitindo a formação de muitas microfissuras

ao longo do compósito, preservando a integridade do elemento e evitando sua ruptura. Este comportamento é conhecido como *strain-hardening*, e pode ser visto na Figura 2.5.

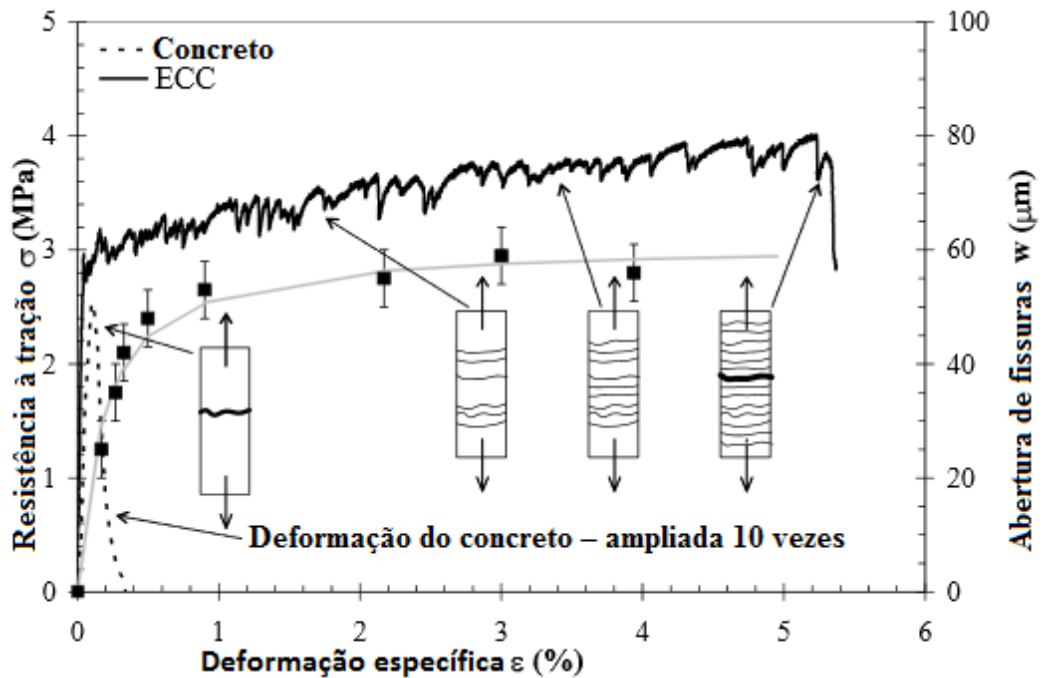


Figura 2.5: Curvas tensão-deformação à tração características de um ECC e um concreto convencional. Fonte: Weimann e Li (2003).

O comportamento *strain-hardening* do ECC é responsável pela elevada ductilidade do compósito; isto significa que comparado com concretos simples ou FRC's, o ECC tem uma probabilidade menor de apresentar ruptura estrutural. Também, como salientam Li e Kanda (1998), o *strain-hardening* tem origem na alta tenacidade e elevada tolerância ao dano do ECC, fazendo que os elementos sofram elevadas deformações sem romper. Este fenômeno pode ser visto na Figura 2.6, imagem representativa do comportamento de um ECC.

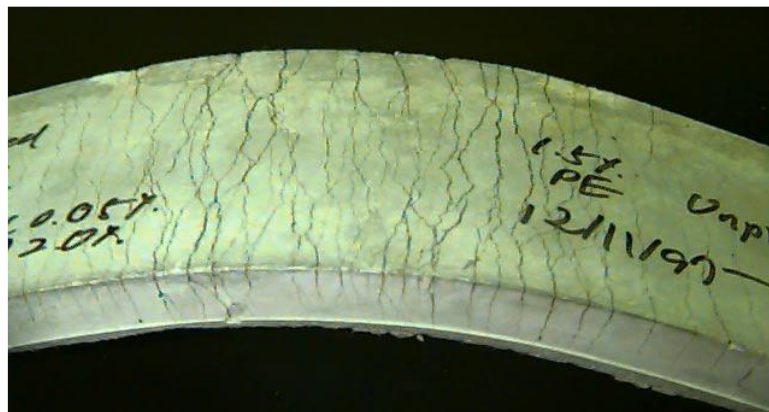


Figura 2.6: Aspecto de fissuração de um compósito cimentício de elevada deformação. Fonte: Li e Kanda (1998).

O ECC também apresenta elevada capacidade de resistir esforços de cisalhamento (Li, 2003). Perante esse tipo de carregamento, o ECC apresenta fissuras alinhadas na direção normal à direção das tensões principais de tração. Como o comportamento à tração é dúctil, a resposta ao cisalhamento também é dúctil. Pode ser visto na Figura 2.7 um exemplo desse comportamento com as curvas de histerese de vigas submetidas a carregamento cíclico. Os resultados apresentados correspondem a vigas com reforço de aço simples e produzidas com concreto (a) e PVAECC (b). Estes experimentos foram realizados por Fukuyama et al. (2000). O resultado demonstra a elevada capacidade e a excelente absorção de energia da viga em ECC.

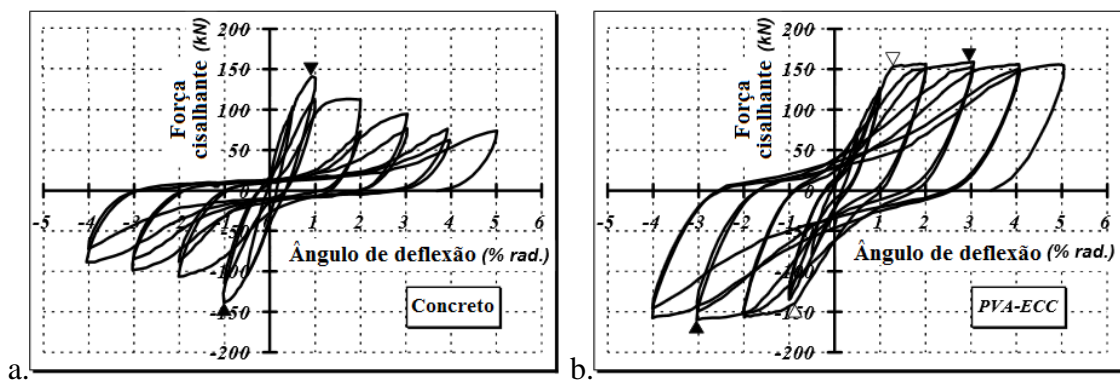


Figura 2.7: Curvas de histerese de vigas produzidas: (a) concreto; (b) PVAECC. Fonte: Fukuyama et al. (2000).

Na Figura 2.8 pode-se verificar que a tolerância ao dano da viga em PVAECC é superior à da viga confeccionada em concreto convencional, evidenciando que elementos elaborados em ECC têm maior capacidade de conter a desagregação e evitar a desintegração do elemento, como é possível verificar no microfissuramento dos elementos.

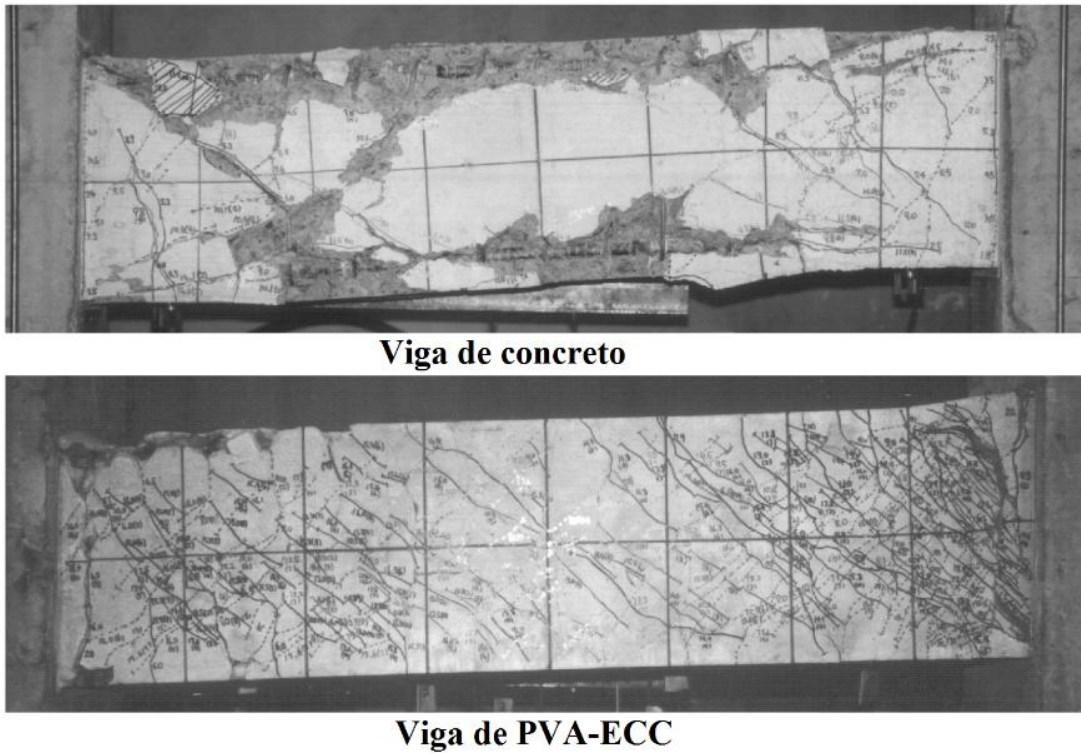


Figura 2.8: Comportamento ao dano: (acima) viga de concreto, (abaixo) viga em PVAECC, ambas com aço de reforço simples. Fonte: Fukuyama et al. (2000).

Adicionalmente às propriedades mecânicas dos ECC's comentadas anteriormente, também existe outro efeito positivo resultante da limitação das aberturas, decorrentes do processo de microfissuração. Este efeito é o conhecido em inglês *self-healing*, autoreparação, ou no caso concreto que se repara a si mesmo. Özbay et al. (2013) definem o *self-healing* como a capacidade do concreto de diminuir a abertura das fissuras por si mesmo, o que é ilustrado na Figura 2.9.

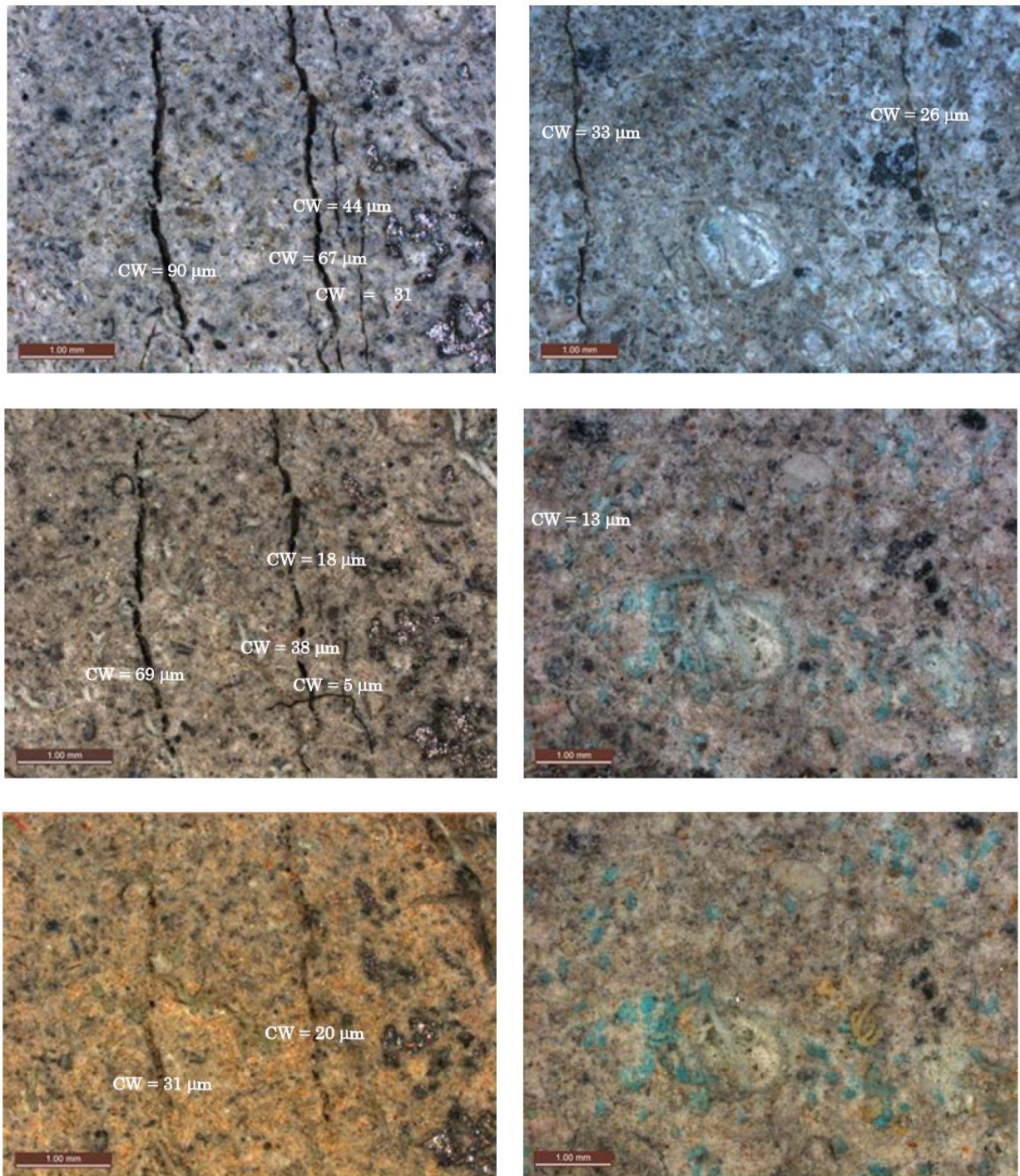


Figura 2.9: Ilustração do processo de *self-healing* para dois elementos de PVAECC: (acima) fissuras antes de expor a umidade; (meio) fissuras depois de 30 dias de exposição a umidade; (abaixo) fissuras depois de 90 dias de exposição a umidade. Fonte: Özbay et al. (2013).

Garcez (2009) relata que três critérios são críticos para que aconteça o *self-healing* em compósitos cimentícios:

- presença de certos compostos químicos reativos;

- b) exposição a determinadas condições ambientais;
- c) pequena abertura das fissuras, que viabiliza a colmatação com cristais precipitados.

O primeiro critério é cumprido pela existência de material anidro, proveniente da hidratação incompleta dos compósitos do cimento, devido à reduzida relação água/aglomerante e da alta compacidade das matrizes cimentícias de alta resistência.

O segundo critério é cumprido no caso de estruturas que ficarão expostas a ciclos de umedecimento e secagem, como por exemplo pavimentos e pontes. Os ciclos de umedecimento permitem a hidratação das partículas inertes expostas nas paredes das fissuras.

Devido ao fato de que o volume de produtos para a autoreparação é limitado, o tamanho da abertura das fissuras é um fator crítico para que o processo ocorra (Li e Yang, 2007; Qian et al., 2009). Estudos preliminares relatavam que aberturas inferiores a 150 μm são susceptíveis ao *self-healing*, sendo que ocorre preferencialmente em aberturas inferiores a 50 μm (Wang et al., 1997; Lepech e Li, 2005). Heide e Schlangen (2007), também Li e Yang (2007) relataram que o *self-healing* requer aberturas de fissura inferiores a 100 μm , e preferentemente inferiores a 50 μm , especialmente para autoreparações pela hidratação de materiais não hidratados. Já os estudos de Nishiwaki et al. (2012) apontam processos de autoreparação em ECC elaborados com vários tipos de fibras sintéticas, com abertura de fissuras superiores a 300 μm para PVAECC.

Li et al. (1998) avaliaram a capacidade de autoreparação dos ECC's e concluíram que materiais com a capacidade de limitar a abertura das fissuras são eficientes na autoreparação. Os produtos químicos que intervêm principalmente no processo são C-S-H (silicatos hidratados de cálcio) e carbonato de cálcio (Kan et al., 2010).

Mihashi et al. (2011) afirmaram que os HPFRC apresentam melhor resistência contra a corrosão do aço de reforço que os concretos convencionais, associado à presença das fibras e do *self-healing* do compósito.

Koda et al. (2011) concluíram que diferentes tipos de fibras apresentam diferentes níveis de *self-healing*. Particularmente, fibras com polaridade, por exemplo as PVA, promovem mais eficientemente a cristalização que outros tipos de fibras.

2.2. ESTUDOS SOBRE ECC'S REALIZADOS NO LEME (UFRGS)

O Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME-UFRGS) vem trabalhando no aprimoramento de um compósito cimentício de elevada capacidade de deformação. Os trabalhos abordam a adaptação a materiais locais, definição dos traços com melhores desempenhos, assim como a caracterização por ensaios e procedimentos adaptados às condições próprias do material. O aspecto ambiental também é levado em consideração ao se utilizarem cinzas de casca de arroz (CCA) como material pozolânico, em substituição parcial do cimento nas misturas avaliadas.

Os trabalhos iniciaram com a pesquisa de Estela Oliari Garcez (2009), quem tinha como objetivo na sua tese de doutorado a formulação de um compósito cimentício com materiais disponíveis no Brasil. O ponto de partida de sua pesquisa foi a adaptação de um traço bem-sucedido de ECC, desenvolvido na universidade de Michigan, com adição de fibras de PVA, às condições brasileiras. A diferença fundamental no ECC proposto é adição de fibras de Polipropileno (PP) em lugar das fibras de Poli-Vinil-Álcool (PVA). As principais características de esses dois tipos de fibras são apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Propriedades das fibras de Poli-Vinil-Álcool (PVA) e Polipropileno (PP).
Modificado de Garcez (2009).

Característica	PVA*	PP**
Massa específica [g/cm ³]	1,3	0,91
Comprimento [mm]	8 - 12	6 - 10
Diâmetro [µm]	39	12
Resistência a tração [MPa]	1070	850
Elongação na ruptura [%]	7	21
Módulo de elasticidade [GPa]	42,8	6
Afinidade ao cimento	Boa	Boa

* Produzida por Kuraray, Japão
** Produzida por Brasilit – Saint Gobain, Brasil

Com um projeto de pesquisa dividido em quatro fases, foram avaliados 5 traços preliminares, variando as proporções de agregado fino, cinza volante e tipo de cimento. Foi utilizada uma cinza volante tipo F, pois além de reagir lentamente, aumenta a resistência do concreto ao ataque de sulfatos e diminui as reações álcali-agregado (Garcez, 2009). Na Tabela 2.3 são apresentados os traços avaliados, já na Tabela 2.4 é apresentado o traço definido na Universidade de Michigan para o PVAECC, traço também conhecido como M45.

Tabela 2.3: Traços estudados por Garcez (2009). Modificado de Garcez (2009). Proporções em volume.

Designação	Proporção de Cimento	Proporção de Areia	Proporção de Cinza Volante	Tipo de Cimento
PPECC1	1	0,5	0	CP-V
PPECC2	1	1	1	CP-V
PPECC3	1	1	2	CP-V
PPECC4	1	1	1	CP-I
PPECC5	1	-	2,8	CP-I

Tabela 2.4: Traço definido por Qian (2007) do PVAECC (M45).

Designação	Prop. de Cimento	Prop. de Areia	Prop. de Cinza Volante	Prop. de Água	Prop. do Superplastificante	Prop. PVA
PVAECC (M45)	1	0,8	1,2	0,59	0,013	0,02

Para a determinação das propriedades mecânicas dos ECC foram executados ensaios uniaxiais de tração direta, de compressão axial, de flexão quatro pontos e de flexão cíclica.

Tanto nos ensaios de tração direta quanto nos ensaios de flexão quatro pontos foi verificado o comportamento *strain-hardening* dos cinco traços. Na Figura 2.10 são apresentados os resultados da Resistência à Flexão do PPECC5.

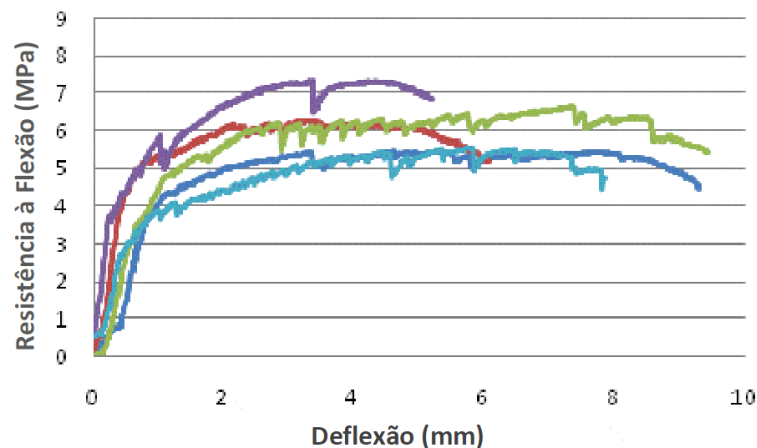


Figura 2.10: Curvas tensão de flexão-deflexão dos corpos de prova de PECC5, ensaio de flexão quatro pontos. Fonte: Garcez (2009).

Os ensaios cíclicos, ao igual que todo o programa experimental da pesquisa de Garcez (2009) foi desenvolvido no *Advanced Civil Engineering Materials Research Laboratory (ACE-MRL)* da Universidade de Michigan, foram executados na configuração de ensaios de flexão quatro

pontos. Foram estudadas a fadiga de três traços, PPECC1, PPECC3 e PPECC5. Os resultados dos ensaios de fadiga foram comparados com a curva característica do concreto convencional (Oh, 1991) e de um PVAECC (Quian, 2007). Como pode ser visto na Figura 2.11 para um mesmo número de ciclos o nível de tensões suportado pelos traços testados é superior ao concreto convencional, embora inferiores ao traço referência de PVAECC. Como salienta Garcez (2009), a utilização de PPECC tem o potencial de aumentar a vida útil de serviço dos recapeamentos, elementos bastante expostos à fadiga.

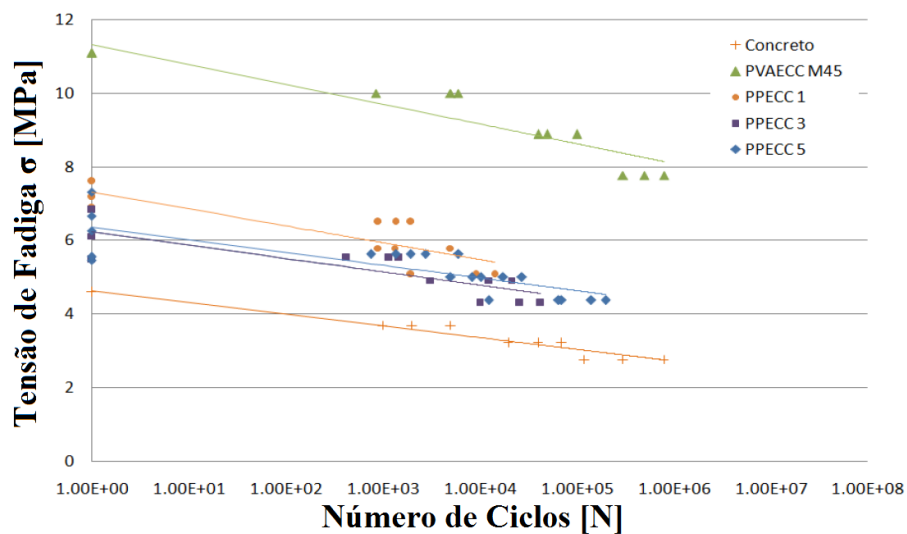


Figura 2.11: Curvas de fadiga características de misturas de concreto convencional, PPECC e PVAECC. Fonte: Garcez (2009).

A reflexão de fissuras foi estudada por Garcez (2009) em vigas compostas, com a configuração apresentada na Figura 2.12. Foi executado um recapeamento em ECC sob uma viga de concreto convencional. A fissura no ponto médio da viga induz a concentração de tensões na zona próxima que está em contato com o recapeamento. Na imagem é observada uma separação entre o recapeamento e o substrato na zona próxima à fissura induzida no concreto. Também é possível ver as microfissuras do recapeamento. O mecanismo responsável pela formação desta rede de microfissuras de pequena abertura é o mesmo que eleva a capacidade de deformação na flexão do corpo de prova. É importante ressaltar que o recapeamento conserva sua integridade e não apresenta danos na superfície.

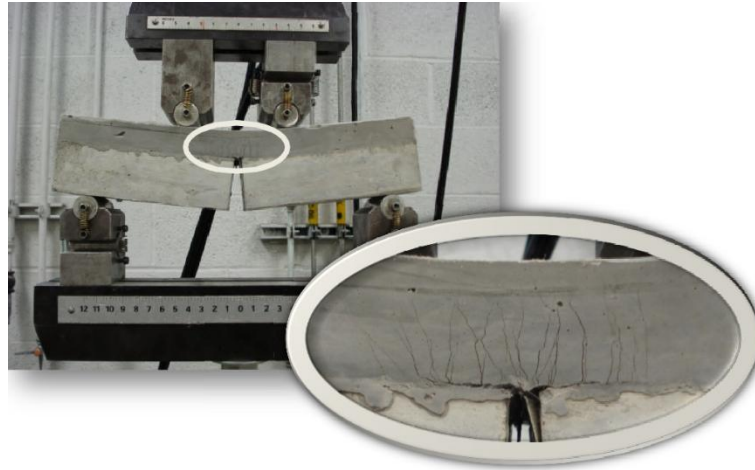


Figura 2.12: Viga composta com recapeamento de PPECC sob carregamento de flexão. Fonte: Garcez (2009).

Na fase final da pesquisa foi realizada uma análise do ciclo de vida e custos de sistemas de recapeamentos. Como conclusão Garcez (2009) destaca as vantagens econômicas e ambientais da execução de recapeamentos em ECC, ao invés de recapeamentos em concreto convencional ou concreto asfáltico.

Quando comparados os resultados para os PPECC (ECC conformados com fibras de Polipropileno) com os PVAECC (ECC conformado com fibras de Poli-Vinil-Álcool) de referência fica evidente o menor desempenho em termos das resistências alcançadas, mas os PPECC apresentam uma maior ductilidade, admitindo deformações específicas maiores. Essa capacidade, somada a custos menores, fazem os recapeamentos em PPECC viáveis para serem empregados como recapeamentos de pavimentos.

A conclusão principal da pesquisa realizada por Garcez é que os compósitos cimentícios PPECC constituem uma alternativa promissora para ser utilizados em recapeamentos de pavimentos deteriorados, em função do seu excelente desempenho à flexão e elevada ductilidade à tração.

A autora ressalta ainda necessidade de aprimorar as dosagens, adaptando-as à realidade brasileira em termos dos materiais disponíveis, além de desenvolver estudos de desempenho a longo prazo dos ECC's e dos recapeamentos fabricados com os mesmos.

Nessa linha, a dissertação de mestrado de Debora Pedroso Righi (2015) teve como objetivo verificar a viabilidade do uso de cinza de casca de arroz sem controle de queima e fibra de polipropileno em compósitos cimentícios de elevada deformação.

Nos traços avaliados foram utilizadas fibras de Polipropileno, cimento CP V-ARI, areia fina e aditivo superplastificante com proporções fixas. A substituição de cimento por cinza de casca de arroz (CCA) moída em laboratório foi estudada em proporções de 10%, 20% e 30%, para tempos de moagem de 1, 2, 4, 6 e 8 horas; além de se executar um traço de referência sem substituição de cimento, totalizando 16 avaliados. Na Tabela 2.5 é apresentada a dosagem do traço de referência.

Tabela 2.5: Dosagem do traço de referência com as proporções em volume. Fonte: Righi (2015).

Componente	Massa específica [g/cm ³]	Proporção	Peso [g]
Cimento	3,11	1	1917
Areia fina	2,52	0,75	1439
Água	1	0,34	662,1
Aditivo	1,09	0,006	13,4
CCA	-	-	-
Fibra PP	0,9	0,018	34

As cinzas foram caracterizadas por ensaios de difração de raios-x, fluorescência de raios-x, perda ao fogo, índice de desempenho, massa específica e distribuição granulométrica. Os ensaios mecânicos executados para caracterizar os compósitos foram os de tração direta e de flexão a quatro pontos. Foram executados os seguintes ensaios complementares: absorção e índice de vazios, curva de liberação de calor de hidratação, ensaios de aderência pelo método de arrancamento (*pull-off test method*), ensaio de aderência pelo método de cisalhamento oblíquo, reflexão de fissuras e microscopia eletrônica de varredura.

Os resultados do índice de desempenho das cinzas mostraram que existe uma tendência de aumento da resistência à compressão com o tempo de moagem. Este ganho de resistência foi principalmente significativo a partir de tempos da moagem de 4 horas.

A distribuição granulométrica mostrou-se sensível ao tempo de moagem, apresentando diâmetros médios de 33,15 µm; 22,29 µm; 7,29 µm; 9,30 µm e 3,59 µm para 1, 2, 4, 6 e 8 horas de moagem, respectivamente. O resultado para 6 horas de moagem foi considerado anômalo, dado que para um maior tempo de moagem, um menor diâmetro seria esperado.

Nos resultados dos ensaios de tração direta foi verificado o comportamento *strain-hardening* nos corpos de prova ensaiados. O comportamento mecânico dos compósitos apresentou melhores resultados ao se aumentar o tempo de moagem e a porcentagem de cinza de

substituição em relação ao traço de referência. O traço com 8 horas de moagem e 30% de CCA alcançou um indicativo de ductilidade superior ao traço de referência.

O ensaio a flexão a quatro pontos foi instrumentado de forma a permitir a medição da deformação lateral e a deflexão do corpo de prova. O arranjo deste ensaio segue as indicações propostas por Perroni em 2012³. Os resultados mostram que todos os corpos de prova apresentaram o comportamento *strain-hardening*, verificando de forma adicional a ocorrência da microfissuração de forma mais eficiente no compósito com 30% de cinza e 8 horas de moagem. Na Figura 2.13 é apresentado o gráfico de tensão-deformação do: (a) traço de referência, (b) o traço de 30% de CCA moída por 8 horas e (c) o traço de 30% de CCA moída por 4 horas.

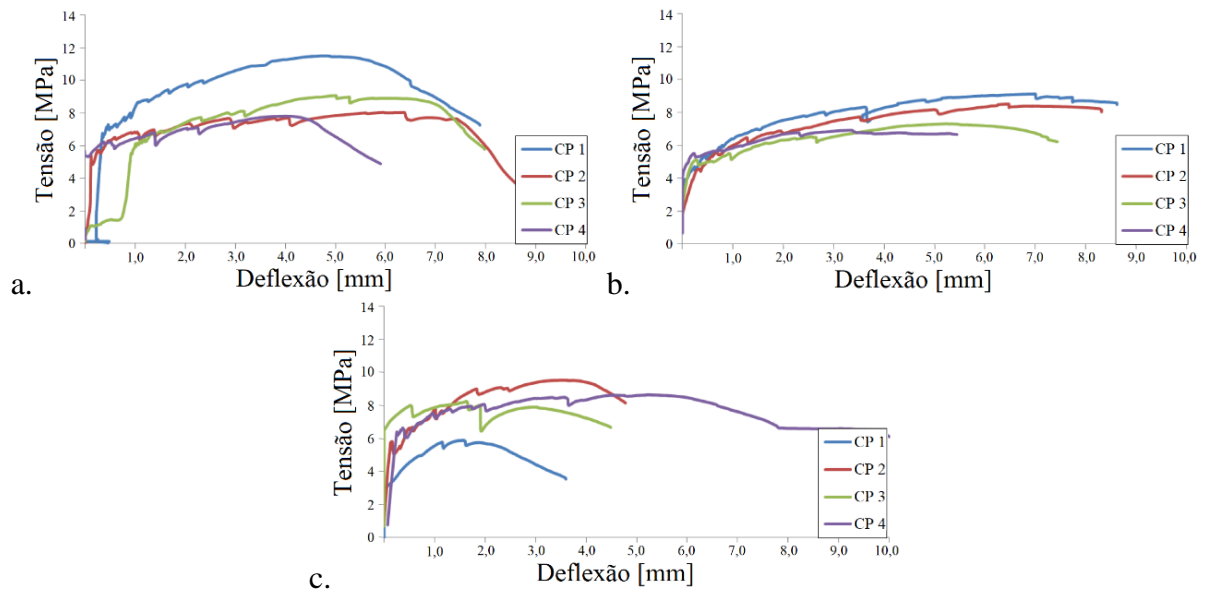


Figura 2.13: Curvas tensão-deslocamento do ensaio a flexão quatro pontos (a) traço de referência, (b) 30% 8 horas e (c) 30% 4 horas.

Fonte: Righi (2015).

A cinza de casca de arroz moída por 8 horas apresentou um comportamento de ductilidade superior ao traço de referência em todas as porcentagens estudadas. Estes resultados são compatíveis com os relatados por Zhu et al. (2014), que realizaram ensaios de flexão em corpos de prova de PVAECC. Nesse estudo as misturas foram produzidas variando-se a proporção de

³Dissertação não publicada intitulada “Estudo da utilização de lajes de continuidade de SHCC para substituição de juntas de dilatação em pontes” do autor Vitor Cury Perrone, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil-UFRGS.

cinza volante em 50%, 60%, 70% e 80% em relação ao material cimentante total. Na Figura 2.14 é possível verificar o aumento da ductilidade do ECC com a proporção de cinza volante.

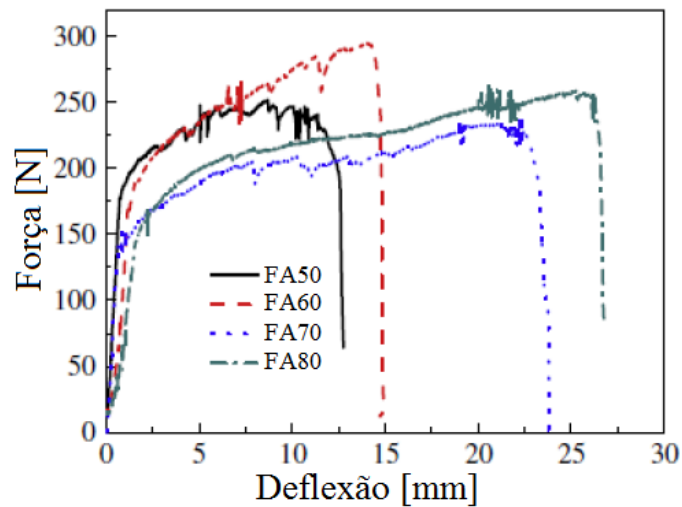


Figura 2.14: Curvas de carga deflexão de PVAECC com relações de adição de cinzas volantes do 50%, 60%, 70% e 80% em relação ao material cimentante total. Fonte: Zhu et al. (2014).

A microfissuração também foi verificada nos ensaios de reflexão de fissuras, como pode ser visto na Figura 2.15. Os resultados demonstram um melhor comportamento mecânico do traço do compósito com 30% de CCA e 8 horas de moagem.

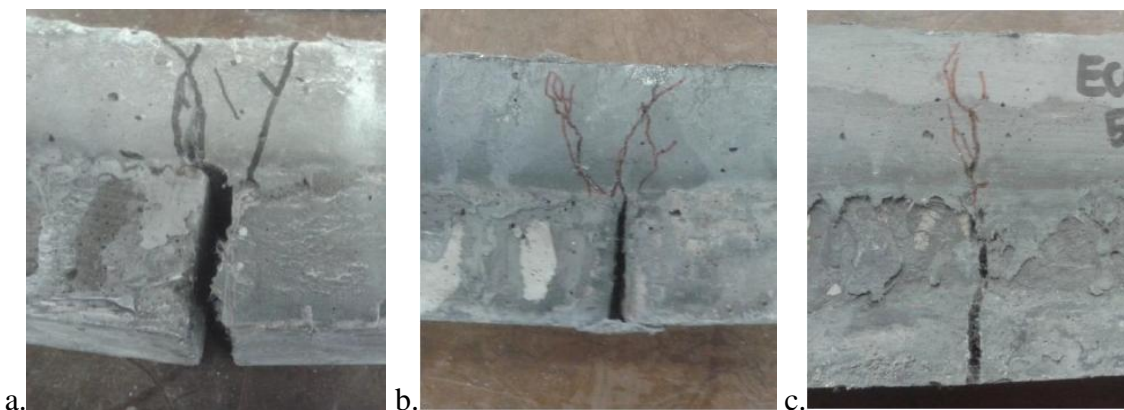


Figura 2.15: Fissuração na região da junta da viga composta compósito/concreto: altura de 5 cm (a) traço de referência, (b) 30% 8 h e (c) 30% 4 h. Fonte: Righi (2015).

Os resultados da liberação de calor de hidratação demonstraram que a utilização de cinzas de casca de arroz (CCA) moídas no laboratório contribuem para reduzir a liberação de calor, como pode ser visto na Figura 2.16, contribuindo possivelmente na redução de fissuras de retração autógena.

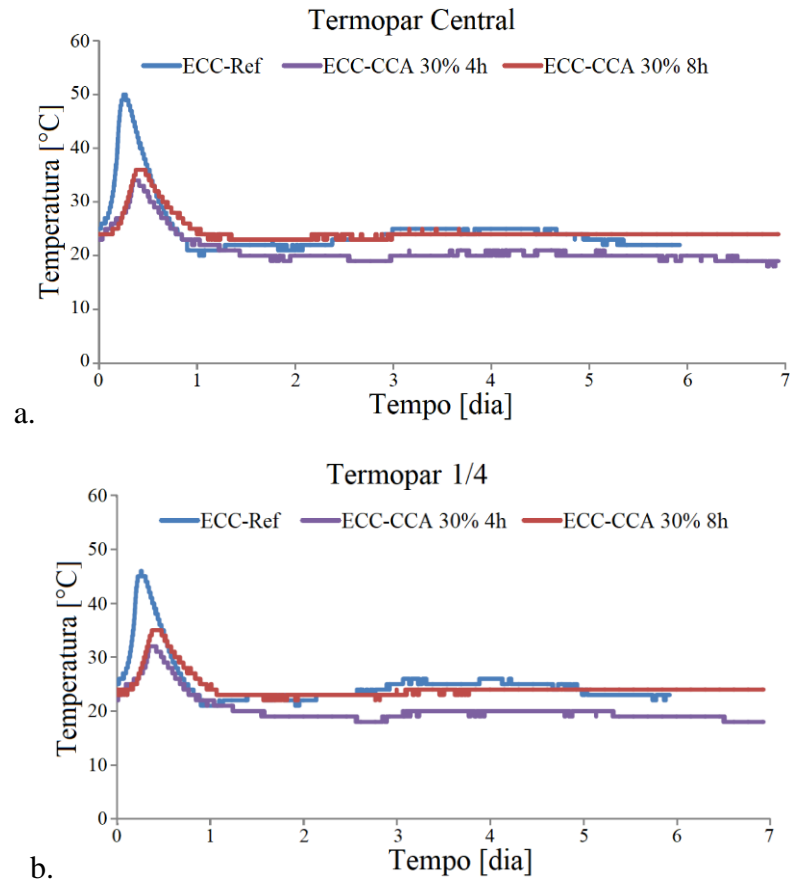


Figura 2.16: Curva de liberação de calor de hidratação: (a) termopar no centro do volume de 1,8 litros, (b) termopar na extremidade no volume de 1,8 litros. Fonte: Righi (2015).

Em termos da aderência, os resultados para os ensaios de arrancamento demonstraram que esta metodologia não resulta adequada para testar aderência entre compósitos e concretos. Já os ensaios de cisalhamento oblíquo, executados sem a utilização de qualquer tipo de tratamento superficial, demonstraram a existência de forte aderência entre os compósitos e o concreto.

Os compósitos elaborados com CCA moída em laboratório por 4 e 8 h, nas proporções de substituição de 30% apresentaram resultados satisfatórios. Foi considerada mais interessante a utilização de cinza moída por 4 h por requerer menor gasto de energia na moagem. Experiências adicionais devem ser executadas, incrementando-se a porcentagem de CCA como material de substituição de cimento na produção de compósitos cimentícios de alta deformação (Righi, 2015).

2.3. COMPORTAMENTO À FADIGA

Como descrito por Ceratti (1991), o comportamento mecânico das estruturas de pavimento depende, em maior ou menor medida: dos níveis de tensões, condições ambientais, materiais, métodos construtivos e procedimentos de manutenção.

Dentre as possíveis manifestações patológicas associadas à degradação dos pavimentos podem ser ressaltadas, enquanto ao tráfego e à estrutura do pavimento, as deformações permanentes excessivas e as fissuras de fadiga. Já as fissuras de retração térmica e desagregação correspondem às características dos materiais utilizados e às condições climáticas atuantes.

Da observação dos defeitos nos revestimentos asfálticos é possível identificar dois dos mais severos modos de sollicitação mecânica: flexão repetida, responsável pela fadiga do material e que está associada ao trincamento do revestimento e a compressão simples, que conduz ao acúmulo de deformações permanentes (Pinto, 1991).

O fenômeno da fadiga tem sido identificado como o principal responsável das falhas nas estruturas de pavimentos (Motta, 1991; Pinto, 1991; Baburamani, 1999; Huang, 2004, entre outros).

2.3.1. Fadiga de materiais

Com a chegada da revolução industrial, perante a necessidade de estudar o comportamento de maquinários e peças metálicas, foram desenvolvidos os trabalhos de Albert (1829), Hodgkinson (1849) e Wöhler (1852). Sendo que o primeiro em utilizar o termo de fadiga foi Poncelet, na França em 1830 (Oliveira, 2002). Já os primeiros trabalhos dedicados especificamente com aplicações na pavimentação correspondem a Porter (1942), Nijboer (1953), Van Der Poel (1953) e Hveem (1955), os quais apresentaram seus resultados na relação entre repetições de carga e deformações reversíveis. Merece uma menção especial os testes realizados em pistas sob condições controladas na caracterização das estruturas de pavimento, o *Maryland Road Test* em pavimentos de concreto no ano 1941, o *Washo Road Test* realizado pela WASHO (*Western Association of Highway Officials*) em pavimentos asfálticos entre os anos 1952 e 1954 e o *AASHO Road Test* realizado pela AASHO (*American Association of State Highway Officials*) no qual foram aplicados um total de 1'114.00 ciclos em pavimentos tanto asfálticos como de concreto entre os anos 1958 e 1960 (Huang, 2004).

A ASTM (*American Society for Testing and Materials*) define a fadiga como o “processo progressivo e localizado de modificações estruturais permanentes ocorridas em um material submetido a condições que produzam tensões e deformações cíclicas que podem culminar em trincas ou fraturas após certo número de ciclos”. Materiais ou peças que são submetidas a carregamentos repetitivos apresentam danos microscópicos irreversíveis que com o passar do tempo se acumulam até acontecerem danos macroscópicos levando em última instância à ruptura ou falha. O processo ocorre de forma localizada, coincidindo com as regiões onde acontecem as concentrações de tensões e deformações (Shibata, 2002). São muitas as causas que levam à ruptura, sendo que resulta muito difícil isolar essas causas e considerar de forma matemática cada uma delas (Motta, 1991).

Na literatura correspondente a fadiga em materiais metálicos têm sido descritos três estágios para a aparição da falha: o primeiro corresponde ao início da trinca, devido a imperfeições (associadas a não homogeneidade dos materiais e à anisotropia dos mesmos); o segundo é a propagação da trinca, que envolve o maior tempo de vida da estrutura; finalmente acontecendo a ruptura catastrófica, devido ao crescimento da trinca (Milfort, 2005).

Pinto (1991) descreve a fadiga como um fenômeno de propagação das fissuras existentes no material e que pode ser prevista a partir de taxas de propagação. O crescimento da trinca se relaciona com as variações na sua geometria associada ao carregamento repetido, consequentemente com as variações nos esforços e tensões.

Motta (1991) descreve que o modo mais comum de ruptura de pavimentos no Brasil trata-se de rupturas por fadiga, sendo descrita esta como uma ruptura progressiva dada por um carregamento cíclico de intensidade suficiente para causar um trincamento inicial e com a capacidade de progredi-lo.

Os materiais aplicados nas camadas de pavimentos estão sujeitos a variações das cargas com o tempo, de forma aleatória, e por tanto difíceis de controlar em laboratório, obrigando a adoção de modelos simplificados.

Pinto (1991) faz uma descrição da evolução histórica das experiências no país iniciando como os ensaios triaxiais de Preussler (1978). Svenson (1980) realizou estudos de deformabilidade de solos argilosos compactados. Ensaio de compressão diametral de misturas asfálticas foram executados na COPPE por Pinto e Preussler (1980). Já os primeiros modelos de fadiga de materiais betuminosos por compressão diametral de carregamento repetido para revestimentos

betuminosos foram estabelecidos por Preussler, Pinto e Medina (1981) e o estudo da influência da temperatura na deformabilidade elástica do pavimento por Motta (1978).

Motta (1991) define os ensaios de fadiga como uma tentativa de medir a confiabilidade de um sistema testando os componentes simulando a vida real até a ocorrência da ruptura.

2.3.2. Tensão cíclica

A degradação por fadiga é dependente do tipo de tensão cíclica, para tanto é necessária uma correta descrição dos parâmetros que a definem. Cada ponto de um corpo de prova submetido a cargas cíclicas estará sujeito a uma tensão variável ao longo de um período de tempo. Dentre os parâmetros que ajudam a definir essa tensão estão a tensão máxima ($\sigma_{\text{máx}}$), a tensão mínima ($\sigma_{\text{mín}}$), o período (T), a forma de evolução no tempo, entre outros (Figura 2.17). Parâmetros como os valores das tensões máximas e mínimas afetam mais diretamente o comportamento a fadiga do material que a frequência e a forma da evolução temporal da tensão.

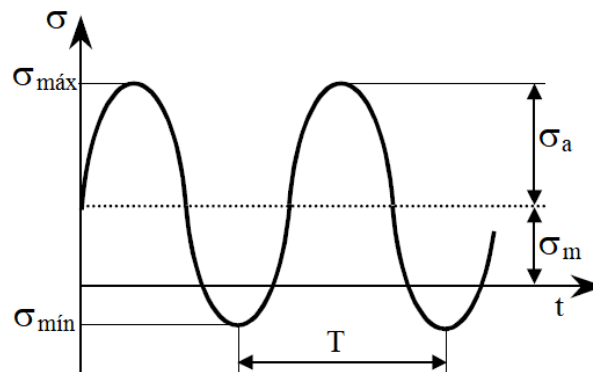


Figura 2.17: Carga cíclica típica de período T .

Sendeckyj (2001) descreve os parâmetros definidos a continuação e que definem o ciclo de carga em ensaios dinâmicos:

- Tensão média (σ_m): valor médio entre as tensões máximas e mínimas, definida como:

$$\sigma_m = (\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}})/2 \quad \text{Equação 2.01}$$

- Intervalo de tensões (R): diferença entre as tensões máximas e mínimas, definido como:

$$R = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n} \quad \text{Equa\c{c}\~{a}o 2.02}$$

- Amplitude das tens\~{o}es ou tens\~{a}o alternada (σ_a): metade do intervalo de tens\~{o}es, definida como:

$$\sigma_a = (\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n})/2 \quad \text{Equa\c{c}\~{a}o 2.03}$$

- \u00cdndice de revers\~{a}o ou rela\c{c}\~{a}o de amplitude de tens\~{o}es (IR): rela\c{c}\~{a}o entre a amplitude das tens\~{o}es m\u00ednima e m\u00e1xima, definido como:

$$IR = \sigma_{m\acute{i}n}/\sigma_{m\acute{a}x} \quad \text{Equa\c{c}\~{a}o 2.04}$$

- \u00cdndice de revers\~{a}o alternativo (Q): est\u00e1 dado pelo quociente entre a tens\~{a}o m\u00e9dia e a tens\~{a}o alternativa, definido como:

$$Q = \sigma_m/\sigma_a \quad \text{Equa\c{c}\~{a}o 2.05}$$

As tens\~{o}es c\u00edclicas podem ser classificadas como:

Alternadas: quando as tens\~{o}es mudam de sinal alternativamente. O exemplo mais simples \u00e9 quando as $\sigma_{m\acute{a}x}$ e $\sigma_{m\acute{i}n}$ apresentam o mesmo valor, mas de sinal contr\u00e1rio. Representa o ciclo chamado de alterno sim\u00e9trico: $\sigma_a = \sigma_{m\acute{a}x} = -\sigma_{m\acute{i}n}$; $IR = -1$.

Quando as tens\~{o}es apresentam diferente sinal e valor, o ciclo ser\u00e1 alternado assim\u00e9trico: $\sigma_m < \sigma_a$; $IR < 0$, $IR \neq -1$.

Intermitente ou repetido: os esfor\u00e7os sempre t\u00eam o mesmo sentido e seu valor varia de zero at\u00e9 um valor determinado, podendo ser negativo ou positivo, como exemplo para ciclos positivos: $\sigma_m = \sigma_a$; $IR = 0$.

Flutuantes ou pulsat\u00f3rias: quando a tens\~{a}o varia de um m\u00e1ximo a um m\u00ednimo, diferente de zero, dentro do mesmo sinal: $\sigma_m > \sigma_a$; $IR > 0$.

2.3.3. Curva de Wh\u00f6eler ou Curva S-N

As curvas de vida de fadiga para tens\~{o}es c\u00edclicas estacion\u00e1rias representadas em um plano S-N, tamb\u00e9m conhecidas como curvas de Wh\u00f6eler, podem ser obtidas experimentalmente submetendo amostras a diferentes n\u00edveis de tens\~{a}o c\u00edclica de amplitude constante. Essas curvas permitem conhecer o n\u00famero de ciclos requerido para que uma carga induzida rompa um corpo

de prova. As curvas permitem estabelecer relações entre a resistência à ruptura do material, ou porcentagens dela (S), com a vida esperada (N) em termos do número de ciclos. Os ensaios começam submetendo os corpos de prova a cargas cíclicas altas, contando o número de ciclos até a ruptura (N_t). O procedimento é repetido com outros corpos de prova diminuindo progressivamente a amplitude das tensões máximas.

Para alguns materiais, as curvas S-N apresentam o que é chamado de *endurance limit* ou limite de fadiga (pontos S_e e N_e). As cargas cíclicas que produzem tensões máximas inferiores a S_e não geram reduções da resistência do material. Em consequência se um material está exposto a tensões cíclicas inferiores a esse valor nunca romperá por fadiga. As curvas S-N normalmente são definidas em termos da tensão máxima e tomam como valor inicial a resistência quase-estática S_u . Trata-se de curvas decrescentes até chegar ao valor de S_e nos materiais que tem limite de fadiga ou até o valor nulo para os que não tem (Mayugo, 2003).

Experimentalmente é observada que a esperança de vida depende do nível de tensões e do IR, em outras palavras que depende da relação entre a tensão máxima e a mínima de cada ciclo. A degradação por fadiga é distinta para diferentes tensões médias embora o nível de tensões máximas seja o mesmo, como mostrado na Figura 2.18. Isto é chamado do efeito da tensão média na fadiga. Ou seja, que para diferentes tensões médias as curvas S-N serão diferentes, apesar das cargas máximas serem iguais. Quando a componente média seja pouco importante e quase todo o nível de tensão seja aportado por uma elevada componente alternada, é produzida uma rápida degradação do material. Ao contrário, quando a tensão cíclica ganha uma componente média maior, a degradação é mais lenta, sendo cada vez menor a variação de tensão ao longo do tempo (Habert, 2015).

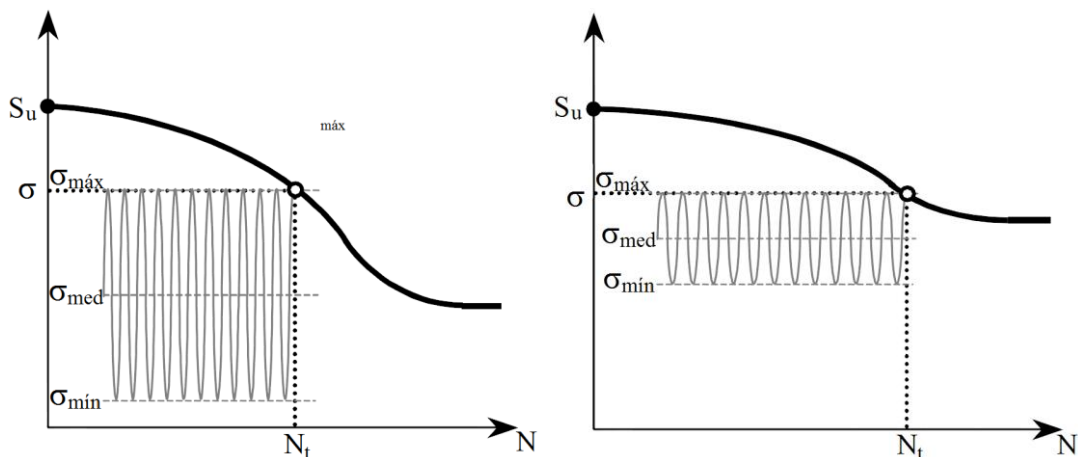


Figura 2.18: Influência da tensão média na vida de fadiga. Fonte: modificado de Mayugo (2003).

Para a caracterização do comportamento mecânico à fadiga de um material a informação apresentada em uma única curva S-N não é suficiente, sendo que nessa curva é representada uma única relação de tensões ($\sigma_{\text{máx}}$, $\sigma_{\text{mín}}$). Com a execução de ensaios com diversas configurações de tensões, e avaliadas essas configurações em termos do IR (Índice de Reversão) e do Q (Índice de reversão alternativo), é possível representar de forma geral o comportamento à fadiga de um material e esquematizado nas curvas apresentadas na Figura 2.19.

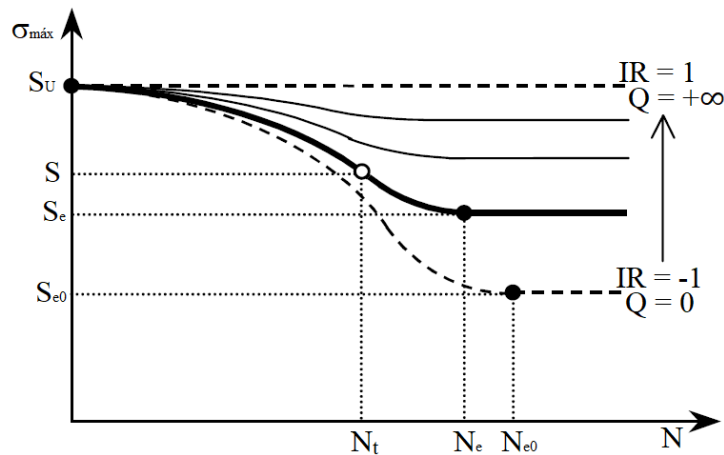


Figura 2.19: Curvas S-N em função do Índice de Reversão (IR).
Fonte: modificado de Mayugo (2003).

2.3.4. Tipos de carregamento

Os equipamentos de laboratório permitem a aplicação de carregamentos cíclicos nos modos tensão controlada ou deformação controlada, existindo também a possibilidade de carregamentos intermediários.

Tensão controlada: Neste modo de ensaio a tensão é mantida constante, mas a deformação cresce com o número de repetições de carga. Tem a característica adicional de ser mais conservador, sendo que a ruptura acontece mais rapidamente (Figura 2.20).

O critério de ruptura está associado à fratura da amostra. Mantida constante a tensão as deformações atingem um valor máximo até produzir-se o colapso do corpo de prova. A vida de fadiga corresponde ao número total de aplicações de carga (N) necessários para levar a amostra até a fratura completa.

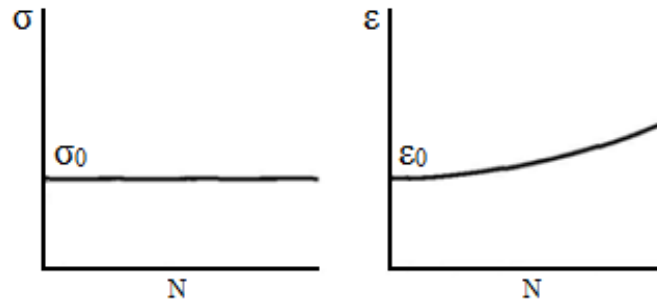


Figura 2.20: Evolução da tensão e da deformação no ensaio de fadiga no modo tensão controlada.

Deformação controlada: Nos ensaios de deformação controlada é mantida a deformação constante, mas a carga ou esforço vai decrescendo com o número de repetições. Nesse tipo de ensaio o critério de ruptura não é destruição da amostra. Para manter a deformação numa taxa fixa é necessário diminuir a carga aplicada (Figura 2.21). Dependendo do ponto de vista adotado a vida de fadiga corresponde ao número de aplicações de carga (N) que levam a uma redução do módulo de rigidez ou de resiliência em 50%, ou quando é atingida uma redução entre 40% ou 50% da carga inicial.

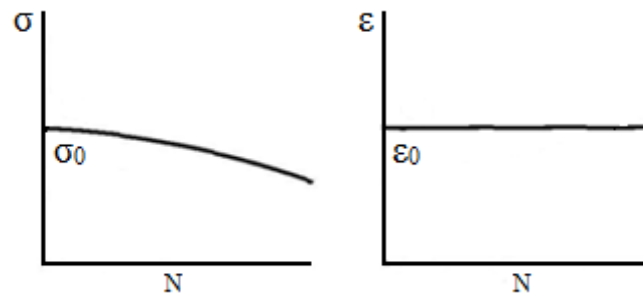


Figura 2.21: Evolução da tensão e da deformação no ensaio de fadiga no modo deformação controlada.

2.3.5. Modelos de fadiga

A definição do critério de ruptura é tão importante quanto o estudo do comportamento dos materiais, dado que seu entendimento e adequada definição dependem em grande parte os resultados e as conclusões de pesquisas.

Para ensaios de tensão controlada têm sido utilizados o critério de ruptura completa (Pinto, 1991); o limite de 90% na redução do módulo complexo E^* (Mamlouk e Sarofim, 1998) e o aumento do 100% da deformação inicial (Dijk, 1975; Rowe, 1993). Já para ensaios a deformação controlada, a redução em 40% da carga inicial aplicada (Pinto, 1991); 50% do

módulo de rigidez inicial por flexão (S_0) os da tensão inicial (Pronk e Hopman, 1990; Tayebali et al., 1993). Dependendo do critério adotado, corresponderá a curva de fadiga. No Brasil se tem adotado de forma usual o critério de ruptura total, também se considera ruptura, mesmo que esta não tenha se materializado, o fato do corpo de prova ter alcançado um determinado número de ciclos de carga, como, por exemplo 1 milhão.

Na interpretação do ensaio têm sido definidas várias relações entre a vida de fadiga, definida em termos do número de repetições (N) e as tensões aplicadas (σ), as deformações específicas registradas (ε), a energia dissipada (W ou DE), o módulo complexo do asfalto (E^*) e a rigidez inicial (S_0).

A forma convencional para expressar os resultados é o modelo descrito na Equação 2.06, embora também possam ser consideradas outras formas de correlacionar os estudos de fadiga. Para ensaios de tensão controlada ou de deformação controlada, considerando que são diferentes na sua execução, podem ser expressos com o mesmo tipo de relações:

$$N = K \left(\frac{1}{\sigma \text{ ou } \varepsilon} \right)^n \quad \text{Equação 2.06}$$

sendo:

N = vida de fadiga representada em número de solicitações da carga;

σ ; ε = tensão de tração ou deformação específica, respetivamente;

K , n = parâmetros do modelo de fadiga determinados experimentalmente.

Outro tipo de modelos de fadiga podem ser:

$$N = K \left(\frac{1}{\Delta\sigma \text{ ou } \Delta\varepsilon} \right)^n \quad \text{Equação 2.07}$$

Huang (2004) descreve que mesmo existindo diversidade de métodos para ensaios de fadiga, é preferível o ensaio de vigas de flexão (*beam test with third-point loading*), também chamado de ensaio quatro pontos, esse ensaio apresenta a vantagem de desenvolver flexão pura (momento fletor constante) no terço central da viga. Desta forma, descreve o autor, também é possível perceber as imperfeições nos corpos de prova refletidas nos resultados.

Para pavimentos de concreto, Huang (2004) descreve que o gráfico de resultados leva o número de repetições em escala logarítmica no eixo das ordenadas e a relação entre tensões aplicada e o módulo de ruptura do concreto no eixo das abscissas (σ/S_c). S_c é determinado seguindo o procedimento descrito na ASTM (1989a) “C78-84 *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete Using Simple Beam with Third Point Loading*”. É proposto o modelo a seguir:

$$\log N_f = 17,61 - 17,61 \left(\frac{\sigma}{S_c} \right) \quad \text{Equação 2.08}$$

sendo:

σ = esforço do ensaio;

S_c = módulo de ruptura do concreto.

Deve ser ressaltada a necessidade de se estabelecerem modelos de comportamento mecânico específicos para cada projeto em particular. Visando limitar a utilização de procedimentos genéricos ou o uso inapropriado de correlações é recomendável a realização dos ensaios respetivos, que levem em consideração as condições particulares do projeto como os materiais disponíveis, o nível das solicitações, considerações de clima e umidade, temperaturas de trabalho, entre outros.

Abordagem por energia dissipada

A utilização de conceitos de energia tem sido utilizada para o estabelecimento de modelos de predição de vida de fadiga tanto de materiais asfálticos quanto de materiais cimentados. De forma simplificada esses métodos assumem que toda a energia aplicada ao material é transformada em dano, pelo qual existe uma relação entre a energia dissipada e o número de ciclos que levam à ruptura (Xiao, 2006). A energia armazenada num material durante um carregamento corresponde à área abaixo da curva tensão-deformação e que pode ser calculada em termos da área interna do ciclo de histerese.

Os modelos ou funções de fadiga estabelecidos em termos da energia dissipada no início do ensaio (*Dissipated Energy – DE_i*) podem ser estimados com o mesmo tipo de relações que os modelos de fadiga estabelecidos em função da tensão ou das deformações. Sendo “a” e “DEE” (*Dissipated Energy Exponent*) as constantes de regressão.

$$N = a \left(\frac{1}{DE_i} \right)^{DDE} \quad \text{Equação 2.09}$$

2.3.6. Ensaio em vigas quatro pontos – procedimento de ensaio

Em pesquisas sobre o comportamento mecânico dos pavimentos e seus componentes, têm sido descritas uma variedade significativa de metodologias de ensaio para a determinação da vida de fadiga, entre os quais se podem: Tração na compressão diametral, Flexão em vigas, Flexão em amostras trapezoidais, *Wheel Tracking Test* (WTT), *Asphalt Pavement Analyzer* (APA). Da relação de ensaios apresentados anteriormente serão descritos a continuação os procedimentos mais comumente empregados no Brasil.

São utilizadas amostras de forma prismática com um comprimento de 38 cm, a seção proposta pela universidade de Berkeley na Califórnia de 3,8 cm de profundidade e largura (Deacon, 1965). Já o Instituto do Asfalto, visando à redução da variabilidade dos resultados, propôs uma seção de 7,6 cm para a profundidade e a largura (Kallas e Puzinauskas, 1972).

A deflexão dinâmica é medida com um LVDT colado no centro da amostra. Os esforços para os ensaios são selecionados de forma a conseguir falhas entre o ciclo 1.000 ao 2.000.000 de carga. São necessárias, normalmente, de 8 a 12 amostras para estabelecer relações de fadiga.

A Austroads, autoridade rodoviária da Austrália e Nova Zelândia, no seu Relatório Técnico AP-T101/08 “*The Development and Evaluation of Protocols for the Laboratory Characterisation of Cemented Materials*” apresenta no Apêndice D uma proposta metodológica para a execução de ensaios a flexão quatro pontos. Esse relatório técnico faz ênfase na realização de ensaios em materiais cimentados, como solo-cimento. Os corpos de prova são prismáticos, com faces lisas e uniformes, as dimensões típicas são apresentadas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6: Dimensões dos corpos de prova para ensaios a flexão quatro pontos segundo o AP-T101/08, unidade em [mm].

Vão (L)	Largura (w)	Altura (h _c)
300	100 ± 5	100 ± 5
450	100 ± 5	100 ± 5

2.3.7. Fadiga em ECC

Suthiwarapirak et al. (2004) salientaram que apesar de existirem muitos estudos que relatam a melhoria das propriedades mecânicas e os mecanismos de ruptura de ECC's sob condições de carga estática (Li e Wu 1992; Li 1993; Kanda e Li, 1999), têm havido poucos estudos sobre as propriedades e mecanismos de falha sob condições de carregamento à fadiga (Matsumoto, 1998). Essa realidade vem pouco a pouco sendo revertida.

Um método de ensaio a flexão quatro pontos que emprega vigas compostas foi inicialmente utilizado por Lim e Li (1997) e Kamada e Li (2000) para estudar compósitos com adição de fibras de Polietileno (PE). Essa configuração, que permite avaliar o processo de reflexão de fissuras e a delaminação, tanto para carga estática quanto para cargas dinâmicas, foi utilizada nas pesquisas desenvolvidas no LEME por Garcez (2009) e Righi (2015).

Zhan e Li (2001) realizam ensaios com recapeamentos em PVAECC, monitorando as deformações com LVDT no ponto médio dos corpos de prova. Executaram ensaios estáticos com uma taxa de deslocamento de 0,1 mm/min. Para os ensaios dinâmicos foi utilizada uma onda sinusoidal e frequência de 1 a 2 Hz. Duas configurações de recapeamento foram analisadas: ECC liso, que corresponde à aplicação do ECC de forma direta sobre o concreto e o ECC rugoso, conseguido pela aplicação de um jato de areia na superfície da base de concreto.

Na Figura 2.22 e Figura 2.23 são apresentados os resultados para os ensaios estáticos e dinâmicos, respectivamente. Pode ser visto que quando é utilizado o PVAECC como recapeamento em vigas compostas a capacidade de carga e a deformabilidade são significativamente maiores que em vigas compostas recapeadas com concreto convencional. A fadiga das vigas compostas com recapeamento em PVAECC não é influenciada pelas características da interface entre materiais. Mas a capacidade de deformação, representada na deflexão do ponto médio, sim é influenciada pelas propriedades da interface, tanto na carga estática quanto na carga dinâmica.

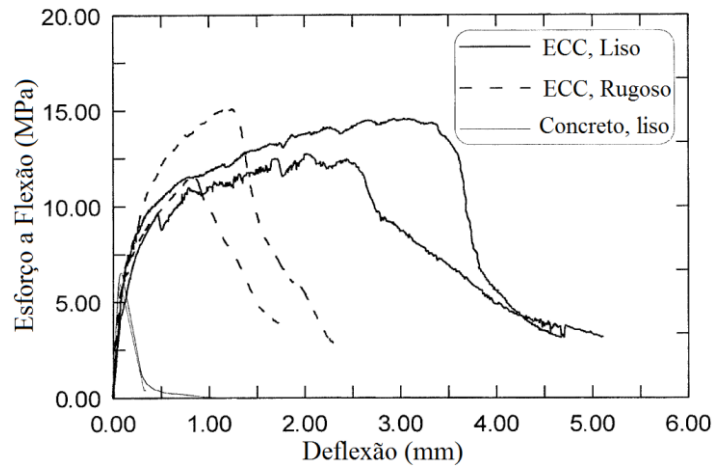


Figura 2.22: Diagrama de tensão de flexão versus deflexão no ponto médio para vigas compostas para carga estática. Fonte: Zhan e Li (2001).

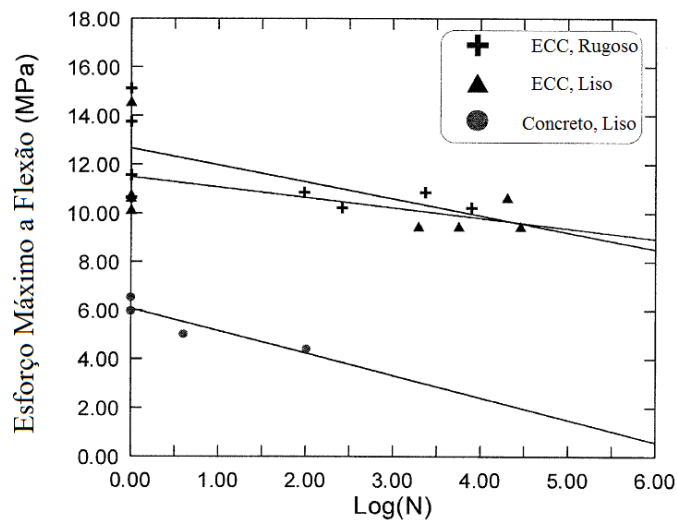


Figura 2.23: Esforço máximo a flexão e relações de vida de fadiga para diferentes materiais de viga composta e diferentes características da interface. Fonte: Zhan e Li (2001).

Leung et al. (2007) avaliaram o comportamento a fadiga de vigas compostas de concreto simples e um compósito tipo PVAECC, monitorando as deformações com LVDT no ponto médio dos corpos de prova. A taxa de deformação aplicada foi de 0,15 mm/min. Para os ensaios dinâmicos foi utilizada uma onda sinusoidal e uma frequência de 3 a 10 Hz. As vigas ensaiadas foram moldadas com uma camada de 25 e 50 mm de ECC, além de se ensaiarem vigas de referência elaboradas unicamente em concreto simples. Na Figura 2.24 é apresentada a configuração do ensaio.

Nos ensaios estáticos constatou-se que a aplicação de uma camada de ECC no lado tracionado de uma viga de concreto ensaiada a flexão gera um acréscimo na resistência à flexão, e que esse incremento melhora com o aumento na espessura da camada de ECC utilizada; sendo a elevada ductilidade e a capacidade de múltipla fissuração responsáveis por este ganho de resistência. Adicionalmente vigas compostas com ECC podem suportar esforços de fadiga sofrendo elevadas deflexões sem falhar. A ductilidade em carregamento cíclico também é melhorada. Os resultados da pesquisa revelaram o potencial das vigas compostas de concreto simples/ECC para aplicações práticas.



Figura 2.24: Configuração de ensaio a flexão quatro pontos para vigas compostas concreto simples/PVAECC. Fonte: Leung et al. (2007).

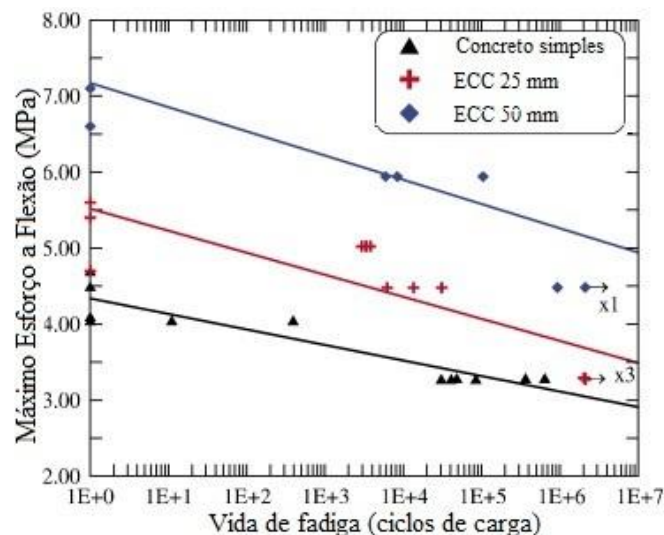


Figura 2.25: Esforço máximo a flexão e relações de vida de fadiga para diferentes espessuras de PVAECC. Fonte: Leung et al. (2007).

Suthiwarapirak et al. (2002) na Universidade de Tóquio executaram ensaios de flexão quatro pontos em PVAECC e dois tipos de PCM (*Polymer Cement Mortar* – argamassa comercial para

reparação estrutural constituída por cimento, polímero líquido e fibras poliméricas). Foram moldadas vigotas com dimensões 400x100x100 mm, que foram curadas por 2 meses em condições de temperatura e umidade controlada. Os ensaios estáticos foram realizados seguindo as indicações do (JCI-SF34), aplicando uma taxa de deformação de 0,02 mm/seg. Os ensaios de fadiga foram executados com uma onda de carga senoidal e frequência de carga de 8 Hz. As informações de deformação e deflexão foram medidas utilizando π gages e dois LVDT's.

Os resultados da resistência a flexão mostram como o compósito PAVECC apresenta o comportamento de *strain-hardening* e amplas deformações, justamente a capacidade de desenvolver altas deformações demonstram como o compósito apresenta um comportamento mais dúctil quando comparado com as argamassas poliméricas (PCM). É possível ver também na Figura 2.26 como as argamassas comerciais (PCM) apresentaram uma fratura frágil, além de capacidades de carga menores.

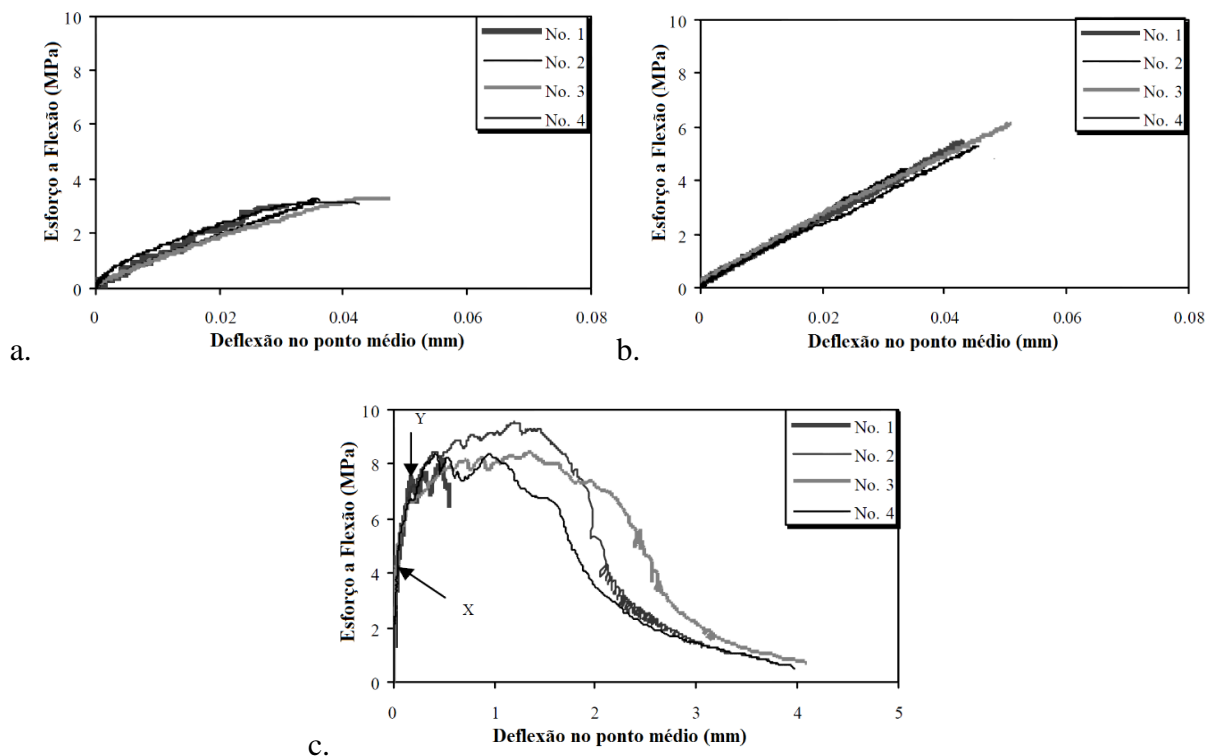


Figura 2.26: Resultados dos ensaios de resistência a flexão: diagrama tensão – deflexão no ponto médio: (a) PCMA, (b) PCMB, (c) PVAECC. Fonte: Suthiwarapirak et al. (2002).

Um segundo estudo foi realizado por Suthiwarapirak et al. (2004), comparando os resultados obtidos para PVAECC com ensaios estáticos e de fadiga de um PEECC e um FRC (*Fiber Reinforced Cement*). Os ensaios foram executados seguindo as mesmas características dos

ensaios em Suthiwarapirak et al. (2002). Os resultados para PEECC e FRC são apresentados na Figura 2.27, na qual pode ser visto que o PEECC de forma similar ao PVAECC desenvolveu comportamento *strain-hardening*, com resistências máximas da mesma ordem do PVAECC, as quais são superiores às alcançadas pelo FRC. Em termos da deflexão os PEECC apresentam deflexões maiores que o PVAECC, já o FRC apresenta um comportamento *strain-softening*. O FRC mostra altas deflexões no ponto médio do corpo de prova na falha com aplicações de carga baixas.

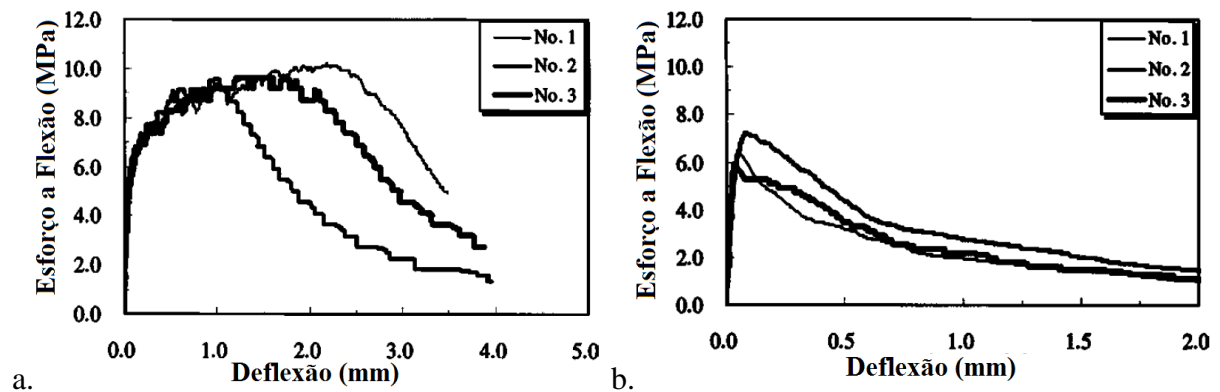


Figura 2.27: Resultados dos ensaios estáticos da resistência a flexão, tensão-deflexão no ponto médio: (a) PEECC, (b) FRC. Fonte: Suthiwarapirak et al. (2004).

As cargas aplicadas nos ensaios de fadiga são definidas em função da resistência máxima estática dos materiais a ensaiados, os níveis de tensão (S), como também são conhecidos, são calculados como uma fração ou porcentagem dessa resistência máxima.

Para os ensaios de fadiga realizados por Suthiwarapirak et al. (2002) foram definidos níveis de tensão do 90%, 80%, 70% e 60% para o PCMA, do 80%, 70%, 60% e 50% para o PCMB e do 90%, 85%, 70%, 60% e 50% para o PVAECC. Nos ensaios de fadiga relatados por Suthiwarapirak et al. (2004) foram reaproveitados os resultados do compósito PVAECC, mas foram definidos níveis de tensão do 90%, 80%, 70% e 60% para o FRC e do 90%, 80%, 70% e 60% para o compósito PEECC.

Resumindo os resultados das duas pesquisas, podem ser feitas as seguintes conclusões: Os ECC's apresentam um comportamento muito mais dúctil que o FRC e PCM's.

O mecanismo de ruptura dos PCM's é governado pelo início de uma fissura localizada. Os PCM's não podem resistir esforços de tração depois da fratura, sendo que a falha na fadiga

acontece de forma repentina; a sua vida de fadiga total é próxima ao número de ciclos para o aparecimento da primeira fissura.

Em contraste, nos ECC (PVAECC e PEECC) a falha por fadiga à flexão envolve tanto a iniciação das fissuras quanto a sua propagação. A vida total de fadiga resulta da soma dos ciclos correspondentes à iniciação das fissuras distribuídas, à distribuição dos danos ao interior das fissuras e à propagação de uma fissura localizada até a se alcançar a falha. Dos resultados, que podem ser vistos na Figura 2.28 e na Figura 2.29, é verificado que o comportamento *strain-hardening* prolonga a vida de fadiga dos ECC's. A relação de Tensão (e Nível de Tensão, S)-Número de ciclos dos ECC's mostram um comportamento bi-linear na escala semi-logarítmica, similar ao comportamento exibido por metais em ensaios de fadiga.

Observando-se os planos de fratura em amostras rompidas constatou-se que as fibras se encontram quebradas, e por esta razão acredita-se que possivelmente a ruptura das fibras governe a vida de fadiga dos ECC's. Além disso, a falha de fibras é similar à apresentada por materiais metálicos em ensaios a fadiga. Esta pode ser a razão para os ECC's apresentar esse comportamento bi-linear.

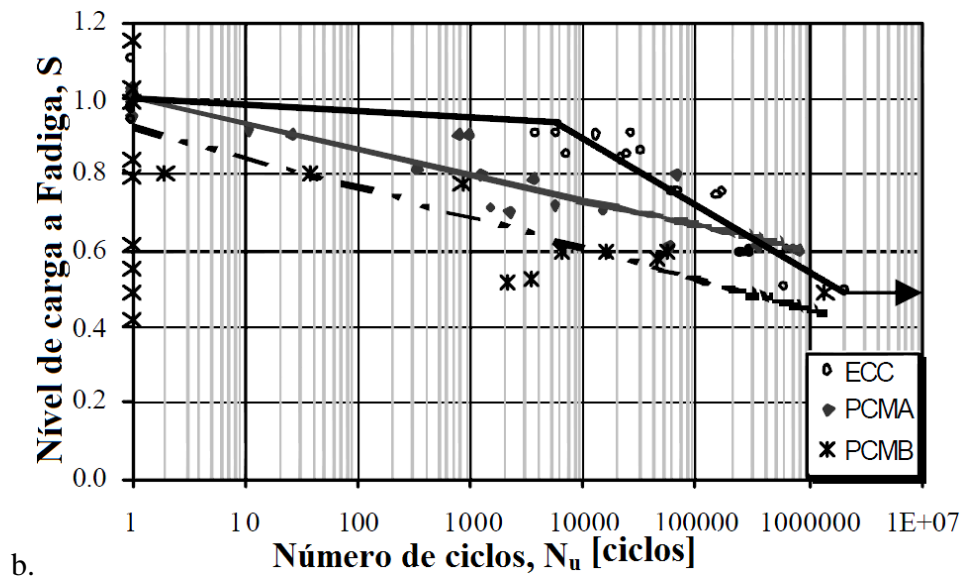
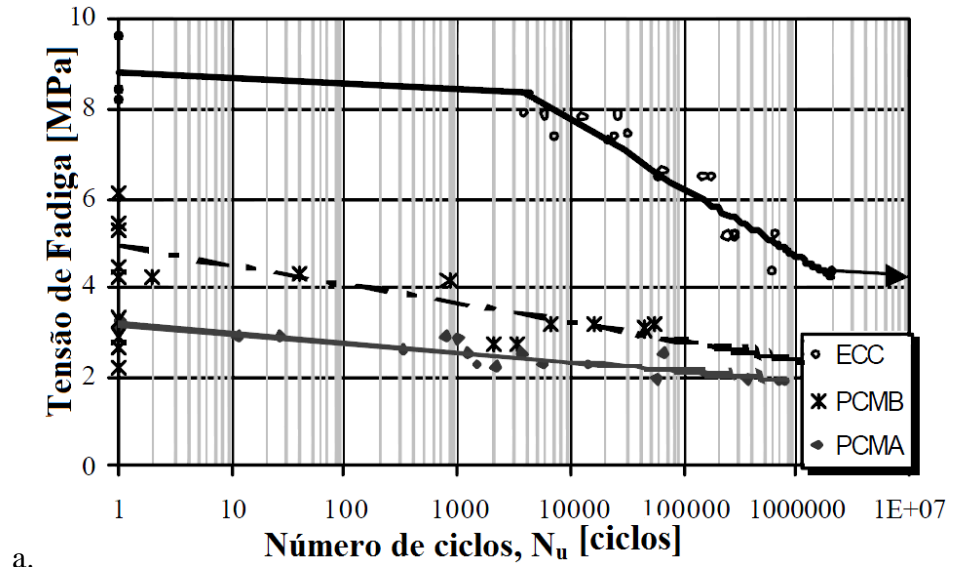


Figura 2.28: Relações da vida de fadiga com: (a) tensões, (b) nível de tensões. Fonte: Suthiwarapirak et al. (2002).

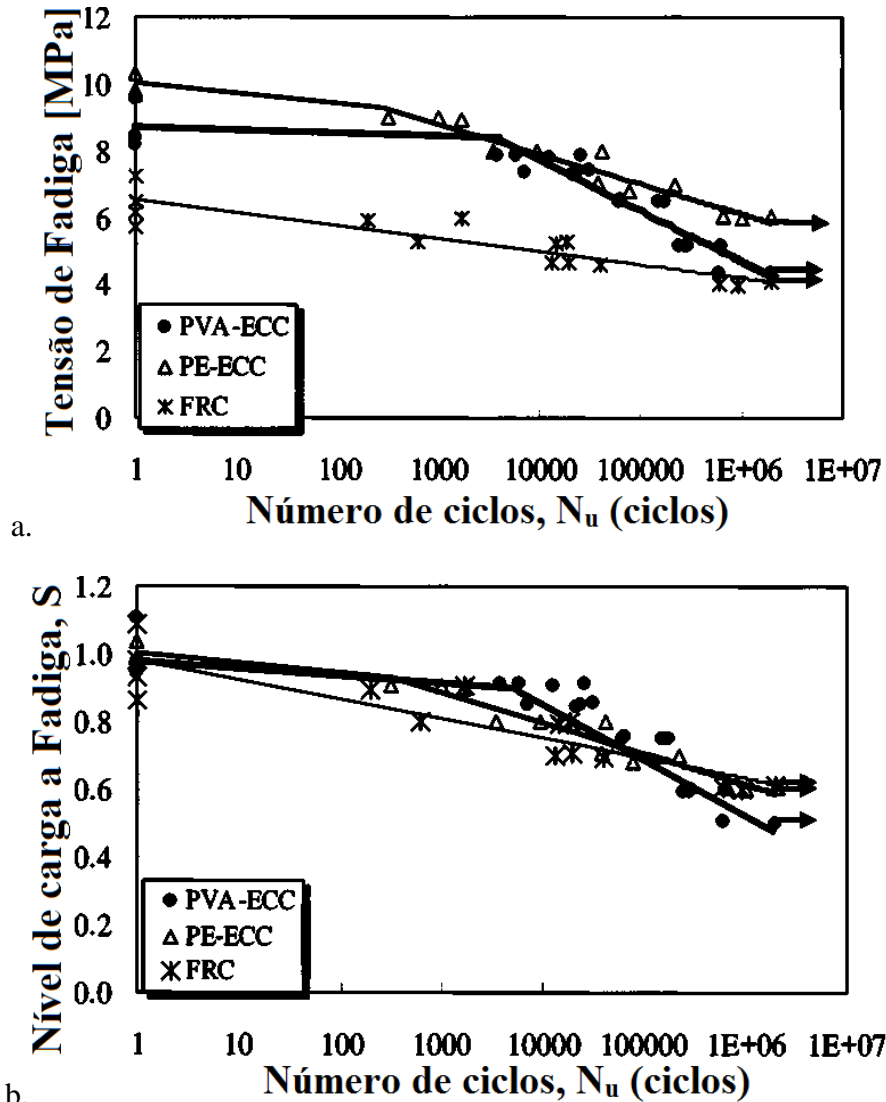


Figura 2.29: Relações da vida de fadiga com: (a) tensões, (b) nível de tensões. Fonte: Suthiwarapirak et al. (2004).

Os autores também comparam o número de fissuras com o nível de carga. Como pode ser visto na Figura 2.30 e Figura 2.31 o número de fissuras que os corpos de prova apresentam para elevados níveis de carga são maiores que para níveis de carga baixos. É possível concluir que a evolução do nível de dano está governada pelo número de fissuras. Os corpos de prova dos ensaios estáticos apresentam o maior número de fissuras, por consequentemente apresentam o maior nível de dano, esses dois fatores vão diminuir nos ensaios dinâmicos de forma proporcional à diminuição do nível de carga (S).

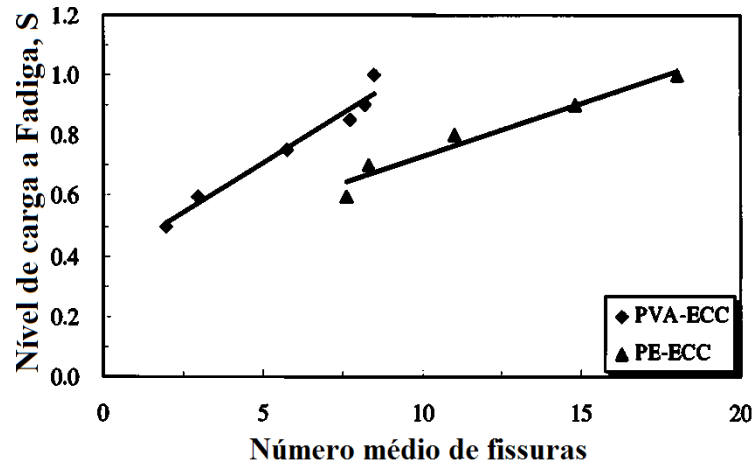


Figura 2.30: Número de fissuras-nível de carga, ECC's. Fonte: Suthiwarapirak et al. (2004).

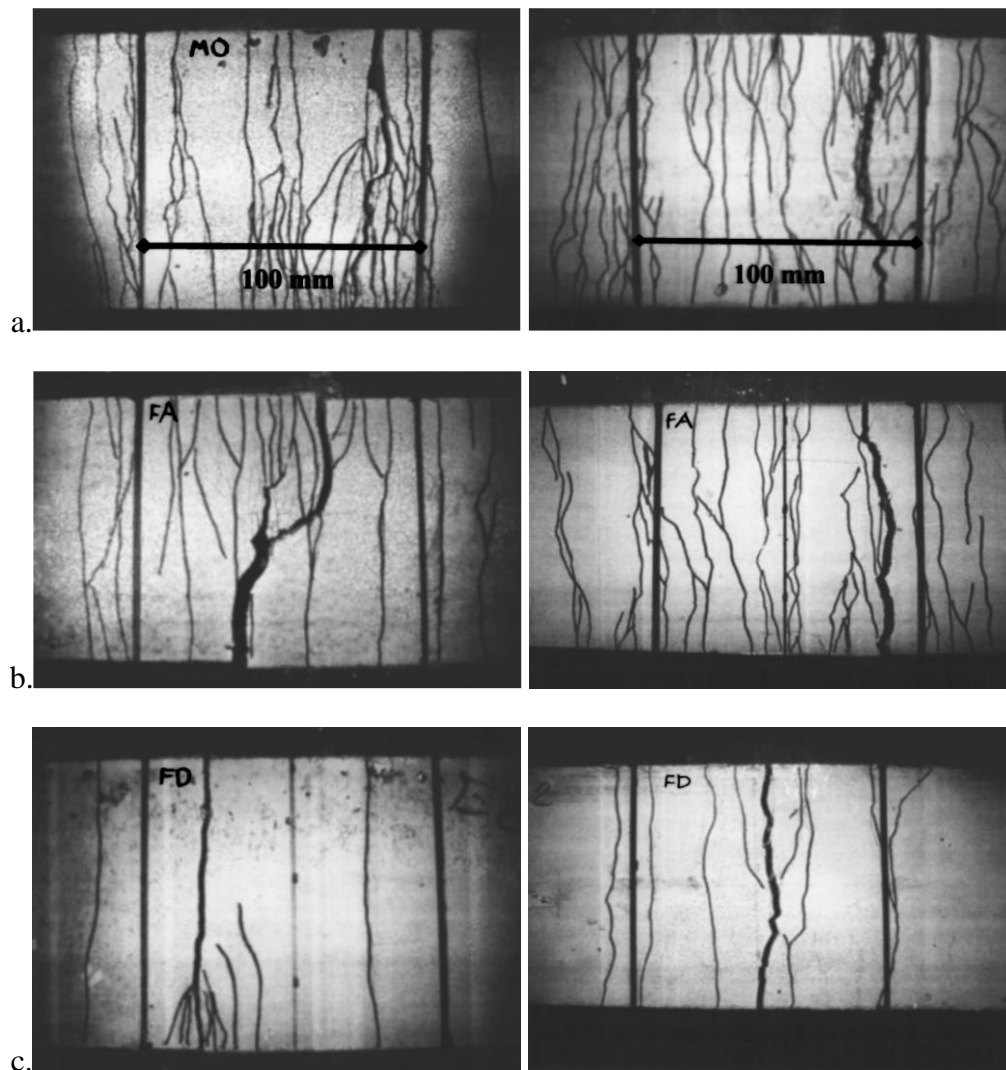


Figura 2.31: Padrão de fissuração na superfície inferior de vigas em PVAECC (esquerda) e PEECC (direita): (a) ensaio estático, (b) ensaio de fadiga para nível de carga de $S = 0,9$ e (c) ensaio de fadiga para nível de carga de $S = 0,6$. Fonte: Suthiwarapirak et al. (2004).

2.4. ENSAIOS ACELERADOS DE PAVIMENTOS

Num breve relato histórico, Huang (2004) descreve os três principais campos de testes da *Highway Research Board* sob condições controladas começaram com o *Maryland Road Test* que no ano de 1941 testou diferentes configurações de carga em uma seção de pavimento asfáltico com um comprimento de 1,76 km. O seguinte grande ensaio está representado pelo *WASHO Road Test* que iniciou operação no ano 1952 e que operando até o ano 1954 testou várias configurações geométricas de um revestimento asfáltico sometido a várias magnitudes de carga. O maior exemplo de testes de real grandeza está representado pelo *AASHO Road Test* que entre os anos de 1958 e 1960 testou 468 seções de pavimentos flexíveis e 368 seções de pavimentos rígidos nas que foram aplicadas um total de 1.114.000 ciclos de carga. Um dos principais aportes desse estudo foi o estabelecimento do PSI (*Present Serviceability Index*) como indicador das condições da superfície do pavimento.

Os resultados do *AASHO Road Test* são base de muitos procedimentos de dimensionamento de estruturas de pavimentos em todo o mundo. Porém, os resultados obtidos devem ser cuidadosamente interpretados. Deve ser levado em consideração que os resultados desse estudo se referem às condições climáticas e de constituição de materiais específicos das pistas de Illinois. Em todo o mundo vem sendo desenvolvidas pesquisas que permitam avaliar as condições locais e poder, dessa forma, aprimorar os procedimentos de dimensionamento de pavimentos, assim como avaliar o desempenho dos pavimentos levando em consideração as características dos materiais e os parâmetros climáticos locais.

De forma alternativa aos ensaios campos de teste existe a possibilidade de realizar ensaios de real grandeza com a utilização de equipamento do tipo simuladores de trânsito. Metcalf (1996) relata que a técnica dos ensaios acelerados com simuladores de trânsito foi utilizada pela primeira vez em 1909 pela *Public Works Department* na cidade de Detroit (Estados Unidos), tratava-se de uma estrutura circular que por meio de um braço rotatório simulava a passagem de um cavalo em um extremo e de uma carroça no outro. De forma quase paralela no ano 1912 foi construída no Reino Unido a *Teddington Testing Machine*, no *National Physical Laboratory* no Reino Unido. Constituído por oito braços radiais com rodas nas extremidades, aplicava cargas de até 13 kN e conseguia 80.000 passadas em 24 horas.

Os testes de pavimentos com ensaios de real grandeza, conhecidos em inglês como *Full-scale Accelerated Pavement Testing* (f-sAPT) (Steyn, 2012), representam um nexos vital entre a

avaliação em laboratório de materiais para pavimentação e o comportamento em campo desses materiais em estruturas de pavimentos. Os ensaios de real grandeza por muito tempo vêm oferecendo aos engenheiros de pavimentos o conhecimento para melhorar o entendimento tanto dos materiais quanto das estruturas de pavimentos, assim como seu comportamento sob cargas de tráfego e os efeitos médio ambientais.

Metcalf (1996) define os f-sAPT como a aplicação controlada de uma roda carregada, em ou acima do limite de carga legal sobre uma estrutura de pavimento existente ou projetada para determinar em um curto período de tempo a resposta ou o desempenho de um pavimento sob dano controlado ou acelerado. Os danos prematuros são alcançados pelo aumento das repetições de carga, modificando as condições de carga, impondo as condições climáticas, também pela utilização de estruturas delgadas com o conseguinte decréscimo da capacidade estrutural, ou pela combinação de alguns desses fatores. É necessário que o processo construtivo seja executado em uma escala real a fim de reproduzir as condições o mais próximo da realidade possível.

Para Saeed e Hall (2003) os f-sAPT são definidos como a aplicação de uma roda carregada sob pavimentos em serviço ou especialmente construídos para o ensaio, com a finalidade de determinar a resposta e o desempenho, em um curto período de tempo, do pavimento sob dano controlado e acelerado.

Hugo e Epps Martin (2004) definiram os ensaios acelerados de pavimentos como a aplicação controlada de uma roda carregada sobre estruturas de pavimentos com o propósito de simular em um pequeno período de tempo os efeitos de longo prazo para condições de cargas de serviço.

Os ensaios acelerados têm como objetivo avaliar seções de pavimentos sob uma variedade de condições ambientais e de carga para melhorar o conhecimento do potencial desempenho de estruturas de pavimento em uma ampla variedade de condições de operação, reproduzindo em um curto espaço de tempo a degradação que irá ocorrer em um pavimento ao longo de sua vida de serviço para o qual foi projetado (Steyn, 2012).

Os ensaios acelerados oferecem a oportunidade de reduzir o risco da utilização de novos materiais. O propósito dos ensaios acelerados é prover respostas que melhorem a relação custo-eficiência em termos da resposta e o desempenho de materiais de pavimentação e estruturas de pavimento. Harvey (2008) descreve os principais elementos a considerar pela utilização de ensaios acelerados para o projeto de pavimentos:

- identificar e ressaltar as deficiências nas práticas atuais;
- avaliar os materiais, desenhos, especificações de materiais ou processos construtivos antes da implementação a escala real;
- realizar comparações entre materiais, desenhos, especificações de materiais ou processos construtivos sob condições controladas;
- avaliar o impacto no desempenho dos pavimentos da mudança do tipo de veículos;
- desenvolver mecânica dos pavimentos e mecanismos de falha para validar e calibrar os modelos de análise e projeto de pavimentos.

Normalmente os simuladores de tráfego são utilizados para ensaiar pequenas seções de teste, se comparado com as dimensões das rodovias, mas as estruturas dos pavimentos são reproduzidas em escala real em termos das camadas e materiais, dessa forma é considerado o procedimento mais próximo da realidade na avaliação de projetos de pavimentos.

Os simuladores de tráfego são normalmente empregados em pequenas seções-testes, quando comparadas às dimensões das rodovias, mas com as estruturas em condições de escala real quanto aos materiais, sendo, portanto, considerado o procedimento mais fiel à realidade na elaboração de projetos de pavimentos.

Steyn (2012) documenta a existência de aproximadamente 40 projetos de simuladores de tráfego ao longo do mundo com projetos ativos ou recentemente desenvolvidos, dessa quantia a terceira parte encontram-se nos Estados Unidos. Uma parte significativa das pesquisas estão concentradas na pesquisa de materiais básicos de pavimentação, assim o trabalho de estruturas de pavimentos. O menor número de projetos está relacionado com a avaliação de trabalhos comerciais.

Alguns dos programas de pesquisa desenvolvidos para avaliar o desempenho de pavimento envolvendo a construção de pistas experimentais para ensaios acelerados correspondem com: *Caltrans/UCPRC HVS*, Campo de testes do *Minnesota Department of Transportation (MnROAD)*, o *ARRB Group (ARRB)* na Austrália, simulador circular de tráfego da Universidade do Sudeste (Nanjing-China), Pista Experimental de Madri (CEDEX). E na América Latina destaca-se o trabalho na Universidade de Costa Rica (Costa Rica), na Universidade de los Andes (Colômbia) e na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Brasil).

Os ensaios acelerados são ferramentas eficientes na previsão do desempenho de estruturas de pavimentos, mas deve ser considerado que uma grande maioria de equipamentos utilizam velocidades menores que as velocidades reais de tráfego entre os 4-20 km/h, embora no MnROAD seja possível alcançar velocidade entre 65-133 km/h e no NCAT *Pavement Test Track* velocidades superiores a 80 km/h.

Os simuladores podem ser do tipo circular ou lineal.

Os simuladores circulares são utilizados para ensaiar pistas de tipo circular, são compostos por braços que nas suas extremidades localizam as rodas, o sistema de carga pode ser por gravidade ou hidráulico, o movimento é gerado por motores elétricos ou elétrico-hidráulicos (Figura 2.32). Diferentes configurações de rodas podem ser utilizadas: simples, duplas e em tandem. Com eles é possível realizar ensaios com velocidades que vão dos 40 km/h no *Public Works Research Institute* (PWRI) no Japão até 100 km/h no Instituto Frances de Ciência e Tecnologia para o Transporte (*Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de L'Aménagement et des Réseaux – IFSTTAR*) (Steyn, 2012).

Os simuladores de tráfego lineares são os mais comuns para o desenvolvimento de pesquisas em trechos experimentais de pavimentos. Esses equipamentos podem ser fixos ou moveis, um exemplo de simulador de tráfego móvel é apresentado na Figura 2.33. Eles permitem diversas configurações de carga. Por médio de motores elétricos é acionado um sistema de cabos ou correntes que tracionam o sistema de rodagem. As cargas podem ser aplicadas em um ou dois sentidos. Usualmente as velocidades são do que as alcançadas pelos simuladores circulares, raramente ultrapassando os 20 km/h.



Figura 2.32: Simulador de tráfego circular do *Canterbury Accelerated Pavement Testing Indoor Facility (CAPTIF)* – Nova Zelândia. Fonte: Arnold et al. (2005).



Figura 2.33: Simulador de tráfego móvel, modelo HVS (*Heavy Vehicle Simulator*) do *Central Road Research Institute-Deli* (Índia).
Imagem disponível em
<http://www.crridom.gov.in/content/accelerated-pavement-testing-facility>.

2.5. REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS

Hall et al. (2001) definem a reabilitação de pavimentos como qualquer tipo de intervenção em um pavimento existente, executada procurando aumentar a capacidade funcional ou estrutural do pavimento, e dessa forma prolongando a sua vida útil de serviço. As reabilitações podem ter diferente complexidade e envolver técnicas diversas, dependendo da condição de conservação da estrutura sob intervenção. Por isto, frequentemente as mesmas são categorizadas, conforme sua natureza específica, em operações de restauração, recapeamentos, reciclagem e reconstrução que normalmente envolve um processo de remoção e substituição das camadas de concreto ou asfalto existentes.

Segundo Tighe et al. (2003), muitos países estão direcionando seus estudos para medidas de correção, manutenção e restauração de rodovias do que para novas construções, visando estratégias de melhor relação custo-benefício.

Em pavimentos sujeitos a tráfego moderado ou intenso, segundo Smith et al. (2002), o método mais utilizado na reabilitação corresponde com a construção de recapeamentos para aumentar a vida útil e a capacidade de serviço do pavimento, podendo ser funcional ou estrutural.

Segundo o *National Center for Concrete Pavement Technology* (CP Tech Center, 2014) os recapeamentos em concreto de cimento Portland podem ser utilizados como uma alternativa de reabilitação sobre todo tipo de pavimentos, sejam pavimentos de cimentos Portland, concreto asfáltico ou pavimentos compostos. Os recapeamentos podem ser projetados dependendo das

condições de tráfego existente, tráfego antecipado, orçamento disponível e vida útil desejada, normalmente com espessuras que variam dos 5 aos 25 cm.

Uma das razões para justificar a construção de um recapeamento é o fato desta ser uma técnica durável, desde que seja bem projetada e executada, e de custo adequado e flexível, considerando a variação de espessuras que podem ser empregadas. Além de não requerer a remoção do pavimento existente, os recapeamentos podem ser executados rapidamente, utilizando as mesmas técnicas empregadas na pavimentação convencional de concreto.

Um dos problemas comuns em pavimentos asfálticos é o surgimento de deformações visco-plásticas, que de acordo com Balbo et Rodolfo (1998) configuram-se em patologias funcionais do pavimento. A possibilidade de utilizar concretos de cimento Portland para a recuperação de pavimentos asfálticos está fundamentada no seu comportamento elástico, nos níveis de tensão geralmente empregados, estando livres da formação de trilhas de roda. Também deve ser considerado que as placas de concreto distribuem mais uniformemente as tensões e apresentar um comportamento à fadiga melhor definido experimentalmente (Balbo, 1999).

Existem duas formas básicas de caracterizar os recapeamentos de concreto, aderidos (*bonded*) e não aderidos (*unbonded*): Os recapeamentos aderidos são projetados para conformar um único conjunto estrutural com o pavimento existente, atuando de forma monolítica com ele. O recapeamento servirá para eliminar os danos superficiais, melhorando as condições de rodagem. Porém, o pavimento existente continuará a suportar grande parte do carregamento.

Os recapeamentos não aderidos são essencialmente um novo pavimento sobre uma base estabilizada (pavimento existente), e que aumenta a capacidade estrutural do sistema. Para tanto, uma adequada caracterização da capacidade de suporte do pavimento existente é necessária para que se possa efetuar o dimensionamento da nova camada.

A implementação dos recapeamentos aderidos é recomendada para ser implementada em pavimentos que estejam em condições estruturais boas ou regulares. Já os recapeamentos não aderidos podem ser executados sobre pavimentos em condições estruturais qualificadas como pobres ou incluso deteriorados, para sua conformação é necessário criar uma camada intermediária entre o novo pavimento e o pré-existente, assegurando assim um comportamento independente entre ambos, minimizando a possibilidade que as fissuras sejam refletidas no novo pavimento, dessa forma a principal função da camada de separação é prevenir a reflexão de fissuras.

Rodrigues (1991) afirma que a região trincada, sobre a qual é executado um recapeamento, é considerada como um ponto de fragilidade estrutural, além de ser o local de solicitação máxima, sendo propícia para o surgimento de trincas, fazendo com que as tensões máximas de tração sob o reforço ocorram neste ponto. As extremidades das trincas do pavimento existente são pontos de concentração de tensões, favorecendo o surgimento de uma nova trinca na camada de reforço, principalmente se houver uma boa aderência entre ambos materiais.

Na Figura 2.34 são apresentadas como exemplo as diferentes configurações possíveis da conformação de recapeamentos aderidos em concreto de cimento Portland sobre estruturas de pavimento deterioradas.

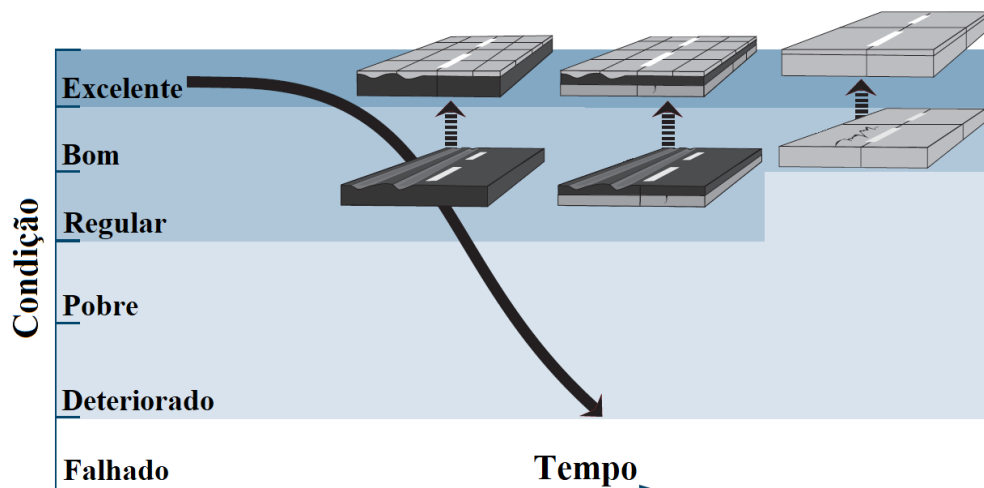


Figura 2.34: Exemplo da conformação de recapeamentos aderidos.

Fonte: modificado do CP Tech Center, 2014.

A aderência entre camadas controla o comportamento monolítico, sem aderência não há compatibilidade de deformações na interfase de materiais (recapeamento-pavimento existente), dessa forma as camadas se deformam de maneira independente, comportamento estrutural que descreve a existência de duas linhas neutras localizadas na altura média das camadas (Figura 2.35a). No comportamento monolítico as duas camadas passam a trabalhar juntas, com aderência plena o comportamento mecânico está governado por a existência de uma única linha neutra (Figura 2.35b) (Pereira, 2003).

Se tratando de materiais com diferentes módulos de elasticidade as solicitações devidas ao tráfego irão induzir tensões de cisalhamento na interface dos dois materiais. Se os esforços de cisalhamento induzidos são menores que a resistência ao cisalhamento devida à aderência, as camadas trabalharão como conjunto até que haja inversão do equilíbrio, que pode ser

condicionada pela fadiga das ligações rígidas promotoras de aderência, conforme Fortes (1999) presenciou em estruturas monolíticas de recapeamentos ultradelgados.

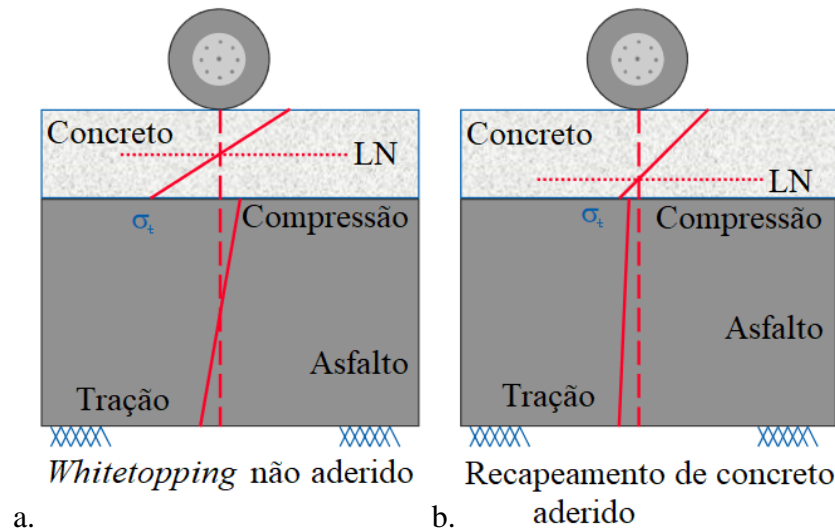


Figura 2.35: Comportamento mecânico da estrutura composta: (a) sem aderência, (b) com aderência. Fonte: modificado do CP Tech Center, 2014.

CP Tech Center (2014) define os recapeamentos sem aderência (*Unbonded Concrete Overlay*, anteriormente chamado de *Whitotopping*) como novas estruturas de pavimento para as que são assumidas a não aderência com a camada de pavimento existente, com espessuras dentre 100-280 mm. Trata-se de um recapeamento conformado para restaurar ou incrementar a capacidade estrutural do pavimento, eliminar os defeitos superficiais e melhorar as condições de rolamento, além de incrementar o albedo ou reflexão de calor superficial. As normas recomendadas para projetá-los são a *AASHTO Guide for Design of Pavement Structure* (AASHTO 1993, 1998) e o M-E PDG (AASHTO 2008).

Os espaçamentos das juntas construtivas são dimensionados em função da espessura da camada de recapeamento, assim para recapeamentos menores que 150 mm os espaçamentos serão iguais a 1,5 vezes 30,48 cm por cada 25 mm de espessura. Para recapeamentos maiores que 150 mm os espaçamentos serão de 2 vezes 30,48 por cada 25 mm, o máximo espaçamento entre juntas de construção é de 4,6 m. Os cortes das juntas de construção são realizados até uma profundidade de 1/3 da espessura do recapeamento.

Os recapeamentos com aderência (*Bonded Concrete Overlay*, anteriormente chamado de *Ultra-Thin Whitotopping* ou *Whitotopping* ultradelgado) são camadas relativamente delgadas, dentre 50-150 mm, aderidas à camada de pavimento existente, condição que garante o comportamento

mecânico como uma estrutura monolítica. Trata-se de um recapeamento conformado para fornecer capacidade de carga adicional, e dessa forma reduzir os esforços e as deformações, eliminar os defeitos superficiais e melhorar as condições de rolamento, além de incrementar o albedo ou reflexão de calor superficial. As normas recomendadas para projetá-los são a *Bonded Concrete Overlay on Asphalt (BCOA) Thickness Designer* (2012) ou a BCOA ME (Vandenbossche 2013).

O padrão de juntas recomendado corresponde com pequenos painéis quadrados da ordem de 0,9-2,4 m. Os cortes das juntas de construção são realizados até uma profundidade de 1/3 da espessura do recapeamento.

3. MÉTODO E MATERIAIS

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A presente pesquisa teve como finalidade analisar e contribuir com o entendimento das propriedades mecânicas do ECC-LEME (ECC com utilização de fibras de polipropileno e cinza de casca de arroz), focando no estudo da viabilidade do material para a construção de recapeamentos para restauração ou reforço estrutural. A pesquisa foi dividida em duas principais linhas de trabalho: uma destinada à determinação das propriedades mecânicas do material por ensaios monotônicos e cíclicos, a outra linha de trabalho destinada ao estudo a viabilidade de se executar o ECC nos traços considerados; a capacidade do material de distribuir tensões e sofrer microfissuração sem romper e a evolução das características de textura do compósito em ensaios em verdadeira grandeza.

O Capítulo inicia com o delineamento esquemático de pesquisa, visando alcançar o objetivo da investigação, e na sequência é apresentado um esquema do programa experimental. A seguir são definidas as variáveis, apresentados os materiais, os aspectos gerais do traço, assim como descrito o processo de mistura, as formas utilizadas e os procedimentos de cura utilizados.

Nas duas seções finais são apresentados os equipamentos utilizados e descritos os procedimentos de ensaios. Tem-se especial cuidado de descrever e justificar as modificações, tanto nos equipamentos quanto nos procedimentos laboratoriais que precisaram ser alterados.

3.2. DELINEAMENTOS DA PESQUISA

O delineamento da pesquisa foi elaborado levando em consideração a síntese da literatura consultada, sendo apresentado na Figura 3.1.

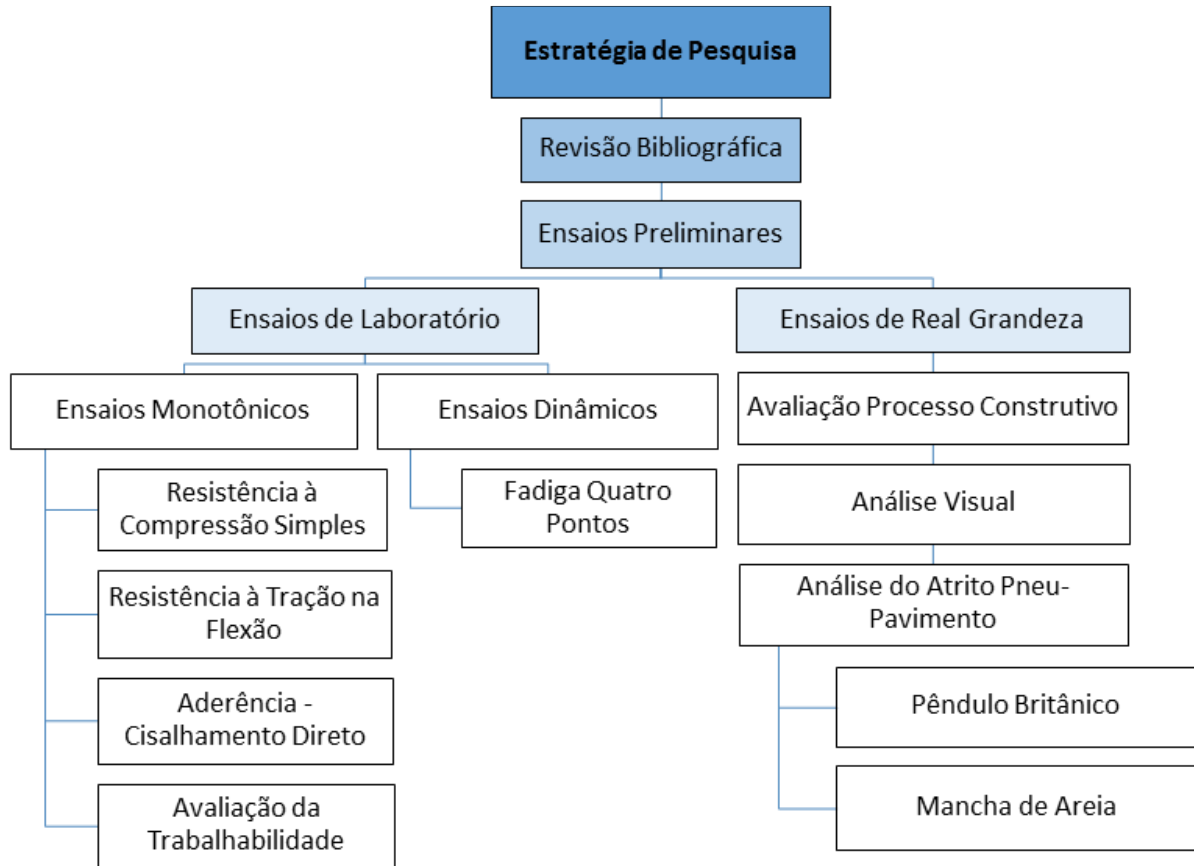


Figura 3.1: Estratégia de pesquisa.

Após a realização da pesquisa bibliográfica, foram realizados ensaios preliminares que consistiram na concretagem de uma placa de 1 m², com a finalidade de estudar o processo de concretagem e lançamento do ECC, assim como as propriedades de macro e microtextura. Também foram estudadas misturas alternativas que consistiram na substituição da areia fina do compósito por areia média; foram executados ensaios de Resistência a Tração na Flexão em vigas quatro pontos, e estudadas as propriedades de macro e microfissura.

Para os ensaios de laboratório foram avaliadas as propriedades mecânicas da Resistência a Compressão Simples; Resistência a Tração na Flexão em vigas de quatro pontos; sendo também estimada a aderência entre os compósitos e o concreto asfáltico através de ensaios de cisalhamento direto. Também foram executados ensaios de fadiga para a definição de modelos, bem como para estudar os processos de degradação dos materiais. Adicionalmente foi possível verificar a trabalhabilidade do ECC em estado fresco.

Para os ensaios em verdadeira grandeza foram construídos dois recapeamentos sobre uma das pistas experimentais existentes no LAPAV. Com esses recapeamentos foi possível definir, entre outros, as exigências construtivas, o comportamento do material na concretagem e lançamento

em estado fresco, assim como os processos de degradação e desgaste superficial ocasionados pela aplicação de cargas com o simulador de tráfego, que opera naquele laboratório desde 1996.

Compósitos como o ECC-LEME demandam elevadas quantidades de cimento para sua elaboração; é por isso que na presente pesquisa, e dando continuidade aos estudos realizados por Righi (2015) e Costa (2015), além de trabalhar com o chamado traço de referência (nomeado como ECC_{Ref}) foi testado um traço alternativo (nomeado como ECC_{CCA}). Na elaboração do traço de referência 100% do material aglutinante é cimento, já o traço alternativo é elaborado mediante a substituição de 30% do volume de cimento por cinzas de casca de arroz, moída por 4 horas no laboratório em um moinho de bolas cerâmicas. Objetivou-se verificar a viabilidade de aplicação desse traço alternativo, possibilitando a incorporação do resíduo e contribuindo para a redução do passivo ambiental, além de reduzir custos.

Foi avaliada a utilização de fibras de polipropileno, mantendo-se constantes o teor e a geometria. Com relação aos demais materiais utilizados na pesquisa, teve-se especial cuidado para que fossem disponíveis comercialmente, e não somente no ambiente de pesquisa, procurando assim se aproximar das práticas construtivas convencionais. A exceção está representada pela cinza de casca de arroz, material que não se consegue de forma comercial e que tem origem na queima sem controle de temperatura na produção de arroz parabolizado, que por ser um material alternativo de emprego ainda incipiente no Brasil, teve de ser gerada em laboratório.

3.3. DEFINIÇÃO DE VARIÁVEIS

Neste item são definidas as variáveis consideradas na pesquisa. Sem desconhecer que existem múltiplas possibilidades para a produção de um compósito, mas visando delimitar o trabalho proposto no presente estudo, o programa foi restrito a um tipo de fibra, um teor de fibra adicionado, um tipo de cimento e um tipo de areia. Dessa forma foi possível estabelecer comparações e dar seguimento às pesquisas já realizadas no LEME.

3.3.1. Variáveis independentes

- tipo de fibra: microfibras de polipropileno;
- geometria das fibras: 12 μ m de diâmetro e 10 mm de comprimento;
- teor de fibra: 2% em relação ao volume de compósito produzido;

- composição de ECC's: dois traços, sendo eles: traço de referência (ECC_{Ref}) e o traço alternativo conseguido com a substituição do 30% em volume do cimento por cinza de casca de arroz moída em laboratório por 4 horas em moinho de bolas (ECC_{CCA}).

3.3.2. Variáveis dependentes

Resistência à compressão simples, resistência à tração na flexão em viga quatro pontos, aderência entre ECC's e pavimento asfáltico através de ensaios de cisalhamento direto, avaliação da trabalhabilidade pelo ensaio de *flow table*, modelos de fadiga por ensaios dinâmicos, aparecimento e evolução de trincas nos recapeamentos, avaliação de defeitos na superfície de rodagem.

3.4. MATERIAIS

A seguir serão apresentados os materiais utilizados e descritas suas características fundamentais.

3.4.1. Cimento

O tipo de cimento adotado corresponde ao CP V-ARI (Figura 3.2), regulado pela norma NBR 5733 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991). Trata-se de um cimento de alta resistência em idades iniciais. Na Tabela 3.1 são descritas algumas das propriedades especificadas pela norma.

Tabela 3.1: Exigências físicas e mecânicas. Fonte: Norma NBR 5733.

Características e propriedades		Unidade	Limites
Finura – Área específica		m ² /kg	≥ 300
Tempo de início de pega		h	≥ 1
Resistência à compressão	1 dia	MPa	≥ 14
	3 dias	MPa	≥ 24
	7 dias	MPa	≥ 34



Figura 3.2: Cimento utilizado na pesquisa. Fonte: foto do autor.

3.4.2. Agregados

Na produção do ECC não se utiliza agregados graúdos, sendo recomendado unicamente o emprego de areias finas, como descrito por Garcez (2009). Sendo um dos objetivos da presente pesquisa a produção de ECC com materiais comerciais locais, foi definida a utilização de areia fina de Osório (município do litoral gaúcho, distante uns 100 km da capital do estado) comercializada por uma empresa de Porto Alegre (Figura 3.3), comprada ensacada e úmida. A análise granulométrica apresentada na Figura 3.4 foi realizada seguindo as recomendações do método de ensaio DNER-ME 083/98.

Para a produção dos corpos de prova destinados aos ensaios monotônicos, a areia foi seca à sombra no interior do LEME. Para a produção dos recapeamentos, tratando-se de volumes maiores, não foi possível secá-la; entretanto, levou-se em consideração a umidade da areia para o cálculo total da água na mistura. Casagrande (2005) determinou que a areia de Osório tem uma composição de $\text{SiO}_2 > 99\%$ e Righi (2015) relatou que a massa específica seca é $2,52 \text{ g/cm}^3$.



Figura 3.3: Areia fina seca utilizada na pesquisa. Fonte: foto do autor.

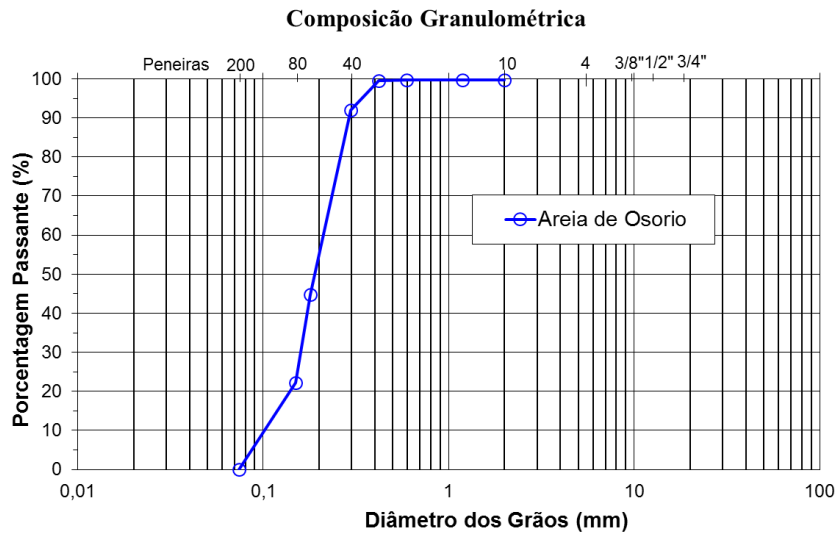


Figura 3.4: Curva granulométrica da areia de Osório.

Nos trabalhos preliminares da presente pesquisa foi utilizada areia média na produção de Misturas Alternativas (MA) de ECC (Figura 3.5). O objetivo era aumentar o atrito superficial e verificar as modificações nas propriedades mecânicas dessas misturas quando comparadas com os ECC produzidos unicamente com areia fina (resultados descritos no Capítulo 4). Na Figura 3.6 é apresentada a curva granulométrica da areia média utilizada.



Figura 3.5: Areia média para misturas alternativas. Fonte: foto do autor.

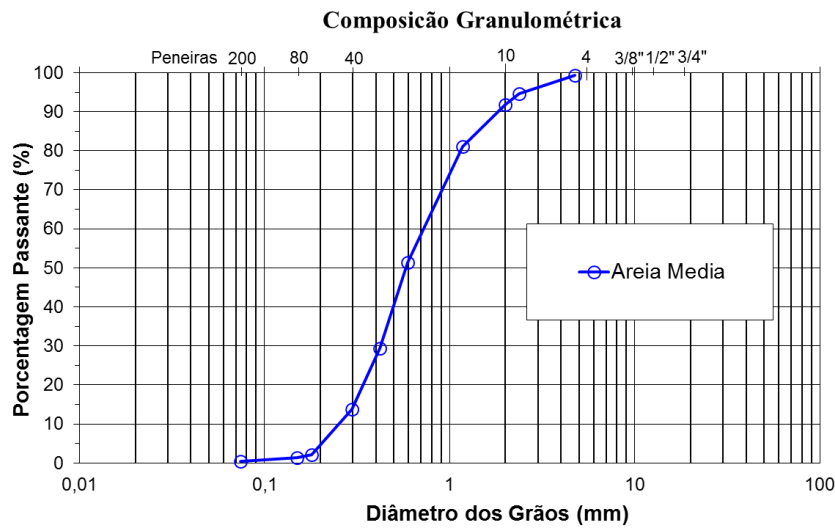


Figura 3.6: Curva granulométrica da areia média.

3.4.3. Fibra de Polipropileno

A fibra utilizada corresponde à microfibras de polipropileno de alta tenacidade, produzida e distribuída no Brasil pela Brasilit-Saint Gobain, com suas propriedades listadas na Tabela 3.2. As fibras individuais têm um comprimento de 10 mm e um diâmetro de 12 μm . Essa fibra corresponde com o tipo de geometria das fibras utilizadas nas pesquisas do LEME, segundo relatado por Garcez (2009), Righi (2015) e Costa (2015). O ECC tem uma adição de fibra correspondente ao 2% do volume total de compósito produzido.

Pela forma como a fibra é produzida em fábrica, de forma compactada, como se vê na Figura 3.7 (a), foi sugerido que elas fossem desaglomeradas antes de sua utilização, visando uma máxima dispersão na matriz cimentante. Para todas as concretagens executadas um jato de ar comprimido foi aplicado às fibras para sua desaglomeração. Na Figura 3.7 (b) pode ser vista uma imagem das fibras prontas para serem usadas em misturas.

Tabela 3.2: Propriedades das fibras de polipropileno de alta tenacidade fornecida pelo fabricante. Fonte Garcez (2009).

Propriedades	
Massa específica [g/cm^3]	0,91
Comprimento [mm]	10
Diâmetro [μm]	12
Resistência à tração [MPa]	850
Alongamento na ruptura [%]	21
Módulo de elasticidade [GPa]	6
Resistência a álcalis	Excelente

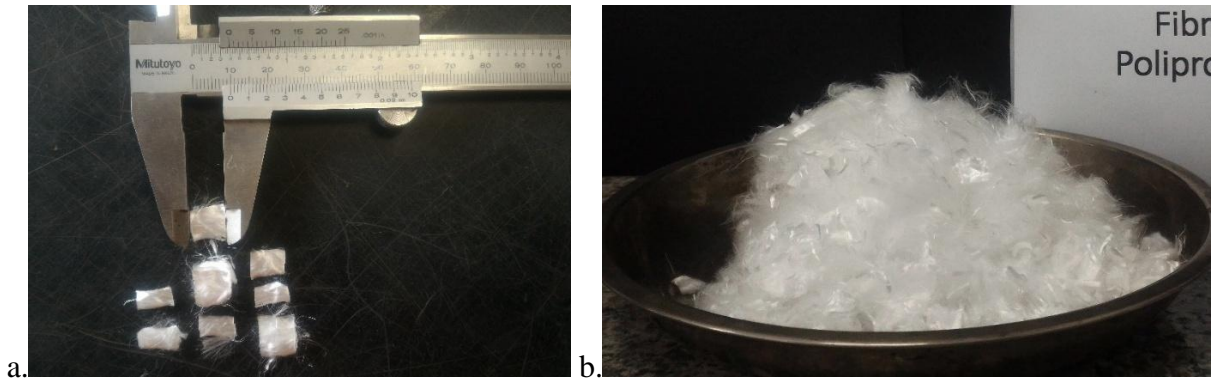


Figura 3.7: Fibra de polipropileno: (a) aspecto de fábrica; (b) utilizadas na pesquisa. Fonte: fotos do autor.

3.4.4. Aditivo

Com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade das misturas e facilitar a dispersão das fibras, sem ter que se elevar a relação água/cimento, foi utilizado um aditivo superplastificante para concreto de base policarboxílica, de terceira geração; especificamente o Tec-flow 8000 comercializado pela Grace.

3.4.5. Pozolana

De acordo com a norma NBR 12653 (ABNT, 2014), a pozolana é um material que por si só apresenta pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas que em presença de água, e em temperatura ambiente, reage com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades cimentícias.

Como poderá ser visto na descrição do traço utilizado, a produção do ECC requer elevados teores de cimento, aproximadamente 1000 kg por cada metro cúbico de compósito produzido. Desde o surgimento do ECC buscava-se uma estratégia que permitisse a redução do consumo de cimento. Várias pesquisas obtiveram resultados favoráveis com a utilização de cinzas volantes (Li et al., 2004; Wang e Li, 2007; Garcez, 2009; entre outros). Atualmente o mercado brasileiro visa à incorporação de materiais alternativos, coprodutos industriais e resíduos nos processos produtivos.

Uma proposta que vem sendo avaliada pelo LEME-UFRGS é a utilização de cinzas de casca de arroz (moídas) na produção de ECC. Assim, Righi (2015) e Costa (2015) trabalharam com cinzas de casca de arroz (CCA) proveniente da CAAL (Cooperativa Agroindustrial Alegrete

Ltda). Na presente pesquisa também foi utilizada CCA proveniente da CAAL (data de coleta 16/09/2015).

Na CAAL utilizam a queima da casca de arroz sem controle de temperatura⁴ como combustível no processo de parbolização do arroz, o resultado é uma grande quantidade de cinzas de casca de arroz que rotineiramente são dispostos em aterros, representando dessa forma um grande passivo ambiental.

Com a finalidade de aumentar a finura da cinza, e dessa forma aumentar a sua atividade pozolânica, foi reduzida a granulometria da cinza utilizado um moinho de bolas, com dimensões de 310 mm de altura e 275 mm de diâmetro (Figura 3.8), contendo 65 bolas com diâmetro de 38 mm, por um tempo de 4 horas, o material final é apresentado na Figura 3.9. O processo de moagem foi realizado com um quilo de cinza por vez.



Figura 3.8: Moinho de bolas usado para moer a CCA. Fonte: foto do autor.



Figura 3.9: Cinza de casca de arroz (CCA) moída por 4 horas, utilizada na pesquisa. Fonte: foto do autor.

⁴ Chandrasekhar et al. (2003) descrevem que a queima sem controle da casca de arroz fornece como produto a CCA rica em sílica, normalmente na forma cristalina. Quando submetida à queima controlada, a sílica pode ser amorfa, caracterizada por uma alta reatividade.

Com o objetivo de realizar a caracterização física da cinza de casca de arroz (CCA) utilizada na presente pesquisa foram realizados ensaios de distribuição granulométrica e Difração de Raio-X no Laboratório de Materiais Cerâmicos LACER-UFRGS.

A determinação da distribuição granulométrica foi realizada por difração a laser utilizando um granulômetro marca CILAS, modelo 1064. As amostras foram preparadas na forma de suspensão em água, sendo depois agitadas para a completa desaglomeração das partículas. O resultado mostra uma distribuição com concentração de partículas de 10 μm , com diâmetro médio das partículas de 12,83 μm , Figura 3.10.

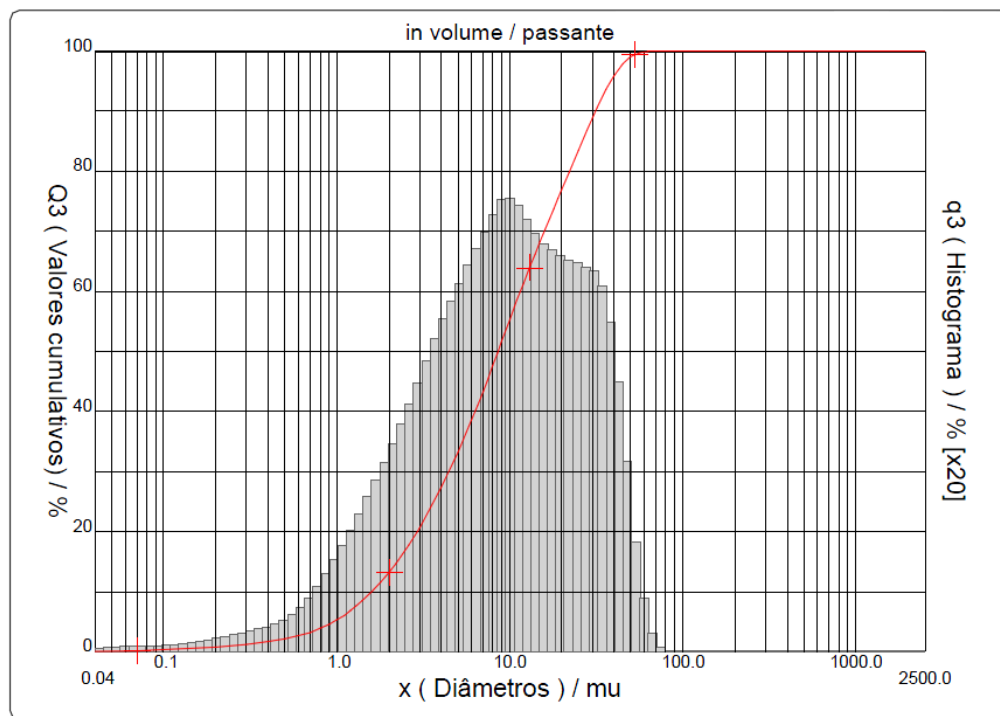


Figura 3.10: Distribuição granulométrica CCA 4h.

Para a Difração de Raios-X (DRX) foi utilizado um difratômetro da marca Siemens, modelo D5000, com intervalo de medida na faixa de 5° a 75° de 2θ e passo a cada 1 segundo de $0,05^\circ$. Esta técnica é indicada na determinação das fases cristalinas presentes nos materiais, ou seja, é utilizada para se obter informações sobre a estrutura, composição e estado de materiais policristalinos. Na Figura 3.11 são apresentados os resultados para uma amostra da cinza utilizada na pesquisa. A presença de picos cristalinos indica que o material analisado não é totalmente amorfo, apresentando alguma cristalinidade.

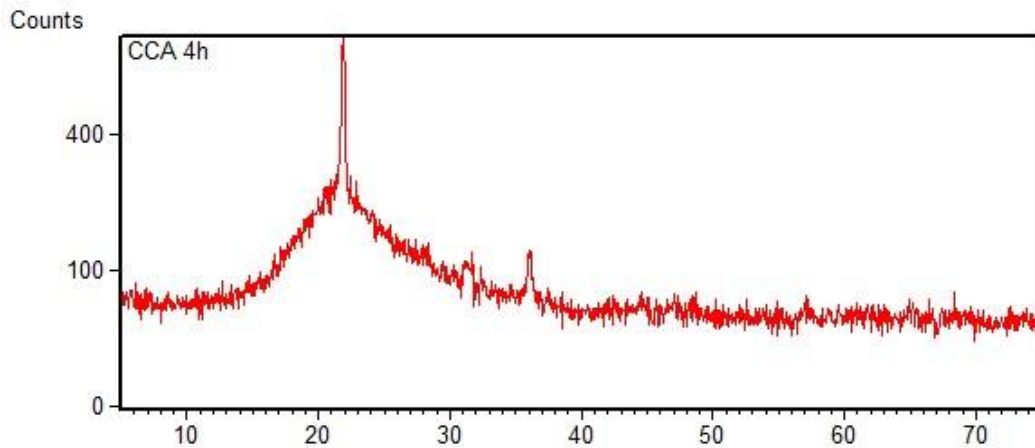


Figura 3.11: Resultado da Difração de Raio-X (DRX) da CCA 4h.

3.4.6. Água

Para os processos de mistura e cura será utilizada água potável disponível na rede local de abastecimento da cidade de Porto Alegre.

3.5. TRAÇO, MISTURA E FÔRMAS

3.5.1. Traços de ECC utilizados

A dosagem dos traços utilizados nesta pesquisa foi realizada com base nos trabalhos desenvolvidos no LEME (Righi, 2015; Costa, 2015 e Garcez, 2009). A relação água/cimento de 0,34 foi mantida. Os demais materiais são dosados em termos do volume total de compósito produzido: 30% de areia, 2% de fibra de polipropileno e 0,6% de aditivo plastificante. O consumo de materiais por metro cúbico para o traço de Referência (ECC_{Ref}) é apresentado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Consumo de materiais na produção de cada m³ de ECC, traço Referência.

Material	kg
Cimento tipo CP V	1016
Areia	762
Água	346
Fibra PP	6,1
Aditivo	18,3

Para tornar o ECC economicamente mais atraente, e também como uma estratégia para produzir materiais mais sustentáveis e, conseqüentemente, mais amigáveis com o meio ambiente, foi

estudado um traço alternativo, onde se realizou a substituição de 30% do volume de cimento por cinza de casca de arroz sem controle de queima (moída por 4 horas). Na Tabela 3.4 é apresentado o consumo de materiais em quilogramas por cada metro cúbico produzido para o traço com utilização de CCA (ECC_{CCA}).

Tabela 3.4: Consumo de materiais na produção de cada m³ de ECC, traço 30% de CCA.

Material	kg
Cimento tipo CP V	711
CCA	199
Areia	762
Água	346
Fibra PP	6,1
Aditivo	18,3

3.5.2. Processo de mistura

Em geral o processo de mistura seguiu as indicações dadas por Garcez (2009) com a seguinte ordem: inicia-se a mistura com os materiais secos, cimento e areia (e cinza quando pertinente), até se conseguir uma mistura uniforme, por aproximadamente de 3 a 5 minutos (Figura 3.12); continua-se com a adição de água e do aditivo plastificante, e mistura-se por 3 a 4 minutos. Neste estágio a pasta obtida é bastante fluida (Figura 3.13). As fibras são adicionadas de forma gradual e contínua, e após o término da adição das fibras a rotação deve continuar por 3 a 5 minutos para obter a completa dispersão das mesmas (Figura 3.14).

Como neste trabalho foi realizada a primeira utilização do ECC em campo, isto é, fora do ambiente de laboratório, várias questões relativas ao processo foram resolvidas quando da realização das misturas.



Figura 3.12: Processo de mistura, materiais secos. Fonte: fotos do autor.



Figura 3.13: Processo de mistura, água e aditivo químico. Fonte: fotos do autor.



Figura 3.14: Processo de mistura, adição da fibra. Fonte: fotos do autor.

3.5.3. Moldagem dos corpos de prova para ensaios laboratoriais

A concretagem das vigas para ensaios monotônicos, de fadiga e de aderência, além dos cilindros para ensaios de compressão simples foi feita no LEME utilizando betoneiras de tombo. Todos os corpos de prova foram compactados com o uso da mesa vibratória apresentada na Figura 3.15 por um tempo dentre 1 a 2 minutos.



Figura 3.15: Mesa vibratória utilizada na concretagem dos corpos de prova. Fonte: foto do autor.

Para a moldagem das vigas foram utilizadas fôrmas de madeira com laterais removíveis, que receberam a aplicação de desmoldante do tipo óleo mineral antes da concretagem, para facilitar extração das vigas.

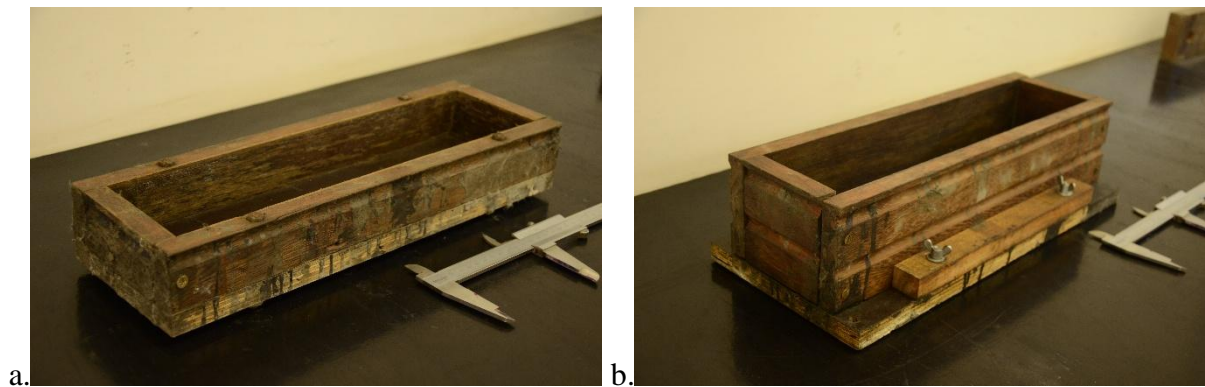


Figura 3.16: Formas para a concretagem de vigas dos ensaios estáticos e dinâmicos. (a) 50x100x400 mm; (b) 100x100x400 mm. Fonte: fotos do autor.

As vigas para os ensaios de aderência foram executadas pela concretagem de uma camada de 50 mm de ECC sobre placas de concreto asfáltico extraídas das pistas do LAPAV; tendo-se ensaiados recapamentos de ECC_{Ref}, ECC_{CCA} e concreto convencional. A fôrma tinha

dimensões de 100x200x500 mm. Na Figura 3.17 é apresentada a fôrma e um exemplo de concretagem.



Figura 3.17: Forma e exemplo de concretagem para ensaios de aderência. Fonte: fotos do autor.

3.5.4. Cura

Garantir uma cura adequada é fundamental para o bom desempenho de materiais que, como o ECC, apresentam altos consumos de cimento.

Uma vez terminadas as concretagens todos os elementos ficaram as primeiras 24 horas nas fôrmas. Uma vez desformadas as vigas e os cilindros foram submersas em água, permanecendo submersos por 28 dias. Uma vez terminada a cura os corpos de prova ficaram expostos ao ambiente do laboratório por pelo menos 2 dias antes da realização dos ensaios.

As vigas destinadas aos ensaios cíclicos ficaram submersas em água por 28 dias para elementos de ECC_{Ref} e concreto, já os elementos confeccionados com ECC_{CCA} permaneceram em cura por 60 dias. Uma vez retiradas da cura, todas as vigas permaneceram armazenadas no laboratório (LEME e LAPAV) até a data dos ensaios. Os tempos de cura para as vigas destinadas aos ensaios de aderência cumpriram os mesmos tempos que as vigas dos ensaios cíclicos.

3.6. EQUIPAMENTOS

A presente pesquisa faz parte de uma parceria entre o LAPAV e o LEME, laboratórios da Escola de Engenharia da UFRGS. Sendo assim a maioria dos equipamentos utilizados nela pertencem a um destes dois laboratórios.

3.6.1. Prensa LAPOL

Na execução dos ensaios preliminares, nos quais foram ensaiadas vigas de ECC com traços alternativos, foi utilizada a prensa do LAPOL (Laboratório de Materiais Poliméricos). Os traços alternativos consistiam na troca em porcentagem da areia fina por areia média (resultados apresentados no Capítulo 4). Foi utilizada uma prensa com capacidade de 50 kN, com uma velocidade de carga de 1,2 mm/min.

3.6.2. Prensa Shimadzu - LEME

A execução dos ensaios monotônicos foi realizada utilizando a prensa Shimadzu modelo UFH 2000 kN do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da UFRGS, com a qual é possível aplicar uma velocidade de deslocamento constante. Nesta prensa foram realizados ensaios de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e ensaios de aderência por cisalhamento direto.

3.6.3. Pórtico de carregamento

Para a execução de ensaios de tração na flexão em quatro pontos foi desenvolvido por Castañeda (2016) um suporte que teve como referência os esquemas apresentados na NCHRP (2014), na *Austroroads* (2008, 2012), na JCI-SF-1984 e na ASTM C1609/C1609M-12. Na presente pesquisa foi utilizado o suporte tanto para os ensaios monotônicos de tração como para os ensaios dinâmicos, em vigas quatro pontos.

O suporte para fixação dos LVDT's foi desenvolvido pelo autor levando em consideração as adequações que considerou necessárias para as condições dos ensaios da presente pesquisa, explicadas no item 3.6.3.2.

3.6.3.1. Suporte para vigas quatro pontos

No desenvolvimento da sua pesquisa, para a execução de ensaios dinâmicos, Castañeda (2016) modificou o equipamento que o LAPAV utiliza para ensaios de Módulo de Resiliência por compressão Diametral (MRD) e de Fadiga por Compressão Diametral (FCD), ensaios que usualmente utilizam corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 100 mm por 40 a 60 mm de altura.

As modificações principais consistiram na retirada da câmara térmica e a usinagem dos suportes esquematizados na Figura 3.18. Os suportes, usinados em aço de alta resistência, alternam

esferas e cilindros como elementos de apoio. Foram utilizados roletes livres, além de entalhes, para garantir um apoio simples de primeira ordem, eliminando possíveis componentes axiais. Para descartar a excentricidade nos pulsos de carga é colocada uma esfera no topo da peça superior.

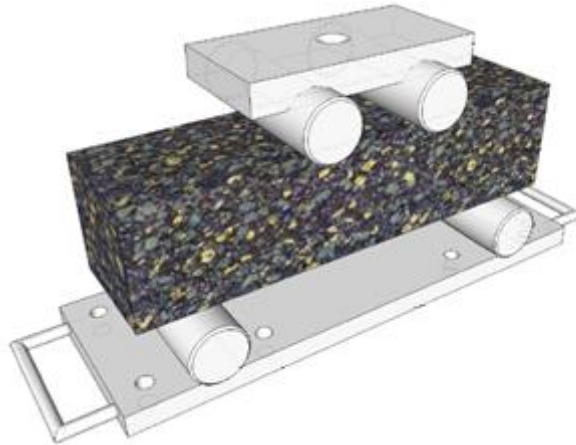


Figura 3.18: Modelo 3D: Suporte quatro pontos. Fonte: Castañeda (2016).

Na Figura 3.19 são apresentados os componentes dos suportes. A separação entre os roletes inferiores corresponde a 300 mm, já os roletes superiores têm uma separação de 100 mm entre eles, projetados para aplicar a carga no terço médio do corpo de prova.

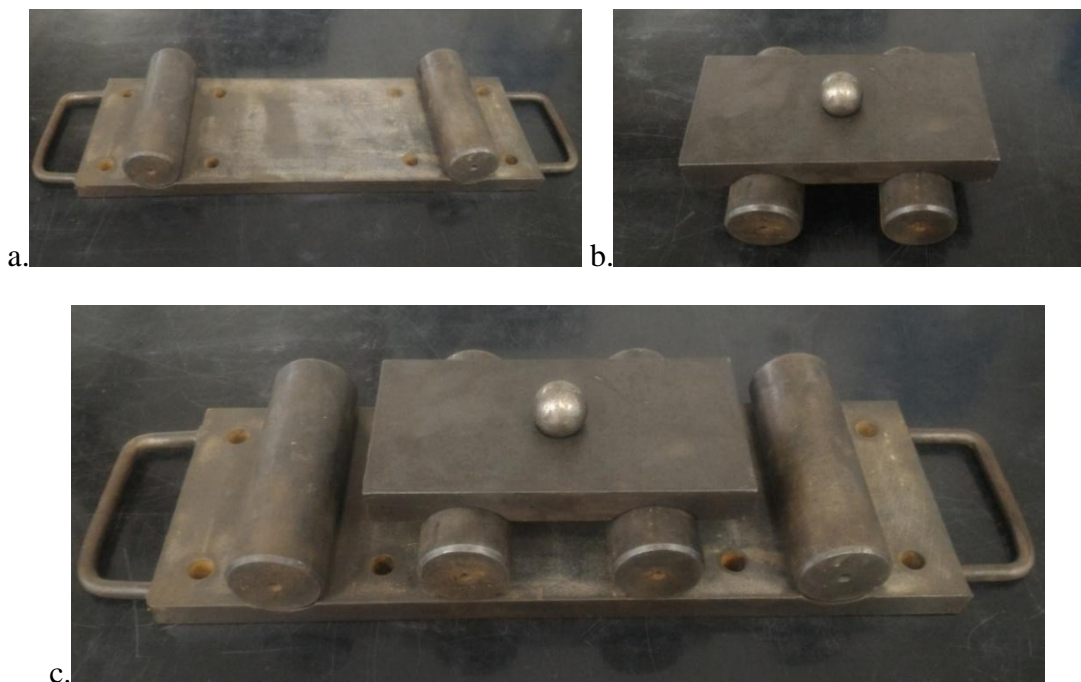


Figura 3.19: Suporte para ensaios à flexão quatro pontos. (a) suporte inferior; (b) aplicador de carga; (c) elementos juntos. Fonte: fotos do autor.

3.6.3.2. Sistema de posicionamento dos LVDT's

Tomando como referência as experiências do LEME, e mais especificamente a observação direta do trabalho de Castañeda (2016), na medição dos deslocamentos em ensaios de flexão em viga quatro pontos, o autor projetou um pórtico para a fixação dos LVDT's, mostrado na Figura 3.20. Ele é utilizado para medir o deslocamento no centro do vão, sendo fixado na linha neutra do corpo de prova, de seção retangular e usinado em alumínio, com parafusos de aço. Suas dimensões foram projetadas para corpos de prova de 400 mm de comprimento por 100 mm de largura.



Figura 3.20: Pórtico para posicionamento dos LVDT's. Fonte: foto do autor.

Na Figura 3.21 são apresentados detalhes do pórtico, mostrando-se (a) a ponta do parafuso que irá segurar o corpo de prova e (b) o elemento que segura o LVDT no suporte.

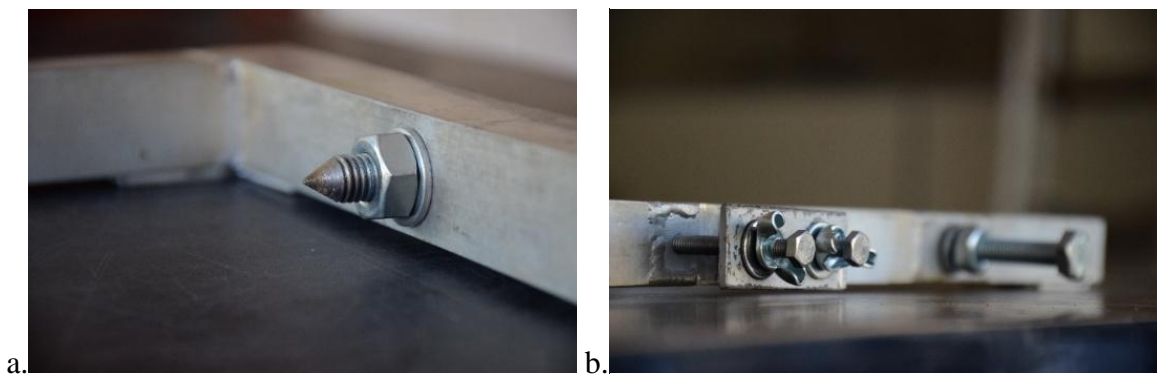


Figura 3.21: (a) detalhe parafuso que fixa o pórtico no corpo de prova; (b) detalhe suporte dos LVDT's. Fonte: fotos do autor.

Este tipo de suporte tem como objetivo evitar que as deflexões medidas sejam afetadas por giros ou efeitos de assentamento, causados pelo suporte de aplicação de carga. Esse elemento permite a fixação de dois LVDT's, um de cada lado.

Já na parte superior dos corpos de prova foi fixada uma chapa de aço, mostrada na Figura 3.22, elaborada com a função de servir como elemento de referência para os LVDT's na medição das deflexões durante a aplicação de carga.



Figura 3.22: Chapa de aço para referência dos LVDT's na medição das deflexões. Fonte: foto do autor.

3.6.4. Equipamento de fadiga

As adaptações realizadas no equipamento para ensaios dinâmicos em corpos de prova cilíndricos permitem a execução de ensaios de Módulo de Resiliência à Flexão (MRF) e Fadiga Quatro Pontos (FQP).

Na Figura 3.23 é apresentada uma visão geral do equipamento, onde é possível identificar do lado direito, o computador controlador e o console de ensaio e do lado esquerdo o sistema de carregamento.

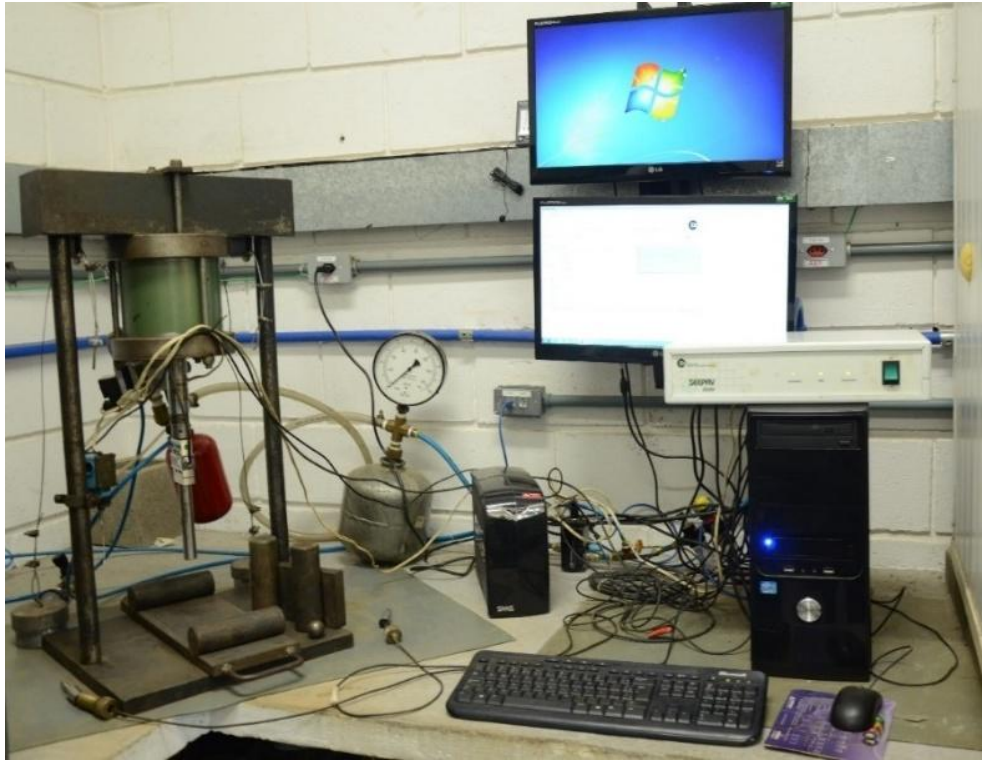


Figura 3.23: Vista geral do equipamento para ensaios de fadiga. Fonte: foto do autor.

3.6.4.1. Sistema de carregamento

Na Figura 3.24 são mostrados os componentes do sistema aplicador de carga adaptado para os ensaios MRF e FQP. O equipamento é semelhante ao descrito na norma DNER-ME 133/94 (DNER, 1994) para determinação do módulo de resiliência por compressão diametral. O sistema é composto por um aplicador pneumático apoiado num pórtico metálico, que fornece a tensão desvio pulsante controlada por um solenoide (válvula 3 vias) conectada a um sistema de controle que regula a pressão e o tempo. A carga gerada pela ação da pressão liberada pelo solenoide é medida pela célula de carga e distribuída pelos frisos de carregamento ao corpo de prova.

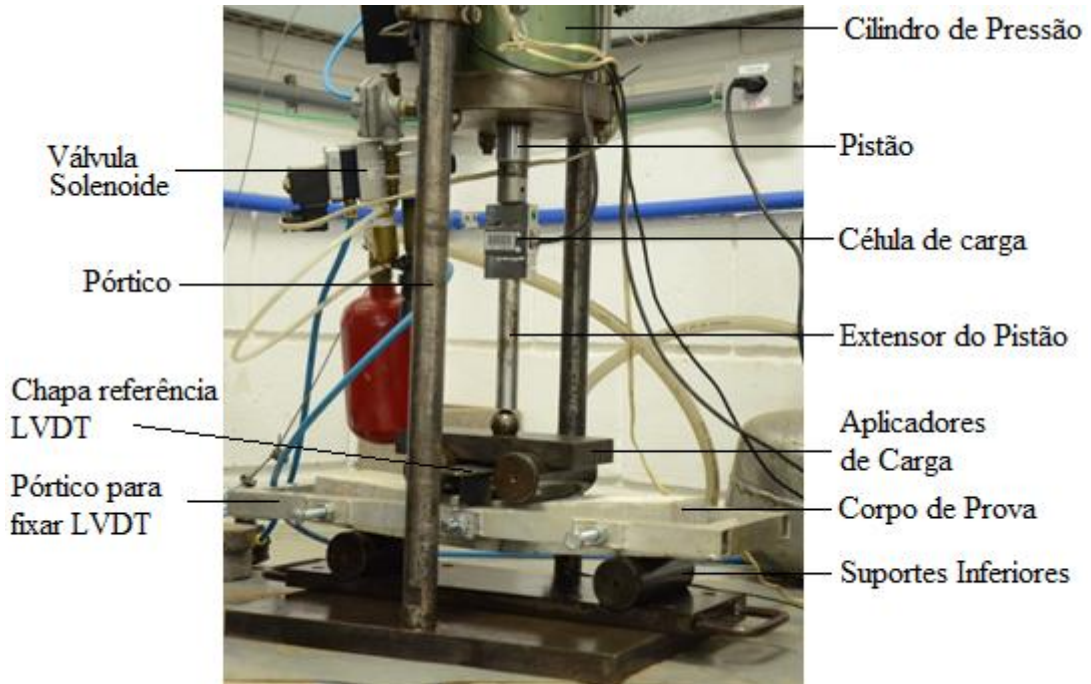


Figura 3.24: Componentes do sistema de carregamento. Fonte: foto do autor.

3.6.4.2. Software

O *software* usado para a recopilção da informação é o SEEPAV 8200, desenvolvido para ser utilizado em ensaios de módulo de resiliência triaxial, MRD e FCD, sendo esta última a rotina utilizada. A resposta do material foi medida pelos LVDT's, amplificada por um condicionador de sinais e armazenada em um sistema de aquisição de dados. O console do sistema foi acoplado no computador e na instrumentação por meio de conexões seriais. Tem-se a opção de gravar dados em escala linear ou potencial. O relatório que o sistema fornece é um arquivo .TXT contendo número do pulso de carga, tempo, valor da carga e deslocamentos (LVDT 0 e LVDT 1).

3.6.4.3. Sensores de deslocamento

Nos ensaios dinâmicos foram utilizados dois sensores de deslocamento LVDT tipo DG da *Solartron* com um curso de $\pm 2,5$ mm (Ver Figura 3.25). A sensibilidade escolhida corresponde a 100% do curso dos sensores, e foram configuradas as constantes de calibração correspondentes para o estágio de ganho mínimo.



Figura 3.25: LVDT utilizado para medir deflexões nos ensaios dinâmicos. Fonte: foto do autor.

3.6.4.4. Extensores para o aplicador de carga

Em provas preliminares de carga foi identificado que o equipamento não conseguia alcançar a sua carga teórica de 12 kN no aplicador de carga pneumática. Com a finalidade de viabilizar a execução dos ensaios propostos foram projetados pelo autor, extensores para serem acoplados no pistão do sistema de carga, mostrados na Figura 3.26. Com a utilização desses extensores é minimizado o consumo de ar em cada um dos pulsos de carga, permitindo assim o aumento da capacidade de carregamento.

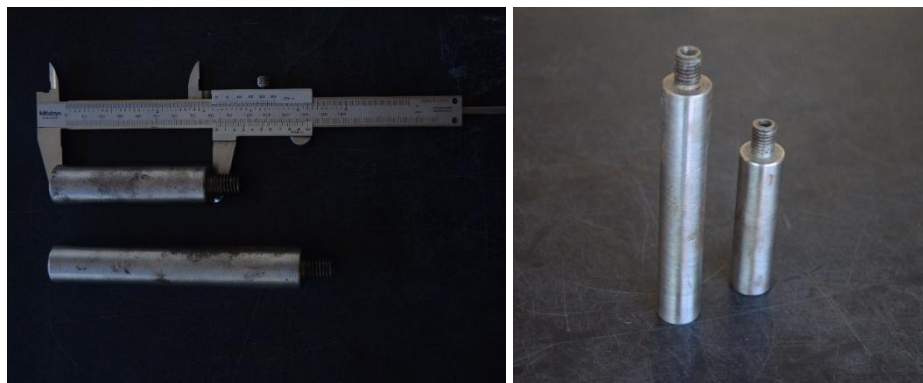


Figura 3.26: Extensores para o pistão de carga. Fonte: fotos do autor.

Os extensores são dois cilindros que possuem uma das extremidades rosqueada para serem acoplados à célula de carga. A outra extremidade do extensor é plana, de forma a apoiar-se sobre a esfera de aço do pórtico de carga. Esses extensores foram usinados em aço de alta resistência. Um dos extensores tem uma longitude de 132 mm para ser utilizado em ensaios com vigas de 50 mm de altura e o outro tem uma longitude de 83 mm para ensaios com vigas de 100 mm de altura. Na pesquisa aqui relatada foi utilizado o extensor de 132 mm, mostrado na Figura 3.27.

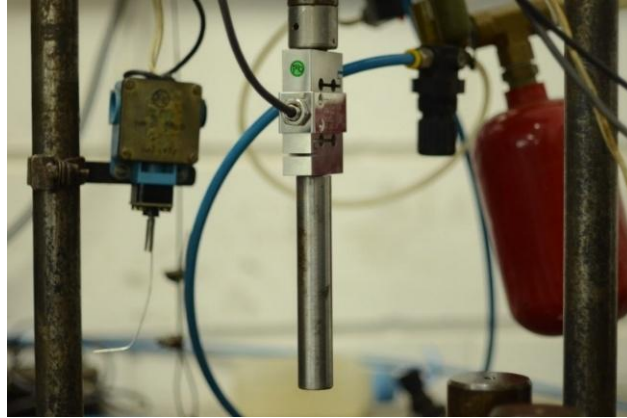


Figura 3.27: Extensor (132 mm) acoplado na célula de carga. Fonte: foto do autor.

A utilização do extensor tem influência direta na quantidade de ar mobilizada em cada pulso de carga, fazendo com que o sistema seja mais eficiente no aproveitamento da pressão disponibilizada pelo compressor. Dessa forma são conseguidos pulsos de carga de maior magnitude. O tempo de abertura da válvula solenoide teve que ser modificado pela influência do extensor, passando de um 1/4 do tempo do pulso de carga, como recomendado por Brito (2006), a um 1/16 do tempo do pulso de carga. Em um processo de várias tentativas foi determinado que dessa forma podem ser executados ensaios com um pulso de carga estável.

3.6.5. O Simulador de Tráfego em operação no LAPAV

O Simulador de Tráfego do LAPAV (UFRGS) (Figura 3.28), construído entre os anos 1992 e 1994, foi projetado pelo Grupo de Projeto Mecânico e Automação Industrial do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS, inspirado no equipamento chamado *Accelerated Loading Facility*. O simulador é do tipo linear e está localizado no Campus do Vale, na antiga Área de Pesquisa e Testes de Pavimentos, hoje sede do LAPAV. Foi posto em operação em 1996 no trabalho de doutorado de Núñez (1997).



Figura 3.28: Simulador de tráfego do LAPAV. Fonte: foto do autor.

As dimensões do simulador de tráfego do LAPAV são de 15 metros de comprimento, 2,5 metros de largura e 4,3 metros de altura. O equipamento apresenta as seguintes características:

- percurso de atuação de carga no pavimento: 8 metros;
- percurso de aceleração e desaceleração: 3 metros;
- carga do semi-eixo atuante sobre o pavimento: regulável de 41 a 61 kN;
- princípio de aplicação de carga: hidráulico;
- aplicação de carga: linear, único sentido, não tracionada;
- sistema de rodado: simples ou duplo, articulado, regulável;
- velocidade de deslocamento: ~5 km/h;
- princípio de acionamento geral: elétrico;
- painel de controle com contador digital do número de ciclos de carga;
- ciclos de carga entre 18 e 21 segundos (180 a 190 ciclos por hora de atividade).

O acionamento e controle são realizados em uma central localizada no prédio próximo às pistas, onde também está instalado o quadro de comando do equipamento. O simulador está equipado com pneus de lonas, tamanho 9x20 cm em um semieixo simples com rodas duplas. O semi-eixo é mostrado em detalhe na Figura 3.29. O sistema está idealizado para simular as condições de tráfego de uma rodovia em serviço, portanto, o equipamento foi concebido para a aplicação do carregamento em um único sentido.



Figura 3.29: Detalhe do trem de carga do simulador linear de tráfego.
Fonte: fotos do autor.

Antes de começar os testes sobre os recapeamentos foi necessária a calibração do sistema hidráulico que é responsável pela aplicação da carga no rodado. Para tal, como se apresenta na Figura 3.30, e com ajuda de uma célula de carga, foi estabelecida uma relação entre a pressão do óleo fornecido pela unidade hidráulica e a magnitude da carga aplicada ao pavimento. Essa relação é representada pela curva de calibração, mostrada na Figura 3.31.



Figura 3.30: Execução da calibração do sistema de carga do simulador. Fonte: foto do autor.

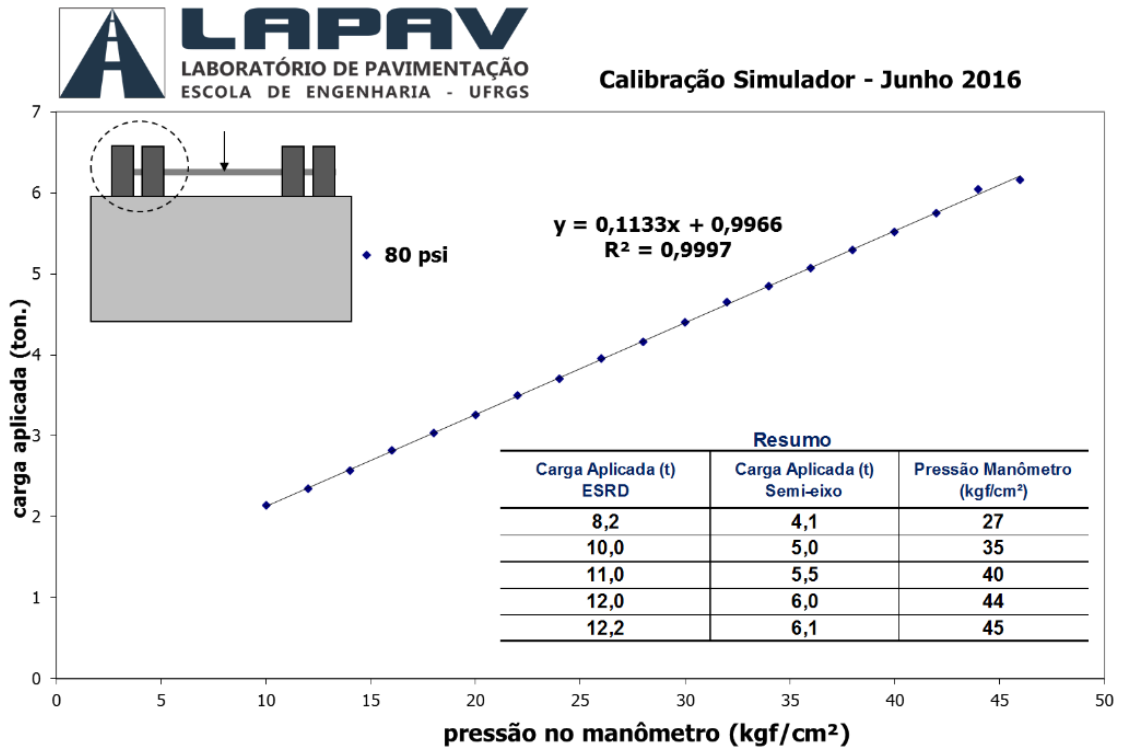


Figura 3.31: Gráfico resumo da calibração do sistema de carga do simulador.

Na Figura 3.32 é apresentada a impressão dos pneus para uma carga de eixo de 11 toneladas, 5,5 toneladas no semieixo. Utilizando a imagem escaneada e escalada foi medida a área de carga num programa de desenho, obtendo-se uma área de 256 cm² no pneu esquerdo e de 274 cm² no pneu direito.

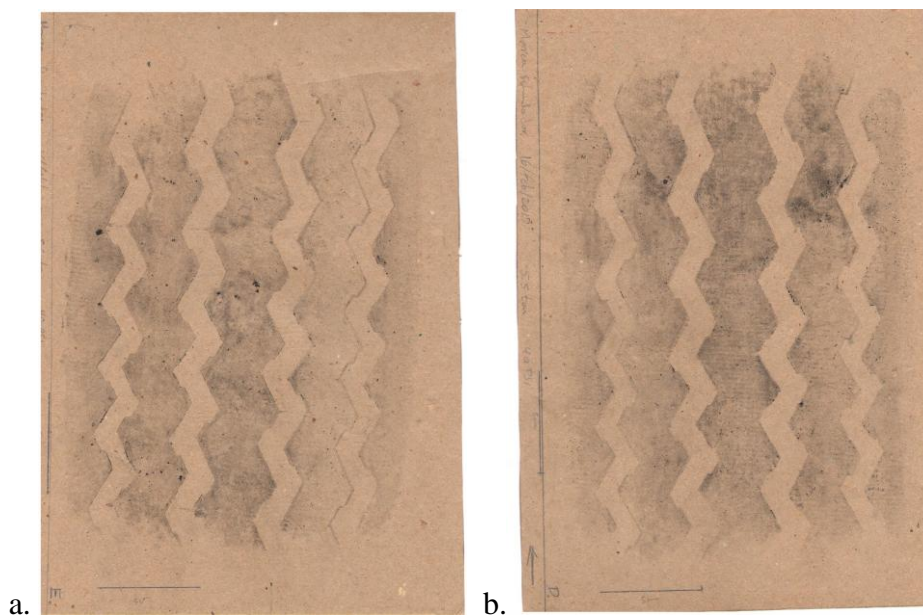


Figura 3.32: Impressão dos pneus com carga de eixo de 11 toneladas.
(a) pneu esquerdo, (b) pneu direito.

3.7. MÉTODOS DE ENSAIOS

Os procedimentos experimentais para o desenvolvimento do presente trabalho foram selecionados com o intuito de cumprir com os objetivos propostos e assim contribuir na avaliação das variáveis de estudo. Tratam-se de procedimentos descritos na literatura e nas normas técnicas consultadas, sendo que em alguns casos foram necessárias algumas adaptações, descritas e justificadas adequadamente no presente documento.

3.7.1. Propriedades mecânicas básicas – ensaios monotônicos

Com a finalidade de caracterizar as propriedades mecânicas do ECC foram executados ensaios de Resistência à Compressão Simples, Resistência à Tração na Flexão e foi determinada a Aderência entre ECC e concreto asfáltico através de ensaios de Cisalhamento Direto. Os resultados são de grande importância na contribuição ao entendimento das propriedades do material. Neste item serão descritos os ensaios, bem como as modificações realizadas nos procedimentos e equipamentos.

3.7.1.1. Resistência à Compressão Simples (f_c)

Com a finalidade de obter um valor característico dos materiais utilizados na pesquisa foi determinada a resistência à compressão do compósito (f_c), tanto para o traço de referência (ECC_{Ref}) como para o traço alternativo (ECC_{CCA}).

Os ensaios foram executados na prensa Shimadzu do LEME. Os corpos de prova foram elaborados com material proveniente das mesmas concretagens com as quais se moldaram as vigas para os ensaios de resistência à tração na flexão. Foram atendidas as recomendações apresentadas na norma brasileira NBR 5739 – *Concreto – Ensaios de Compressão de corpos cilíndricos* (ABNT, 2007). As dimensões dos corpos de prova mantêm uma relação de 2:1 entre altura e diâmetro, 200 mm e 100 mm, respectivamente.

3.7.1.2. Resistência à Tração na Flexão ($f_{t,f}$)

O ensaio consiste na aplicação de um carregamento monotônico nas vigas, sob taxa de deslocamento constante. Os ensaios foram executados seguindo as recomendações descritas na norma ASTM C1609 C1609M-12, além de considerarem alguns detalhes contidos na norma japonesa JCI-SF-1984. Essa norma descreve um tipo de ensaio que avalia o desempenho de concretos reforçados com fibras, utilizando parâmetros obtidos das curvas de carga-deflexão

em ensaios com carregamento no terço médio das vigas. Com os resultados também é possível calcular o Módulo Elástico à Flexão secante (E_{sec}), além de estabelecer os níveis de carregamento para os ensaios dinâmicos.

A ASTM C1609 C1609M-12 estabelece critérios para a execução, o cálculo de parâmetros e a elaboração de relatórios de resultados. A norma recomenda que as dimensões dos corpos de prova sejam de 100x100x350 mm ou de 150x150x500 mm, mas outras dimensões de vigas podem ser utilizadas desde que a altura e a largura da viga sejam pelo menos três vezes maiores que o comprimento das fibras e que o comprimento da viga seja de pelo menos 350 mm. Na Figura 3.33 é apresentado um padrão de gráfico carga-deflexão obtido durante a realização do ensaio, no qual se visualizam alguns parâmetros de resposta do ensaio:

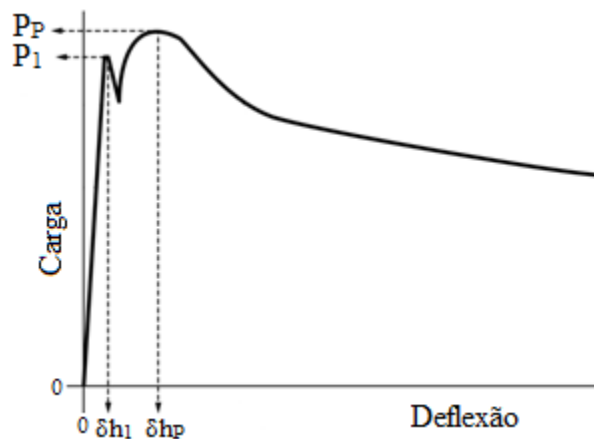


Figura 3.33: Exemplo dos parâmetros de cálculo apresentados na ASTM C1609 C1609M-12. Gráfico adaptado da mesma norma.

sendo:

P_p : carga máxima [kN];

P_1 : carga na abertura da primeira fissura [kN];

δ_{hp} : deflexão na carga máxima [mm];

δ_{h1} : deflexão na abertura da primeira fissura [mm].

O conjunto de viga e suportes foi posicionado na prensa Shimadzu, como mostrado na Figura 3.34. O pistão de carga foi posicionado sobre a esfera de aço, os LVDT's foram zerados e foi iniciada a etapa de carregamento.

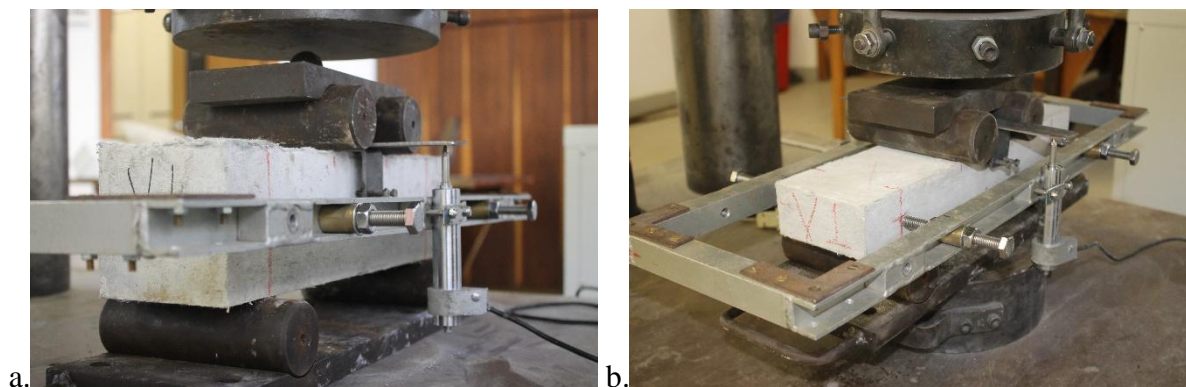


Figura 3.34: Configuração do ensaio de resistência à tração na flexão.
(a) viga de 100 mm; (b) viga de 50 mm. Fonte: foto do autor.

Foram ensaiados 10 corpos de prova por cada traço, sendo que 5 correspondem a uma altura de 50 mm e 5 à de 100 mm. A realização de ensaios de tração na flexão com vigas de diferentes alturas visava à determinação da geometria mais conveniente para a utilização do equipamento disponível no LAPAV para ensaios de carga dinâmica.

Foi estabelecida uma taxa de deslocamento de 1,2 mm/min. Após a ruptura, mede-se a distância entre o local de formação da fissura principal e a extremidade mais próxima da viga, a fim de garantir que a falha se encontre no terço médio da viga. Caso contrário os resultados do ensaio são descartados, existindo uma margem de tolerância de um 5% de L (equivalente a 15 mm), ou seja, a medida desde o extremo mais próximo até a linha de ruptura deve ser maior que 135 mm.

Na Figura 3.35 é apresentado um esquema dos elementos do ensaio que são levados em consideração para o cálculo dos resultados. A resistência à tração na flexão ($f_{t,r}$) ao longo do ensaio é calculada utilizando a Equação 3.10, sendo que a resistência à tração na flexão máxima ($f_{t,FP}$) é determinada como o 95% da resistência à tração na flexão máxima medida em cada ensaio, no cálculo também foi considerado o peso dos roletes superiores, igual a 83,5 N.

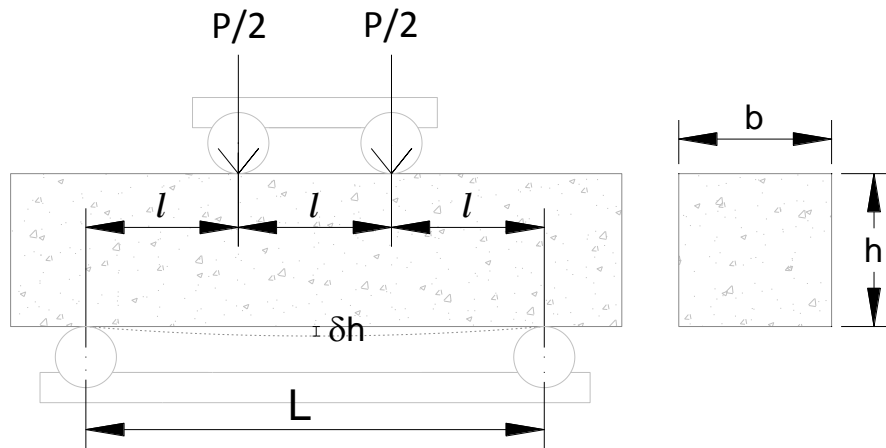


Figura 3.35: Esquema das geometrias para os ensaios à flexão quatro pontos.

$$f_{t,f} = \frac{PL}{bh^2}$$

Equação 3.10

sendo:

$f_{t,f}$: tensão de tração na flexão [kPa];

P: carga vertical aplicada [N];

L: separação entre suportes inferiores [mm];

b: largura média da viga [mm];

h: altura média da viga [mm].

A Equação 3.11 é usada para estimar a deformação específica de extensão da fibra inferior da viga (ε_t) associada a um determinado estado de tensões e calculada a partir das deflexões (δh) registrados pelos LVDT's. Salienta-se que essa equação é deduzida da Teoria da Elasticidade e desconsidera os efeitos das tensões cisalhantes.

$$\varepsilon_t = \frac{12 * \delta h * h}{3L^2 - 4l^2} * 1000000$$

Equação 3.11

sendo:

ε_t : deformação específica de extensão [$\mu\varepsilon$];

δh : deflexão no centro da amostra [mm];

h: altura média da amostra [mm];

L: separação entre suportes inferiores [mm];

l: separação entre aplicadores de carga [mm].

Para o cálculo do Módulo Elástico à Flexão secante (E_{sec}) (Equação 3.12) foi utilizado o critério de Che (2010) *apud* Graeff (2011) segundo o qual o (E_{sec}) é o valor máximo do módulo elástico obtido em um gráfico entre o módulo elástico secante e a carga a flexão em um intervalo de 30% ao 60% da carga máxima (P_p).

$$E_{sec} = \frac{f_{t,f}}{\varepsilon_t} * 10^6 \quad [\text{MPa}] \quad \text{Equação 3.12}$$

3.7.1.3. Avaliação da Aderência através de ensaios de Cisalhamento Direto

Sendo indispensável a aderência entre o pavimento existente e o recapeamento, de forma a garantir um adequado comportamento mecânico em um pavimento composto, é fundamental avaliar essa propriedade em materiais de tão incipiente desenvolvimento, como o ECC. Na presente pesquisa ela foi avaliada através da resistência ao cisalhamento.

O ensaio de aderência proposto na presente pesquisa segue as indicações de execução apresentadas na tese de doutorado de Fortes (1999). Dentre as metodologias existentes para determinar a aderência entre materiais de pavimentação, esta metodologia se mostra vantajosa dada a simplicidade dos equipamentos utilizados – serra de corte, prensa de carga –, ambos disponíveis na UFRGS.

Foram retiradas placas de concreto asfalto de uma das pistas experimentais do LAPAV, com dimensões de 200x500 mm. A espessura da camada de concreto asfáltico era de aproximadamente de 50 mm. Os ensaios foram executados para avaliar a aderência simples entre pavimentos existentes e recapeamentos, sendo considerados três tipos de recapeamento: ECC_{Ref}, ECC_{CCA} e um recapeamento em concreto convencional para fins de comparação. Após as concretagens os corpos de prova permaneceram 24 horas nas fôrmas. Depois de desmoldados foram submetidos a cura imersa em água por 30 dias no caso do ECC_{Ref} e do concreto convencional e 60 dias para ECC_{CCA}.

Finalizada a cura, foi realizado o corte das placas. O objetivo era obter 4 peças de cada placa com dimensões de 80x200 mm que foram numeradas como A, B, C e D. Na Figura 3.36 é apresentado o croqui dos cortes executados. As peças são coladas com resina epóxi duas a duas: a parte superior de A com a parte superior de B, e a parte superior de C com a parte superior de D. Na Figura 3.37 é apresentado o esquema de um corpo de prova pronto para ser ensaiado; sendo apresentada na Figura 3.38 um exemplo de ensaio.

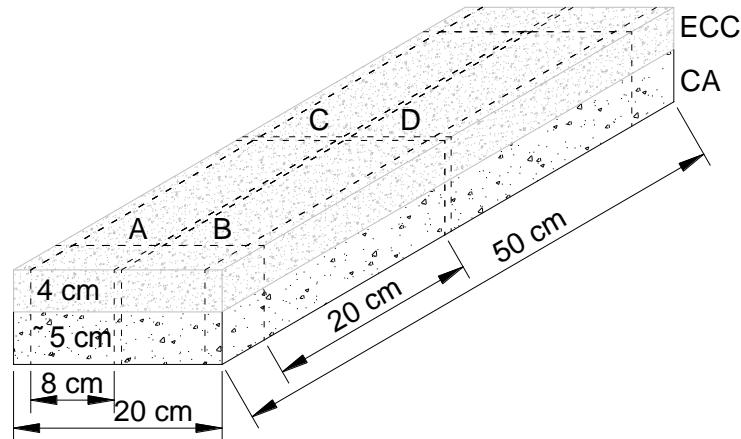


Figura 3.36: Croqui dos cortes requeridos para cada placa. Concreto asfáltico recapado com ECC. Modificado de Fortes (1999).

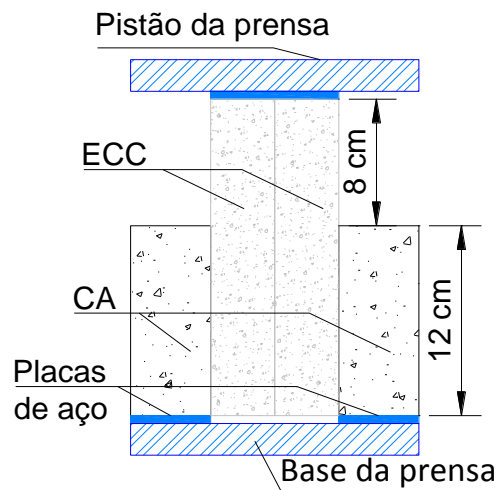


Figura 3.37: Esquema de corpo de prova para ensaios de aderência. Modificado de Fortes (1999).



Figura 3.38: Corpo de prova disposto na prensa para o ensaio de cisalhamento direto. Fonte: foto do autor.

A amostra é ensaiada por carregamento axial, controlando a velocidade de aplicação de carga. Levando em consideração as recomendações de Fortes (1999), a velocidade proposta para o ensaio é de 0,065 MPa/s. A resistência ao cisalhamento é calculada como:

$$\tau_{rup} = \frac{P_{rup}}{2A} \quad \text{Equação 3.13}$$

sendo:

τ_{rup} : resistência ao cisalhamento [kPa];

P_{rup} : carga de ruptura [kN];

A : área da seção de ruptura [m²].

3.7.2. Avaliação da Trabalhabilidade

Um fator importante na viabilidade da implantação de um novo material é a facilidade de produzi-lo usando equipamentos e ferramentas convencionais, evitando dessa forma incorrer em investimentos adicionais e adaptações que podem dificultar a aceitação desse novo material. No caso do ECC, um material de novíssimo desenvolvimento, principalmente no Brasil, foi estabelecido o estudo da trabalhabilidade como critério para ponderar a viabilidade de sua utilização.

A trabalhabilidade permite definir o comportamento dos compósitos em estado fresco. Levando em consideração que a adição de fibras afeta diretamente a trabalhabilidade de um compósito como o ECC, é importante se dispor de um indicador dessa propriedade. Nos traços trabalhados na presente pesquisa foi utilizado o ensaio denominado como *flow table*, que é utilizado para argamassas e que está regulamentado pela norma ASTM C 1437-13.

Para a realização do ensaio é utilizado um cone de aço disposto no centro de uma mesa giratória. O material a ser ensaiado é colocado dentro do cone em camadas de aproximadamente 2,5 cm, e com a ajuda de um bastão metálico é nivelado pela aplicação de 20 golpes (sem aplicar pressão, somente com o peso próprio do bastão). Uma vez que o cone estiver cheio e nivelado, é mantido por 1 minuto em repouso. Posteriormente é retirado o cone e são aplicados 25 golpes na mesa em 15 segundos. No material dispersado e com ajuda de um paquímetro ou régua são medidos 4 diâmetros.

Os resultados são disponibilizados em termos da unidade *flow table*, calculada como a relação entre o fator A e o diâmetro inferior do cone, multiplicada por 100 (Equação 3.14). O fator A é calculado como a diferença entre o diâmetro médio das medições do material disperso e o diâmetro inferior do cone. Na Figura 3.39 é apresentado o processo de execução.

$$flow\ table = \frac{A}{diâmetro\ inferior\ do\ cone} * 100 \quad \text{Equação 3.14}$$

sendo:

A [cm] = diâmetro médio das medições - diâmetro inferior do molde.



Figura 3.39: Sequência da execução de ensaios de *flow table*: (a) elementos para o ensaio; (b) cone cheio e nivelado; (c) retirada do cone; (d) final do ensaio. Fonte: fotos do autor.

3.7.3. Propriedades Dinâmicas – Fadiga Quatro Pontos

Os ensaios foram realizados seguindo-se recomendações da *Austrroads* (2008, 2012) e dos trabalhos na universidade de Tóquio de Suthiwarapirak et al. (2002, 2004), e consistiram na aplicação de carregamentos cíclicos de magnitude constante (tensão controlada), ensaiando corpos de prova prismáticos, apoiados sobre um pórtico quatro pontos e registrando a informação tanto das cargas quanto das deflexões e pulsos de carga. A execução dos ensaios de Fadiga Quatro Pontos (FQP) foi possível pela adaptação dos parâmetros utilizados em ensaios de Fadiga por Compressão Diametral (FCD) no LAPAV. São descritos a seguir o pulso de carga, a parametrização do mesmo, a rotina definida, critérios de ruptura utilizados e cálculos necessários para as análises.

3.7.3.1. Pulso de carga

A realização dos ensaios estáticos - Resistência à Tração na Flexão (descritos no item 3.7.1.2) permitiram definir os níveis de tensões a serem utilizados.

Para os ensaios de fadiga o equipamento foi calibrado para aplicar ciclos de carregamento com uma frequência de 4 Hz, reduzindo ao mínimo o tempo de descanso. As bibliografias referenciadas anteriormente indicam, com relação aos níveis de tensão a aplicar, uma faixa dentre 60% a 90% da ($f_{t,FP}$) para ensaios de FQP. Foi evidenciado nos ensaios iniciais que valores superiores ao 70% da ($f_{t,FP}$) levaram à falha da viga com poucos ciclos de carga; dessa forma foi estabelecida uma faixa para os ensaios na presente pesquisa dentre 30-60% da ($f_{t,FP}$). A resposta resiliente dos primeiros 100 ciclos foi considerada para a definição do Módulo de Resiliência à Flexão (MRF).

3.7.3.2. Parametrização do pulso

Como relatado por Brito (2006) o equipamento não possui um gerador de forma de onda, mas consegue dois tipos de formatos para o pulso de carga: um próximo a um formato de tipo quadrado para pulsos com duração maior a 0,15 segundos e outro do tipo semi-seno-verso (*haversine*).

A válvula solenoide controla e calibra o pulso de carga, desse modo a forma e o tempo do pulso são determinados pelo tempo de abertura e pela forma como o ar é inserido no sistema. Para o caso de estudo, tempo de pulso de 0,25 s (a duração do pulso de carga corresponde ao inverso da frequência), foi preciso verificar a vazão e o tempo de abertura do solenoide para obter um pulso de carga próximo ao ideal, e evitar dessa forma a geração de pulsos de carga quadrados. Assim, o tempo de abertura da válvula de controle de 0,0155 segundos foi estabelecido, pois mostrou uma boa aproximação.

O pulso resultante e o pulso ideal são mostrados na Figura 3.40, e na Tabela 3.5 são mostrados os parâmetros de calibração do pulso de carga. O tempo de aplicação de carga em cada ciclo é ~0,195 segundos com um repouso de ~0,055 segundos.

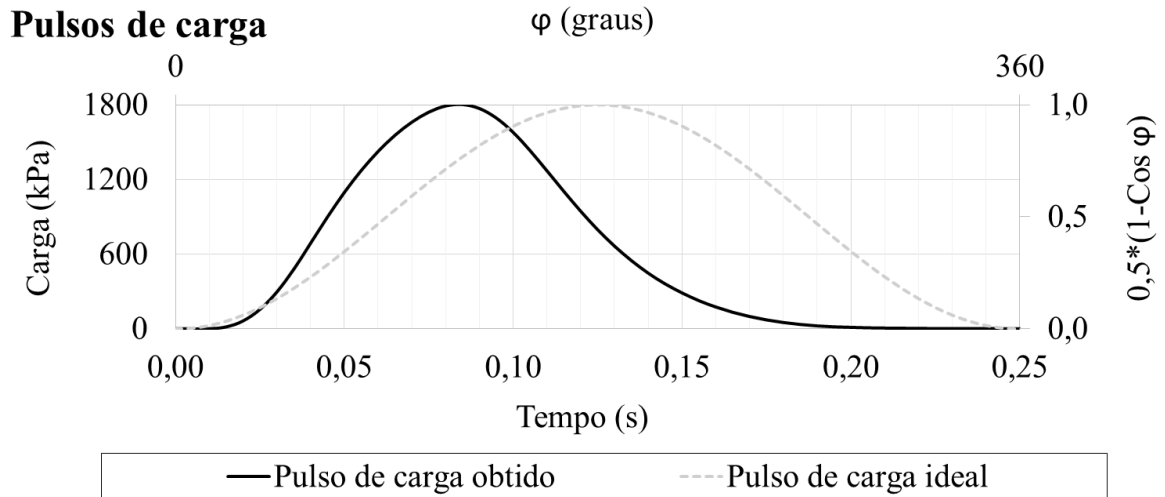


Figura 3.40: Pulso de carga ideal e obtido. Viga 2, ECC_{Ref} 50% $f_{t,FP}$, ciclo 50.

Tabela 3.5: Parâmetros de calibração do pulso de carga.

Parâmetro de entrada	Ensaio FQP
Tempo de repetição da válvula [s]	0,25
Tempo de abertura da válvula [s]	0,0155
LVDT [uni.]	2
Constantes de calibração dos LVDT 0 e 1	Ganhos mínimos
Constante de calibração célula de carga	0,8639

3.7.3.3. Rotina de ensaio

A rotina do ensaio iniciava com a instalação do pórtico para a fixação dos LVDT's e da chapa de aço que serviam de referência para as leituras de deslocamento no corpo de prova. Posteriormente o corpo de prova era posicionado sobre os cutelos inferiores do suporte quatro pontos, depois eram colocados os cutelos superiores e posicionado todo o conjunto embaixo do pistão de carga. Uma vez posicionado o pistão dava-se início ao programa SEEPAV 8200 na sub-rotina de fadiga "F". O equipamento e o ensaio eram configurados com os parâmetros descritos na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Parâmetros de entrada, configuração do ensaio FQP.

Etapa do ensaio	Parâmetro de entrada	Ensaio FQP
Configuração do 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	
	Nome operador; cliente	
	Identificação do CP	
	Altura [cm]	6
	Diâmetro [cm]	10
	$f_{t,D}$ [MPa]	$f_{t,Deq}$

- ciclo inicial, incremento e número de ciclos gravados: 50, 100 e 50, respectivamente para todos os ensaios. O número de ciclos gravados corresponde à metade do valor do incremento, portanto é salva a metade dos dados do ensaio por questões de rendimento no processamento dos dados (ciclos gravados: 50-99, 150-199, 250-299, etc.);
- área do cilindro: fixo, depende do equipamento;
- escala linear: banco de dados a intervalos constantes, formato linear para ser processados;
- análise matemática: não é realizado o monitoramento do módulo, portanto a análise matemática é desconsiderada;
- identificação CP: foram identificados em função da porcentagem de carga (% da $f_{t,FP}$) e do número da viga, exemplo: 503, viga 3 com porcentagem de carga do 50% da ($f_{t,FP}$);
- altura (L_c) e diâmetro (D) do corpo de prova cilíndrico: 6 e 10 cm, respectivamente, valores padrão do ensaio FCD. Sendo requerida a utilização da equação descrita a seguir para o cálculo da ($f_{t,Deq}$).

O programa SEEPAV 8200 está programado para trabalhar em função da Resistência à Tração por Compressão Diametral ($f_{t,D}$) como dado de entrada, é com essa informação que o programa estabelece e faz o controle do valor da carga alvo para cada pulso de carga.

Para a execução de ensaios a Fadiga Quatro Pontos foi atendida a consideração de Castañeda (2016), que relata que a força alvo P [N] gera uma distribuição de tensões de tração diferente em um corpo de prova cilíndrico aos gerados em um corpo de prova prismático. Já que o valor dessas tensões é função somente da geometria do corpo de prova e da disposição das cargas, as equações são igualadas em função da força P [N] aplicada para se obter um valor de $(f_{t,D})$ equivalente, que é usado como valor de entrada para determinação dos níveis de tensão (força alvo).

$f_{t,D}$ [MPa]: calculado como mostrado na Equação 3.15, dessa forma foi gerada em cada ensaio o valor de tensão alvo como porcentagem da $f_{t,f}$, de forma semelhante que em ensaios de FCD. O fator de conversão calculado com as geometrias dos corpos de prova prismáticos é de 0,08842 com $L = 300$ mm; $b = 100$ mm e $h = 50$ mm.

$$P_{CD} = P_{TF} \quad [N]$$

$$\frac{f_{t,D} * \pi * L_c * D}{2} = \frac{f_{t,f} * b * h^2}{L}$$

Equação 3.15

$$f_{t,Deq} = \frac{2 * f_{t,f} * b * h^2}{\pi * L_c * D * L}$$

$$f_{t,Deq} \approx 0,08842 * f_{t,f}$$

sendo:

P_{CD} : carga alvo – Compressão diametral [N];

P_{TF} : carga alvo – Tração na flexão [N];

$f_{t,Deq}$: resistência à tração por compressão diametral equivalente [MPa];

L_c : altura do corpo de prova cilíndrico [mm];

D : diâmetro do corpo de prova cilíndrico [mm];

$f_{t,f}$: resistência à tração na flexão [MPa];

b : largura média da viga [mm];

h: altura média da viga [mm];

L: separação entre suportes inferiores [mm].

3.7.3.4. Critério de ruptura

O número de ciclos de carga em cada viga foi limitado a 1×10^6 ciclos, em caso de não ter acontecido a ruptura física da viga, levando em consideração que não é possível fazer o monitoramento contínuo do Módulo de Resiliência à Flexão (MRF).

3.7.3.5. Módulo de Resiliência à Flexão (MRF)

Os valores de MRF correspondem à relação tensão-deformação de cada ciclo (ou conjunto de ciclos) k , conforme a Equação 3.16. As tensões aplicadas foram calculadas com a Equação 3.10 e as deformações resilientes com a Equação 3.11.

$$MRF_k = \frac{f_{t,fk}}{\varepsilon_{tk}} * 10^6 \quad [\text{N}] \quad \text{Equação 3.16}$$

3.7.3.6. Energia dissipada durante o ensaio de fadiga

A área contida nas curvas de histerese representa a energia dissipada, *Dissipated Energy* (DE) em cada um dos ciclos de carga. As curvas são obtidas de gráficos com as deformações [μe] no eixo horizontal e as tensões [kPa] no eixo vertical.

Na Figura 3.41 são apresentadas, como exemplo, as curvas de histerese dos ciclos 50 até 299, e na Figura 3.42 as curvas individuais dos ciclos 50, 299 e 3999, correspondentes ao ensaio de fadiga da viga 502 do ECC_{Ref}. A deformação permanente está representada com o deslocamento no eixo horizontal dos ciclos; o incremento na área da curva representa o aumento da energia dissipada no transcurso do ensaio, como uma evidência da degradação do corpo de prova.

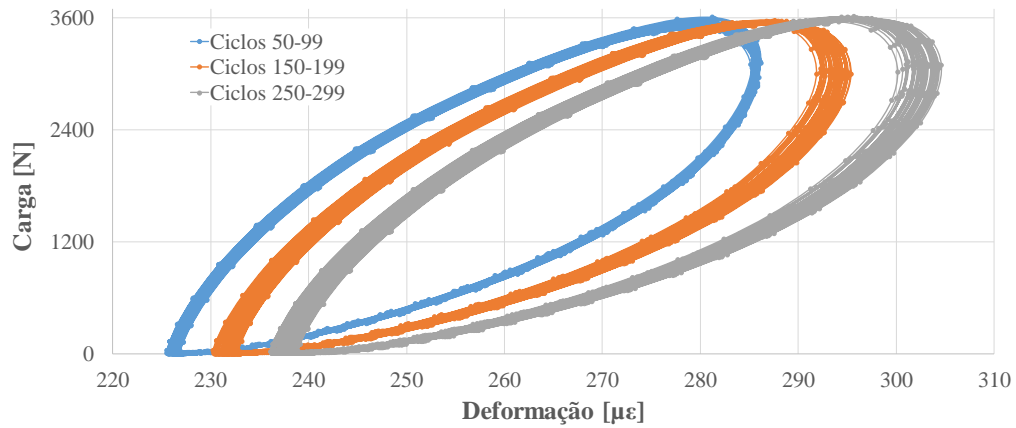


Figura 3.41: Curvas de histereses, viga ECC_{Ref} 502 ciclos 50 até 299.

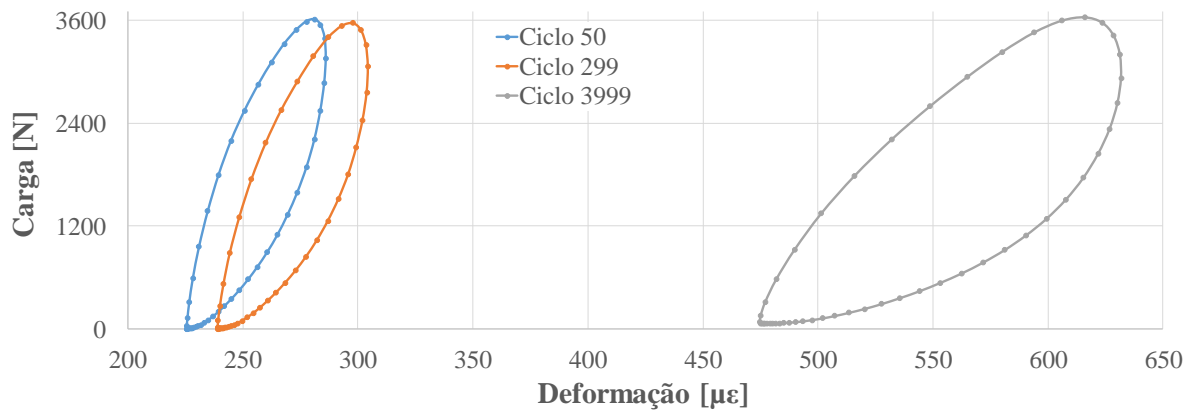


Figura 3.42: Curvas de histerese dos ciclos 50, 299 e 3999. Viga ECC_{Ref} 502.

A energia dissipada em cada ciclo foi calculada a partir da área de cada curva histerética, por integração numérica (método do trapézio) de cada um dos pontos que a conformam, seguindo a Equação 3.17:

$$DE_N = \sum_{j=0}^{j=50} \frac{(\varepsilon_{tj} - \varepsilon_{t(j-1)}) * (f_{t,fj} - f_{t,f(j-1)})}{2} \quad \left[\frac{J}{m^3} \right] \quad \text{Equação 3.17}$$

3.7.3.7. Análise de energia

Shen e Lu (2010) estudaram diferentes aproximações para a avaliação de diferentes estágios de degradação de misturas asfálticas, descrevendo os critérios que definem a micro e microfissuração a partir do cálculo da energia dissipada durante o ensaio. Dentre os métodos propostos foram desenvolvidos os correspondentes à Relação de Energia, *Energy Ratio* (ER)

(Equação 3.18): definida como a relação entre a energia dissipada no ciclo inicial (DE_0) e a energia dissipada no ciclo N (DE_N). Na situação hipotética de ensaios sobre materiais que não apresentem perdas de energia, com $ER = N$, esta relação representa a Linha de Não Dano (LND).

$$ER = N * \frac{DE_0}{DE_N} \quad \text{Equação 3.18}$$

3.7.4. Ensaios em Verdadeira Grandeza com Simulador de Tráfego

Um dos objetivos da pesquisa foi verificar a viabilidade construtiva do ECC em verdadeira grandeza e, dessa forma, estudar a necessidades e rendimentos em termos de equipamentos e mão de obra.

Antes da realização da presente pesquisa, a produção de ECC na UFRGS tinha sido limitada a pequenas quantidades em condições de laboratório; da ordem de 2 litros por mistura. Para a experiência proposta na área de testes do LAPAV foram executadas duas concretagens, uma de 500 litros e outra de 300 litros.

As concretagens permitiram verificar a viabilidade da produção do ECC em condições construtivas convencionais e analisar seu comportamento em estado fresco, assim como seu desempenho mecânico e as patologias associadas com a aplicação de ciclos de carga que simulam a passagem de um caminhão. Dentre os efeitos associados aos ciclos de carga foram estudados o desgaste superficial e a aparição de trincas na superfície, assim como a reflexão de fissuras desde o pavimento subjacente.

No presente item são descritas as características dos recapeamentos executados no LAPAV assim como as questões levadas em consideração no processo construtivo.

3.7.4.1. Características da estrutura de pavimento existente

No desenvolvimento do trabalho de pesquisa descrito na sua tese de doutorado Gonçalves (2002) construiu 6 pistas no campo de provas do LAPAV, nas quais foram variadas as espessuras entre 4, 6 e 8 cm e testados dois materiais de revestimento asfáltico um concreto asfáltico convencional utilizando ligante asfáltico tipo CAP-20 e um pavimento asfáltico melhorado com polímeros tipo SBS.

A pista utilizada na presente pesquisa corresponde com a pista N^o. 5, a qual segundo Gonçalves (2002) apresenta as seguintes características:

Revestimento asfáltico: espessura de 60 mm, foi constituído com um CA (Concreto Asfáltico) conformado com ligante asfáltico tipo CAP-20. Apresentando em laboratório um Módulo de resiliência de 3475 MPa. Faixa granulométrica "tipo B" da especificação 16/91 do DAER.

Base granular: espessura de 300 mm, foi constituída com brita graduada com granulometria compatível com a classificação faixa B e classe A do DAER-RS. Compactada em campo em duas camadas de 15 cm cada. Teor de umidade ótimo de 8,7% e com uma densidade aparente de 2,36. O Módulo de resiliência em laboratório foi de 250 MPa.

Reforço do subleito: espessura de 500 mm, foi constituído por um solo argiloso classificado como CL, ou A-7-6 (segundo a classificação TRB, antigo HRB). O material apresenta um índice de plasticidade do 16% e um limite de liquidez do 42%. O Módulo de resiliência em laboratório foi de 230 MPa.

3.7.4.2. Características dos recapeamentos

Para a realização dos ensaios acelerados foram construídos 2 recapeamentos em ECC sobre uma pista construída no início dos anos 2000 no LAPAV (Gonçalves, 2002). Construídos diretamente sobre o pavimento flexível existente, os recapeamentos tinham dimensões de 10 metros de comprimento por 1 metro de largura. A concretagem foi executada em área plana sem qualquer junta.

O primeiro recapeamento, com espessura de 50 mm, foi concretado exclusivamente com ECC_{Ref}; já no segundo recapeamento, com espessura de 30 mm, foi possível concretar 2,5 metros do comprimento em ECC com adição de cinza de casca de arroz (ECC_{CCA}). Na Figura 3.43 apresenta-se uma vista dos dois recapeamentos, à esquerda o de 50 mm e à direita o de 30 mm, sendo a parte mais escura o ECC_{CCA}.



Figura 3.43: Vista dos recapeamentos conformados para os ensaios em verdadeira grandeza: direita 50 mm, esquerda 30 mm. Fonte: foto do autor.

No primeiro recapeamento (50 mm) foram aplicados um total de 101.040 ciclos de carga, iniciando no dia 12/07/2016 e finalizando no dia 15/02/2017, com uma média de 1690 ciclos por dia laboral. No transcurso da pesquisa foi necessário parar o experimento em várias oportunidades, por necessidade de manutenção e conserto de vários componentes do simulador.

No segundo recapeamento (30 mm) foi aplicado um total de 97.608 ciclos entre as datas do 21/03/2017 e 10/10/2017, com uma média de 1500 ciclos por dia.

Foi estabelecida uma carga de semieixo de 5,5 toneladas, equivalente a um eixo de um caminhão com 11 toneladas de peso. A pressão de inflado dos pneus se manteve em 560 kPa. Levando em consideração os resultados do procedimento de calibração do sistema de carga do trem de carga, sistema que utiliza um dispositivo hidráulico, essas 5,5 toneladas correspondem a uma pressão aplicada de 40 kgf/cm².

A limpeza da superfície do pavimento existente foi realizada unicamente com água e passando uma vassoura na superfície a fim de remover materiais soltos, nenhum produto químico sendo aplicado. A forma para a concretagem foi delimitada pela instalação de uma moldura de madeira em todo o perímetro com ripas de pinho e fixadas com parafusos ancorados no pavimento asfáltico. Detalhe da fôrma é apresentado na Figura 3.44.



Figura 3.44: Detalhe da fixação da madeira no pavimento existente.
Fonte: foto do autor.

Mesmo sem juntas que demarquem qualquer divisão nos recapeamentos, para facilitar as análises e as avaliações do desempenho foi utilizada a nomenclatura por seções apresentada na Figura 3.45, cada um dos recapeamentos foi dividido em 10 seções. O sistema inicia o processo de carga entre as seções N.º 1 e N.º 2, já o processo de frenagem e descarga acontece entre as seções N.º 9 e N.º 10.

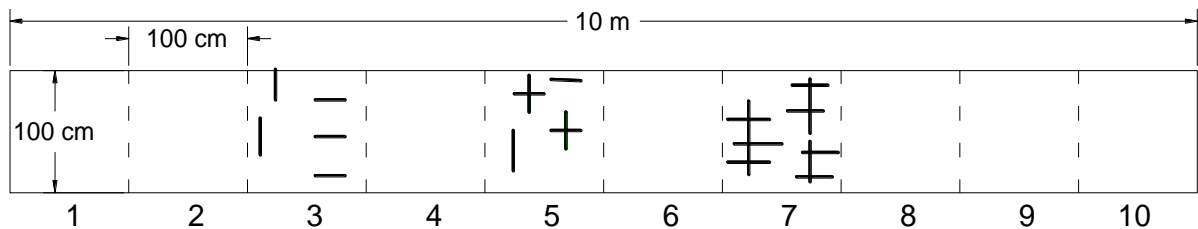


Figura 3.45: Croqui do esquema da conformação dos recapeamentos –
vista superior.

Um dos objetivos da execução do recapeamento consiste na avaliação do processo de reflexão de trincas desde o pavimento existente para o recapeamento. Para tal, foram executados cortes com serra circular no revestimento asfáltico do pavimento existente, até se alcançar o topo da base granular.

Como esquematizado na Figura 3.46, nas seções N.º 3, N.º 5 e N.º 7 foi executado o padrão de trincamento correspondente, simulando dessa forma 3 estágios do processo de fadiga num

pavimento. As trincas foram preenchidas com argila para evitar que sejam seladas na concretagem. Detalhe apresentado na Figura 3.47.

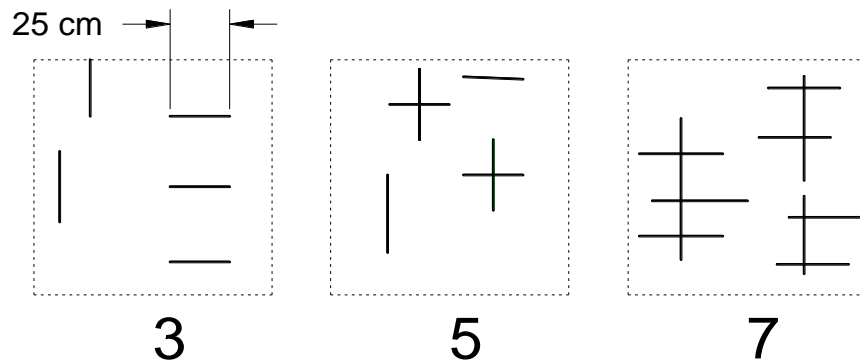


Figura 3.46: Croqui do detalhe dos cortes realizados nas seções N.º. 3, N.º. 5 e N.º. 7 de ambos recapeamentos na pista para simulação de fadiga nos antigos revestimentos asfálticos e avaliação de reflexão de trincas nos recapeamentos em ECC.

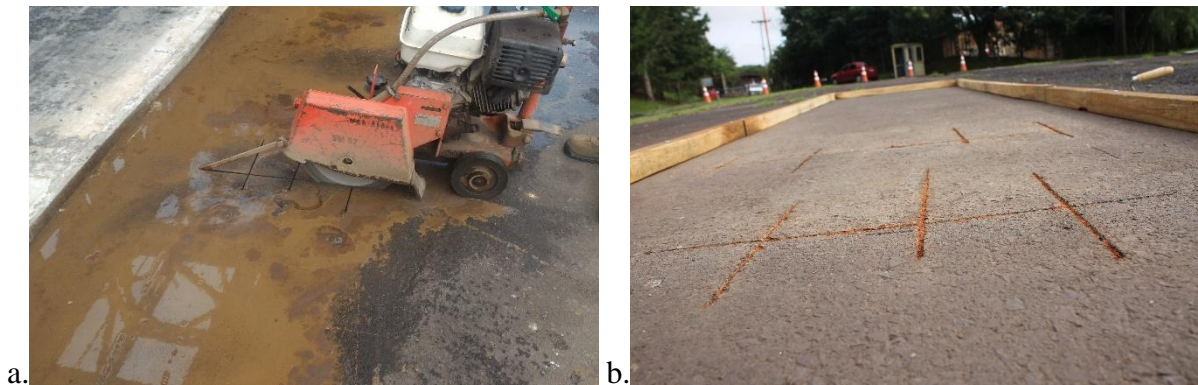


Figura 3.47: (a) Corte do pavimento existente para simulação de fadiga e (b) trincas preenchidas com argila. Fonte: fotos do autor.

De forma complementar à avaliação do comportamento mecânico dos recapeamentos, o processo de concretagem em si mesmo permitiu estudar o comportamento e as exigências construtivas na elaboração, manuseio e lançamento do ECC. Foi verificada a viabilidade da utilização de betoneiras de tombo convencionais e a utilização de ferramentas convencionais como réguas metálicas, pás de pedreiro e vibradores de imersão no lançamento do ECC.

Por se tratar de um material com uma significativa presença de fibras o acabamento superficial não pode ser realizado com vassouras metálicas. Dessa forma foram testadas duas metodologias para o acabamento da superfície de rodagem, a primeira consistiu em aplicar pressão e rodar um parafuso de 12 mm de diâmetro no recapeamento de 50 mm. O recapeamento de 30 mm, com ajuda de uma régua metálica, foi ranhurado com um prego.

3.7.4.3. Parâmetros de comportamento dos recapeamentos ensaiados

A aplicação dos ciclos de carga permite simular o comportamento do material em um ambiente controlado. Dessa forma é possível verificar o desempenho das seções levando em consideração o histórico de cargas. Na presente pesquisa foram avaliadas as alterações na superfície de rodagem e o aparecimento e evolução de trincas.

Os processos de desgaste e variação da textura da superfície de rodagem foram avaliados utilizando como indicadores os ensaios de Pêndulo Britânico e Mancha de Areia, além da avaliação visual. Foram executados ensaios em cada um dos recapeamentos antes e depois da aplicação dos ciclos de carga.

Também foi avaliado o aparecimento e evolução de trincas na superfície. Com o objetivo de complementar a caracterização meramente superficial foram extraídas seções dos recapeamentos e assim de analisar a possível origem da trinca e sua possível relação com as trincas induzidas no pavimento existente. Desta forma foi possível verificar a capacidade do ECC de evitar a reflexão de trincas.

3.7.4.4. Ensaio de microtextura com o Pêndulo Britânico

A microtextura foi avaliada pelo ensaio do Pêndulo Britânico. Trata-se de um equipamento portátil que mede a perda de energia através do atrito entre a base de borracha de um pêndulo e a superfície do pavimento. O equipamento tem um braço pendular cuja extremidade tem uma sapata de borracha, essa é usada para atritar contra a superfície do pavimento umedecido (Figura 3.48). A superfície úmida representa a condição mais desfavorável de atrito em pavimentos. Tem-se uma medida indireta da microtextura superficial através da diferença de altura entre o início e o final do movimento, dessa forma é possível avaliar a perda de resistência à derrapagem em função do tráfego. O ensaio foi executado seguindo as indicações da norma ASTM E-303-13 (ASTM, 2013), sendo os resultados dados em BNP (*British Number Pendulum*) ou seu equivalente em português VRD (Valor da Resistência a Derrapagem). Conforme especificado no Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006) a microtextura superficial pode ser classificada em função do VRD (ou BPN), como mostrado na Tabela 3.7.



Figura 3.48: Ensaio de Pêndulo Britânico no recapeamento de 50 mm.
Fonte: foto do autor.

Tabela 3.7: Classes de microtextura pelo método do Pêndulo Britânico (DNIT, 2006).

Classe	VRD – Valor da Resistência a Derrapagem
Perigosa	$VRD < 25$
Muito lisa	$25 \leq VRD \leq 31$
Lisa	$32 \leq VRD \leq 39$
Insuficientemente rugosa	$40 \leq VRD \leq 46$
Medianamente rugosa	$47 \leq VRD \leq 54$
Rugosa	$55 \leq VRD \leq 75$
Muito rugosa	$VRD > 75$

3.7.4.5. Avaliação da macrotextura com o ensaio de Mancha de Areia

Uma metodologia utilizada para estimar a macrotextura de pavimentos é o ensaio de Altura de Mancha de Areia. Este consiste no espalhamento sobre a superfície do pavimento de um volume pré-determinado de areia fina com propriedades conhecidas de volume, peso e massa específica. O espalhamento é realizado em movimentos circulares com um bastão padronizado, preenchendo todas as rugosidades até alcançar de forma aproximada um círculo, do qual é medido o diâmetro. Com o diâmetro, e conhecendo o volume do material espalhado (25000 mm^3), é obtida a altura da mancha. O ensaio foi executado seguindo as indicações da norma ASTM E 965-96 (ASTM, 2006). A classificação da macrotextura em função da HS também está especificada no Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006), como mostrado na Tabela 3.8.

A altura média da mancha de areia (HS) pode ser calculada pela equação:

$$HS = \frac{4 * V}{\pi * D^2} \quad \text{Equação 3.19}$$

sendo:

HS: altura média de mancha de areia [mm];

V: volume constante de areia de 25000 mm³;

D: diâmetro médio do círculo de areia [mm].

Tabela 3.8: Avaliação da macrotextura pelo método da Altura de Areia (DNIT, 2006).

Classe	Altura média da mancha de areia [mm]
Muito fina ou Muito fechada	$HS \leq 0,20$
Fina ou Fechada	$0,20 < HS \leq 0,40$
Média	$0,40 < HS \leq 0,80$
Grosseira ou Aberta	$0,80 < HS \leq 1,20$
Muito grosseira ou Muito aberta	$HS > 1,20$

4. RESULTADOS PRELIMINARES

Os trabalhos descritos no presente Capítulo representam as primeiras aproximações do autor com o ECC, e tiveram como objetivo principal o entendimento do material. Buscava-se, através do manuseio e da execução de alguns ensaios adquirir suficiente experiência para levar a cabo o programa experimental proposto, descrito no Capítulo anterior.

São descritas uma série de experiências que, em conjunto, constituíram um processo de aprendizado, iniciando com um conhecimento meramente bibliográfico do material até permitir ao autor planejar e executar as concretagens requeridas pelo programa experimental. Os trabalhos iniciaram com a execução de uma placa em ECC com área de 1 m², continuando com a experimentação com misturas alternativas e terminando com a melhoria da trabalhabilidade através da substituição do aditivo plastificante.

A execução da placa e a experiência com as misturas alternativas foram determinantes no entendimento do processo de elaboração do ECC; foi possível verificar a viabilidade do traço assim como propor as modificações pertinentes em termos de equipamentos, ferramentas e esquemas de trabalho.

4.1. EXECUÇÃO DA PLACA DE ECC DE SUPERFÍCIE DE 1 M²

A concretagem de uma placa de 1 m² em ECC no LEME foi proposta como uma primeira aproximação ao processo de elaboração do ECC, devido a que uma das perguntas iniciais da pesquisa consistia em saber se era possível produzir ECC em quantias suficientes e por meios convencionais para atender as necessidades de uma obra real. Com a placa também foi possível verificar a viabilidade do material como superfície de rolamento.

As experiências laboratoriais anteriormente realizadas no LEME utilizaram baixos volumes de material, convencionalmente misturando em uma argamassadeira com capacidade aproximada de 2 litros, apresentada na Figura 4.1. Para a mistura dos materiais da placa foi escolhida uma betoneira de eixo vertical pela sua semelhança na forma de operar com a argamassadeira e pela capacidade de aplicar uma energia de mistura maior que as betoneiras de tombo.



Figura 4.1: Betoneira de eixo vertical, baixo volume de capacidade.
Fonte: foto do autor.

4.1.1. Considerações iniciais

A fôrma utilizada foi construída especificamente para esta experiência na oficina do LEME. A placa foi projetada com espessura de 3 cm, o que equivale a misturar 30 litros de ECC. O traço empregado foi o definido nas pesquisas de Righi (2015) e Costa (2015), sem adição de materiais pozolânicos (ECC_{Ref}). Na Tabela 4.1 são apresentadas as quantidades de materiais consumidos.

Tabela 4.1: Quantidades de materiais para elaborar 30 litros de ECC.

Material	Proporção	Peso [kg]
Cimento	1	30,5
Areia fina	0,75	22,9
Água	0,34	10,4
Aditivo	0,006	0,183
Fibra PP	0,018	0,549

Para se avaliar as condições do acabamento foram realizados ensaios de Altura de Mancha de Areia como indicador da Macrotextura Superficial e de Pêndulo Britânico como indicador da Microtextura.

Também foi possível avaliar qualitativamente a trabalhabilidade do material, as dificuldades no lançamento e na acomodação na forma, as ferramentas adequadas para disposição do material e para dar o acabamento superficial, além da necessidade ou não de vibrador de imersão.

A forma foi impregnada com óleo mineral para facilitar a extração da placa, viabilizando a possível reutilização da forma (Figura 4.2). Os materiais foram pesados e separados em

recipientes plásticos, sendo as fibras de polipropileno desfiadas manualmente. Na Figura 4.3 é apresentada uma vista geral da área de trabalho.

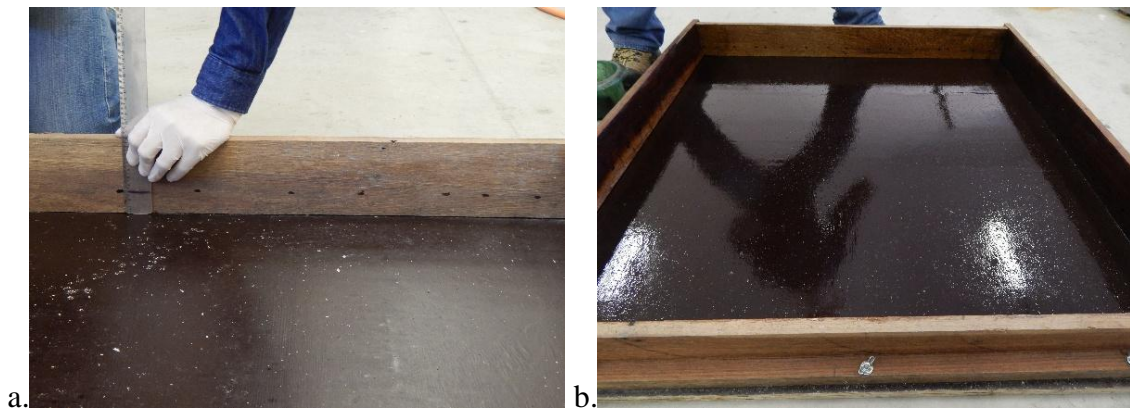


Figura 4.2: (a) marcação do nível para concretagem. (b) forma impregnada com óleo mineral. Fonte: fotos do autor.



Figura 4.3: Vista dos equipamentos e materiais prontos para a concretagem. Fonte: foto do autor.

4.1.2. Mistura

O processo de mistura foi realizado seguindo a ordem e os tempos estabelecidos nas pesquisas de Garcez (2009) e Righi (2015). Salienta-se que durante a adição da fibra foi necessário ajudar o equipamento puxando a bacia em direção oposta ao giro (como pode ser visto na imagem (e) da Figura 4.4), isto devido à consistência que ia tomando o ECC, relativamente compacta, sendo difícil para a betoneira continuar com a rotação das hastes. Na Figura 4.4 pode ser vista a sequência do processo:

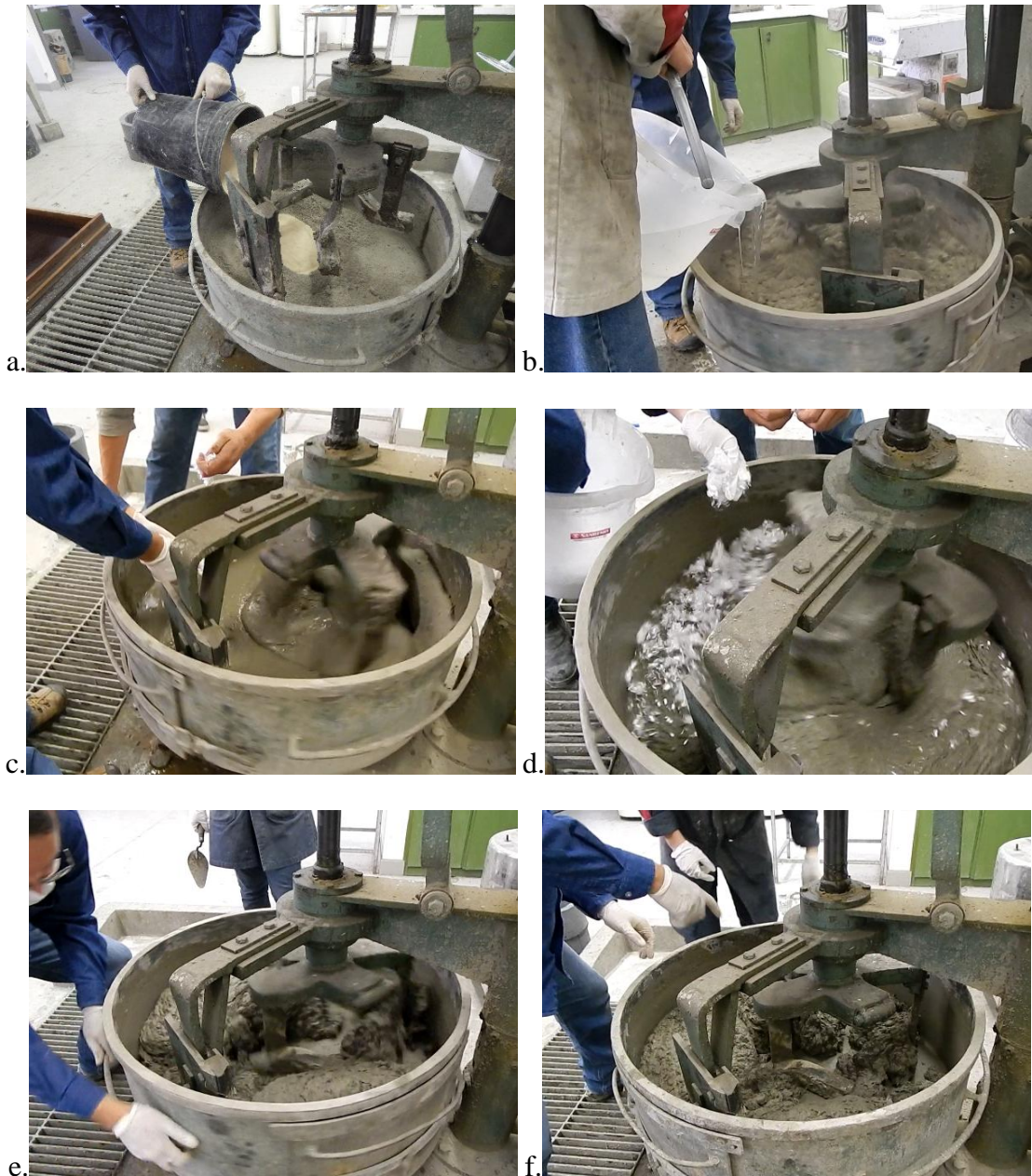


Figura 4.4: Sequência do processo de mistura de ECC: (a) mistura de materiais secos; (b) adição de água e aditivo; (c) com material homogêneo inicia-se adição de fibras; (d) adição de fibras; (e) processo final de mistura; (f) material final. Fonte: fotos do autor.

Uma vez terminada a mistura, procedeu-se ao lançamento do ECC na forma, processo difícil devido à consistência do material. Este ECC em estado fresco é bastante “compacto”, difícil de manusear, tendendo a permanecer em grumos. Foi distribuído de forma manual e com a ajuda de um vibrador de imersão. O acabamento final foi dado com régua metálica. Na Figura 4.5 é apresentada a sequência de lançamento do ECC na forma:



Figura 4.5: Sequência que mostra a acomodação do ECC na forma: (a-b) disposição de material na forma; (c-d) espalhamento e vibração; (e) acabamento final; (f) textura final. Fonte: fotos do autor.

Pelo tamanho da forma não foi possível levar a placa para a câmara úmida o que implicou a impossibilidade de se realizar um controle de umidade e temperatura durante a cura, a qual resumiu-se em molhar a placa duas vezes por dia durante uma semana, permanecendo a placa o tempo todo no interior do laboratório. Na Figura 4.6 pode ser visto o aspecto final da placa.



Figura 4.6: Aspecto final da placa. Fonte: fotos do autor.

4.1.3. Avaliação da Microtextura com o Pêndulo Britânico

A microtextura foi avaliada pelo ensaio do Pêndulo Britânico seguindo as indicações da norma ASTM E-303-13 (ASTM, 2013). Foram executados três ensaios na placa, sendo dois em uma direção e um terceiro na direção perpendicular a dos outros dois. Na Figura 4.7 se apresenta a execução de um ensaio na placa. Os resultados são apresentados na Tabela 4.2.



Figura 4.7: Execução do ensaio de Pêndulo Britânico na placa. Fonte: fotos do autor.

Tabela 4.2: Resultados dos ensaios do Pêndulo Britânico e classificação da Microtextura.

Ensaio	VRD	Classificação
1	55	Rugosa
2	54	Medianamente rugosa
3	55	Rugosa

4.1.4. Avaliação da Macrotextura com a Altura de Mancha de Areia

Uma metodologia utilizada para estimar a macrotextura de pavimentos é o ensaio de altura de Mancha de Areia. Esse ensaio foi executado seguindo as indicações da norma ASTM E 965-96 (ASTM, 2006). Foram executados três ensaios na placa, como pode ser visto na Figura 4.8, os resultados são apresentados na Tabela 4.3.



Figura 4.8: Distribuição dos ensaios de altura da mancha de areia na placa de ECC. Fonte: foto do autor.

Tabela 4.3: Resultados dos ensaios de Altura de Mancha de Areia e classificação da Macrotextura.

Ensaio	HS [mm]	Classificação
1	0,65	Média
2	0,62	Média
3	0,67	Média

4.1.5. Conclusões desta fase do estudo

- a utilização de uma betoneira de eixo vertical mostrou-se eficiente para a mistura de ECC, porém com dificuldade;
- verificou-se a dificuldade do manuseio do material em estado fresco, sendo difícil sua colocação na forma e seu acabamento. Mesmo assim, foi possível lançar o material, vibrar e nivelar, mostrando a viabilidade de sua utilização;
- ficou evidente a necessidade de se implementar uma metodologia para desfilar as fibras; considerando-se a proposta de utilizar um jato de ar com as fibras dispostas no interior de um recipiente fechado, técnica já utilizada em outros laboratórios da UFRGS.

O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (2006) incluiu faixas de alturas de Mancha de Areia e valores mínimos do Pêndulo Britânico. A macrotextura verificada por meio da altura de Mancha de Areia (HS) deve estar no intervalo de 0,60 a 1,20 mm. Por sua vez a condição de atrito obtida por meio do Pêndulo Britânico deve estar no intervalo de 47 a 75. Como pode ser visto nas tabelas Tabela 4.3 e Tabela 4.2, os resultados obtidos para a placa em ECC, indicam que a macrotextura é avaliada como Média, sendo necessário estabelecer medidas para melhorar a textura superficial para melhorar o atrito dos recapeamentos em ECC.

Algumas opções consideradas são:

- substituição da areia da mistura ou uma porcentagem dela por areia de granulometria média;
- aplicação na superfície de materiais para melhorar o atrito, como por exemplo, o salgamento com areia;
- realização de ranhuras superficiais.

Embora se analisa a viabilidade de aplicar produtos para melhorar o atrito, deve ser levado em conta que a opção mais adequada é a formação de ranhuras superficiais. A execução de ranhuras em superfícies de ECC não pode ser realizada com vassoura de cerdas metálicas, prática comum para acabamento de pavimentos de concreto, dado que as cerdas arrastam as fibras. Uma proposta inicial corresponde com a utilização de um rolo com o negativo das ranhuras requeridas. Dessa forma passando o rolo de forma manual e com uma pressão suficiente deixar-se-ia a superfície de ECC texturizada.

A substituição da areia fina por areia média motivou a experiência com misturas alternativas que é descrita a seguir.

4.2. ESTUDO DE MISTURAS ALTERNATIVAS

Considerando as conclusões da elaboração da placa inicial, foi proposta a execução de misturas de ECC nas quais se variasse a proporção do agregado fino (areia fina) do traço. A proposta consistiu na substituição, medida em peso, de uma porcentagem da areia fina por areia média; buscando-se obter um material com uma superfície que apresentasse melhores características de atrito, conseqüentemente mais seguras para o tráfego de veículos. As misturas elaboradas também foram avaliadas quanto à resistência mecânica por meio do ensaio de tração na flexão

em viga quatro pontos, proposto por Perroni em 2012, baseado na norma ASTM C1609 C1609M-12.

A experiência consistiu na moldagem de vigas de ECC, com dimensões de 305 mm de comprimento, 70 mm de largura e 15 mm de altura. Para avaliar as condições de atrito foram executados ensaios de Pêndulo Britânico e de Altura de Mancha de Areia. Deve ser considerado que em se tratando de vigas com as dimensões descritas anteriormente, os ensaios de macrotextura e microtextura exigem algumas adaptações para sua execução. Também foram realizados ensaios de *flow table* como forma de avaliar as condições de trabalhabilidade dessas misturas em estado fresco.

4.2.1. Mistura

Foi utilizado como traço básico o resultado das pesquisas de Righi (2015) e Costa (2015), sem adição de materiais pozolânicos. A substituição de areia fina por areia média foi de 20%, 50% e 80%, sendo também concretada uma viga com o 100% de areia média, relação apresentada na Tabela 4.4.

As misturas foram designadas como MA (Misturas Alternativas), seguido da relação em porcentagem de areia fina e areia média. Exemplo: MA 20/80 corresponde à Mistura Alternativa com 20% de areia fina e 80% de areia média.

Tabela 4.4: Relação de misturas ensaiadas.

Designação	Proporção de areia fina [%]	Proporção de areia média [%]	Quantidade de vigas
MA 0/100	0	100	1
MA 20/80	20	80	4
MA 50/50	50	50	4
MA 80/20	80	20	4

As misturas foram realizadas na argamassadeira do LEME. Na Figura 4.9 é apresentada uma sequência dos trabalhos:



Figura 4.9: Sequência que mostra o lançamento das misturas alternativas de ECC nas formas: (a) argamassadeira; (b) formas; (c-d) materiais para a concretagem; (e) ECC após terminar a mistura; (f) material nas formas. Fonte: fotos do autor.

Terminado o lançamento do ECC nas formas, estas foram levadas à câmara úmida e desformadas 24 horas depois da mistura, continuando o processo de cura por 28 dias na câmara úmida com temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar superior a 95%.

Os ensaios foram executados com corpos de prova secos, por isso os corpos de prova foram retirados 48 horas antes da realização dos ensaios e secados ao ar livre no laboratório, sem exposição solar. O manuseio e transporte das vigas deve ser cuidadoso para garantir que não

sejam golpeadas ou sofram qualquer dano. Dessa forma pode-se garantir ao máximo de qualidade e representatividade dos resultados.

4.2.2. Resultados de Ensaios de Tração na Flexão

Na Figura 4.10 é apresentada a configuração dos equipamentos prontos para iniciar o ensaio. O vão é de 230 mm, sendo a carga aplicada nos dois terços meios do vão, com uma separação entre cutelos de 77 mm. Na Figura 4.11 é apresentado um croqui da configuração do ensaio.

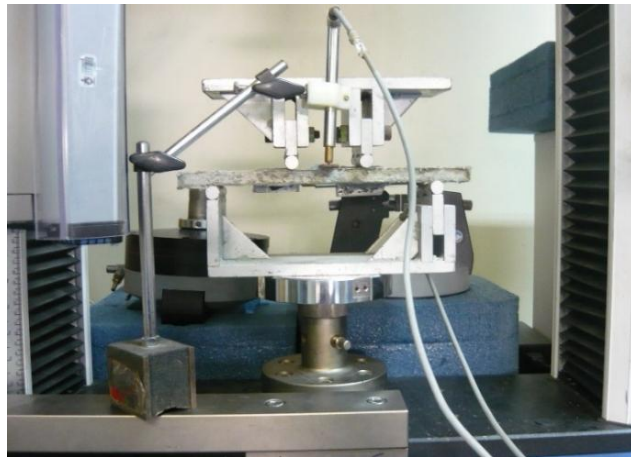


Figura 4.10: Configuração dos equipamentos para realizar os ensaios de resistência à tração na flexão em vigas quatro pontos. Fonte: foto do autor.

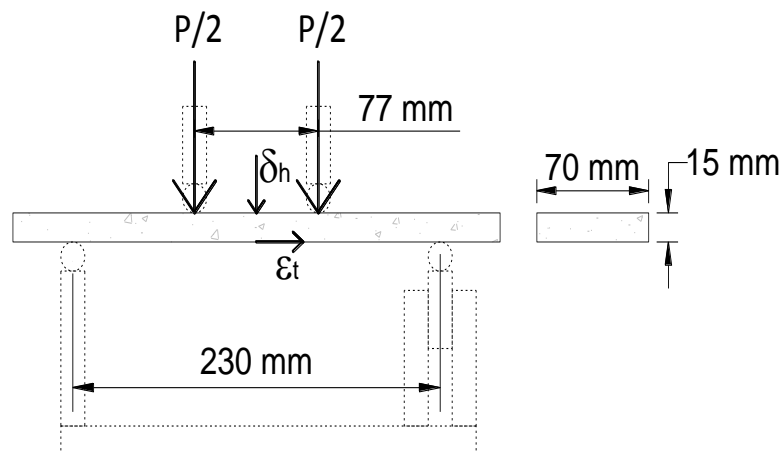


Figura 4.11: Croqui do ensaio de resistência à tração na flexão em viga quatro pontos.

Foram instalados dois sensores (LVDT) para registrar os deslocamentos; um deles na parte superior da viga, no ponto central, permitindo registrar as deflexões (δ_h). Um segundo LVDT foi instalado com ajuda de suportes na parte posterior da viga, de forma a registrar os

deslocamentos horizontais no carregamento, e com esses registros foi possível calcular as deformações específicas de extensão (ϵ_t). Na Figura 4.12 é possível ver o detalhe do LVDT instalado para registrar os deslocamentos horizontais.

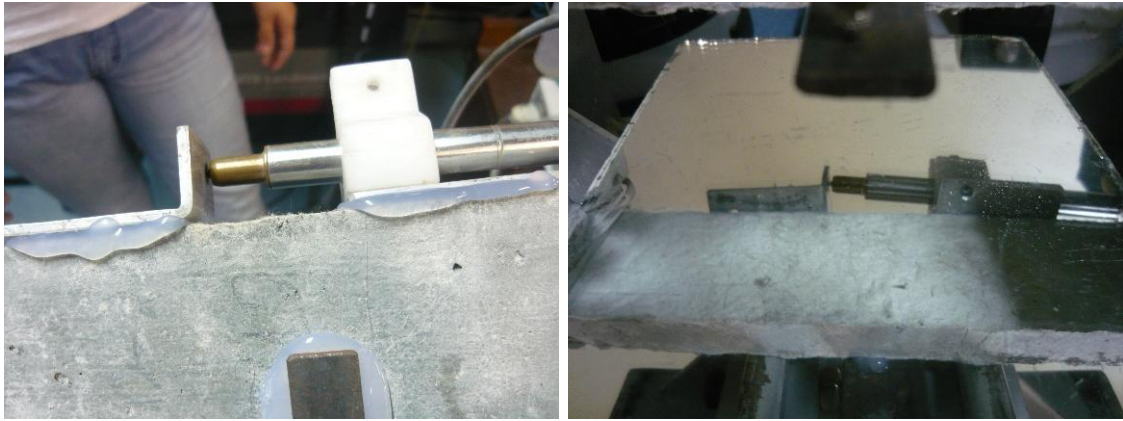


Figura 4.12: Detalhe da instalação de LVDT para registrar deslocamentos horizontais. Fonte: fotos do autor.

No total foram executados 13 ensaios no LAPOL (Laboratório de Materiais Poliméricos), sendo que um dos resultados foi desconsiderado (MA 80/20 CP1) porque durante a execução do ensaio aconteceu um problema com o arranjo dos equipamentos. Na Figura 4.13 são mostradas as rupturas em dois ensaios ao final da sua execução. É possível ver a deflexão e a quase integridade das vigas. A microfissuração foi verificada na totalidade dos corpos de prova ensaiados (Figura 4.14).

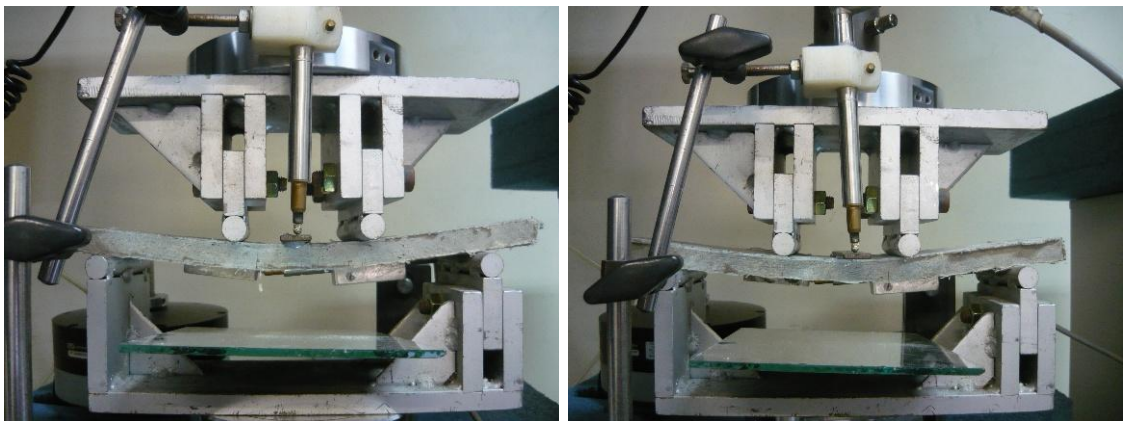


Figura 4.13: Exemplos de corpos de prova no momento final do ensaio de resistência à tração na flexão. Fonte: fotos do autor.



Figura 4.14: Corpos de prova ensaiados, notam-se as microfissuras.
Fonte: fotos do autor.

A seguir serão apresentados os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão das Misturas Alternativas: na Tabela 4.5 resultados das resistências; na Tabela 4.6 as deflexões e deformações específicas correspondentes com as resistências máximas, medidas no LVDT vertical e na Tabela 4.7 as deformações de tração na fibra inferior, medida no LVDT horizontal. São incluídos os correspondentes Desvio Padrão e os coeficientes de variação (CV).

Tabela 4.5: Resistência à Tração na Flexão das Misturas Alternativas.

Designação	$f_{t,FP}$ [MPa]	Desvio Padrão [MPa]	CV [%]
MA 0/100	6,3	-	-
MA 20/80	7,1	2,0	27
MA 50/50	8,1	0,7	9
MA 80/20	7,0	0,8	11

Tabela 4.6: Deflexões e deformações específicas nas resistências máximas medidas no LVDT vertical, Misturas Alternativas.

Designação	δ_{HP} [mm]	ϵ_{tP} [$\mu\epsilon$]	Desvio Padrão [MPa]	CV [%]
MA 0/100	3,46	4617	-	-
MA 20/80	3,84	5148	3310	64
MA 50/50	5,59	7454	2645	35
MA 80/20	4,68	6242	3326	53

Tabela 4.7: Deformações específicas de tração na fibra inferior nas resistências máximas medidas no LVDT horizontal, Misturas Alternativas.

Designação	ϵ_{tP} [%]	Desvio Padrão [%]	CV [%]
MA 0/100	1,54	-	-
MA 20/80	2,36	1,19	50
MA 50/50	1,92	1,92	100
MA 80/20	2,59	1,00	39

Na Figura 4.15 são apresentados os resultados dos ensaios de quatro pontos para as Misturas Alternativas em termos da Resistência à Tração na Flexão ($f_{t,f}$) e as deflexões (δh) medidas no centro do vão. Pode-se verificar o comportamento *strain-hardening* de todos os traços testados.

Nesse mesmo gráfico também pode ser visto que todas as misturas apresentam um comportamento elástico semelhante, e com resistências da abertura da primeira fissura no intervalo do 4,2-6,6 MPa.

A mistura correspondente com a substituição do 50% da areia fina por areia média (MA 50/50) apresentou maiores resistências médias e maiores deformações na ruptura, o que a coloca como a porcentagem de substituição mais promissória visando à conformação de trações alternativas do ECC.

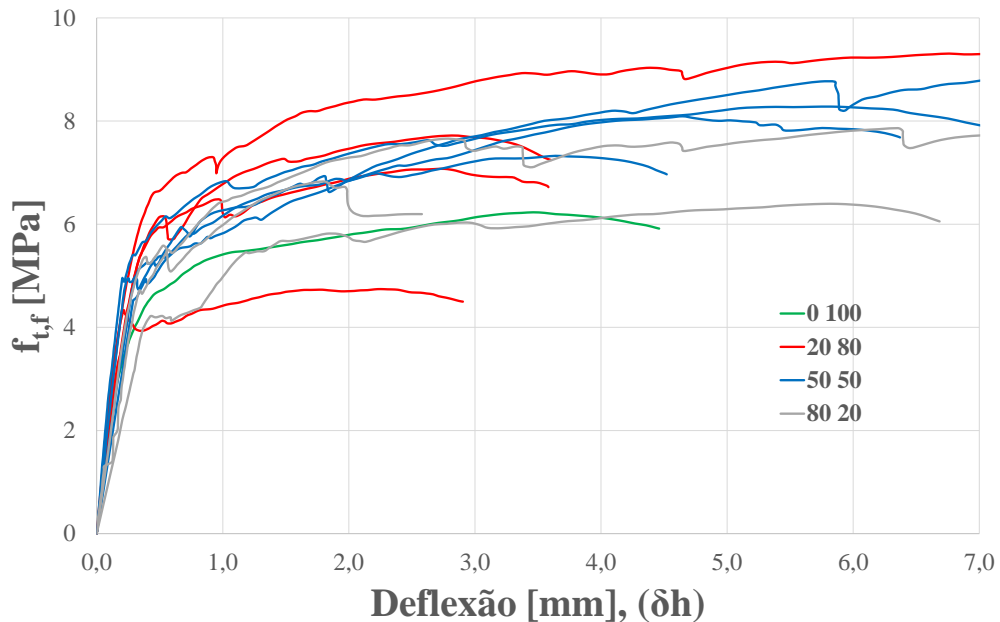


Figura 4.15: Tensão de tração *versus* Deflexão no ponto médio – Misturas Alternativas.

A partir das curvas tensão-deformação calculou-se o Módulo Elástico à Flexão secante (E_{sec}) para cada traço, como mostrado na Figura 4.16. Nessa figura a tensão de tração atuante é dividida pela resistência máxima; ou seja, apresenta-se em termos da Resistência à Tração na Flexão normalizada. Na Tabela 4.8 é apresentado um resumo do (E_{sec}), calculado segundo o critério de Che (2010) *apud* Graeff (2011).

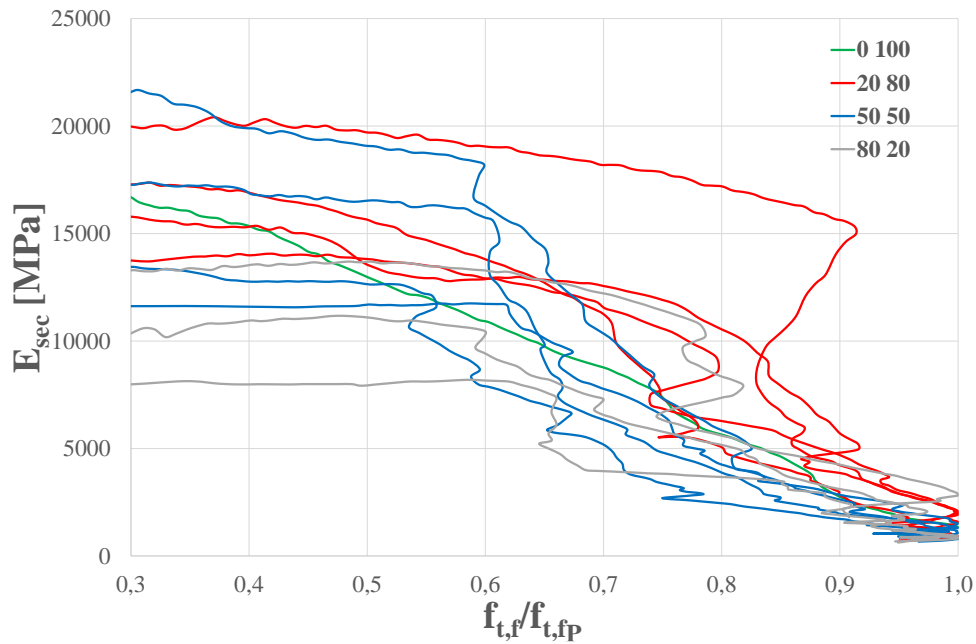


Figura 4.16: Módulo Elástico à Flexão secante *versus* Tensão de tração normalizada – Misturas Alternativas.

Tabela 4.8: Módulo Elástico à Flexão secante das Misturas Alternativas.

Designação	E_{sec} [MPa]	Desvio Padrão [MPa]	CV [%]
MA 0/100	15354	-	-
MA 20/80	16565	2583	16
MA 50/50	15324	3844	25
MA 80/20	10792	2764	26

Os resultados obtidos demonstram a viabilidade da utilização de areias de granulometria média na produção de ECC's. É importante levar em consideração que as resistências e as deformações encontram-se na ordem de grandeza que as relatadas na literatura para outros traços de ECC, sendo que praticamente a totalidade deles foram produzidos com areias finas. A possibilidade de substituir de forma parcial ou total por areia média a produção de ECC's representa um aporte significativo na viabilização de projetos para os quais por fatores econômicos ou de disponibilidade do material não seja possível a utilização de areias finas.

4.2.3. Ensaio de Pêndulo Britânico

O ensaio foi executado seguindo as indicações da norma ASTM E-303-13 (ASTM, 2013). Como os ensaios foram executados em vigas foi necessário segurá-las com uma placa de aço (Figura 4.17), única modificação feita em relação à norma. Foram ensaiadas as 13 vigas, os resultados sendo apresentados na Tabela 4.9.



Figura 4.17: Equipamento para a execução do ensaio de Pêndulo Britânico nas vigas das misturas alternativas. Fonte: foto do autor.

Tabela 4.9: Resultados dos ensaios do Pêndulo Britânico e classificação da Microtextura das vigas das Misturas Alternativas.

Designação	VRD	Classificação
MA 0/100 CP1	94	Muito rugosa
MA 20/80 CP1	90	
MA 20/80 CP2	93	
MA 20/80 CP3	89	
MA 20/80 CP4	86	
MA 50/50 CP1	90	
MA 50/50 CP2	94	
MA 50/50 CP3	96	
MA 50/50 CP4	97	
MA 80/20 CP1	87	
MA 80/20 CP2	83	
MA 80/20 CP3	81	
MA 80/20 CP4	81	

4.2.4. Ensaios da Altura da Mancha de Areia

Nos ensaios para medir a macrotextura foram levados em consideração as disposições da norma ASTM E 965-96, mas devido a utilização de vigas com uma área retangular foram feitas as seguintes adaptações: dispôs-se areia sobre a viga e espalhou-se delicadamente com um bastão até cobri-la completamente, pesou-se a areia que cobre a viga e estimou-se a equivalência em volume, com a área da viga como referência, determina-se o diâmetro de um círculo com uma área equivalente.

Na Figura 4.18 é apresentado um exemplo da execução do ensaio, sendo os resultados apresentados na Tabela 4.10.



Figura 4.18: Execução do ensaio de Altura de Mancha de Areia nas vigas das misturas alternativas. Fonte: foto do autor.

Tabela 4.10: Resultados dos ensaios de altura de Mancha de Areia e classificação da Macrotextura das vigas de Misturas Alternativas.

Designação	HS [mm]	Classificação
MA 0/100 CP1	0,72	Média
MA 20/80 CP1	0,66	Média
MA 20/80 CP2	0,64	Média
MA 20/80 CP3	0,59	Média
MA 20/80 CP4	0,65	Média
MA 50/50 CP1	0,94	Grosseira ou Aberta
MA 50/50 CP2	0,75	Média
MA 50/50 CP3	0,80	Média
MA 80/20 CP1	0,60	Média
MA 80/20 CP2	0,67	Média
MA 80/20 CP3	0,64	Média
MA 80/20 CP4	0,64	Média

O ECC apresenta um comportamento em termos do acabamento superficial similar ao apresentado por concretos de cimento Portland convencionais, demonstrado nos valores obtidos nos ensaios do Pêndulo Britânico e da altura de Mancha de Areia. Mesmo com a melhoria nas condições do atrito superficial, se comparados os resultados das Misturas Alternativas com o ECC_{Ref} , há necessidade de estabelecer processos que visem à melhoria de indicadores como a altura de Mancha de Areia.

4.2.5. Trabalhabilidade

Foram executados ensaios de *flow table* nos 4 traços, seguindo as indicações da norma ASTM C 1437-13. Os resultados são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11: Resultados do *flow table* das Misturas Alternativas.

Designação	Diâmetro médio [cm]	<i>Flow table</i>
MA 0/100	18,15	45
MA 20/80	18,45	48
MA 50/50	16,73	34
MA 80/20	18,53	48

4.2.6. Conclusões desta fase do estudo

- as resistências obtidas para as Misturas Alternativas se encontram dentro da ordem de grandeza dos relatados na literatura para compósitos com areia fina na sua composição. Os valores obtidos para as deformações específicas apresentam-se como um indicador do comportamento dúctil dos materiais testados, de forma análoga ao descrito na literatura;
- os resultados do Pêndulo Britânico mostram uma melhoria na microtextura com a substituição de areia fina por areia média, passando de superfícies Rugosa ou Medianamente Rugosa, na Placa de 1 m², para superfícies a Muito Rugosas, nas vigas;
- os resultados dos ensaios de Altura de Mancha de Areia (modificados) executados nas vigas mantêm a mesma ordem de grandeza dos resultados obtidos na placa de 1 m², comprovando que em termos da macrotextura não se tem algum ganho na utilização de algum dos traços ensaiados;
- com base nos resultados dos ensaios de Altura de Mancha de Areia se mantém a proposta de estabelecer processos de texturização da superfície dos recapeamentos executados em ECC.

4.3. MISTURAS COM SUBSTITUIÇÃO DO ADITIVO

Uma verificação final foi realizada por meio da substituição do plastificante Glenium 54 da BASF pelo aditivo Tec-flow 8000 da Grace. O autor realizou uma única mistura com a finalidade de examinar a trabalhabilidade, utilizando como indicador os resultados do ensaio *flow table* (Tabela 4.12). O traço corresponde ao ECC de referência (ECC_{Ref}). Mantendo-se a proporção do aditivo em 0,56% do volume total do compósito.

Tabela 4.12: Resultado *flow table* mistura de prova novo aditivo.

Designação	Diâmetro médio [cm]	<i>Flow table</i>
ECC _{Ref} Tec-flow 8000	20,88	67

Ao comparar o resultado com os das misturas alternativas constata-se um comportamento mais favorável em termos da trabalhabilidade para o uso da aditivo Tec-flow 8000.

4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS QUANTO AOS ESTUDOS PRELIMINARES

Embora a mistura de ECC utilizando a betoneira de eixo vertical seja possível de ser executada não se mostrou como opção viável para a construção dos recapeamentos a serem ensaiados no LAPAV. Essa betoneira não pode ser transportada fora do LEME e o tipo de equipamento não está disponível comercialmente. A alternativa de substituir o aditivo plastificante viabiliza o emprego de betoneiras de tombo para mistura, fato que foi comprovado com as concretagens realizadas para elaborar as vigas para ensaios monotônicos.

A substituição do aditivo plastificante se fez mantendo a proporção do aditivo utilizado anteriormente, sugerindo que se procure aprimorar o traço, em futuras pesquisas.

Mesmo verificada a viabilidade das Misturas Alternativas foi mantido o traço de referência para os demais ensaios propostos, mantendo a linha de pesquisa do LEME. Uma sugestão para pesquisas futuras seria a verificação das propriedades dinâmicas ou em ensaios de verdadeira grandeza de ECC's produzidos com a incorporação de areias médias na sua composição.

A partir dos resultados dos ensaios de macrotextura (Mancha de Areia), tanto na placa de 1 m² quanto nas vigas, constatou-se a necessidade da texturização da superfície dos recapeamentos a executar em ECC. A primeira proposta consiste na impressão de ranhuras ou fendas nos recapeamentos.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos dos ensaios propostos no programa experimental, sendo as experiências divididas entre ensaios de laboratório e ensaios em verdadeira grandeza. Com os ensaios de laboratório foram obtidas as propriedades mecânicas do ECC, assim como avaliado seu comportamento perante cargas cíclicas e definidos modelos de fadiga. Já com os ensaios em verdadeira grandeza foi possível verificar os requisitos construtivos na utilização do ECC, assim como avaliar seu comportamento perante a aplicação de ciclos de carga aplicados pelo simulador de tráfego.

5.1. ENSAIOS DE LABORATÓRIO

5.1.1. Ensaio de Resistência à Tração na Flexão ($f_{t,f}$)

No presente item serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão em ensaios de viga quatro pontos. Além de permitir a caracterização das propriedades mecânicas do compósito, com a Resistência à Tração na Flexão são estabelecidos os níveis de carregamento a serem aplicados nos ensaios de fadiga, sendo esses níveis de carga porcentagens da resistência. Os resultados dos ensaios também foram utilizados para escolher a geometria dos corpos de prova para os ensaios dinâmicos, buscando que se ajustassem à capacidade do equipamento para ensaios de fadiga disponível no LAPAV, conforme foi descrito no item 3.6.4.

Para a confecção dos corpos de prova foram executadas duas concretagens, uma para o traço de referência (ECC_{Ref}) e outra para o traço alternativo (ECC_{CCA}). Com cada uma das concretagens foram moldados 10 corpos de prova prismáticos, 5 com dimensões de 100x100x400 mm e 5 de 50x100x400 mm, e 3 cilindros para ensaios de resistência a compressão axial. No processo de mistura foi utilizada a betoneira de tombo de 400 litros de capacidade. É importante ressaltar esse fato porque uma das questões a resolver na pesquisa, e tratada no Capítulo 4, era a viabilidade de se utilizar esse tipo de equipamento para uma mistura bem sucedida de ECC.

5.1.1.1. Resultados de Resistência à Tração na Flexão ($f_{t,f}$)

Na Tabela 5.1 são resumidos os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão para os dois traços ensaiados. São apresentados os valores médios para cada um dos 4 grupos de 5 vigas, a carga máxima aplicada (P_P), a ($f_{t,FP}$) correspondente a essa carga máxima, o Desvio Padrão e o Coeficiente de Variação (CV). As vigas foram ensaiadas com uma idade de 28 dias.

O traço de referência (ECC_{Ref}) apresenta um valor de ($f_{t,FP}$) médio de 5,8 MPa para vigas de 100 mm de altura e de 6,8 MPa nas vigas de 50 mm de altura. O traço alternativo (ECC_{CCA}) apresenta valores de ($f_{t,FP}$) médio de 7,2 MPa (vigas de 100 mm) e de 8,2 MPa (vigas de 50 mm). O traço alternativo apresenta valores 24 e 21% superiores que o traço de referência, para vigas de 100 mm e de 50 mm de altura, respectivamente. Valores médios do (CV) para o ECC_{Ref} do 8% e para o ECC_{CCA} do 15% demonstram a homogeneidade dos resultados.

Tabela 5.1: Resistência à Tração na Flexão ($f_{t,f}$).

Traço	Altura CP's [mm]	Viga	$f_{t,FP}$ [MPa]	P_P médio [kN]	$f_{t,FP}$ médio [MPa]	Desvio Padrão [MPa]	CV [%]
ECC_{Ref}	100	1	5,3	18,7	5,8	0,6	11
		2	6,3				
		3	6,2				
		4	6,1				
		5	4,9				
ECC_{Ref}	50	1	6,3	5,3	6,8	0,4	5
		2	7,0				
		3	6,7				
		4	7,3				
		5	6,9				
ECC_{CCA}	100	1	5,8	24,8	7,2	0,9	12
		2	7,2				
		3	7,5				
		4	7,7				
		5	8,0				
ECC_{CCA}	50	1	6,7	6,6	8,2	1,5	18
		2	6,6				
		3	9,5				
		4	8,6				
		5	9,5				

Na Tabela 5.2 é apresentado um resumo de valores da ($f_{t,f}$) de várias pesquisas em ECC. Como pode ser visto, os resultados da presente pesquisa encontram-se abaixo dos valores apresentados, mas não de forma significativa.

Tabela 5.2: Faixa de valores da $f_{t,f}$, obtidos por alguns autores.

Autores	Compósito	$f_{t,f}$ médio [MPa]	Desvio Padrão [MPa]	CV [%]
Suthiwarapirak et al. (2002)	PVAECC ⁵	8,6	0,6	7
Suthiwarapirak et al. (2004)	PEECC ⁶	9,9	0,3	3
Qian (2007)	PVAECC	10,9	0,9	8
Garcez (2009)	PPECC	7,7	0,7	9
Righi (2015)	PPECC _{Ref} ⁷	9,1	1,7	19
	PPECC _{CCA}	7,8	1,7	22

Comparando os resultados em termos das resistências à primeira fissura, intervalo elástico, apresentados na Tabela 5.3, pode ser constatada e mantida a tendência do traço alternativo a apresentar resistências superiores às do traço de referência. A resistência à tração na primeira fissura ($f_{t,f1}$) representa, aproximadamente, 68 e 65% da ($f_{t,f}$) do ECC_{Ref} e do ECC_{CCA}, respectivamente.

Tabela 5.3: Resistência à Tração na Flexão na abertura da primeira fissura ($f_{t,f1}$).

Traço	Altura CP's [mm]	$f_{t,f1}$ médio [MPa]
ECC _{Ref}	100	4,0
	50	4,5
ECC _{CCA}	100	4,6
	50	5,4

Todas as vigas ensaiadas, 20 no total, apresentaram o comportamento tensão-deformação de *strain-hardening*. Esse comportamento inclui nos primeiros estágios de carga uma fase elástico-linear, seguida por outra elástico-não linear até a abertura da primeira fissura, após da qual inicia o processo de microfissuração e o aporte de resistência das fibras, conhecido como *strain-hardening*, até se alcançar a resistência máxima, a partir da qual inicia o processo de perda de resistência com a deformação *-strain-softening-* até a ruptura física da viga.

Considerando os resultados anteriormente expostos e que o sistema de aplicação de carga do equipamento para ensaios dinâmicos do LAPAV tem capacidade máxima teórica de 12 kN, foi definido que as dimensões das vigas para a realização dos ensaios de fadiga seriam 50x100x400

⁵ PVAECC: ECC elaborado com adição de fibras de Poli-Vinil-Álcool (PVA).

⁶ PEECC: ECC elaborado com adição de fibras de Polietileno (PE).

⁷ PPECC: ECC elaborado com adição de fibras de Polipropileno (PP).

mm. As vigas com essas dimensões exigem cargas máximas ($f_{t,f} = 100\%$) de 5,3 kN para ECC_{Ref} e 6,6 kN para ECC_{CCA}, níveis perfeitamente aplicáveis com o equipamento disponível.

Na presente pesquisa e com a finalidade de comparar resultados com Suthiwarapirak et al. (2002 e 2004) foi adotada uma taxa de deslocamento de 1,2 mm/min. Salienta-se que nessas pesquisas foram realizados ensaios monotônicos e de fadiga em ECC's constituídos com fibras de PVA e de PE. Como comparação, a norma ASTM C1609 recomenda uma taxa de deslocamento na faixa de 0,025-0,2 mm/min. Valores similares também foram relatados nos ensaios de compósitos por Garcez (2009) e por Magalhães (2010) de 0,1 mm/min e 0,3 mm/min, respectivamente.

Na Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3 e Figura 5.4 são apresentados os gráficos dos quatro grupos de vigas ensaiadas. As ondulações presentes no comportamento após a primeira fissura, pós-elástico, são características do comportamento do compósito, que é influenciado pelo processo de microfissuração e os aportes de resistência das fibras, sendo mais evidentes nas vigas de 50 mm de altura. Todas as vigas apresentaram a sua falha no terço médio.

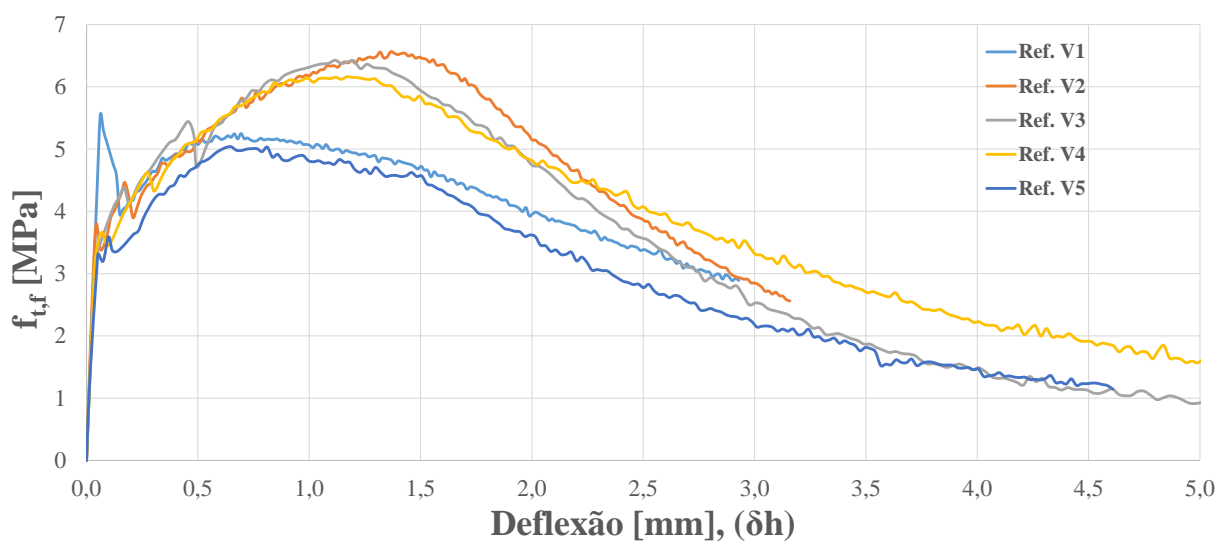


Figura 5.1: Tensão de tração *versus* Deflexão no ponto médio – Traço de referência, viga 100 mm de altura.

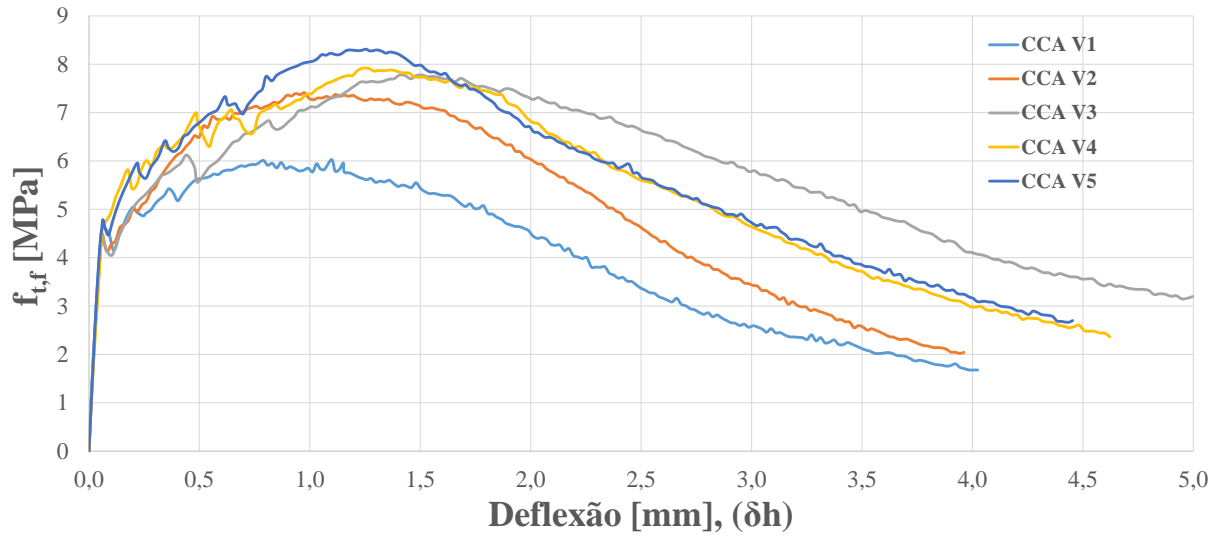


Figura 5.2: Tensão de tração *versus* Deflexão no ponto médio – Traço de alternativo, viga 100 mm de altura.

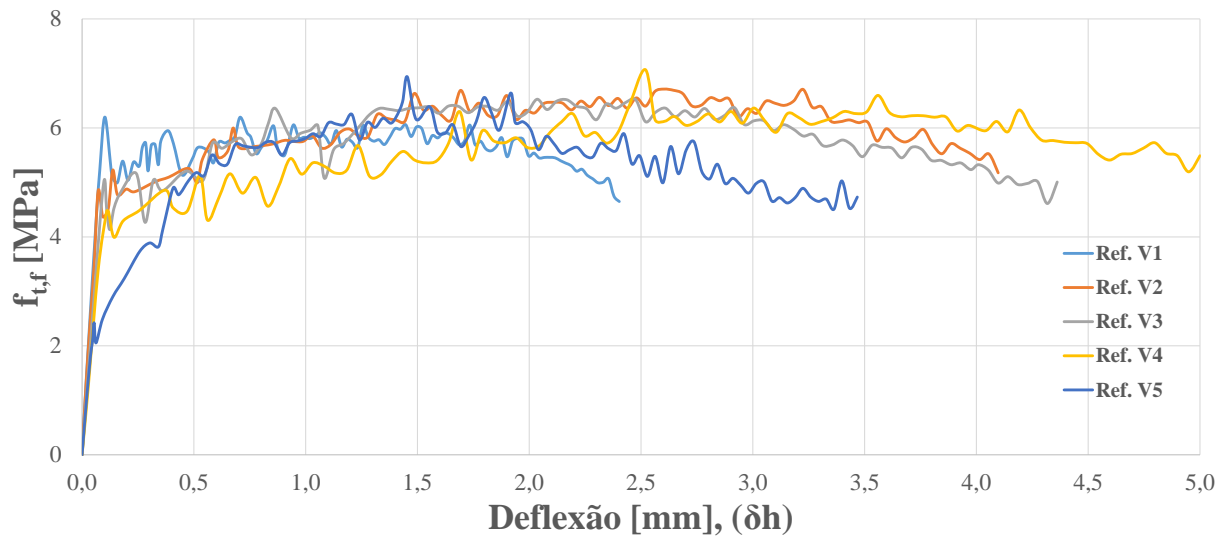


Figura 5.3: Tensão de tração *versus* Deflexão no ponto médio – Traço de referência, viga 50 mm de altura.

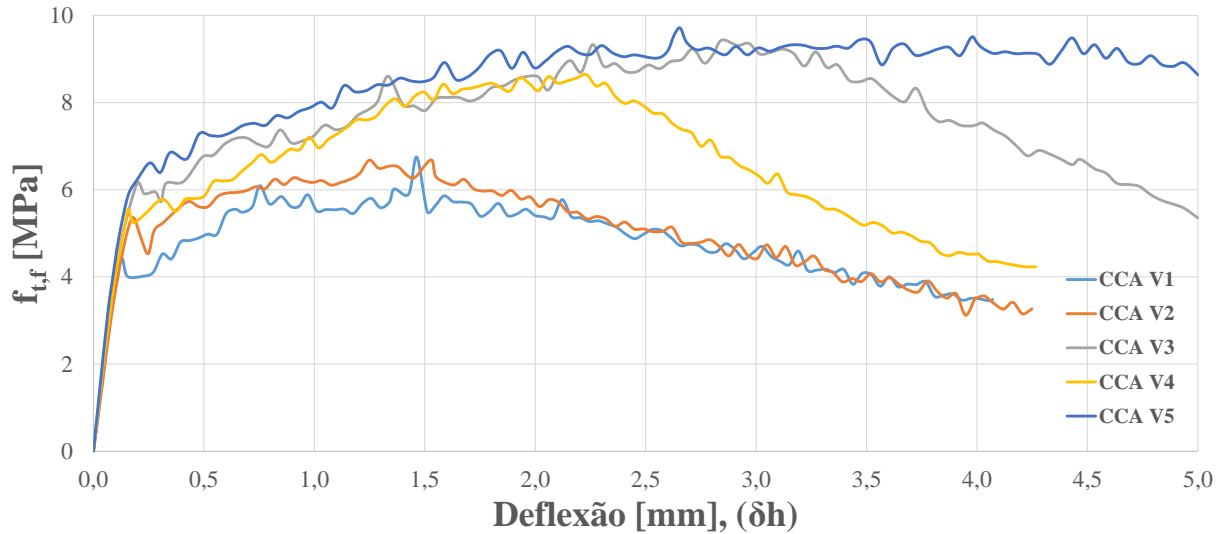


Figura 5.4: Tensão de tração *versus* Deflexão no ponto médio – Traço de alternativo, viga 50 mm de altura.

5.1.1.2. Deformação na Resistência Máxima (ϵ_{tP})

Na Tabela 5.4 são apresentadas as deformações específicas de extensão (ϵ_{tP}) associadas às resistências máximas dos compósitos, que se correspondem com as deflexões na carga máxima (δh_P) medidas no ponto médio das vigas ensaiadas. Apresentam-se resultados para os dois compósitos, junto com os correspondentes desvios padrão e coeficientes de variação. Já a Tabela 5.5 mostra as deformações correspondentes à abertura da primeira fissura (ϵ_{t1}).

Os resultados obtidos das deformações, tanto da primeira fissura como máximas, sugerem um comportamento do compósito com traço alternativo mais dúctil que o comportamento apresentado pelo compósito com traço de referência. Os valores dos (CV) indicam uma elevada dispersão dos resultados, ou seja, dados heterogêneos.

Tabela 5.4: Deformação específica de extensão na resistência máxima (ϵ_{tP}) nos ensaios de tração na flexão.

Traço	Altura CP's [mm]	δh_P [mm]	ϵ_{tP} [$\mu\epsilon$]	Desvio Padrão [$\mu\epsilon$]	CV [%]
ECC _{Ref}	100	1,01	5175	1557	30
	50	1,68	4712	1996	42
ECC _{CCA}	100	0,88	6411	1037	16
	50	1,99	5513	1624	29

Tabela 5.5: Deformação específica de extensão na abertura da primeira fissura (ϵ_{t1}) nos ensaios de tração na flexão.

Traço	Altura CP's [mm]	δh_1 [mm]	ϵ_{t1} [$\mu\epsilon$]	Desvio Padrão [$\mu\epsilon$]	CV [%]
ECC _{Ref}	100	0,08	408	263	65
	50	0,09	217	59	27
ECC _{CCA}	100	0,08	432	263	61
	50	0,18	454	122	27

5.1.1.3. Módulo Elástico à Flexão secante (E_{sec})

Para a estimativa do Módulo Elástico à Flexão secante foi utilizado o critério proposto por Che (2010) *apud* Graeff (2011). Na Tabela 5.6 é apresentado o resumo dos resultados, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Os resultados mostram que os valores do E_{sec} de ambos traços são da mesma ordem de grandeza, com baixos valores do (CV), o que indica baixa dispersão dos resultados; excetuando os resultados do ECC_{Ref} (50 mm de altura) com valores acima dos demais grupos, mas com variabilidade maior nos resultados (CV = 22%).

Tabela 5.6: Módulo Elástico à Flexão secante, critério de Che (2010).

Traço	Altura CP's [mm]	E_{sec} médio [MPa]	Desvio Padrão [MPa]	CV [%]
ECC _{Ref}	100	18052	1478	8
	50	22625	4962	22
ECC _{CCA}	100	17861	1076	6
	50	16688	1636	10

Na Figura 5.5, Figura 5.6, Figura 5.7 e Figura 5.8 são mostrados os E_{sec} em função da resistência à tração na flexão normalizada ($f_{t,f} / f_{t,fp}$). É possível ver, em todos os ensaios, um trecho inicial quase horizontal ou com uma declividade baixa que representa o comportamento elástico do material. Também é possível diferenciar dois valores de pico, sendo que o primeiro se corresponde à abertura da primeira fissura e o segundo ao valor máximo no comportamento *strain-hardening*.

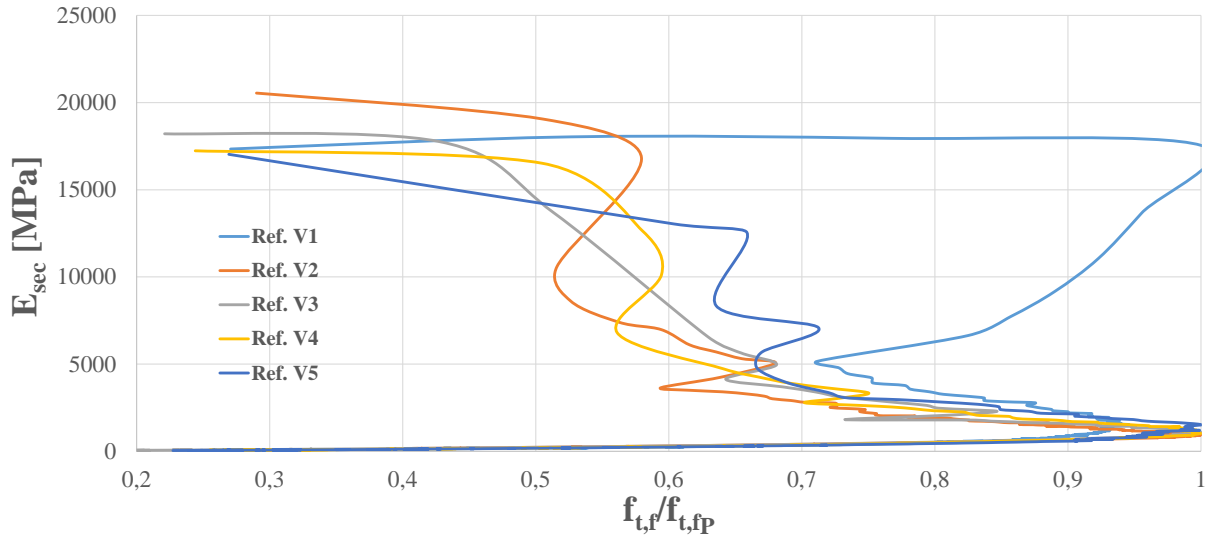


Figura 5.5: Módulo Elástico à Flexão secante *versus* Tensão de tração normalizada – Traço de referência, vigas 100 mm de altura.

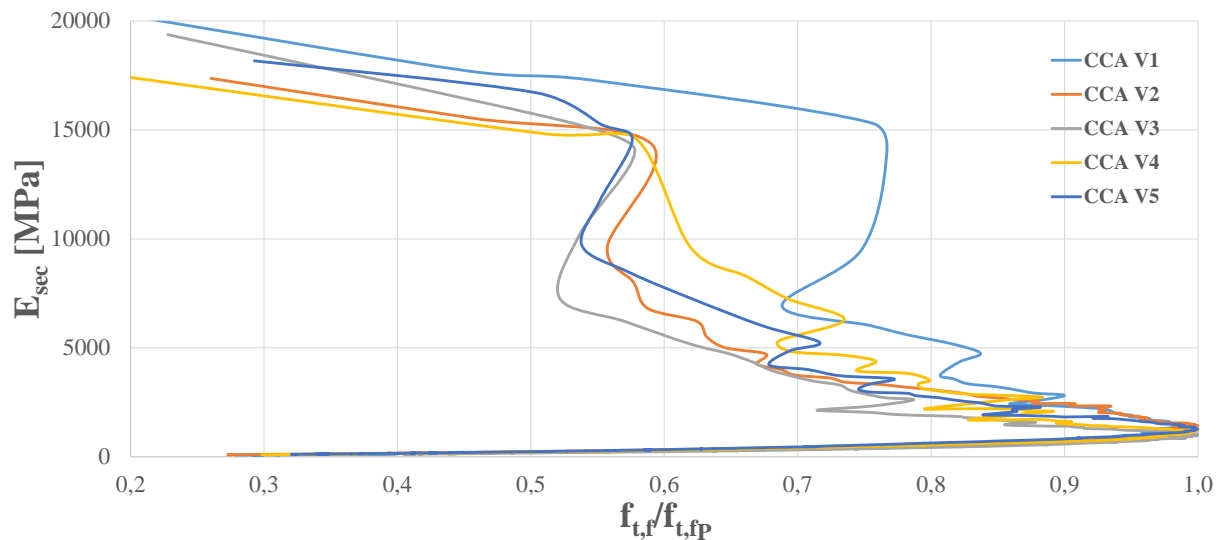


Figura 5.6: Módulo Elástico à Flexão secante *versus* Tensão de tração normalizada – Traço alternativo, vigas 100 mm de altura.

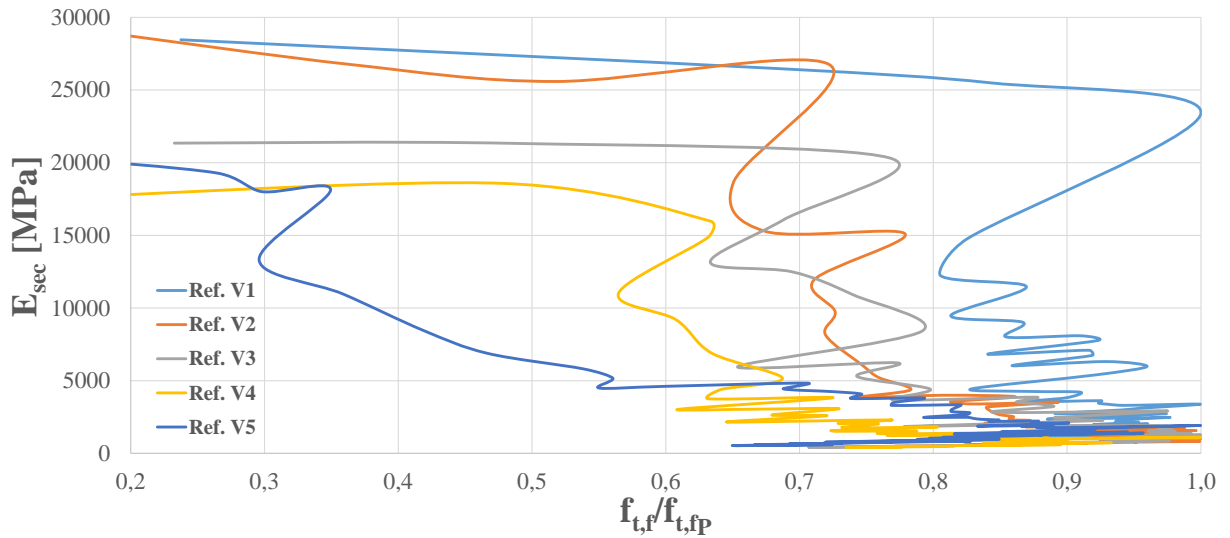


Figura 5.7: Módulo Elástico à Flexão secante *versus* Tensão de tração normalizada – Traço de referência, vigas 50 mm de altura.

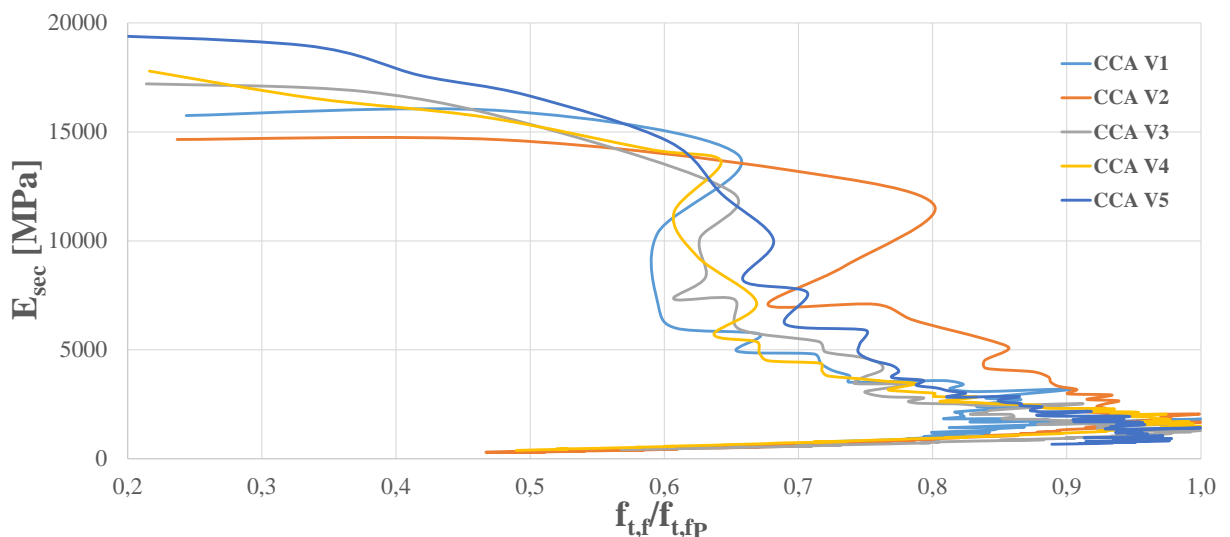


Figura 5.8: Módulo Elástico à Flexão secante *versus* Tensão de tração normalizada – Traço alternativo, vigas 50 mm de altura.

5.1.1.4. Ensaios adicionais

Na etapa final da pesquisa foram executados 8 ensaios de resistência à tração na flexão, utilizando 7 vigas que não foram ensaiadas nos ensaios de fadiga e a viga identificada como ECC_{Ref} 302 que foi a única que alcançou, sem romper, um milhão de ciclos no ensaio de fadiga e que tinha sido ensaiada com um nível de tensão correspondente ao 30% da ($f_{t,fp}$). Dois objetivos motivaram a execução desses ensaios: o primeiro consistiu na verificação da influência da umidade na resistência do ECC; o segundo foi verificar a influência dos carregamentos dinâmicos na degradação do compósito.

Primeiramente foram ensaiadas 7 vigas, 4 do traço de referência e 3 do traço alternativo. Uma das vigas (ECC_{Ref}) foi ensaiada em estado seco, as outras 6 vigas foram ensaiadas após ficarem imersas em água: uma por 2 dias e as outras cinco por 7 dias. Na Tabela 5.7 são apresentados os resultados dos ensaios para as 7 vigas, junto com as cargas máximas (P_P), a Resistência à Tração na Flexão máxima ($f_{t,FP}$), a deformação específica de extensão na resistência máxima (ϵ_{tP}) e o Módulo Elástico à Flexão secante (E_{sec}). Já na Tabela 5.8 são apresentados os resultados correspondentes à abertura da primeira fissura. As vigas tinham dimensões de 50x100x400 mm e foram ensaiadas 240 dias após a moldagem.

Tabela 5.7: Resistência à Tração na Flexão, ensaios adicionais.

Traço	Tempo submerso [dia]	P_P [kN]	$f_{t,FP}$ [MPa]	Deformação (ϵ_{tP}) [$\mu\epsilon$]	E_{sec} [MPa]
ECC_{Ref}	0	6800	8,20	4855	22184
	2	8186	9,80	3866	28954
	7	7469	8,96	5655	24929
	7	9005	10,81	6605	25813
ECC_{CCA}	7	5049	6,06	2151	24502
	7	6771	8,12	4723	24444
	7	6981	8,38	4100	25300

Tabela 5.8: Resistência à Tração na Flexão na abertura da primeira fissura, ensaios adicionais.

Traço	Tempo submerso [dia]	P_1 [kN]	$f_{t,f1}$ [MPa]	Deformação (ϵ_{t1}) [$\mu\epsilon$]
ECC_{Ref}	0	4622	5,5	300
	1	6981	8,4	350
	7	5919	7,1	335
	7	6607	7,9	359
ECC_{CCA}	7	4969	6,0	324
	7	6208	7,4	368
	7	6276	7,5	375

Os resultados demonstram que não existe uma perda da resistência do compósito pela exposição à água, pelo menos para ensaios monotônicos. A motivação dessa experiência foi verificar se a presença d'água cumprindo uma função como lubrificante durante o processo de carga afetava a aderência entre as fibras e a matriz cimentante dos compósitos. Em função dos resultados, a aderência entre fibras e matriz demonstra ser suficientemente estável.

A Figura 5.9 apresenta os gráficos de tensão-deflexão. Como pode ser visto, todas as vigas apresentam comportamento *strain-hardening*, além de um comportamento elástico semelhante.

Todos os corpos de prova tiveram sua falha no terço médio. Na Figura 5.10 são apresentadas as curvas do E_{sec} em função do esforço de tração normalizada.

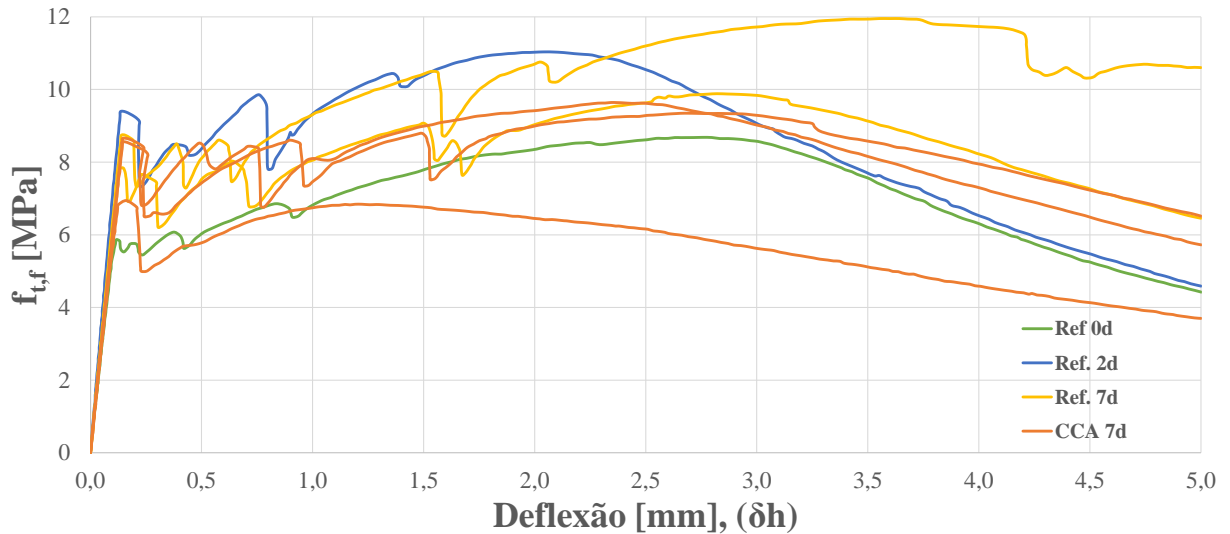


Figura 5.9: Tensão de tração *versus* Deflexão no ponto médio, ensaios adicionais.

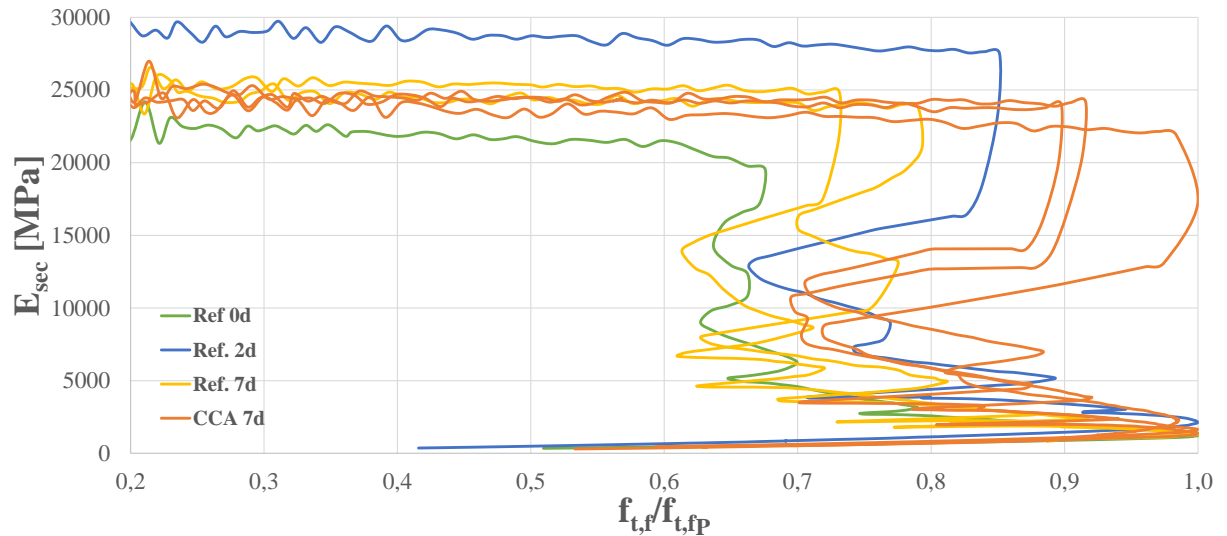


Figura 5.10: Módulo Elástico à Flexão secante *versus* Tensão de tração normalizada, ensaios adicionais.

A segunda parte da experiência consistiu na execução do ensaio de tração da viga denominada $ECC_{Ref} 302$ e cujos resultados são apresentados na Tabela 5.9. Esse ensaio se realizou seguindo os mesmos procedimentos dos demais ensaios quatro pontos da presente pesquisa.

Tabela 5.9: Resistência à Tração na Flexão, $ECC_{Ref} 302$.

CP	P_P [kN]	$f_{t,fp}$ [MPa]	Deformação (ϵ_{tP}) [$\mu\epsilon$]	E_{sec} [MPa]
$ECC_{Ref} 302$	8716	10,5	8710	12331

Quando comparados os resultados com os resultados obtidos para as vigas com idades semelhantes, descritos anteriormente, é visto que o valor da ($f_{t,f}$) se encontra dentro do intervalo de variação dos valores obtidos (Tabela 5.7). Já as propriedades associadas à integridade do material demonstram que existe uma perda significativa das mesmas, assim, o (E_{sec}) apresenta um valor equivalente ao 48% do (E_{sec}) das outras vigas e a deflexão teve um aumento equivalente ao 166% se comparadas com as deflexões médias das vigas com idades semelhantes.

Como pode ser visto na Figura 5.11, a viga apresentou comportamento tensão-deformação do tipo *strain-hardening*, mas considerando que a parcela não linear representa a maior parte do comportamento elástico, ao contrário de todos os demais ensaios realizados.

O comportamento do (E_{sec}) em termos do esforço à flexão normalizado está mostrado na Figura 5.12. A degradação do corpo de prova associada com os ciclos de carga dinâmica aplicados nele é evidente na forma como o (E_{sec}) diminui desde o início do ensaio, consequentemente o valor do (E_{sec}) secante é menor.

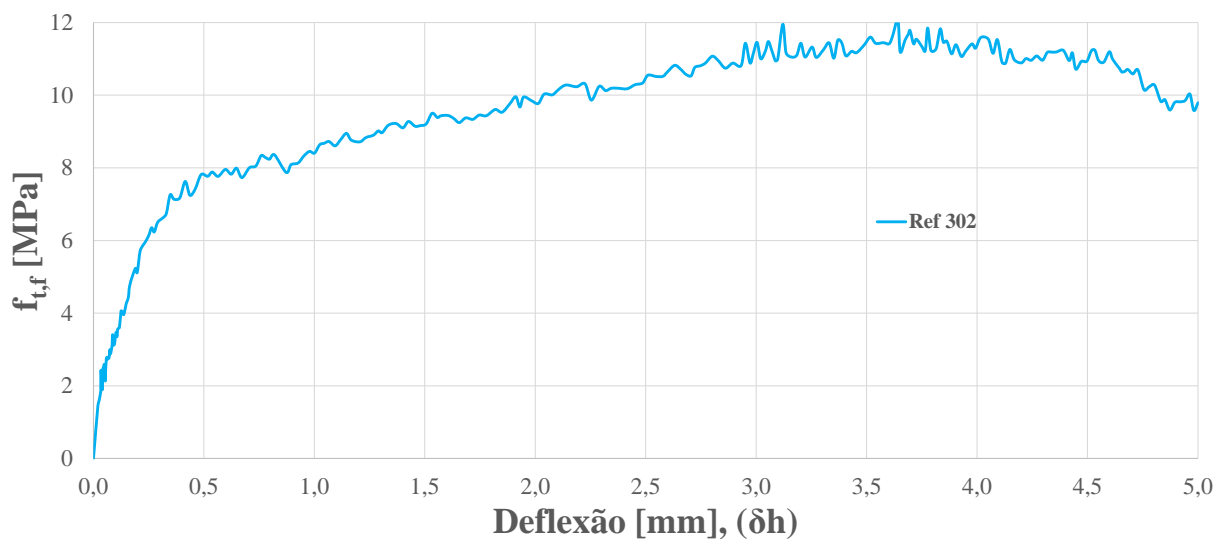


Figura 5.11: Tensão de tração *versus* Deflexão no ponto médio – Traço de referência, viga Ref. 302.

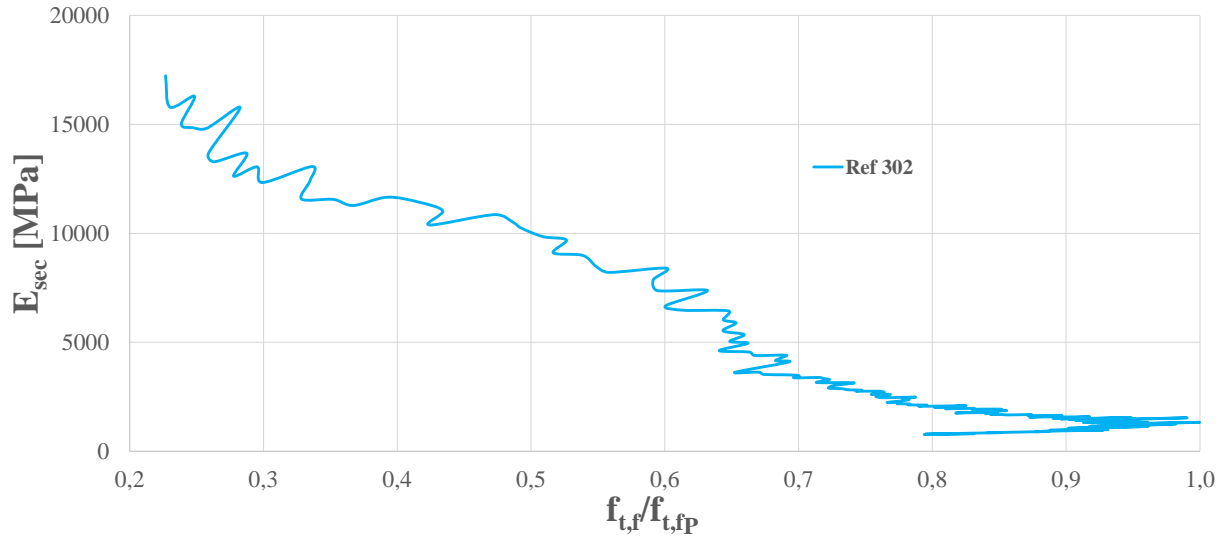


Figura 5.12: Módulo Elástico à Flexão secante *versus* Esforço à tração normalizado, viga ECC_{Ref} 302.

5.1.2. Resistência à Compressão Simples (f_c)

Nesse item são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial dos compósitos ensaiados. A Tabela 5.10 apresenta os valores médios dos resultados para cada traço, desvio padrão e o coeficiente de variação.

Tabela 5.10: Resultados de Resistência à Compressão Simples (f_c).

Traço	Cilindro	f_c [MPa]	f_c médio [MPa]	Desvio padrão [MPa]	CV [%]
ECC _{Ref}	A	36	36	1,3	4
	B	37			
	C	35			
ECC _{CCA}	A	59	50	9,2	18
	B	50			
	C	41			

Righi (2015) apresentou resultados de resistência à compressão simples em cilindros com 28 dias de cura de 47 MPa para ECC_{Ref} e de 61 MPa para o traço alternativo ECC_{CCA}. Os resultados obtidos na presente pesquisa encontram-se abaixo desses valores, mas mantém a tendência na qual o traço alternativo apresenta um melhor desempenho. Uma possível causa para a diferença nos resultados esteja associada com a velocidade de carregamento. Alguns autores têm descrito que existe uma relação entre a velocidade de carga nos ensaios de compressão simples e as resistências alcançadas (Mehta e Monteiro, 2006; Mali et al., 2015).

Para os ensaios executados na presente pesquisa foi mantida a taxa de deslocamento aplicada nos ensaios de viga quatro pontos, 1,2 mm/min (mesma velocidade de carga dos ensaios de tração na flexão), velocidade de carga diferente à recomendada pela norma brasileira NBR 5739 – *Concreto – Ensaios de Compressão de corpos cilíndricos* (ABNT, 2007) de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. As velocidades médias dos ensaios da presente pesquisa foram de 1600 N/s, calculados a partir dos relatórios, sendo a velocidade estabelecida pela norma de 3500 N/s.

Na Figura 5.13 são apresentados como exemplo dois dos cilindros após a execução do ensaio. É possível observar a influência das fibras, que evita rupturas frágeis dos corpos de prova. Na Tabela 5.11 é apresentado um comparativo entre a resistência à tração dos compósitos com suas respectivas resistências à compressão. Em termos gerais, os dois traços se mantêm na mesma ordem de grandeza, mas o ECC_{Ref} apresenta relações ligeiramente maiores que o traço alternativo.

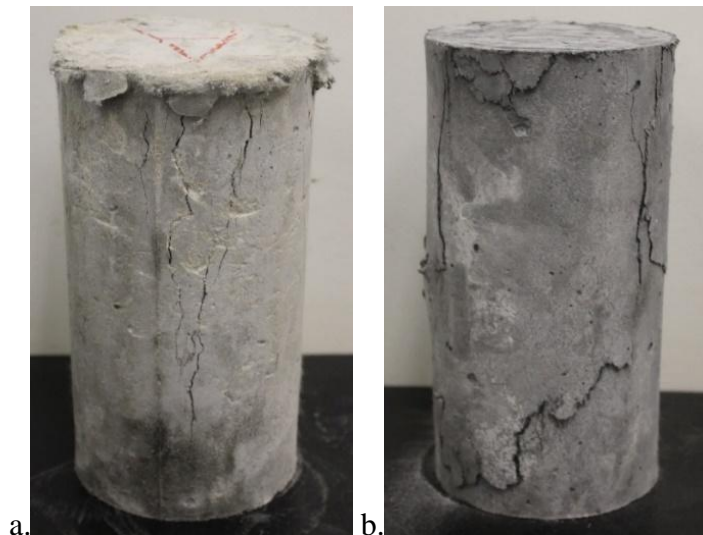


Figura 5.13: Cilindros rompidos no ensaio f_c : (a) ECC_{Ref}. (b) ECC_{CCA}.

Fonte: fotos do autor.

Tabela 5.11: Relação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão simples.

Traço	Altura CP's [mm]	Relação da $f_{t,f}/f_c$ [%]
ECC _{Ref}	100	16
	50	19
ECC _{CCA}	100	14
	50	16

Mehta e Monteiro (2006) descrevem que para concretos convencionais a relação entre ($f_{t,f} / f_c$) encontra-se entre 10-15%. Os resultados de Graeff (2011) para concretos convencionais (sem

adição de fibras) se obteve uma relação do 8% e para concretos reforçados com fibras, uma relação média dos resultados, de 11%. Com os resultados descritos por Sherir et al. (2015) para compósitos conformados com fibras de PVA a relação média de resistências é da ordem do 20%. As relações obtidas na presente pesquisa demonstram-se superiores aos valores descritos anteriormente e na mesma ordem de grandeza dos resultados obtidos por Righi (2015) de 19% para o ECC_{Ref} e de 13% para o ECC_{CCA}. Um dos objetivos no desenvolvimento dos ECC's era a obtenção de um material com melhor resistência à tração, condição verificada pelos resultados antes expostos.

5.1.3. Aderência – Cisalhamento Direto (τ_{rup})

A aderência entre materiais cimentícios e pavimentos asfálticos foi avaliada por meio de ensaios de cisalhamento direto, utilizando para tal a metodologia proposta por Fortes (1999). Os corpos de prova foram concretados sobre placas de pavimento asfáltico, recuperadas das pistas do LAPAV. Trabalhou-se com materiais cimentícios que irão simular três tipos de recapeamentos: concreto convencional, ECC traço de referência (ECC_{Ref}) e ECC traço alternativo (ECC_{CCA}). Na Tabela 5.12 são apresentados os resultados da carga de ruptura (P_{rup}), a resistência ao cisalhamento (τ_{rup}) como estimativa da aderência, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Tabela 5.12: Resistência ao cisalhamento-aderência.

Material do Recapeamento	CP	A [m ²]	P_{rup} [kN]	τ_{rup} [kPa]	τ_{rup} médio [kPa]	Desvio Padrão [kPa]	CV [%]
Concreto	1	0,0201	27,8	1383	1488	181	12
	2	0,0197	26,0	1317			
	3	0,0200	30,5	1526			
	4	0,0197	34,0	1726			
ECC _{CCA}	5	0,0199	42,0	2114	2050	65	3
	6	0,0197	40,4	2053			
	7	0,0201	39,9	1984			
ECC _{Ref}	8	0,0201	33,9	1688	1901	301	16
	9	0,0200	42,3	2114			

Os resultados demonstram uma maior aderência dos compósitos com o pavimento asfáltico que o concreto convencional. Já entre compósitos, o traço alternativo apresenta uma maior aderência que o traço de referência. Considerando a colocação de Armaghani e Tu (1997, 1998) *apud* Fortes (1999) segundo a qual o valor mínimo recomendado para o bom desempenho de um recapeamento ultradelgado é de 1400 kPa, é possível concluir que os dois compósitos

apresentam resistências suficientes para cumprir essa recomendação. É verificado como a utilização de cinza de casca de arroz como substituto de uma parcela do cimento aumenta o potencial de aderência. Possivelmente os compósitos apresentem uma maior afinidade química com o concreto asfáltico que o concreto convencional dada a presença de uma maior quantidade de material cimentante, de forma análoga a presença da cinza de casca de arroz pode favorecer o desenvolvimento de uma maior quantidade de enlaces químicos que o compósito de referência. A Figura 5.14 apresenta de forma gráfica os resultados e mostra um comparativo com os resultados de Fortes (1999) para a aderência entre concreto hidráulico e concreto asfáltico.

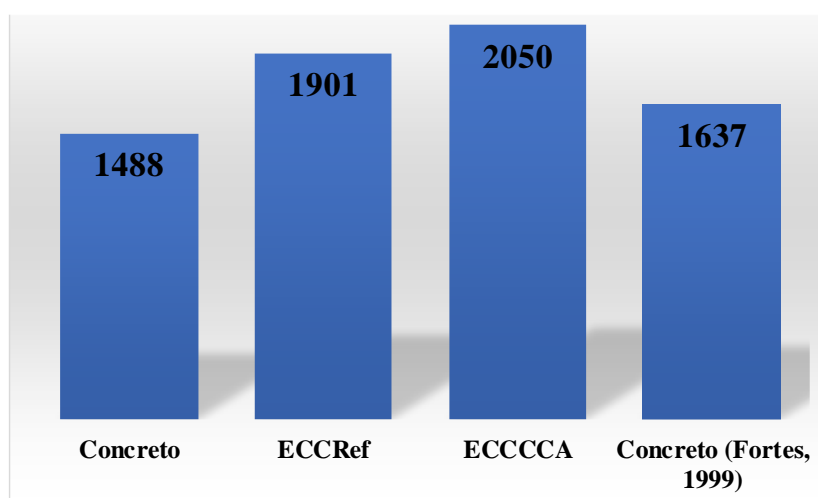


Figura 5.14: Resultados da Resistência ao Cisalhamento Direto como indicador da Aderência com concreto asfáltico.

5.1.4. Avaliação da Trabalhabilidade (*flow table*)

A experiência na concretagem da placa de 1 m² demonstrou as dificuldades da produção e manuseio do ECC-LEME com o traço preliminar. Dentre as possibilidades para realizar modificações no traço preliminar foi escolhida a substituição do aditivo plastificante por se tratar da variável mais simples de avaliar. No traço preliminar foram mantidas as proporções dos outros materiais, substituindo o aditivo plastificante Glenium 54 pelo Tec-flow 8000, e através da avaliação da trabalhabilidade pelo ensaio de *flow table* verificar a validade dessa mudança.

A trabalhabilidade foi avaliada nas misturas alternativas (descritas no Capítulo 4), na mistura de prova (executada especificamente para testar a troca do aditivo plastificante, ECC_{Ref}), e em cada uma das 10 concretagens efetuadas na confecção das vigas para os ensaios de fadiga (5 por cada traço). Pelas dificuldades de mobilizar os equipamentos até a área de testes do LAPAV

não foi possível medir a trabalhabilidade das concretagens efetuadas na construção dos recapeamentos. Na Tabela 5.13 são apresentados os valores médios dos ensaios executados.

Tabela 5.13: *Flow table* das misturas.

Designação	Diâmetro médio [cm]	<i>Flow table</i> médio
Misturas Alternativas	17,96	44
ECC _{Ref} Novo Aditivo	20,88	67
ECC _{Ref}	23,68	89
ECC _{CCA}	23,78	90

A substituição do aditivo plastificante na produção do ECC duplicou os valores do *flow table*, passando de valores médios de 44 para 90. A mudança do aditivo gerou uma melhora significativa na trabalhabilidade do compósito, possibilitando que nas concretagens fosse possível utilizar betoneiras de tombo. A mudança de aditivo também facilitou o manuseio, lançamento e nivelamento do material em estado fresco tanto nas formas quanto na conformação dos recapeamentos no LAPAV. Outra melhoria a ressaltar foi a maior facilidade para realizar o acabamento da superfície do material, verificado especificamente na construção dos recapeamentos. Como exemplo, na Figura 5.15 é apresentada a aparência final de dois ensaios de *flow table*, em (a) um ECC_{Ref} misturado utilizando Glenium 54 e em (b) um ECC_{Ref} com Tec-flow 8000. Ressalta-se que o aumento na trabalhabilidade não gerou segregação no material, conforme mostra a figura.

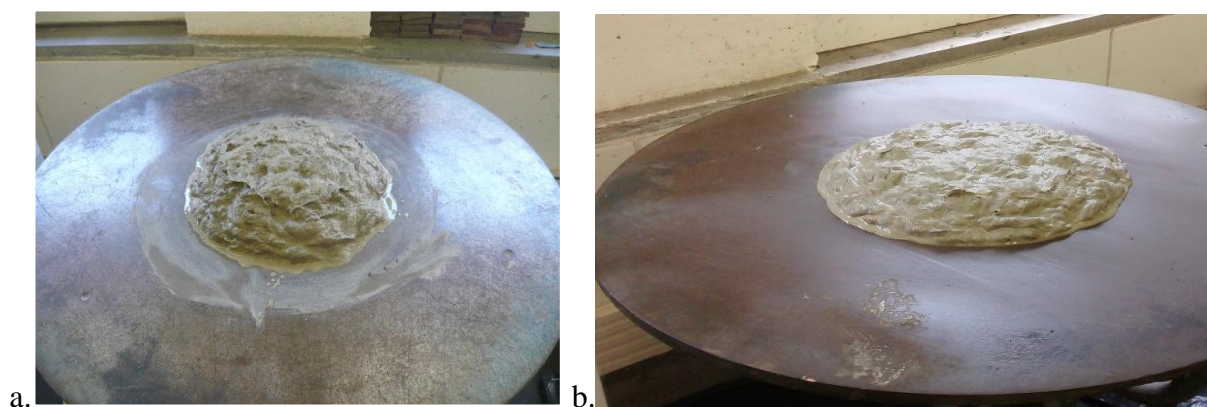


Figura 5.15: Aparência final do ensaio *flow table*: (a) ECC_{Ref} produzido com plastificante Glenium 54, (b) ECC_{Ref} produzido com plastificante Tec-flow 8000. Fonte: fotos do autor.

5.1.5. Fadiga Quatro Pontos

Neste item são relatados os resultados obtidos nos ensaios de fadiga em viga quatro pontos, sendo que com as informações recompiladas foi possível estabelecer modelos, bem como avançar no entendimento do processo de degradação dos compósitos perante a aplicação de cargas cíclicas.

Para os ensaios de fadiga foram confeccionadas 50 vigas em total (25 para ECC_{Ref} e 25 para ECC_{CCA}) em 10 processos de mistura, sendo concretadas 5 vigas por vez. As vigas ficaram nas fôrmas as primeiras 24 horas após a concretagem. Uma vez desformadas as vigas foram submersas em água, permanecendo nela por dois meses, após a cura permaneceram armazenadas até o momento do ensaio, o qual aconteceu com uma idade média das vigas de 200 dias.

O total de ensaios executados foi de 21 para o ECC_{Ref} e 22 para o ECC_{CCA} , sendo bem-sucedidos 14 ensaios por traço. Somando os dois traços, em total foram 15 ensaios que apresentaram algum inconveniente na execução, sendo necessário desconsiderar seus resultados para o análise: 2 vigas foram danificadas nos ajustes iniciais do equipamento; iniciados os ensaios, 5 ensaios foram malsucedidos por problemas com a válvula solenoide, que teve que ser substituída; uma vez substituída a válvula e reiniciado os ensaios, 4 ensaios tiveram problemas com o sistema de fixação dos LVDT's; finalmente no processo de processamento da informação, 4 dos arquivos que continham os relatórios foram encontrados danificados.

Na Figura 5.16 é apresentada a face inferior da viga ECC_{Ref} 302 após o termino do ensaio de fadiga, nessa imagem é possível ver a microfissuração e o centro a fissura principal. Na Figura 5.17 é apresentada uma vista lateral da viga ECC_{Ref} 401 na qual é possível ver a magnitude da deflexão associada com o carregamento dinâmico.



Figura 5.16: Face inferior da viga ECC_{Ref} 302 após terminado o ensaio de fadiga. Fonte: foto do autor.

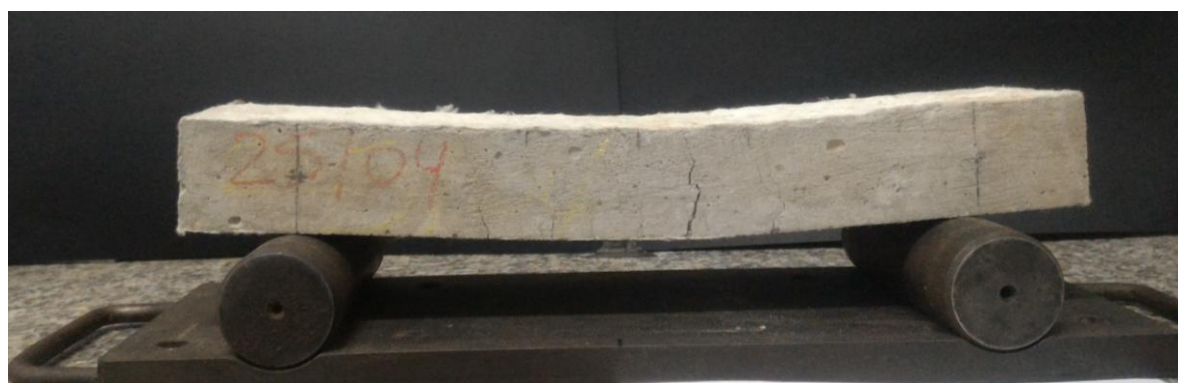


Figura 5.17: Vista lateral da Viga ECC_{Ref} 401 após terminado o ensaio de fadiga. Fonte: foto do autor.

O projeto inicial dos ensaios de fadiga considerava a comparação dos resultados com os resultados apresentados nos trabalhos de Suthiwarapirak et al. (2002, 2004) realizados na Universidade de Tóquio. Estes trabalhos relatam experiências de ensaios dinâmicos em compósitos elaborados com fibras de PVA e PE e que estabelecem relações matemáticas entre o Número de ciclos (N) e o nível de carga (S).

A presente pesquisa apresentou significativas diferenças no procedimento de ensaio com os trabalhos da Universidade de Tóquio. Por exemplo, esses trabalhos relatam a utilização de frequências maiores (8 Hz), o controle do nível de carga em cada pulso (relação entre a tensão máxima a flexão e a tensão mínima a tensão aplicada em cada pulso de carga foi de 0,2 ou $\Delta S = 20\%$) e altura das vigas de 100 mm.

Dentre as diferenças citadas anteriormente, possivelmente o controle do pulso de carga teve a maior incidência no comportamento dos materiais ensaiados. Os pulsos de carga aplicados na presente pesquisa não tiveram controle do nível de carga, ou seja, a relação entre a tensão máxima a flexão e a tensão mínima a flexão aplicada em cada pulso de carga foi de 1 ou $\Delta S = 100\%$, dessa forma os processos de carga realizados na presente pesquisa tiveram níveis de energia aplicados em cada pulso maiores o que leva a processos de deterioração mais acelerados. Por terem níveis de energia aplicados maiores também não foi possível realizar ensaios com níveis de carregamento altos ($S = 70\%$, 80% ou 90%).

A capacidade máxima teórica do equipamento para a aplicação dos pulsos de carga condicionou à utilização de vigas de 50 mm de altura, o que também limita a possibilidade de utilizar nos ensaios níveis de carregamento altos por incidir de forma direta na resistência das vigas.

Como pode ser visto na Figura 5.18 as diferenças na execução dos ensaios levaram a resultados que se tornam difíceis de comparar, pelo menos mediante a utilização de curvas S-N.

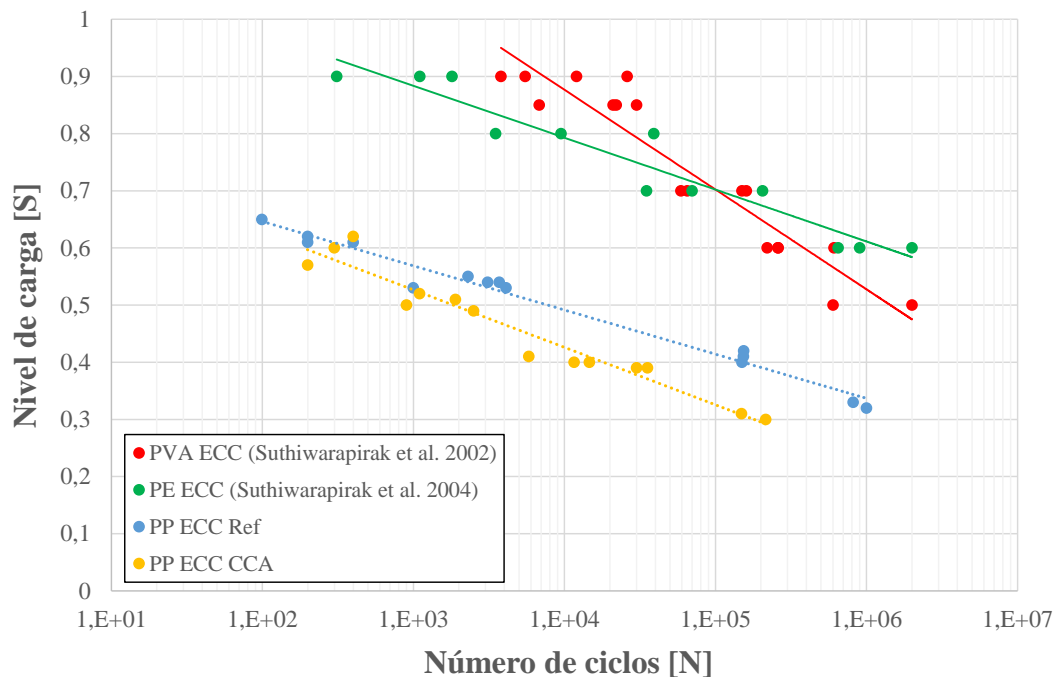


Figura 5.18: Comparação entre resultados de ensaios de fadiga realizados nesta pesquisa e os realizados na Universidade de Tóquio, modelos S-N.

5.1.5.1. Modelos de fadiga

Na presente pesquisa foram processados os resultados dos ensaios utilizando a rotina de cálculo desenvolvida e detalhadamente descrita por Castañeda (2016). Com essa ferramenta de cálculo foram possíveis o processamento do grande volume de dados e o estabelecimento de relações matemáticas para os compósitos, em função do número de ciclos de carga.

O processamento da informação teve como referência os trabalhos da Austroads (Austroads 2008, 2010, 2012) para a caracterização de materiais com fins rodoviários, de forma que os modelos de fadiga obtidos estão focados na utilização do material com fins de projetos de pavimentos.

A seguir são apresentados os modelos propostos para cada um dos traços ensaiados, sendo os modelos de fadiga baseados na deformação específica de extensão inicial (ϵ_{ii}), deformação específica de extensão normalizada ($\epsilon_{ii}/\epsilon_{IP}$) e tensão de tração inicial (σ_{ii}); modelos tidos como tradicionais. Também é apresentado o modelo de fadiga em termos da energia dissipada (DE), trata-se de uma relação entre o número do ciclo de carga e a energia dissipada em cada ciclo de carga, calculado a partir da área do ciclo de histerese. Mesmo que a Austroads (2012) recomenda a utilização de modelos de fadiga baseados nas deformações para descrever a vida de fadiga de materiais cimentados, na presente pesquisa também são apresentados os outros modelos de fadiga.

Modelos em Função da Deformação Específica de Extensão inicial

Os expoentes nas equações de ajuste dos diferentes modelos de fadiga (SDE⁸, LDE⁹ e o DEE¹⁰), descrevem a amplitude da variação da vida de fadiga, representando em gráficos log-log a inclinação da linha de ajuste dos diferentes modelos. Matematicamente, esses expoentes descrevem como a vida de fadiga dos materiais é afetada pela variação dos parâmetros de estudo como as deformações, tensões, energia dissipada, entre outros. Materiais com expoentes altos apresentam altas quedas na sua vida de fadiga perante pequenas variações nos parâmetros de estudo.

⁸SDE = *Strain Damage Exponent*.

⁹LDE = *Load Damage Exponent*.

¹⁰DEE = *Dissipated Energy Exponent*.

A Austroads (2010) relata valores do SDE dentre 14 e 27, e Castañeda (2015) dentre 7,3 e 15,4. No caso da presente pesquisa, foram encontrados SDE da ordem de 3,86 para o ECC_{Ref} e 3,62 para o ECC_{CCA} , demonstrando como os compósitos são muito menos frágeis que outros materiais cimentados, apresentando dessa forma as grandes qualidades dos ECC's perante a aplicação de cargas repetidas.

Na Tabela 5.14 e Tabela 5.15 são apresentados os parâmetros dos modelos de fadiga em função da deformação específica de extensão inicial e da deformação específica de extensão inicial normalizada, respectivamente. Já os respectivos gráficos são apresentados na Figura 5.19 e Figura 5.20.

Tabela 5.14: Parâmetros modelo de fadiga em função da deformação específica de extensão inicial.

Traço	a	SDE	R ²
ECC_{Ref}	1,49E+14	3,86	0,88
ECC_{CCA}	1,10E+14	3,62	0,93
EQUAÇÃO	$N = a * \epsilon_{ti}^{-SDE}$		

Tabela 5.15: Parâmetros modelo de fadiga em função da deformação específica de extensão inicial normalizada.

Traço	a	SDE	R ²
ECC_{Ref}	9,78E-01	3,86	0,88
ECC_{CCA}	3,30E+00	3,62	0,93
EQUAÇÃO	$N = a * (\epsilon_{ti}/\epsilon_{tP})^{-SDE}$		

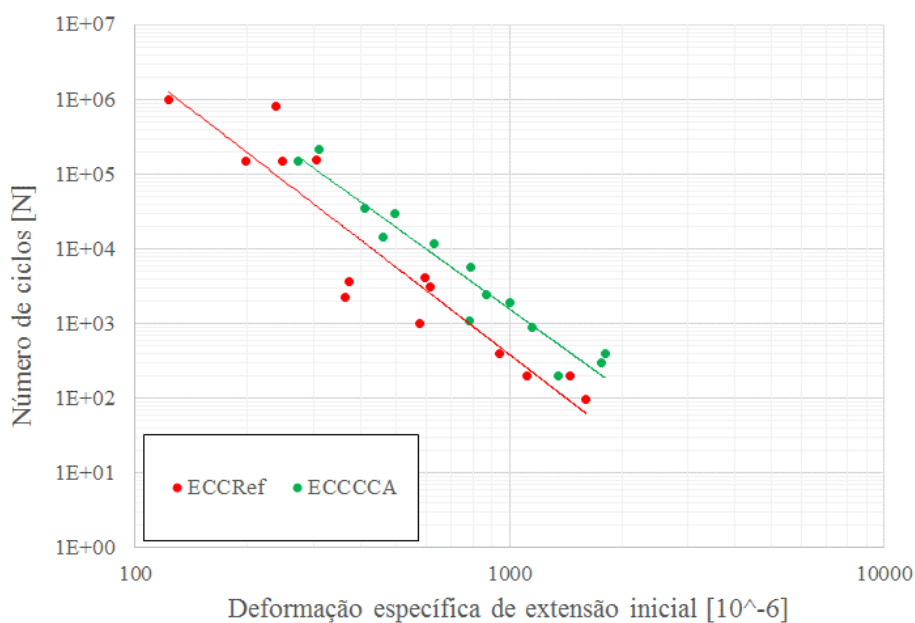


Figura 5.19: Modelos de fadiga em função da deformação específica de extensão inicial, ECC_{Ref} e ECC_{CCA} .

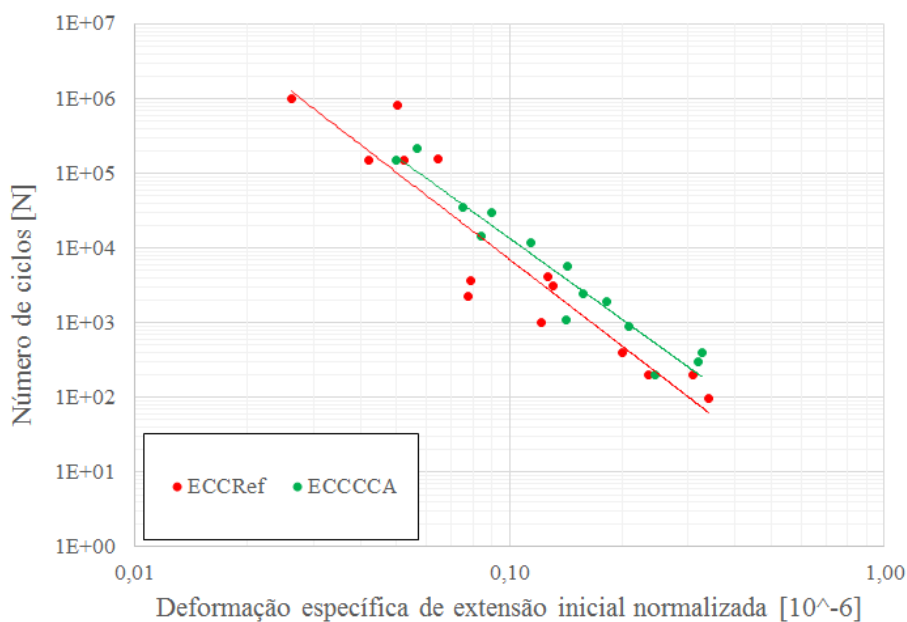


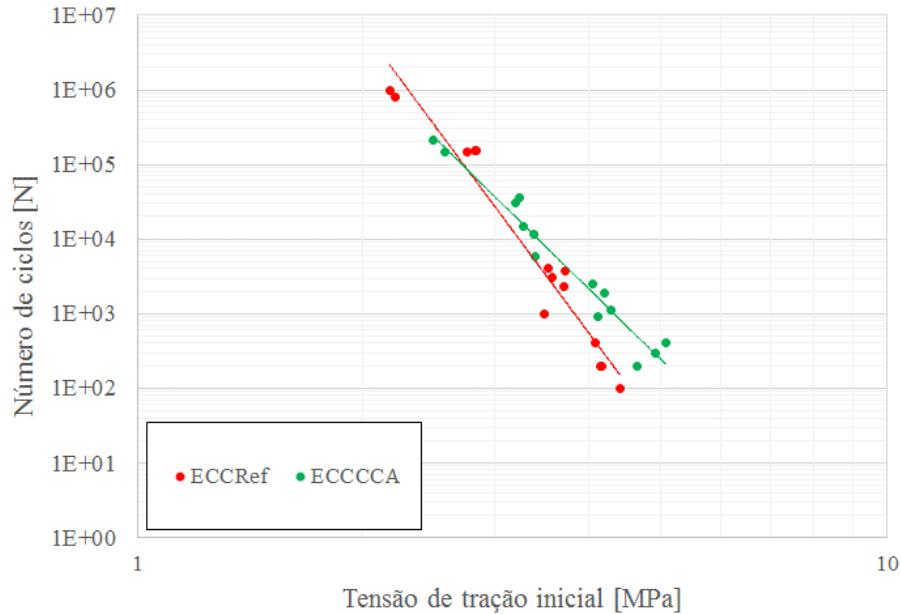
Figura 5.20: Modelos de fadiga em função da deformação específica de extensão inicial normalizada, ECC_{Ref} e ECC_{CCA} .

Modelos em Função da Tensão de Tração inicial

Na Tabela 5.16 são apresentados os parâmetros dos modelos de fadiga dos traços estudados em função da tensão de tração inicial. As curvas correspondentes são apresentadas na Figura 5.21.

Tabela 5.16: Parâmetros modelo de fadiga em função da tensão de tração.

Traço	a	LDE	R ²
ECC _{Ref}	7,78E+10	13,53	0,95
ECC _{CCA}	1,87E+09	9,86	0,96
EQUAÇÃO	$N = a * \sigma_{ti}^{-LDE}$		

Figura 5.21: Modelos de fadiga em função da tensão de tração inicial, ECC_{Ref} e ECC_{CCA}.

Modelos em Função da Energia Dissipada

Na Tabela 5.14 são apresentados os parâmetros dos modelos de fadiga em função da energia dissipada e o respectivo gráfico na Figura 5.22. A localização da linha de tendência do ECC_{CCA} à direita do ECC_{Ref} representa que para uma mesma quantidade de energia dissipada se teria um N (número de ciclos de projeto) maior, o que representa que como mesmo nível de deformações se teriam maiores N com o ECC_{CCA}.

Tabela 5.17: Parâmetros modelo de fadiga em função da energia dissipada de energia.

Traço	a	DEE	R ²
ECC _{Ref}	1,02E+12	2,85	0,92
ECC _{CCA}	4,85E+11	2,57	0,95
EQUAÇÃO	$N = a * DE_i^{-DEE}$		

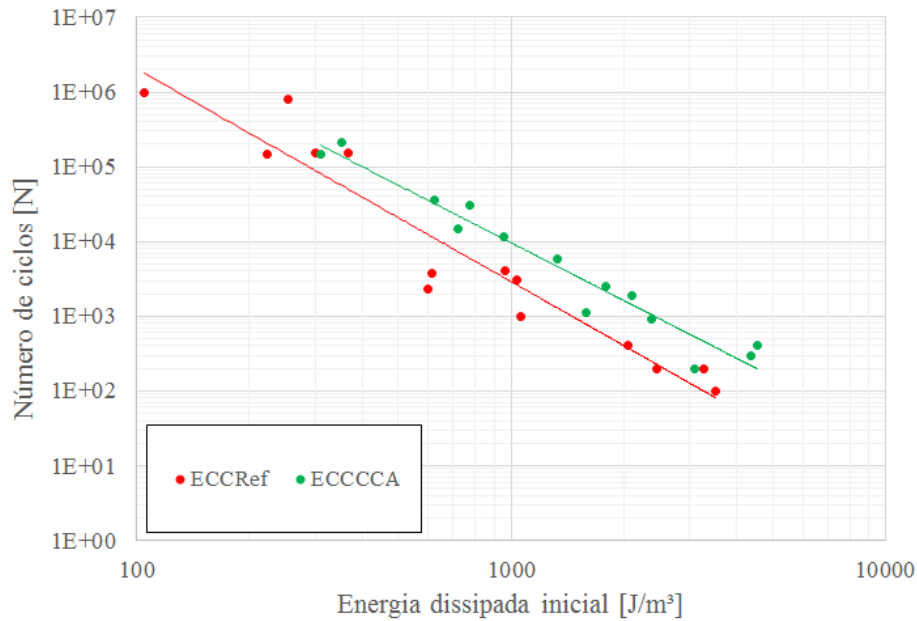


Figura 5.22: Modelos de fadiga em função da energia dissipada, ECC_{Ref} e ECC_{CCA} .

Na Figura 5.23 é apresentada uma comparação entre os modelos de fadiga encontrados na presente pesquisa com dois dos modelos propostos na pesquisa de Castañeda (2015). Nessa pesquisa o autor trabalhou com pavimentos reciclados, variando o conteúdo de material fresado e a adição de cimento, na sua nomenclatura a mistura 4-50 corresponde com 4% de adição de cimento e 50% de fresado asfáltico e a mistura 2-50 corresponde à adição de 2% de cimento e 50% de fresado asfáltico.

Como pode ser visto no gráfico os compósitos apresentam uma alta capacidade de dissipação de energia se comparado com um material recomendado como base reforçada de pavimentos. Sendo que os dois materiais teriam funções diferentes na estrutura de pavimento, os compósitos são recomendados para ser utilizados como revestimento, a comparação resulta útil a fim de estimar as altas qualidades dos ECC's.

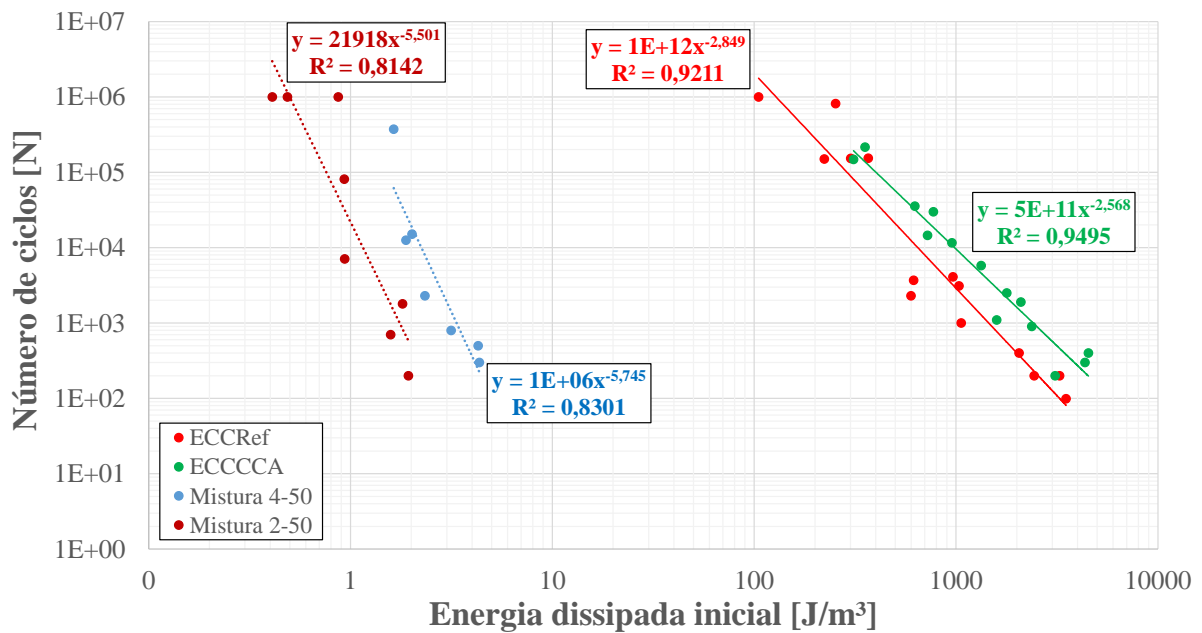


Figura 5.23: Comparação dos resultados da presente pesquisa e os resultados de Castañeda (2015) para os modelos de fadiga em termos da energia dissipada.

Resumo dos Modelos de Fadiga

Todos os modelos estudados apresentam elevados coeficientes de determinação, e em função de cada modelo, o R^2 varia entre 0,88 e 0,96, o que valida desde o ponto de vista estatístico os resultados relatados.

Na Tabela 5.18 são apresentados os dados resumo dos diferentes modelos de fadiga estabelecidos na presente pesquisa, nessa tabela o N representa o número de ciclos até a ruptura da viga.

Tabela 5.18: Resumo dos resultados dos ensaios de fadiga.

Traço	CP	S [%]	σ_{ti} [MPa]	ϵ_{ti} [$\mu\epsilon$]	$\epsilon_{ti}/\epsilon_{tP}$	DE_i [J/m ³]	N
ECC _{Ref}	1	33	2,21	237	5,4	253	8,25E+05
	2	32	2,17	123	2,8	105	1,00E+06
	3	40	2,75	199	4,5	222	2,37E+05
	4	41	2,83	247	5,6	301	1,53E+05
	5	42	2,81	304	6,9	367	1,55E+05
	6	55	3,72	365	8,3	598	2,34E+03
	7	53	3,53	596	13,5	966	4,13E+03
	8	54	3,58	616	14,0	1033	3,19E+03
	9	53	3,49	576	13,1	1061	1,10E+03
	10	54	3,72	373	8,5	616	3,75E+03
	11	62	4,17	1453	33,0	3258	2,21E+02

Traço	CP	S [%]	σ_{ti} [MPa]	ϵ_{ti} [$\mu\epsilon$]	$\epsilon_{ti}/\epsilon_{tP}$	DE_i [J/m ³]	N
	12	61	4,01	944	21,5	2054	4,20E+02
	13	61	4,15	1111	25,3	2436	2,10E+02
	14	65	4,40	1599	36,3	3509	1,08E+02
ECC _{CCA}	1	31	2,57	274	5,0	310	1,49E+05
	2	30	2,49	312	5,7	354	2,15E+05
	3	40	3,38	632	11,5	953	1,16E+04
	4	57	4,65	1345	24,4	3096	2,70E+02
	5	39	3,24	413	7,5	625	3,55E+04
	6	41	3,40	786	14,2	1332	5,85E+03
	7	39	3,20	495	9,0	772	3,00E+04
	8	40	3,27	462	8,4	722	1,47E+04
	9	52	4,28	779	14,1	1591	1,15E+03
	10	51	4,20	1003	18,2	2097	1,93E+03
	11	49	4,05	868	15,7	1783	2,50E+03
	12	50	4,11	1147	20,8	2370	9,45E+02
	13	62	5,07	1797	32,6	4524	4,10E+02
	14	60	4,90	1757	31,9	4356	3,40E+02

5.1.5.2. Análise mecanicista

Nas análises mecanicistas cada camada da estrutura do pavimento é caracterizada pela espessura, módulo de resiliência e coeficientes de Poisson, assim como do subleito. Considera-se que as cargas transmitidas ao pavimento são uniformemente distribuídas em áreas circulares e que a tensão de contato roda-pavimento é igual à pressão de inflação dos pneus.

Para esta pesquisa, adotou-se o software Everstress v 5.11 (1999) ©, desenvolvido pelo “Washington State Department of Transportation” o qual, a partir das informações das cargas e das camadas constituintes do pavimento, apresenta a distribuição tensão-deformação do pavimento analisado. Esse software considera a estrutura do pavimento como um sistema elástico de múltiplas camadas.

Para as análises foram modeladas duas estruturas de pavimento variando a camada de recapeamento entre o ECC_{Ref} e o ECC_{CCA}. Na Tabela 5.19 são apresentadas as características das camadas de pavimento consideradas no modelamento. As propriedades mecânicas das camadas do pavimento existente (pista N°. 5) apresentadas nessa tabela foram tomadas de Gonçalves (2002). Para o cálculo foram feitas as seguintes considerações: a pressão de inflado dos pneus foi considerada constante e igual a 560 kPa; duas cargas uniformemente distribuídas sobre áreas circulares e magnitudes de carga por roda de 20.500 N.

Tabela 5.19: Características das camadas do pavimento.

Camada	Material	Coefficiente de Poisson	Módulo de Resiliência [MPa]	γ [kN/m ³]	Espessura [cm]
Recapeamento	ECC _{Ref}	0,20	20340	20	3; 5; 7; 10
	ECC _{CCA}	0,20	17280	20	3; 5; 7; 10
Revestimento asfáltico	CA	0,30	3475	24	6
Base granular	Brita graduada	0,35	250	21	30
Reforço do subleito	Solo argiloso	0,45	230	19	50
Subleito	Solo residual	0,45	100	18	∞

No total foram modeladas 16 estruturas de pavimento, 8 para cada traço. Mantendo constantes as camadas do pavimento existente foram variadas as espessuras do recapeamento entre 3, 5, 7 e 10 cm. Para a análise dos resultados foram tomados como pontos de interesse o centro geométrico de uma das rodas e o ponto médio das duas rodas para uma profundidade equivalente à face inferior da camada de ECC, sendo que o ponto crítico de análise corresponde com o centro da roda. A partir da resposta estrutural em termos das deformações específicas de extensão foram empregados os modelos de fadiga baseados na deformação específica de extensão inicial (definido no numeral 5.1.5.1) para a estimativa da vida de fadiga da camada do recapeamento.

Na Figura 5.24 são apresentados os resultados das deformações específicas de extensão na fibra inferior do recapeamento, foram diferenciadas duas condições, com e sem aderência entre o recapeamento e a camada de revestimento asfáltico. É possível ver que as condições com aderência geram níveis de deformação muito baixos, os quais quando utilizados para calcular a vida de fadiga geram N's muito altos, vidas de fadiga que podem ser tomadas como infinitas. Percebem-se magnitudes semelhantes entre recapeamentos de 3 e 5 cm, mas com uma queda significativa com o aumento da camada de ECC.

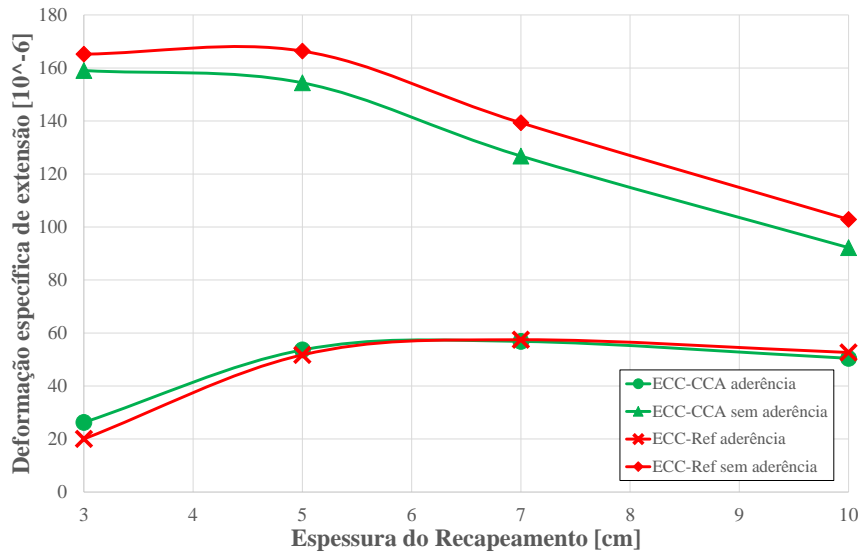


Figura 5.24: Deformações específicas de extensão na fibra inferior dos recapeamentos.

Na Figura 5.25 são apresentados os resultados da tensão de tração na fibra inferior do recapeamento. As tensões de tração para as condições sem aderência encontram-se, em todas as espessuras modeladas, muito acima das avaliações da aderência nos ensaios de cisalhamento direto (descritos no numeral 5.1.3). Essa situação pode ter influência no processo de fissuração e os problemas de aderência evidenciados no recapeamento de 30 mm executado no LAPAV, e que serão relatados no numeral 5.2.2.

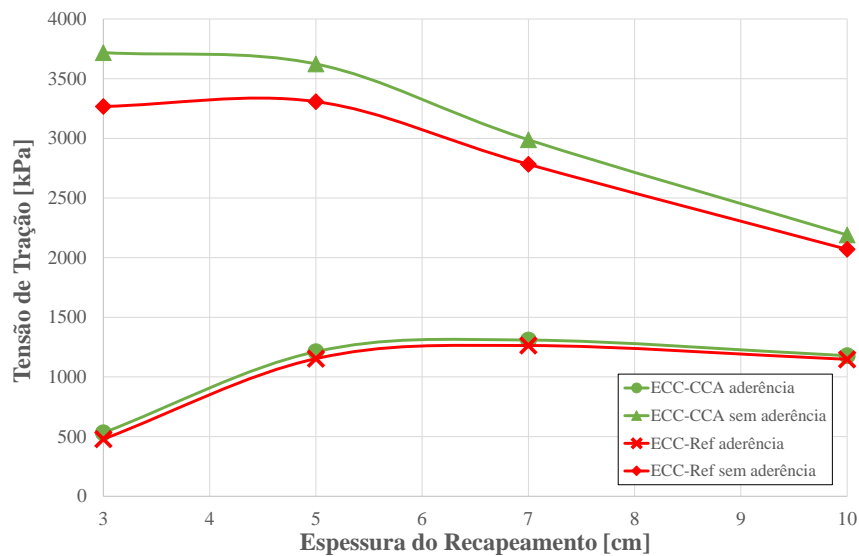


Figura 5.25: Tensão de tração na fibra inferior dos recapeamentos.

Avaliando as deformações unitárias, da condição sem aderência, nos modelos de fadiga em função da deformação específica de extensão inicial, foram estimadas as vidas de fadiga apresentadas na Figura 5.26. A utilização do traço alternativo apresenta condições mais favoráveis que o traço de referência em termos da vida de fadiga. É possível também ver que existem altos ganhos da vida de fadiga com mudanças de espessura a partir dos 7 cm, mas ainda teriam que ser avaliadas estes ganhos em termos das implicações econômicas da sua implementação.

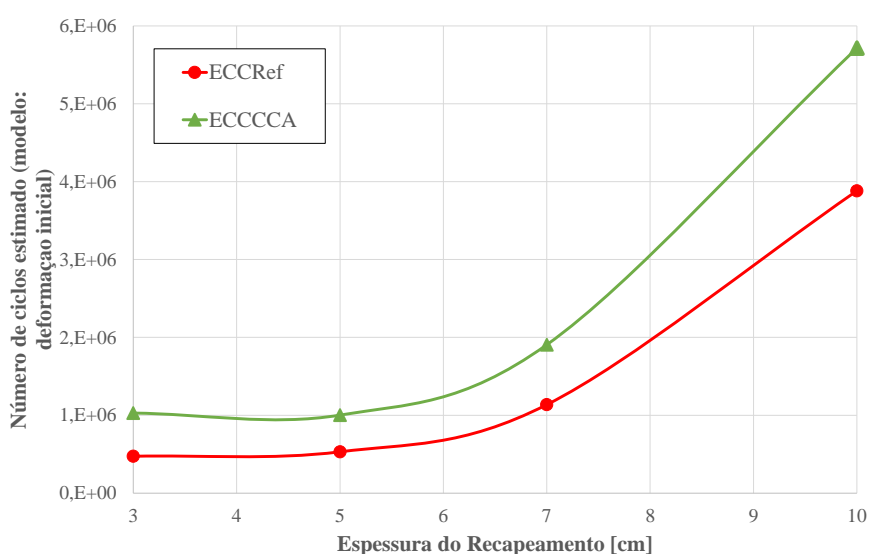


Figura 5.26: Vida de fadiga estimada para os recapeamentos em ECC, condição sem aderência com a camada asfáltica.

5.1.5.3. Degradação dos compósitos

Módulo de Resiliência à Flexão

Na Figura 5.27 e Figura 5.28 são apresentadas as evoluções dos módulos de resiliência à flexão em função do número de ciclos de carga, a qual representa uma forma de se evidenciar o processo de degradação dos compósitos ensaiados. Os resultados sugerem uma tendência das vigas falharem quando se encontram com valores do módulo próximos a 2000 MPa.

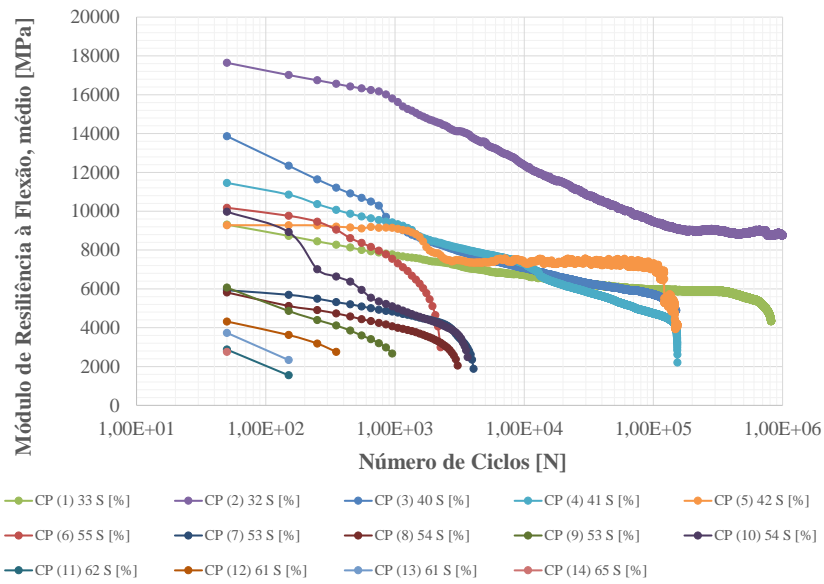


Figura 5.27: Evolução do Módulo de Resiliência na Flexão em função do Número de ciclos, ECC_{Ref} .

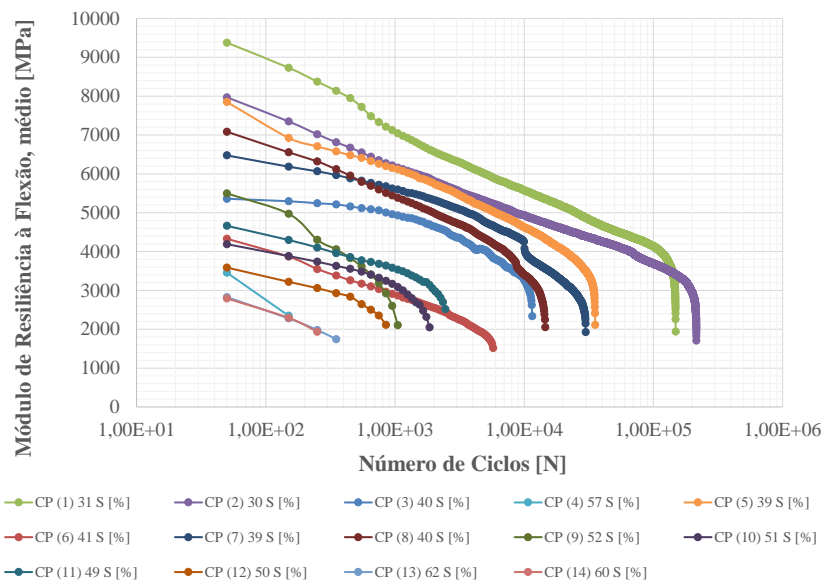


Figura 5.28: Evolução do Módulo de Resiliência na Flexão em função do Número de ciclos, ECC_{CCA} .

Na Figura 5.29 é apresentada a relação entre os módulos de resiliência à flexão inicial e a tensão de tração aplicada em cada ensaio. Os resultados apresentados na figura sugerem a existência de uma relação entre a carga aplicada em cada ensaio e o módulo resiliente inicial, sendo que para níveis de carga maiores se têm módulos resilientes iniciais menores.

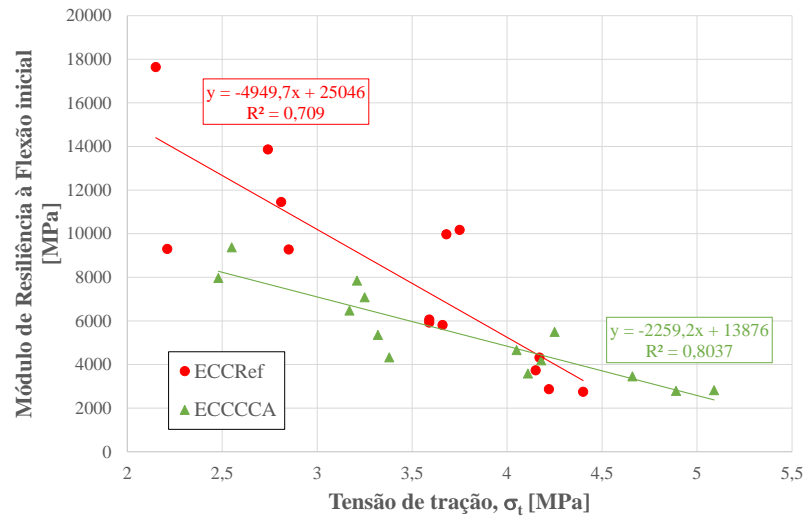


Figura 5.29: Relação entre o módulo de resiliência à flexão inicial e a tensão de tração.

Evolução das Deflexões médias

Na Figura 5.30 e Figura 5.31 são apresentadas as evoluções das deflexões medidas no ponto médio das vigas, em função do número de ciclos de carga.

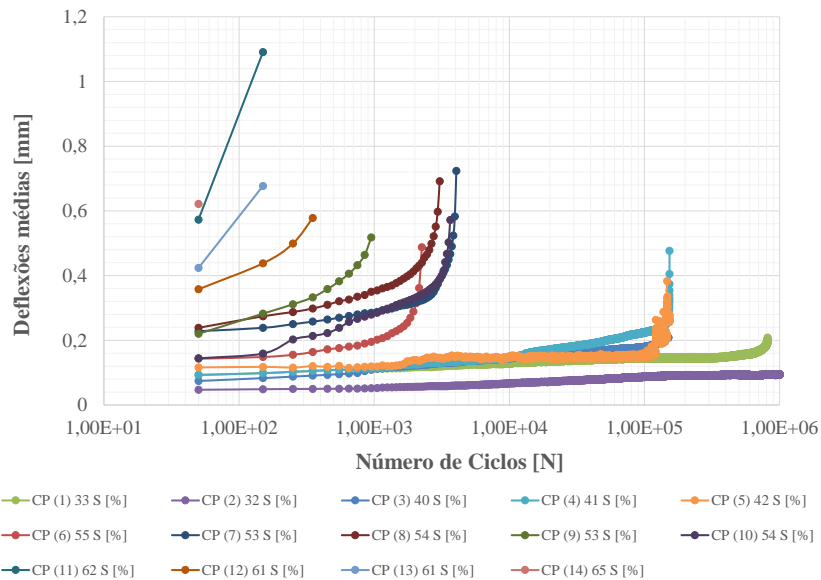


Figura 5.30: Evolução da Deflexão no ponto médio da viga em função do Número de ciclos, ECCRef.

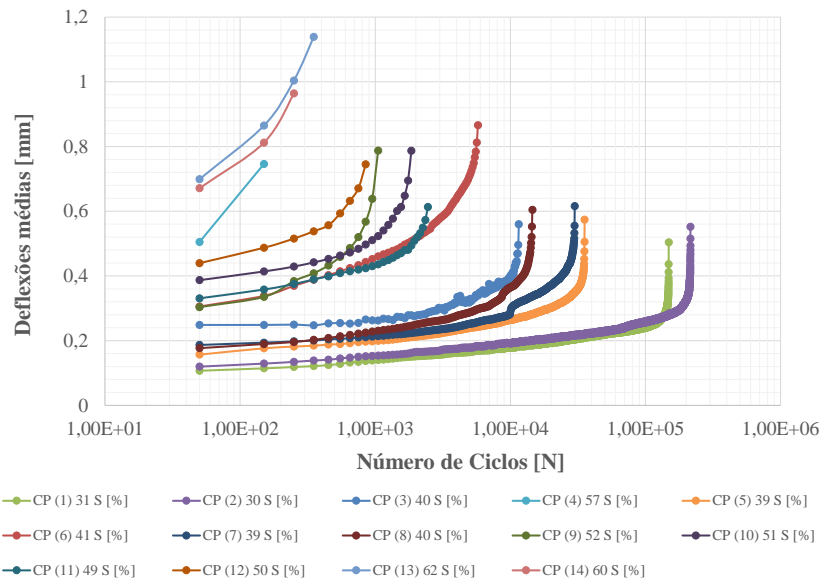


Figura 5.31: Evolução da Deflexão no ponto médio da viga em função do Número de ciclos, ECC_{CCA}.

Na Figura 5.32 é apresentada a relação entre as deflexões iniciais e a tensão de tração aplicada em cada ensaio, os resultados mostram a relação entre a carga aplicada em cada ensaio e as deflexões medidas no início dos ensaios, sendo que para níveis de carga menores se têm deflexões iniciais menores.

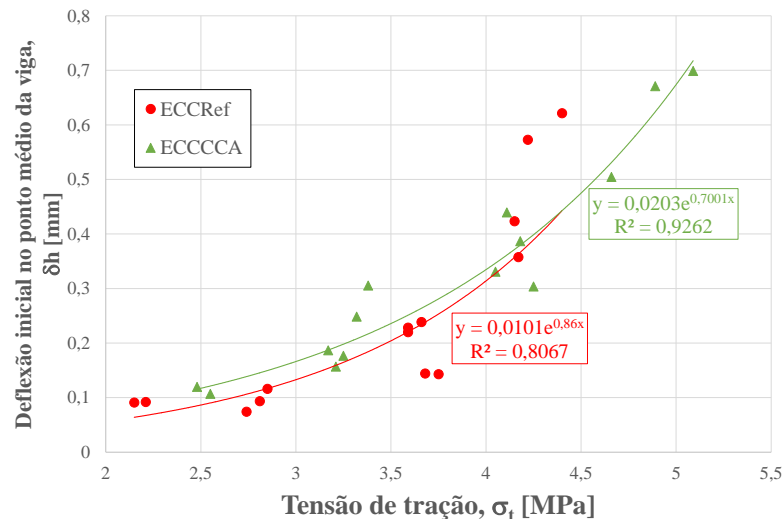


Figura 5.32: Relação entre a deflexão inicial e a tensão de tração.

5.1.5.4. Análise de energia

Energia dissipada

Na Figura 5.33 e Figura 5.34 são apresentados os gráficos da energia dissipada (DE). Esses gráficos são construídos com o resumo dos dados recolhidos em cada ensaio. Ambos traços demonstram um comportamento análogo ao descrito em termos dos deslocamentos, no qual para níveis de carga maiores são apresentados níveis maiores de dissipação de energia.

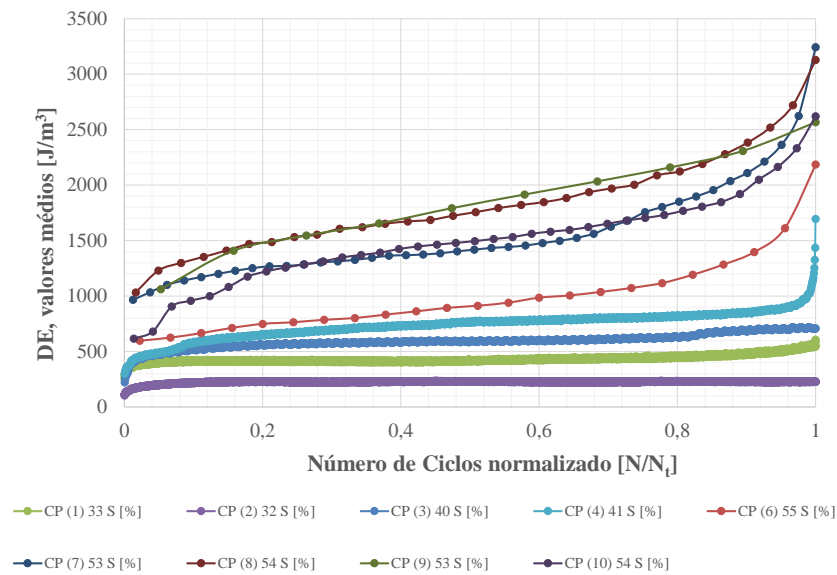


Figura 5.33: Evolução da Energia dissipada em função do Número de ciclos normalizados, ECC_{Ref} .

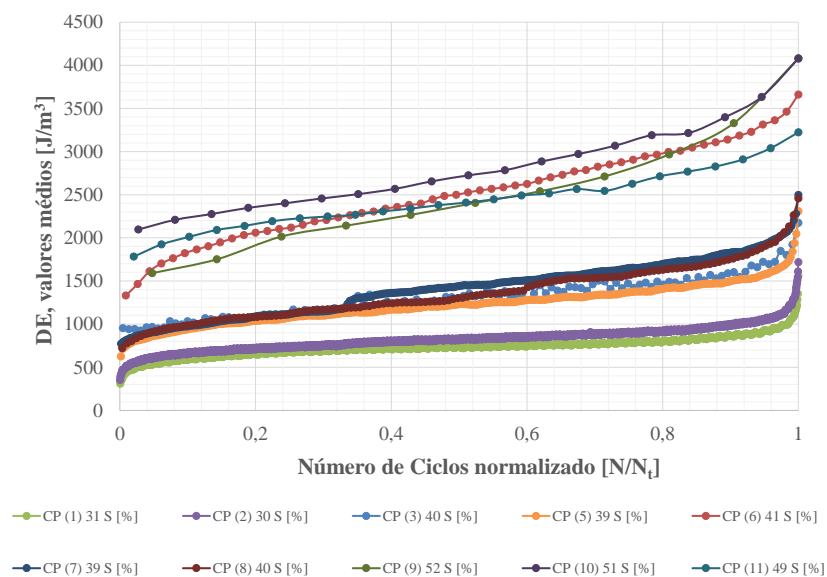


Figura 5.34: Evolução da Energia dissipada em função do Número de ciclos normalizados, ECC_{CCA} .

Matsumoto e Li (1999) *apud* Suthiwarapirak et al. (2002), ao estudarem a evolução do dano por fadiga em ECC, dividiram o processo em três fases: a primeira (I) ou fase inicial é caracterizada por uma rápida degradação nos ciclos iniciais de carga, essa rápida degradação está associada com a ampliação das fissuras formadas nos primeiros ciclos e a formação de múltiplas novas microfissuras; todas as fissuras contribuem com a rápida degradação do material nesta fase. A segunda fase (II) é descrita por uma curva estável, a qual representa a maior parte da vida de fadiga dos corpos de prova, sem a formação de novas fissuras, nela as fissuras já existentes aumentam seu comprimento e sua abertura e na terceira fase (III) ou fase final uma fissura tende a se abrir significativamente, levando o corpo de prova à ruptura.

Considerando que as deflexões e a energia dissipada mantêm uma relação matemática diretamente proporcional é apresentada na Figura 5.35 uma adaptação gráfica do processo de degradação do material ensaiado em termos de energia dissipada (DE) e o número de ciclos (N); sendo que também podem ser apresentados os resultados em termos do número de ciclos normalizado (N/N_t).

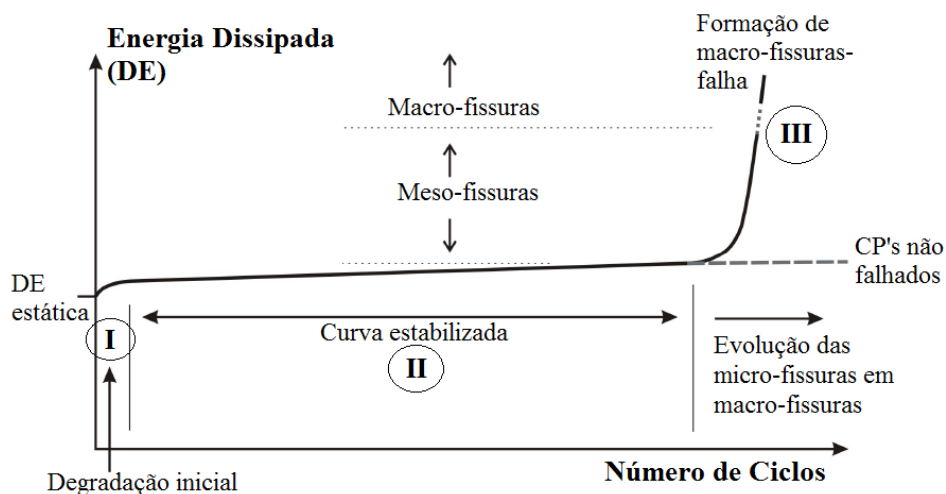


Figura 5.35: Esboço da evolução da dissipação de energia (DE).
Fonte: Adaptado de Graeff (2011).

O comportamento mecânico descrito anteriormente foi identificado na presente pesquisa em ambos compósitos. Apresentam-se, como exemplo, na Figura 5.36, os resultados para duas vigas ensaiadas com um nível de carga (S) equivalente a 30% da $f_{t,FP}$. Nessa imagem é mostrada a evolução da degradação dos materiais em função da dissipação de energia com os ciclos de carga.

Estudando os resultados para ambos compósitos foi possível estabelecer os pontos de inflexão das curvas e definir valores característicos, o final da fase inicial (I) acontece para uma degradação média do 6% da vida de fadiga (medida em termos do número de ciclos normalizado). A curva estabilizada durante toda a fase II apresenta um comportamento constante para o ECC_{CCA}, já o ECC_{Ref} apresenta uma mudança de inclinação em um valor médio do 60% da vida de fadiga.

Para os materiais estudados pela Austroads (2012) o *turning-point*, ou ponto de transição entre a fase II e a fase III, acontece aos 80% da vida de fadiga. Nesta pesquisa, foi possível estabelecer para os compósitos valores do 94% para ambos compósitos a partir das curvas ER.

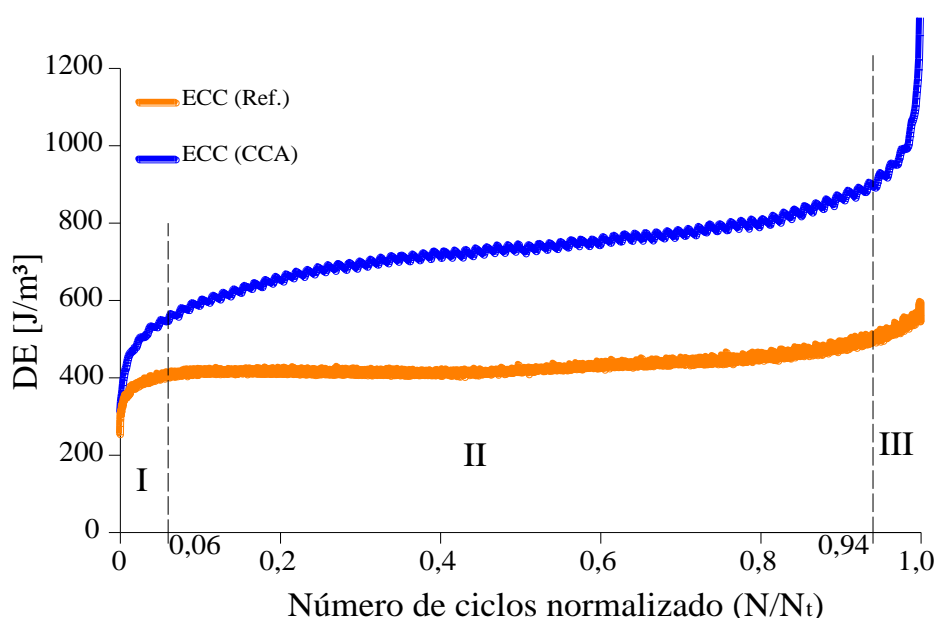


Figura 5.36: Evolução da dissipação de energia (DE) nos dois compósitos, para um nível de carga (S) igual a 30%.

Relação de Energia (ER)

A Relação de Energia (*Energy Ratio*) é definida como a relação entre a energia dissipada no ciclo N e a energia dissipada no ciclo inicial. Este tipo de relação matemática foi usado para ajudar na interpretação dos resultados. No caso da presente pesquisa foi possível verificar, em gráficos com o número de ciclos normalizado (N/N_t), a porcentagem da vida de fadiga na qual tem início a microfissuração que corresponde com o valor máximo da ER, e como as curvas têm um formato similar aos relatados na literatura (Shen e Lu, 2010).

A forma da curva da ER apresenta comportamentos diferenciados para cada um dos compósitos; de forma similar aos vistos nas curvas de DE, o ECC_{Ref} mostra duas linhas que se

interceptam no equivalente ao ponto de mudança da curva estabilizada descrita nos diagramas de DE, já o ECC_{CCA} descreve mais um comportamento curvo que linear. Na Figura 5.37 e Figura 5.38 são apresentadas duas curvas exemplo da ER para ambos compósitos, sendo a totalidade das curvas apresentadas no Apêndice C.6.



Figura 5.37: Relação de energia (ER) no ECC_{Ref} , para um nível de carga (S) igual a 30%.

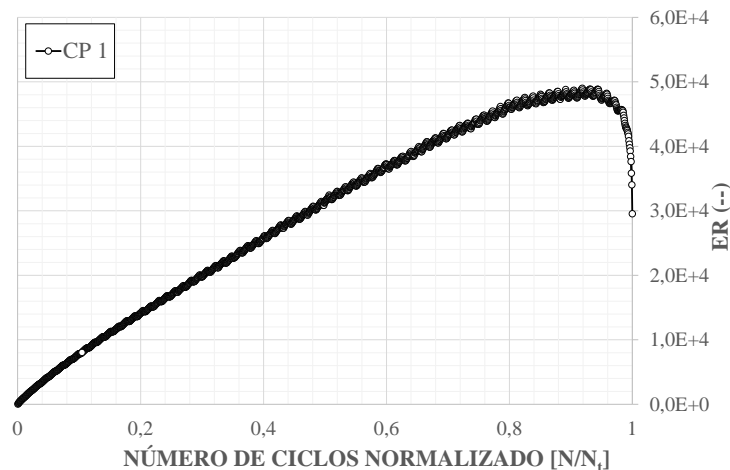


Figura 5.38: Relação de energia (ER) no ECC_{CCA} , para um nível de carga (S) igual a 30%.

5.2. ENSAIOS EM VERDADEIRA GRANDEZA

O objetivo principal da experiência foi estudar o processo construtivo, podendo examinar o conhecimento que sobre o material se tem acumulado na UFRGS e analisar os requisitos para sua implementação na recuperação e reforço de pavimentos.

Na construção dos recapeamentos foi aplicado o aprendizado que o autor acumulou sobre a produção e manuseio do ECC, com os trabalhos preliminares e os ensaios de laboratório. As observações são descritas a seguir dividindo os assuntos entre a avaliação do processo construtivo, a análise visual e a análise da superfície de rolamento.

5.2.1. Avaliação do processo construtivo

Nessa etapa da pesquisa se ressalta a importância de incorporar na produção do ECC materiais conseguidos comercialmente, principalmente os de maior consumo, como o cimento e a areia. O cimento e a areia foram comprados a uma distribuidora de materiais de construção na cidade Porto Alegre. O cimento (CP-V ARI Nacional) vinha empacotado em sacos de 40 kg e a areia fina (areia de Osorio) em sacos de 25 kg. O aditivo e a fibra foram obtidos de produtores em São Paulo.

Os recapeamentos foram construídos sobre a pista N°. 5 descrita na pesquisa de Gonçalves (2002) na antiga Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos, atual LAPAV. Na faixa direita (sentido Viamão-Porto Alegre) foi construído o recapeamento de 50 mm de altura e na faixa esquerda o recapeamento de 30 mm de altura.

As fotografias apresentadas na Figura 5.39 mostram o processo de lançamento do ECC para a construção dos recapeamentos no LAPAV. Foram utilizadas ferramentas convencionais de pedreiro, além de um rastelo metálico para acomodar o material e um vibrador de imersão.

Para a produção do ECC do recapeamento de 50 mm, o primeiro em ser construído, foi utilizada uma betoneira com capacidade de 150 litros. Para sua conformação foram necessários 500 litros de ECC divididos em 13 processos de misturas, misturando um saco de cimento por vez, sendo que em cada mistura foram produzidos aproximadamente 40 litros de ECC. Esse recapeamento foi conformado inteiramente com o traço ECC_{Ref}.

Para a construção do recapeamento de 30 mm foi utilizada uma betoneira de 500 litros de capacidade. Os materiais foram dosados para usar em cada processo de mistura 2 sacos de cimento, produzindo aproximadamente 80 litros de ECC por betonada. Dos 10 metros de comprimento do recapeamento, 7,5 metros foram construídos com ECC_{Ref} sendo os outros 2,5 metros construídos com o traço alternativo, ECC_{CCA} (material mais obscuro apresentado nas últimas 3 fotografias da Figura 5.39).



Figura 5.39: Processo de lançamento do material na conformação dos recapeamentos. Fonte: fotos do autor.

A mistura foi realizada conservando a ordem dos materiais e, de forma aproximada, os tempos recomendados para cada etapa como estabelecido no item 3.5.2, sendo que ocasionalmente, e em função do volume de material, foram necessários tempos de rotação ligeiramente maiores. Foi estabelecido como critério para dar por terminada cada etapa da mistura a obtenção de um material homogêneo, mantendo-se a betoneira em rotação até alcançá-lo.

Uma vez terminada a mistura, o material foi disposto de forma direta sobre a superfície do pavimento existente, procedendo-se à acomodação e distribuição em toda a superfície. Para distribuir o compósito foram utilizadas pás, pás de pedreiro e um rastelo metálico, ferramenta que facilitou notavelmente o trabalho (terceira foto na Figura 5.39).

Um vibrador de imersão foi utilizado para ajudar na distribuição, acomodação e saída do ar do ECC, de forma similar como teria ocorrido em concretos convencionais. Foi um trabalho significativamente menos exigente em comparação com a elaboração da placa 1 m².

É recomendado que para as concretagens os agregados se encontrem em estado seco, facilitando assim o cálculo das quantias de materiais mantendo as proporções dos traços, evitando dessa forma realizar correções em função da umidade. Como a areia é comercializada ensacada úmida, para a elaboração dos corpos de prova dos ensaios de laboratório, foi secada à sombra no LEME. Nessa atividade foi identificado que um saco de 25 kg tinha uma perda aproximada de 1,5 kg de peso pela evaporação d'água. Perante a impossibilidade de secar toda a areia a ser utilizada nos recapeamentos, essa perda de peso foi levada em consideração na dosagem tanto nas quantias de areia quanto nas quantias de água.

A água presente na areia úmida foi considerada de forma aproximada para a dosagem dos materiais na concretagem do recapeamento de 50 mm. Como pode ser visto na Figura 5.40 uma vez terminada a mistura o ECC apresenta uma consistência homogênea, pronto para sua dispersão e vibrado, mas no momento de aplicar o vibrador apresentou uma exsudação abundante, exemplificada na Figura 5.41.



Figura 5.40: Disposição do material sobre o pavimento existente.

Fonte: fotos do autor.



Figura 5.41: Exsudação observada na construção do recapeamento de 50 mm. Fonte: foto do autor.

A exsudação poderia ser explicada como um efeito associado à troca do aditivo químico ou como um excesso de água na dosagem. No caso do aditivo químico, foi mantida mesma proporção do aditivo que vinha sendo utilizado, sendo que na presente pesquisa se optou por manter inalterada essa variável. Portanto, na concretagem do recapeamento de 30 mm o controle das quantias de materiais foi mais rigoroso, tentando manter ao máximo as proporções teóricas dos mesmos.

Ao utilizar areia úmida diretamente da saca, na dosagem foi considerada a perda de peso da areia e a consequente contribuição no peso de água. Para repor a areia, previamente tinham sido secadas ao sol dois sacos, sendo utilizada essa areia seca como material de controle em cada uma das betonadas realizadas. O resultado, como pode ser visto na Figura 5.42, é um material muito mais consistente, sem ocorrência de exsudação, o que, entre outros fatores, permitiu um melhor acabamento da superfície.



Figura 5.42: Vibrado do compósito na construção do recapeamento de 30 mm. Fonte: foto do autor.

O nivelamento final foi realizado com régua metálica e desempenadeira, como mostrado na Figura 5.43. Nos dois recapeamentos foram conseguidas superfícies lisas e planas, como mostrado na Figura 5.44.



Figura 5.43: Processo de acabamento do recapeamento de 30 mm.
Fonte: fotos do autor.



Figura 5.44: Aparência dos recapeamentos recém terminados de concretar: (a) recapeamento de 50 mm, (b) recapeamento de 30 mm.
Fonte: fotos do autor.

Uma vez terminado o nivelamento do ECC não foi possível realizar as ranhuras superficiais de forma imediata, principalmente pela consistência mole do composto e também pelo arraste das fibras ao passar as ferramentas. Optou-se por deixar em repouso o ECC até que alcançara

um estado semi-endurecido. A observação das duas experiências permitiu estabelecer que o momento adequado para executar o acabamento superficial encontrasse na janela das 10 às 18 horas após terminada a concretagem.

Tempos tão elevados de espera, que extrapolam a jornada laboral convencional, dificultam a obtenção de uma textura superficial adequada. No caso da presente pesquisa, e com um compósito quase endurecido por completo, foram executadas as texturizações no dia seguinte à concretagem. Foram testados dois procedimentos; no recapeamento de 50 mm foi rodado um parafuso de 12 mm de diâmetro aplicando pressão com o corpo, enquanto que no recapeamento de 30 mm foi utilizada uma punção para riscar a superfície. Na Figura 5.45 é apresentada a textura superficial conseguida com ambos procedimentos.

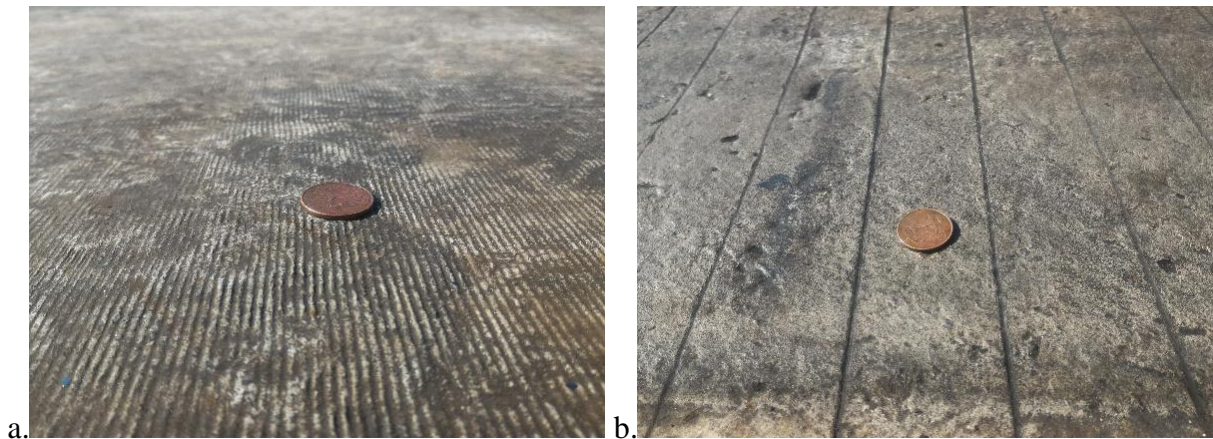


Figura 5.45: Acabamento superficial: (a) pista 50 mm, (b) pista 30 mm. Fonte: fotos do autor.

Os dois procedimentos parecem ser suficientes para proporcionar textura adequada à superfície do ECC. Entretanto, nesta pesquisa, trabalhando com um material quase endurecido e, possivelmente, pela falta de prática do executor, a textura superficial dos recapeamentos não foi suficiente para atender as especificações rodoviárias.

Em cada um dos recapeamentos foi testado um processo de cura diferente. O recapeamento de 50 mm foi coberto com uma camada de areia, já o recapeamento de 30 mm foi coberto com uma lona plástica. A areia foi mantida umedecida regando-a de 3-4 vezes por dia, de forma similar a zona entre a superfície do ECC e a lona plástica também foi mantida umedecida. Em ambos os recapeamentos, a cura úmida prosseguiu por 28 dias.

A proposta inicial para a cura dos recapeamentos era o recobrimento superficial com areia e mantê-la úmida, mas com a experiência no recapeamento de 50 mm foi visto que esse

procedimento não era eficiente, sendo mudado para o recobrimento com a lona plástica, processo que se demonstrou mais adequado. Uma vez encerrada essa operação, o processo de aplicação de carga iniciou no momento que se teve o simulador posicionado.

5.2.2. Análise Visual

No presente item são descritas as manifestações patológicas observadas nos recapeamentos, que evidenciam os processos de degradação associados às aplicações de cargas pelo simulador.

Durante a solicitação do tráfego, se apresentou um fenômeno pouco comum em pavimentos de concreto. Sobre a superfície dos dois recapeamentos surgiu um tipo de nata de cimento, sendo mais abundante no recapeamento de maior espessura. Esse fenômeno ocorreu uma única vez, e teve como elemento comum ter acontecido em dias chuvosos e em uma semana com dias anteriores também chuvosos.

No recapeamento de 50 mm ocorreu no dia 9 de novembro de 2016, transcorridos 20 dias de solicitação do pavimento e após o simulador de tráfego ter aplicado 25.700 ciclos de carga de semi-eixo de 5,5 tf. Já no recapeamento de 30 mm a nata de cimento apareceu no dia 25 de maio de 2017, após 29 dias de solicitação, tendo sido aplicados 40.450 ciclos de carga.

Não foi possível explicar completamente a origem desse fenômeno, mas é possível que tenha ocorrido o arrancamento de partículas e a pulverização da superfície dos recapeamentos pelo atrito entre os pneus e o ECC na passagem do trem de carga. O pó misturado com a água da chuva resulta na nata de cimento mostrada na Figura 5.46. Na Figura 5.47 é apresentada uma amostra do material que apareceu no recapeamento de 50 mm, depois de secado no forno.

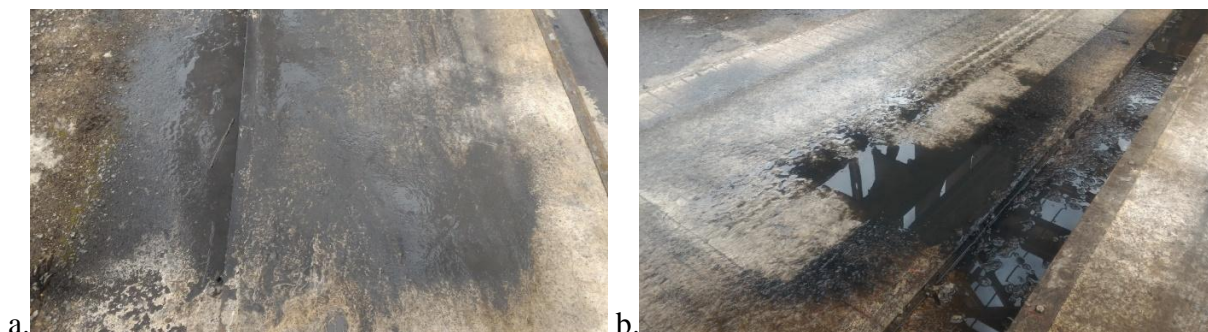


Figura 5.46: Surgimento de nata de cimento sobre a superfície dos recapeamentos: (a) 50 mm, (b) 30 mm. Fonte: fotos do autor.



Figura 5.47: Material surgido na superfície do recapeamento com espessura de 50 mm, secado ao forno. Fonte: foto do autor.

Uma vez concluída a aplicação dos ciclos de carga foi realizado um levantamento das superfícies de ambos recapeamentos para identificar e mapear as fissuras surgidas. Foram identificadas no recapeamento de 50 mm 15 fissuras e 25 no recapeamento de 30 mm, no croqui apresentado na Figura 5.48 são apresentadas com linhas de cor vermelha.

Como foi explicado no Capítulo 3, nas secções N.º 3, N.º 5 e N.º 7 foram executados cortes nos pavimentos existentes, simulando 3 estágios de fadiga, com o objetivo de verificar a possibilidade da reflexão de fissuras nos recapeamentos (linhas cor preta no croqui). Como pode ser visto no croqui, não se evidencia uma concentração de fissuras nas secções antes mencionadas. A maioria das fissuras surgiu na direção perpendicular ao tráfego do simulador.

Em cada um dos recapeamentos todas as fissuras menos uma não excederam os 100 μm de espessura, foi identificada uma única fissura de 300 μm no recapeamento de 50 mm (última a direita na Figura 5.49) e uma de 200 μm no recapeamento de 30 mm (última a direita na Figura 5.50).

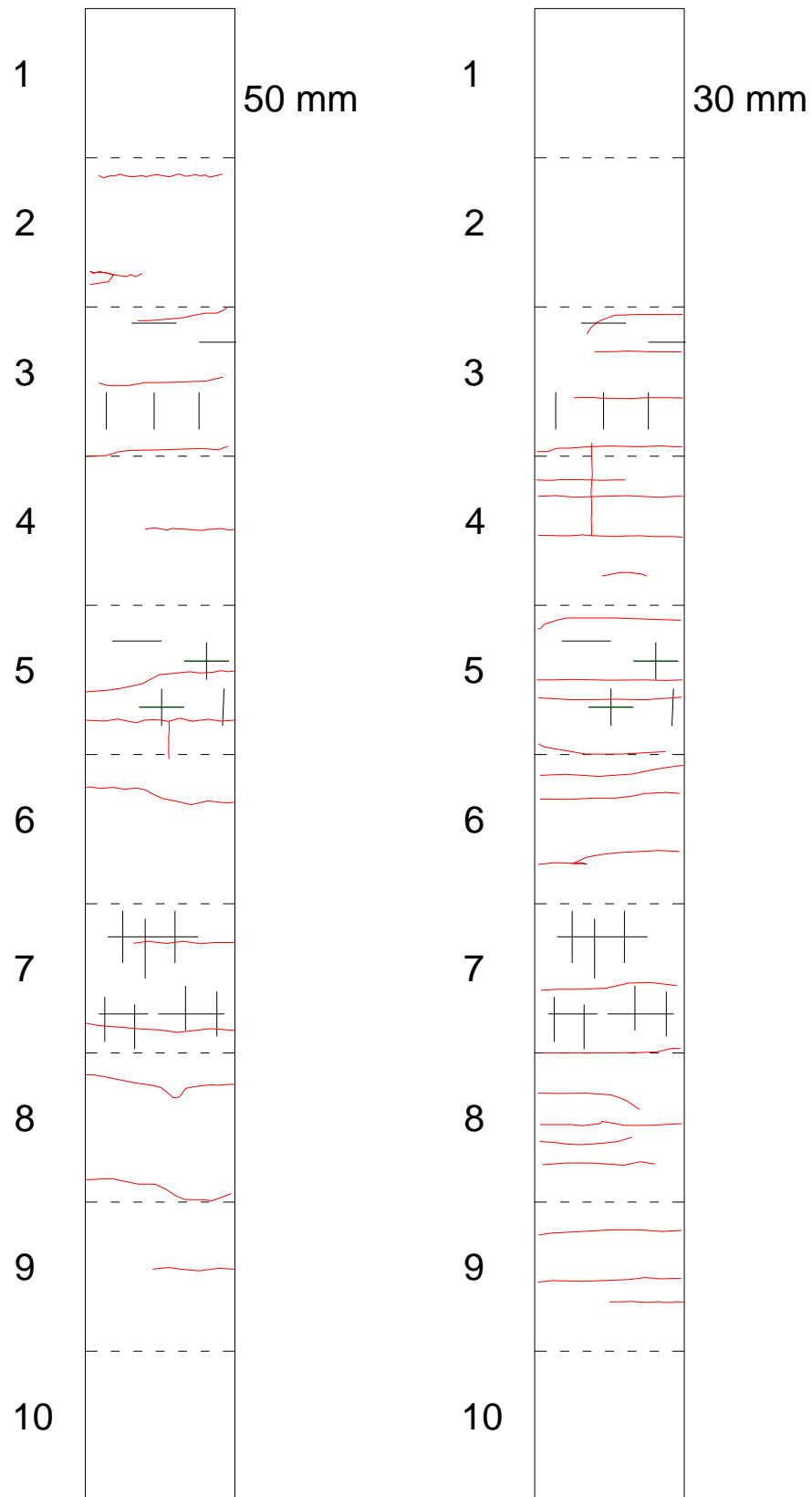


Figura 5.48: Croqui do levantamento das fissuras nos recapeamentos.



Figura 5.49: Exemplo de fissuras no recapeamento de 50 mm. Fonte: fotos do autor.



Figura 5.50: Exemplo de fissuras no recapeamento de 30 mm. Fonte: fotos do autor.

Como atividade final, foram extraídas duas placas do recapeamento de 30 mm, uma no espaço construído com o traço de referência e a outra no espaço construído com o traço alternativo, como mostrado na Figura 5.51. Os cortes foram escolhidos de forma que fossem coincidentes com as fissuras superficiais; dessa forma foi possível observar sua propagação na profundidade.



Figura 5.51: Extração de seções no recapeamento de 30 mm. Fonte: foto do autor.

Na Figura 5.52 são apresentadas 8 imagens que permitem analisar desenvolvimento das fissuras tanto no recapeamento em ECC quanto no revestimento asfáltico antigo. Nas imagens a) e b) são apresentadas fissuras que atravessam a camada de concreto asfáltico e se propagam como um corte único, sem microfissuração, no recapeamento de ECC_{Ref}; além disso é observada uma falha na aderência na área próxima da fissura.

Na imagem c) se vê uma fissura progredindo, desde o revestimento antigo no ECC_{CCA}, além de evidenciar o começo da falha da aderência na área circundante; já na imagem d) é apresentada uma fissura que progrediu até a superfície no ECC_{CCA}, também é evidenciada uma falha na aderência.

Nas imagens e), f) e g) são apresentadas fotografias de seções coincidentes com cortes realizados no revestimento asfáltico antigo, antes da execução dos recapeamentos. Nessas imagens não se observa a ocorrência da microfissuração no ECC_{Ref}, mas sim é evidenciada uma falha da aderência em toda a área próxima dos cortes.

Na imagem h) é apresentada uma vista de uma seção extraída, na qual é possível ver a borda do recapeamento e como este perdeu completamente a aderência com o pavimento existente, em aproximadamente 7 cm. Esse tipo de falha foi observado em todos os cortes realizados sugerindo que se apresenta em todo o perímetro do recapeamento. Isto sugere que a aderência entre o ECC e a camada asfáltica subjacente é um fator que afeta muito significativamente o comportamento do compósito, sob carga.



Figura 5.52: Vistas laterais dos cortes executados no recapeamento de 30 mm. Fonte: fotos do autor.

As passagens do rodado do simulador ocorreram, em faixas de 67 cm de largura, sem que tenham sido observados Afundamento de Trilha de Roda (ATR).

5.2.3. Análise da superfície de rolamento

A micro e macrotextura são duas escalas nas quais é possível avaliar a aderência pneu-pavimento. Na presente pesquisa foram avaliadas como uma forma de verificar a capacidade do ECC para resistir o desgaste superficial associado às cargas do tráfego. Dentre os diversos equipamentos disponíveis para determinar a textura superficial de pavimentos, o Pêndulo Britânico e a Mancha de Areia são os mais difundidos.

Nas superfícies os dois recapeamentos, foram realizados ensaios, antes do início da solicitação pelo simulador de tráfego e após 100 mil ciclos de carga de semi-eixo de 5,5 tf.

5.2.3.1. Avaliação da Microtextura com o Pêndulo Britânico

Resultados no Recapeamento de 50 mm

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de Pêndulo Britânico realizados no recapeamento de 50 mm, mostrando-se resultados pontuais com a correspondente classificação da microtextura, o valor médio, classificação do valor médio, Desvio Padrão e CV. As leituras iniciais, antes de iniciar os ciclos de carga, encontram-se na Tabela 5.20, e na Tabela 5.21 após realizados 100 mil ciclos de carga, aproximadamente.

Tabela 5.20: Resultados de ensaios do Pêndulo Britânico e classificação da Microtextura. Leitura inicial, recapeamento de 50 mm.

Seção	VRD	Classificação	Valor Médio VRD	Classificação	Desvio Padrão	CV [%]
5	94	Muito Rugosa				
6	90	Muito Rugosa				
7	90	Muito Rugosa	91	Muito Rugosa	2	2
8	89	Muito Rugosa				

Tabela 5.21: Resultados de ensaios do Pêndulo Britânico e classificação da Microtextura.
Leitura final, recapeamento de 50 mm.

Seção	VRD	Classificação	Valor Médio VRD	Classificação	Desvio Padrão	CV [%]
5	60	Rugosa	46	Insuficientemente Rugosa	12	26
6	41	Insuficientemente Rugosa				
7	49	Medianamente Rugosa				
8	32	Lisa				

Resultados no Recapeamento de 30 mm

De forma similar, a seguir são apresentados os resultados dos ensaios de Pêndulo Britânico realizados no recapeamento de 30 mm. As leituras iniciais, antes de iniciar os ciclos de carga, encontram-se na Tabela 5.22, e na Tabela 5.23 depois de terem sido aplicados 100 mil ciclos de carga, aproximadamente.

Tabela 5.22: Resultados de ensaios do Pêndulo Britânico e classificação da Microtextura.
Leitura inicial, recapeamento de 30 mm.

Seção	VRD	Classificação	Valor Médio VRD	Classificação	Desvio Padrão	CV [%]
5	76	Muito Rugosa	76	Muito Rugosa	8	10
6	70	Rugosa				
7	70	Rugosa				
8	86	Muito Rugosa				

Tabela 5.23: Resultados de ensaios do Pêndulo Britânico e classificação da Microtextura.
Leitura final, recapeamento de 30 mm.

Seção	VRD	Classificação	Valor Médio VRD	Classificação	Desvio Padrão	CV [%]
5	72	Rugosa	75	Rugosa	5	6
6	77	Muito Rugosa				
7	71	Rugosa				
8	81	Muito Rugosa				

5.2.3.2. Avaliação da Macrotextura com o Ensaio de Mancha de Areia

Resultados no Recapeamento de 50 mm

Os resultados da Mancha de Areia no recapeamento de 50 mm são apresentados a seguir, mostrando-se os resultados em cada ponto avaliado, a classificação da macrotextura, o valor médio, classificação do valor médio, Desvio Padrão e CV. As leituras iniciais, antes de iniciar os ciclos de carga encontram-se na Tabela 5.24, e na Tabela 5.25 após 100 mil ciclos de carga.

Tabela 5.24: Resultados de ensaios de Altura de Mancha de Areia e classificação da Macrotextura. Leitura inicial, recapeamento de 50 mm.

Seção	HS [mm]	Classificação	Valor Médio HS [mm]	Classificação	Desvio Padrão [mm]	CV [%]
3	0,70	Média				
5	0,65	Média				
6	0,60	Média	0,66	Média	0,04	6
7	0,67	Média				

Tabela 5.25: Resultados de ensaios de Altura de Mancha de Areia e classificação da Macrotextura. Leitura final, recapeamento de 50 mm.

Seção	HS [mm]	Classificação	Valor Médio HS [mm]	Classificação	Desvio Padrão [mm]	CV [%]
3	0,61	Média				
5	0,52	Média				
6	0,53	Média	0,54	Média	0,05	8
7	0,51	Média				

Resultados no Recapeamento de 30 mm

De forma semelhante, são apresentados a seguir os resultados de Altura de Mancha de Areia no recapeamento de 30 mm; na Tabela 5.26 antes de iniciar a aplicação dos ciclos de carga e na Tabela 5.27 depois de aplicados 100 mil ciclos de carga.

Tabela 5.26: Resultados de ensaios de Altura de Mancha de Areia e classificação da Macrotextura. Leitura inicial, recapeamento de 30 mm.

Seção	HS [mm]	Classificação	Valor Médio HS [mm]	Classificação	Desvio Padrão [mm]	CV [%]
3	0,69	Média				
5	0,53	Média				
6	0,57	Média	0,58	Média	0,08	13
7	0,52	Média				

Tabela 5.27: Resultados de ensaios Altura de Mancha de Areia e classificação da Macrotextura. Leitura final, recapeamento de 30 mm.

Seção	HS [mm]	Classificação	Valor Médio HS [mm]	Classificação	Desvio Padrão [mm]	CV [%]
3	0,58	Média	0,52	Média	0,04	8
5	0,48	Média				
6	0,50	Média				
7	0,53	Média				

5.2.3.3. Avaliação global

Microtextura

Na Tabela 5.28 é apresentado o resumo das leituras do VRD realizadas na presente pesquisa. Como pode ser visto, a maior parte das superfícies podem ser caracterizadas como Rugosas ou Muito Rugosas. Importante exceção são as leituras finais realizadas no recapeamento de 50 mm, recapeamento no qual a superfície experimentou uma queda do 50% do VRD médio, essa queda se deve ao causado pelo tráfego no ECC. Na Figura 5.53 os resultados são apresentados graficamente.

Tabela 5.28: Resumo valores do VRD no ECC.

	VRD médio	Desvio Padrão	CV [%]
Placa 1 m ²	55	1	1
Misturas Alternativas	89	5	6
Recapeamento de 50 mm inicial	91	2	2
Recapeamento de 50 mm final	46	12	26
Recapeamento de 30 mm inicial	76	8	10
Recapeamento de 30 mm final	75	5	6

O maior controle de qualidade realizado na concretagem do recapeamento de 30 mm pode ser um fator determinante para que a redução do valor médio do VRD nesse recapeamento tenha sido de apenas do 0,3%. Mattos (2009), ao analisar a evolução do VRD em três trechos em concreto de cimento Portland da BR-290/RS, ao longo de 8 meses, verificou uma redução de 7,2% no valor médio do VRD.

O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006) indica que o valor da resistência à derrapagem deve ser igual ou superior a 55 ($VRD \geq 55$), condição não atendida na superfície do recapeamento de 50 mm, após a aplicação de 100 mil ciclos de carga.

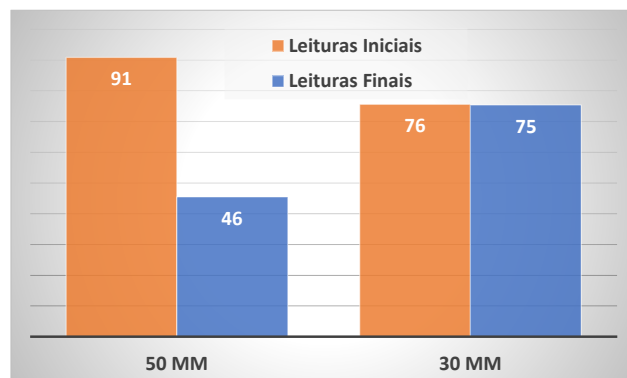


Figura 5.53: Comparativo entre resultados dos ensaios de Pêndulo Britânico nos dois recapeamentos.

Macrotextura

Na Tabela 5.29 é apresentado o resumo das leituras da HS. Todas as superfícies são caracterizadas como textura superficial Média, o que sugere a necessidade de aprimorar os procedimentos para executar processos de texturização e acabamento superficial mais eficientes. O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006) indica que o valor de Altura de Mancha de Areia deve estar entre 0,6-1,2 mm ($0,6 \text{ mm} \leq HS \leq 1,2 \text{ mm}$), encontrando-se os dois recapeamentos com valores de HS próximos ou abaixo desse intervalo. Utilizando o critério da proposta de Pasquet (1968) *apud* Specht et al. (2007) são caracterizadas essas superfícies como de textura superficial Média, indicadas para vias com velocidades de circulação no intervalo de 80-120 km/h.

Tabela 5.29: Resumo valores da HS no ECC.

	HS médio [mm]	Desvio Padrão [mm]	CV [%]
Placa 1 m ²	0,65	0,03	4
Misturas Alternativas	0,69	0,10	14
Recapeamento de 50 mm inicial	0,66	0,04	6
Recapeamento de 50 mm final	0,54	0,05	8
Recapeamento de 30 mm inicial	0,58	0,08	13
Recapeamento de 30 mm final	0,52	0,04	8

O recapeamento de 50 mm apresentou uma queda do valor médio da HS de 17% e o recapeamento de 30 mm de 9%. A redução de HS constatada por Mattos (2009) nos referidos

pavimentos em concreto de cimento Portland foi do 8%. Specht et al. (2007) no seu estudo da macrotextura para vários tipos de pavimentos no estado do Rio Grande do Sul encontraram valores médios para concretos de cimento Portland da ordem do 0,58 mm, com desvio padrão do 0,08 mm. Na Figura 5.54 mostram-se graficamente as evoluções de HS nos recapeamentos.

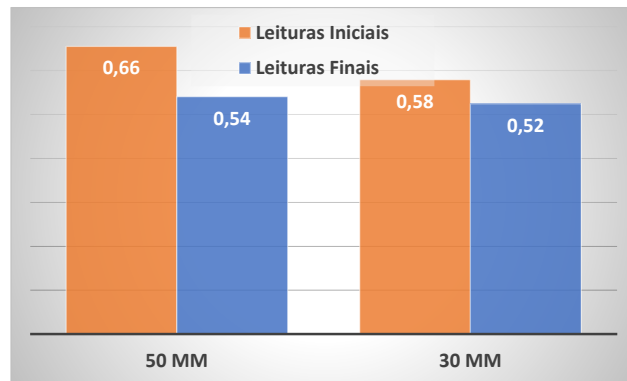


Figura 5.54: Comparativo de resultados dos ensaios de Altura de Mancha de Areia nos dois recapeamentos.

6. CONCLUSÕES

6.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

A motivação fundamental da pesquisa aqui relatada foi contribuir com a caracterização e o entendimento do comportamento mecânico do ECC (*Engineered Cementitious Composites*) com adição de fibras de polipropileno, que tem sido objeto de pesquisa no LEME. Especificamente, buscou-se avaliar a viabilidade do emprego do material como recapeamento para a reparação ou reforço de pavimentos.

Além da execução de ensaios de laboratório, com os quais se estudaram os efeitos de carregamentos monotônicos e cíclicos no ECC-LEME, foram levantadas as necessidades em termos de equipamentos e ferramentas para processos de mistura em condições reais de obra. Igualmente, e mediante a utilização do simulador de tráfego linear do LAPAV, foram estudadas as manifestações patológicas, o desgaste da superfície de rodagem e a possibilidade de reflexão de fissuras causados pela aplicação de ciclos de carga.

O teor de fibras adicionadas na mistura foi fixado em 2% do volume total de material. Dois traços foram definidos para estudo, o traço de referência (ECC_{Ref}) e um traço alternativo (ECC_{CCA}) com a substituição do 30% (em volume) do cimento por cinzas de casca de arroz sem controle de queima moídas por 4 horas em laboratório. Uma das características dos ECC's é o elevado consumo de cimento na sua fabricação, aproximadamente 1000 kg por metro cúbico, levando isso em consideração um dos objetivos da pesquisa consistiu em caracterizar o traço alternativo como uma forma de tornar mais amigável desde o ponto de vista econômico a utilização do ECC.

6.2. CONCLUSÕES DA PESQUISA

A principal conclusão resultante do trabalho experimental desenvolvido nesta Tese é que com materiais disponíveis comercialmente no estado é possível produzir-se um compósito tipo ECC, com elevada resistência à tração e comportamento à deformação conhecido como *strain-hardening* o qual demonstrou sua aplicabilidade no recapeamento de pavimentos.

Complementarmente, e atendendo aos objetivos específicos, as seguintes conclusões foram obtidas a partir dos trabalhos em laboratório e nos ensaios em verdadeira grandeza.

Em termos dos trabalhos preliminares

- a construção da placa de 1 m² evidenciou as dificuldades da utilização do traço de ECC anteriormente trabalhado no LEME. A baixa trabalhabilidade dificultou a mistura, o lançamento e o nivelamento, além de obrigar à utilização de uma betoneira de eixo vertical, a qual somente está disponível no laboratório para fins de pesquisa. Os problemas de trabalhabilidade motivaram a necessidade de estudar a mudança do aditivo químico, estudo que resultou no estabelecimento de um novo traço de referência (ECC_{Ref}) utilizado no resto da pesquisa;
- os baixos valores obtidos nos ensaios de Pêndulo Britânico e de Altura de Mancha de Areia realizados na placa de 1 m² evidenciaram a necessidade de se estabelecerem processos de texturização superficial ou a substituição do traço original por outro que aumentasse o atrito superficial do material, o que motivou o estudo das misturas alternativas;
- as misturas alternativas, conseguidas pela substituição da areia fina por areia média, apresentaram bom desempenho em termos de resistência e deformação, mostrando um comportamento *strain-hardening*. Os resultados de micro e macrotextura resultaram superiores aos correspondentes ao traço preliminar utilizado na placa de 1 m²; contudo foi decidido focar na pesquisa o traço de referência.

Em termos dos ensaios de resistência à tração na flexão:

- os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão em vigas quatro pontos demonstraram um comportamento do ECC (ambos traços) elaborado com fibras de Polipropileno (PP) similares aos descritos na literatura consultadas, as quais na sua maioria utilizaram fibras de Poli-Vinil-Álcool (PVA) ou Polietileno (PE). Na presente pesquisa foram registrados resultados da $f_{t,f}$ média para o traço de referência (ECC_{Ref}) de 5,8 MPa para vigas de 100 mm de altura e de 6,8 MPa nas vigas de 50 mm de altura. O traço alternativo (ECC_{CCA}) apresenta valores da $f_{t,f}$ média de 7,2 MPa (vigas de 100 mm) e de 8,2 MPa (vigas de 50 mm);
- o traço alternativo, com substituição parcial de cimento por cinza de casca de arroz, alcançou maiores valores da resistência máxima, 8,2 MPa se comparado com os 6,8 MPa do ECC_{Ref}; igual tendência foi demonstrada pelas deformações

específicas de extensão nas tensões máximas, 5175 $\mu\epsilon$ do ECC_{Ref} e 6411 $\mu\epsilon$ do ECC_{CCA};

- foi evidenciada a influência da altura dos corpos de prova nas resistências máximas, sendo, em ambos os traços, maiores em corpos de prova de menores alturas. No ECC_{Ref} a resistência máxima média foi de 6,8 MPa para corpos de prova de 50 mm de altura e 5,8 MPa para corpos de prova de 100 mm de altura, já o ECC_{CCA} apresentou valores de 8,2 MPa para corpos de prova de 50 mm de altura e 7,2 MPa para 100 mm de altura;
- todos os corpos de prova apresentaram o comportamento esforço-deformação denominado de *strain-hardening*, esse comportamento é caracterizado pelo ganho de resistência perante a deformação nos processos de carga. Como a ruptura ocorreu sempre no terço médio das vigas, aproveitaram-se todos os resultados;
- nos ensaios executados em corpos de prova com idade aproximada de 240 dias, foi verificado um aumento nas resistências médias do traço de referência passando de 6,8 MPa para 9,44 MPa, já no traço alternativo não houve uma mudança significativa 8,2 MPa para vigas com 30 dias de idade e 7,52 MPa. Através desses ensaios também foi possível verificar que a utilização de corpos de prova com imersão previa em água e sem secar não afeta seus resultados nos ensaios de resistência;
- no ensaio monotônico executado na única viga que atingiu o milhão de ciclos sem romper, no ensaio de fadiga, constatou-se não haver redução na resistência máxima à flexão associada com os ciclos de carga. Esta viga também apresentou um comportamento esforço-deformação de *strain-hardening*, mas com um intervalo elástico significativamente menor que os evidenciados nos demais ensaios monotônicos executados.

Em termos dos ensaios de resistência à compressão simples:

- de forma análoga aos resultados de resistência à tração na flexão, o traço alternativo alcançou maiores resistências à compressão simples, 50 MPa, que o traço de referência com 36 MPa.

Em termos da aderência avaliada através do ensaio de cisalhamento direto:

- a aderência entre os compósitos e o concreto asfáltico foi estimada em termos da resistência ao cisalhamento direto, assim, foi verificado como o traço alternativo (ECC_{CCA}) apresenta melhor desempenho com uma resistência média de 2050 kPa que o traço de referência (ECC_{Ref}) com uma resistência média de 1901 kPa. Também foi medida a aderência entre um concreto de cimento Portland e o concreto asfáltico, registrando uma resistência ao cisalhamento média de 1488 kPa, evidenciando a capacidade dos compósitos de desenvolver maiores condições de aderência entre materiais.

Em termos da trabalhabilidade:

- para avaliar a trabalhabilidade foi utilizado o ensaio de *flow table*, descrito na norma ASTM C 1437-13, o qual apresenta resultados sem unidades. Foi executado nas misturas realizadas no laboratório. Perante os problemas de trabalhabilidade do traço utilizado nos ensaios preliminares, no início da pesquisa, foi substituído o aditivo químico plastificante e utilizado o *flow table* como indicador da mudança no comportamento do material;
- com a troca do aditivo plastificante foi melhorada a trabalhabilidade do ECC-LEME, sendo duplicado o valor inicial do *flow table* nas misturas realizadas para os ensaios de fadiga, passando de 44 para 90 unidades de *flow table*. Com essa mudança foi viabilizada a utilização de betoneiras de tombo, além de facilitar o manuseio do material em estado fresco.

Em termos dos ensaios de fadiga em viga quatro pontos:

- por suas características, o equipamento de fadiga a quatro pontos do LAPAV permite a realização de ensaios de elevada severidade. Por este motivo, foram aplicados níveis de carga de 30%, 40%, 50% e 60% da $f_{t,f}$, inferiores aos sugeridos na literatura;
- foram estabelecidos modelos de fadiga em função da tensão de tração inicial (σ_{ti}), da deformação específica de extensão inicial (ε_{ti}) e deformação específica de extensão inicial normalizada ($\varepsilon_{ti}/\varepsilon_{tP}$); assim como em função da energia dissipada (DE);
- os resultados foram bem-sucedidos, 14 para cada um dos traços, permitiram uma adequada caracterização do fenômeno da fadiga, sendo evidente nos altos

valores dos coeficientes de correlação (R^2): modelo tensão (médio de 0,96), modelo deformação (médio de 0,91), e modelo energia dissipada (médio de 0,94);

- nos modelos de fadiga definidos em termos da deformação específica de extensão inicial (ϵ_{ti}) são calculados SDE (*Strain Damage Exponent*), para o ECC_{Ref} de 3,86 e para o ECC_{CCA} de 3,62. Os baixos valores apresentados pelos compósitos demonstram como estes têm um comportamento à fadiga muito mais eficiente que outros materiais cimentícios destinados à pavimentação;
- a análise do processo de degradação dos compósitos em termos da evolução da deflexão no ponto médio das vigas apresenta um comportamento similar ao descrito por Matsumoto e Li (1999) *apud* Suthiwarapirak et al. (2002) para compósitos do tipo ECC;
- o critério de ruptura da redução (50%) do MRF não se mostrou consistente, sendo aconselhável levar até a ruptura o corpo de prova;
- o valor máximo da relação de energia (*Energy Ratio*, ER), resulta útil para definir o início do processo de microfissuração, mas não para estágio de microfissuração.

Em termos dos ensaios de real grandeza – recapeamentos:

- foi demonstrada a capacidade de se produzir volumes relativamente elevados com a utilização de equipamentos convencionais (betoneira de tombo), 300 litros para o recapeamento de 30 mm de altura e 500 litros para o recapeamento de 50 mm de altura. Assim como realizar as operações de lançamento, manuseio e nivelamento em estado fresco com a ajuda de ferramentas convencionais;
- a exsudação apresentada durante a execução do recapeamento de 50 mm evidenciou a necessidade de controle estrito nas proporções de materiais no processo de mistura, especialmente da água. Possivelmente a fonte da água excedente seja a areia úmida utilizada. A exsudação dificultou a realização do acabamento superficial além de favorecer o processo de desgaste da superfície de rodagem. Na execução do recapeamento de 30 mm foi mais rigoroso o controle das proporções de materiais; o resultado foi um material sem exsudação

e com um acabamento superficial de melhor qualidade, evidenciado nos menores resultados de desgaste verificados nos ensaios de Pêndulo Britânico;

- o tipo de nata de cimento que apareceu nas superfícies dos recapeamentos após a aplicação de dezenas de milhares de ciclos de carga, possivelmente esteja associada com o processo de desgaste superficial do material. Com a passagem do semieixo do simulador de tráfego, as partículas de pó são arrancadas do ECC. Essas partículas misturadas com a água da chuva podem ter gerado a nata observada uma única vez em cada recapeamento;
- tendo sido aplicada a mesma carga, um semi-eixo de 5,5 toneladas, e de forma aproximada o mesmo número de ciclos de carga nos dois recapeamentos, 101.040 no recapeamento de 50 mm e 97.608 no recapeamento de 30 mm, como era de se esperar, foi maior a ocorrência de manifestações patológicas no elemento de menor espessura. No recapeamento de 50 mm foram identificadas 15 fissuras, sendo a maioria perpendiculares à direção do tráfego; já o recapeamento de 30 mm apresentou 25 fissuras, sendo várias delas paralelas à direção do tráfego;
- com as placas extraídas do recapeamento de 30 mm, foi possível estudar a propagação das fissuras no interior da camada. Foram identificadas fissuras que partindo do pavimento existente atingiram a superfície do ECC, apresentando adicionalmente uma afetação na aderência dos dois materiais. Contudo, a grande maioria das fissuras não resultou da reflexão de trincas existentes na camada asfáltica subjacente aos recapeamentos; isto sugere que os ECC's são materiais eficientes no retardamento da reflexão de trincas, mecanismo de degradação importante nos pavimentos;
- nas placas extraídas não se evidenciou a ocorrência de microfissuramento, mas sim problemas de aderência entre os dois materiais na área de influência dos cortes. Também foram identificados problemas de aderência ao longo do perímetro do recapeamento;
- os resultados dos ensaios de Pêndulo Britânico apresentaram valores médios de VRD finais de 46 para o recapeamento de 50 mm e 75 para o recapeamento de 30 mm. O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006)

sugere que o valor da resistência à derrapagem seja igual ou superior a 55 ($VRD \geq 55$), sendo a superfície final do recapeamento de 50 mm após a aplicação de 100 mil ciclos de carga a única que não cumpre com essa condição. O recapeamento de 50 mm experimentou uma queda do 50% do VRD médio, sendo que possivelmente o maior controle de qualidade realizado na concretagem do recapeamento de 30 mm pode ter influência na redução do valor médio do VRD desse recapeamento, o qual foi do 0,3%;

- os resultados da Altura de Mancha de Areia com valores de HS finais de 0,54 para o recapeamento de 50 mm e 0,52 para o recapeamento de 30 mm, apresentaram resultados abaixo dos recomendados pelas especificações para pavimentos rígidos, sendo que o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006) sugere que o valor da Altura de Mancha de Areia esteja entre 0,6–1,2 mm ($0,6 \text{ mm} \leq HS \leq 1,2 \text{ mm}$).

6.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de complementar, validar e dar continuidade à presente pesquisa a seguir são apresentadas algumas propostas para a execução de trabalhos futuros:

- aprimoramento do traço de ECC-LEME, enfatizando a determinação da quantidade ótima de aditivo químico;
- a metodologia utilizada para a determinação da aderência, e que segue a recomendação de Fortes (1999), se mostrou de difícil execução, sendo que a elaboração dos corpos de prova complicado e delicado. É recomendável a adoção de um procedimento de ensaio diferente em futuras pesquisas;
- estabelecimento de uma metodologia adequada para o acabamento superficial;
- estudar a resistência à abração do ECC-LEME;
- estudo das propriedades reológicas do ECC-LEME;
- estudar mais detalhadamente os traços alternativos, tanto por meio de ensaios monotônicos como por ensaios cíclicos;

- construção de trechos experimentais em verdadeira grandeza, fora dos ambientes de laboratório, sob condições mecânicas e ambientais reais;
- estudar mais detalhadamente a aderência do ECC com os pavimentos existentes em trechos experimentais;
- realizar uma análise de custos de construção, considerando rendimentos em obra, equipamentos e mão de obra;
- tratando-se de um material de recente desenvolvimento não se tem a possibilidade de comparar os resultados obtidos nos modelos de fadiga da presente pesquisa, ficando os presentes resultados disponibilizados para serem verificados em futuras pesquisas;
- verificar o comportamento do ECC como recapeamento sobre pavimentos de cimento Portland;
- extrair do recapeamento de 50 mm placas com as quais verificar a propagação de fissuras e a possíveis problemas de aderência.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **ASTM C78-84**: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete Using Simple Beam with Third Point Loading.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **ASTM C1437-13**: Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **ASTM C1609/C1609M-12**: Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **ASTM E303-13 (2013)**: Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **ASTM E965-96 (2006)**: Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique (Withdrawn 2015).

ARNOLD, G.; STEVEN B.; ALABASTER, D. e FUSSELL, A. **Effect on pavement wear of increased mass limits for heavy vehicles – Concluding Report**. Land Transport New Zealand Research Report 281, Wellington, New Zealand, 80 f., 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland com Alta Resistência Inicial. Rio de Janeiro, 1991.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIATION OF AUSTRALASIAN ROAD TRANSPORT AND TRAFFIC AGENCIES. **The Development and Evaluation of Protocols for the Laboratory Characterization of Cemented Materials**: Austroads Technical Report AP-T101/08. Sydney, 89 f., 2008.

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

ASSOCIATION OF AUSTRALASIAN ROAD TRANSPORT AND TRAFFIC AGENCIES. **Preliminary Investigation of the Influence of Micro-cracking on Fatigue Life of Cemented Materials:** Austroads Technical Report AP-T198-12. Sydney, 65 f., 2012.

AZAMBUJA, D. M. **Estudos de recapeamentos asfálticos de pavimentos através de testes acelerados.** 2004. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

BABURAMANI, P. **Asphalt fatigue life prediction models – a literature review.** Research report ARR 334. Vermont South. National Interest Services, 1999.

BALBO, J. T. e RODOLFO, M. P. **Concrete Requirements for Ultra-Thin Concrete Overlays (Whitetopping) for Flexible Pavements.** In: International Symposium on Concrete Roads, AIPCR-CEMBUREAU, 8TH, Theme IV – Maintenance and Rehabilitation, Lisbon – Portugal, Proceedings. p. 27-32, 1998.

BALBO, J. T. **Contribuição à Análise Estrutural de Reforços com Camadas Ultradelgadas de Concreto de Cimento Portland sobre Pavimentos Asfálticos (Whitetopping Ultradelgado).** Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 195 f., 1999.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros.** Petrobras/Abeda, 3 reimpressão, Rio de Janeiro, 2006.

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

CASAGRANDE, E. Q. **Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras de Polipropileno e com Adição de Cinza Volante: Estudo de Desempenho em Pavimentos de Concreto.**

Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

CASAGRANDE, M. D. T. **Comportamento de Solos Reforçados com Fibras Submetidos a Grandes Deformações**. 2005. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CASTAÑEDA, M. A. L. **Reciclagem de pavimentos flexíveis com adição de cimento Portland: estudo de fadiga através do ensaio de flexão em viga quatro pontos**. 2016. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

CERATTI, J. A. P. **Estudo do comportamento à fadiga de solos estabilizados com cimento para utilização em pavimentos**. 1991. 338 f. Tese (Doutor em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

CHANDRASEKHAR, S.; SATYANARAYANA, K. G.; PRAMADA, P. N.; RAGHAVAN, P. **Processing, Properties and Applications of Reactive Silica from Rice Husk-an Overview**. Journal of Materials Science, v. 38, p. 3159-3168, 2003.

CHANVILLARD, G. e RIGAUD, S. **Complete Characterization of Tensile Properties of Ductal UHPFRC According to French Recommendations**. In: Fourth International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC4): Sponsored by RILEM, Ann Arbor, USA, June 15-18, 2003.

COSTA, F. B. P. da. **Análise da Durabilidade dos Compósitos Cimentícios de Elevada Deformação Reforçados com Fibras**. 2015. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

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

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES: **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**: DNIT IPR-720/2006. Rio de Janeiro, 2006.

DONATELLO, S.; TYRER, M.; CHEESEMAN, C. R. **Resent Develops in Macro-Defect-Free (MDF) Cement**. *Construction and Building Materials*, v. 3, p. 1761-1767, Outubro, 2008.

EMMANUEL, B. O. A.; LEV, K.; LESLIE, T.G. **Mechanistic-Based Model for Predicting Reflective Cracking in Asphalt Concrete-Overlaid Pavements**, *Transp. Res. Rec.* 1629, p. 234-241, 1998.

FIORIN, M. M. **Avaliação de desempenho de recapeamentos asfálticos com camada intermediária de geotêxtil submetidos à solicitação por simulador de tráfego**. 2009. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

FORTES, R. M. **Estudo da Aderência Entre o Concreto de Cimento Portland e Concretos Asfálticos para Fins de Reforços Ultradelgados de Pavimentos**. 1999. 233 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

FORTES, R. M. **Proposta de ensaio de resistência ao cisalhamento direto para determinação da aderência entre duas camadas**. 33ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv - Associação Brasileira de Pavimentação, Florianópolis – SC. 17 f. Brasil, 2001.

FUKUYAMA, H.; SATO, Y.; LI, V. C.; MATSUZAKI, Y.; MIHASHI, H. **Ductile Engineered Cementitious Composite Elements for Seismic Structural Application**. 12WCEE, 2000.

GARCEZ, E. O. **Investigação do Comportamento de *Engineered Cementitious Composites* Reforçados com Fibras de Polipropileno como Material para Recapeamento de Pavimentos**. 2009. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

GONÇALVES, F. J. P. **Estudo do Desempenho de Pavimentos Flexíveis a Partir de Instrumentação e Ensaios Acelerados**. 2002. 507 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

GRAEFF, A. G. **Long-term performance of recycled steel fibre reinforced concrete for pavement applications**. 2011. 501 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Faculty of Engineering, The University of Sheffield, Sheffield (UK), 2011.

HARVEY, J. T. **Impacts and Benefits of APT: An APT Operator's Perspective**, Proceedings of the 3rd International Conference on Accelerated Pavement Testing, Madrid, Spain, Oct. p. 1-3, 2008.

HEIDE, N. T. e SCLILANGEN, E. **Self-Healing of Early Age Cracks in Concrete**. In: A. J. M. Schmets and S. van der Zwaag Eds., Proceedings of the first international conference on self-healing materials. Dordrecht: Springer, 2007.

HUANG, Yang H., **Pavement Analysis and Design**, Second edition. New Jersey: Prentice Hall, 2004.

JAPAN CONCRETE INSTITUTE (JCI). **JCI Standards for Test Methods of Fiber Reinforced Concrete**. Tokyo. p. 45-48, 1984.

KAMADA, T. e LI, V. C. **The Effects of Surface Preparation on the Fracture Behavior of ECC/Concrete Repair System**, Journal of Cement and Concrete Composites, 22 (6), p. 423-431, 2000.

KAN, L. L.; SHI, H. S.; SAKULICH, A. R.; LI, V. C. **Self-Healing Characterization of Engineered Cementitious Composite Materials**. ACI Materials Journal 107(6), p. 617-624, 2010.

KANAKUBO, T. **Tensile Characteristics Evaluation Method for Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composites**. Journal of Advanced Concrete Technology. v. 4 n. 1, p. 3-17, Feb 2006.

KANDA, T. e LI, V. C. **New Micromechanics Design Theory for Pseudostrain Hardening Cementitious Composite**. J. Eng. Mech., 125(4), p. 373-381, 1999.

KODA, M.; MIHASHI, H.; NISHIWAKI, T.; KIKUTA, T.; KWON, S.-M. **Self-Healing Capability of Fiber Reinforced Cementitious Composites**. Proc. of Int'l Workshop on Advances in Construction Materials through Science and Technology, Hong Kong, RILEM PRO 79, 2011.

LEPECH, M. D. e LI, V. C. **Application of ECC for Bridge Deck Link Slabs**. Materials and Structures, 42(9), p. 1185-1195, 2009.

LEUNG, C. K. Y.; CHEUNG, Y. N.; ZHANG, J. **Fatigue Enhancement Of Concrete Beam With ECC Layer**. Cement and Concrete Research 37, p. 743-750, 2007.

LI, V. C. **From Micromechanics to Structural Engineering - The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Application**. J. Struct. Mech. Earthquake Eng., JSCE, Tokyo. 10(2), p. 37-48, 1993.

LI, V. C. **Engineered Cementitious Composites – Tailored Composites through Micromechanical Modelling**. In: Banthia, N.; Bentur, A. A.; Mufti, A. editors. Fiber Reinforced Concrete: Present and Future, p. 64-97, 1998.

LI, V. C. **Engineered Cementitious Composites (ECC): a Review of the Material and its Applications**. Journal of Advanced Concrete Technology, v. 1 n. 3, p. 215-230, Nov 2003.

LI, V. C. e HERBERT, E. N. **Robust Self-Healing Concrete for Sustainable Infrastructure**. Journal of Advanced Concrete Technology, v. 10, p. 207-218, 2012.

LI, V. C. e KANDA, T. **Multiple Cracking Sequence and Saturation in Fiber Reinforced Cementitious Composites**. JCI Concrete Research and Technology, v. 9, n. 2, p. 19-33, 1998.

LI, V. C. e YANG, E. **Self-Healing in Concrete Materials**. In: S. van der Zwaag Ed. Self-Healing Materials: An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science. Springer Series in Materials Science. p. 161-193, 2007.

LI, V. C. e WU, H. C. **Conditions for Pseudostrain Hardening in Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites**. Appl. Mech. Rev., 45(8), p. 390–398, 1992.

LI, V. C.; LIM, Y. M.; CHAN, Y-W. **Feasibility Study of a Passive Smart Self-Healing Cementitious Composite**. Composites Part B. 29B, p. 819-827, 1998.

LIM, Y. M. e LI, V. C. **Durable Repair of Aged Infrastructures Using Trapping Mechanism of Engineered Cementitious Composites.** Cement and Concrete Composites, v. 19, p. 373-385, 1997.

MAGALHÃES, M. S. **Caracterização Experimental de Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras de PVA: processo de fratura, propriedades térmicas, deformações deferidas e estabilidade térmica.** 2010. 245 f. Tese (Doutor em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

MALI, S; PACHPANDE, T.; KOTHRUD, A. **Effects of Rate of Loading on Compressive Strength of Concrete.** International Journal of Innovation and Emerging Research in Engineering, v. 2, i. 4, p. 20-25, 2015.

MATSUMOTO, T. **Fracture Mechanics Approach to Fatigue Life of Discontinuous Fiber Reinforced Composites.** PhD thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Michigan, Ann Arbor, Mich. 1998.

MATTOS, J. R. G. **Avaliação da aderência pneu-pavimento e tendências de desempenho para a rodovia BR-290/RS.** 2009. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MAYUGO, J. A. M. **Estudio constitutivo de materiales compuestos laminados sometidos a cargas cíclicas.** 2003. 314 f. Tese (Doutor em Engenharia) – Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanya, 2003.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos,** Segunda edição. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2005.

MEHTA P. K. e MONTEIRO P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials,** 3rd ed. New York: McGraw-Hill. xxi, p. 659, 2006.

MIHASHI, H.; AHMED, S. F. U.; KOBAYAKAWA, A. **Corrosion of Reinforcing Steel in Fiber Reinforced Cementitious Composites.** Journal of Advanced Concrete Technology, 9(2), p. 159-167, 2011.

MORILHA, A. J. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas.** 2004. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas.** 1991. Tese (Doutor em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

NATIONAL CONCRETE PAVEMENT TECHNOLOGY CENTER (CP Tech Center): **Guide to Concrete Overlay Sustainable Solutions for Resurfacing and Rehabilitating Existing Pavements:** CP Tech Center 2014, Iowa State University, 161 p., Washington D.C., May 2014.

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

NISHIWAKI, T.; KODA, M.; YAMADA, M.; MIHASHI, H.; KIKUTA, T. **Experimental Study on Self-Healing Capability of FRCC Using Different Types of Synthetic Fibers.** Journal of Advanced Concrete Technology, v. 10, p. 195-206, Junho, 2012.

NUÑEZ, W. P. **Análise Experimental de Pavimentos Rodoviários Delgados com Basaltos Alterados.** 1997. 297 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

ÖZBAY, E.; SAHMARAN, M.; YÜCEL, H. E.; ERDEM, T. K.; LACHEMI, M.; LI, V. C. **Effect of Sustained Flexural Loading on Self-Healing of Engineered Cementitious Composites.** Journal of Advanced Concrete Technology, v. 1, p. 167-179, May 2013.

PEREIRA, D. da S. **Estudo do Comportamento de pavimentos de Concreto Simples em Condições de Aderência entre Placa de Concreto e Base Cimentada ou Asfáltica.** 2003. 299 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos.** 1991. 489 f. Tese (Doutor em Engenharia) – Programa

de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

QIAN, S. **Influence of Concrete Material Ductility on Behavior of High Stress Concentration Zones**, Dissertation, University of Michigan, 2007.

QIAN, S.; ZHOU, J.; De ROOIJ, M.; YE, G.; SCHLANGEN, E.; van BREUGEL, K. **Self-Healing Behavior of Strain Hardening Cementitious Composites Incorporating Local Waste Materials**. Cement and Concrete Composites. 31(9). 613-621, 2009.

RANADE, R.; ZHANG J.; LYNCH J. P.; LI V. C. **Influence of micro-cracking on the composite resistivity of Engineered Cementitious Composites**. Cement and Concrete Research, v. 58, p. 1-12, 2014.

RIGHI, D. P. **Caracterização do Comportamento Mecânico de Compósitos Cimentícios de Elevada Deformação com a Utilização de Fibras de Polipropileno e Cinza de Casca de Arroz**. 2015. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RIVOIRE, J. L. **Avaliação de Misturas Mornas com Emprego de Simulador de Tráfego Linear**. 2014. 249 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RODRIGUES, R. M. **Estudo do Trincamento dos Pavimentos**. 1991. Tese (Doutor em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

SAEED, A.; HALL, J. W. Jr. **NCHRP Report 512: Accelerated Pavement Testing: Data Guidelines**. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 59 pp, 2003.

SAID, S. H.; RAZAK, H. A.; OTHMAN, I. **Flexural behavior of engineered cementitious composite (ECC) slabs with polyvinyl alcohol fiber**. Construction and Building Materials, v. 75, p. 176-188, 2015.

SENDECKYJ, G. P. **Constant life diagrams — a historical review**. International Journal of Fatigue, v. 23, p. 347-353, 2001.

SHERIR, M. A. A.; HOSSAIN, K. M. A.; LACHEMI, M. **Structural Performance of Polymer Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composites Subjected to Static and Fatigue Flexural Loading.** Journal Polymers, volume 7, issue 7, p. 1299-1330, 2015.

SMITH, K. D.; YU, H. T.; PESHKIN, D. G. **Portland Cement Concrete Overlays: State of the Technology Synthesis**, FHWA-IF-02-045, Federal Highway Administration, 192 p., April 2002.

SPECHT, L. P.; ROZEK, T.; HIRSCH, F.; SANTOS, R. T. dos. **Avaliação da macrotextura de pavimentos através do ensaio de mancha de areia.** Teoria e Prática na Engenharia Civil, Rio Grande, n. 10, p. 30-38, julho, 1997.

SUTHIWARAPIRAK, P.; MATSUMOTO, T.; KANDA, T. **Flexural Fatigue Failure Characteristics of an Engineered Cementitious Composite and Polymer Cement Mortar.** J. Mater. Concrete Struct. Pave., JSCE, Tokyo, 718(57), p. 121-134, 2002.

SUTHIWARAPIRAK, P.; MATSUMOTO, T.; KANDA, T. **Multiple Cracking and Fiber Bridging Characteristics of Engineered Cementitious Composites under Fatigue Flexure.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 16, p. 433-443, 2004.

TIGHE, S.; HASS, R.; PONNIAH, J. **Life Cycle Cost Analysis of Mitigating Pavement Rehabilitation Reflection Cracking.** 82nd Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2003. 1 CD-ROM.

VITORINO, D. R. **Análise de Desempenho de um Pavimento Flexível da Rodovia BR-290/RS Solicitado por um Simulador de Tráfego Móvel.** 2008. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

WANG, S. e LI, V. C. **Engineered Cementitious Composites with High-Volume Fly Ash.** ACI Materials Journal, v. 104, n. 3, p. 233-240, May-June 2007.

WANG, K.; JANSEN, D. C.; SHAH, S. P. **Permeability Study of Cracked Concrete, Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 3, p. 381-393, 1997.

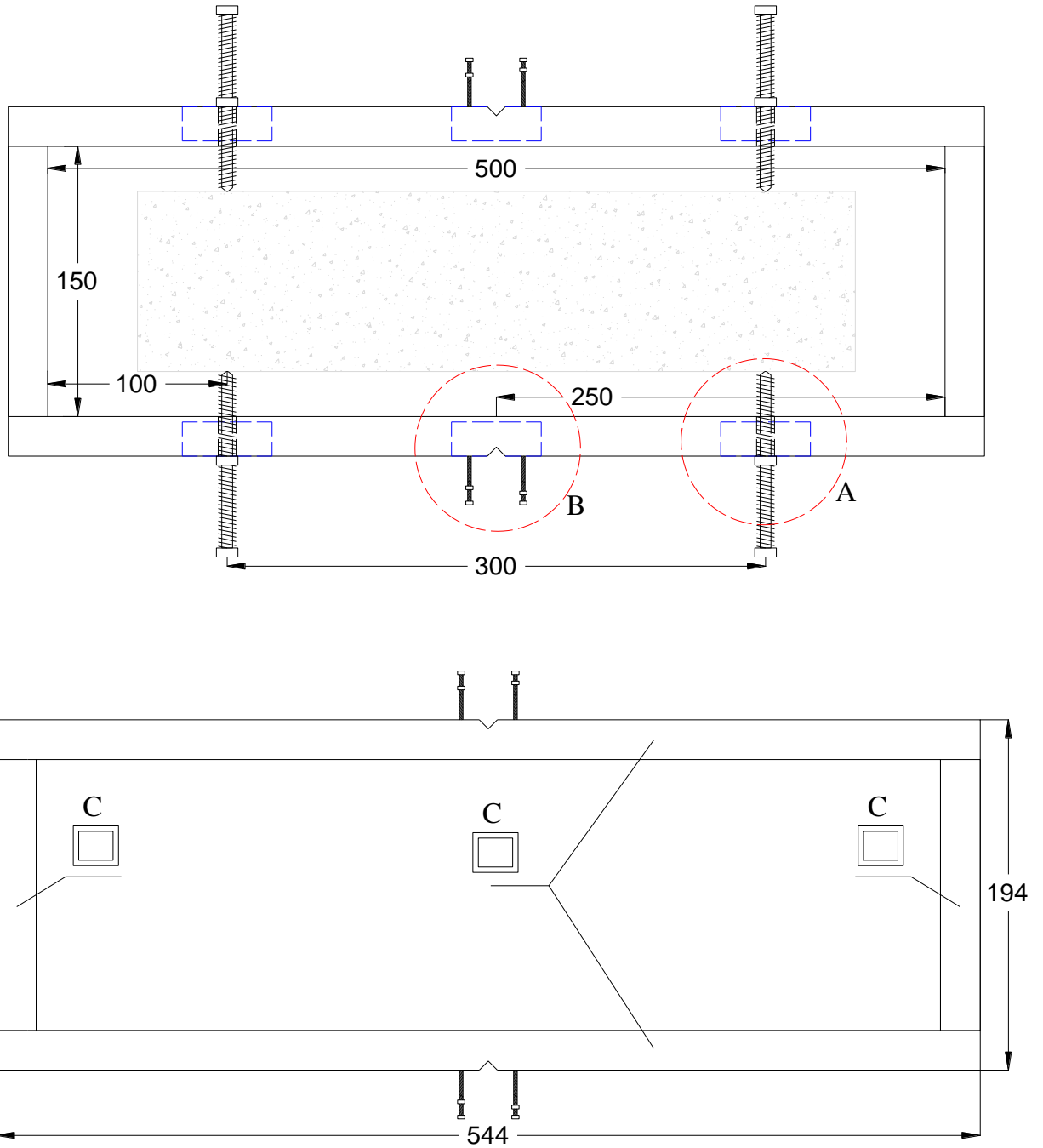
WEIMANN, M. B. e LI, V. C. **Hygral Behavior of Engineered Cementitious Composites (ECC)**. *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments*, v. 9, n. 5, p. 513-534, 2003.

ZHANG, Z. e LI, V. C. **Monotonic and Fatigue Performance in Bending of Fiber-Reinforced Engineered Cementitious Composite in Overlay System**. *Cement and Concrete Research*, n. 32, p. 415-423, 2001.

ZHOU, J.; QIAN, S.; YE, G.; OGUZHAN, C.; van BREUGEL, K.; LI, V. C. **Improved fiber distribution and mechanical properties of engineered cementitious composites by adjusting the mixing sequence**. *Cement and Concrete Composites*, v. 34, p. 342-348, 2012.

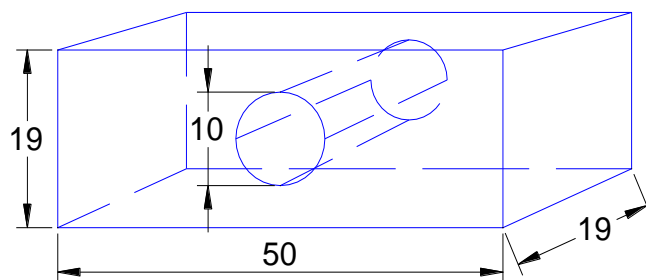
ZHU, Y.; ZHANG, Z.; YANG, Y.; YAO, Y. **Measurement and Correlation of Ductility and Compressive Strength for Engineered Cementitious Composites (ECC) Produced by Binary and Ternary Systems of Binder Materials: Fly ash, Slag, Silica Fume and Cement**. *Construction and Building Materials Journal*, n. 68, p. 192-198, 2014.

APÊNDICE A – PROJETO SISTEMA DE POSICIONAMENTO DOS LVDT



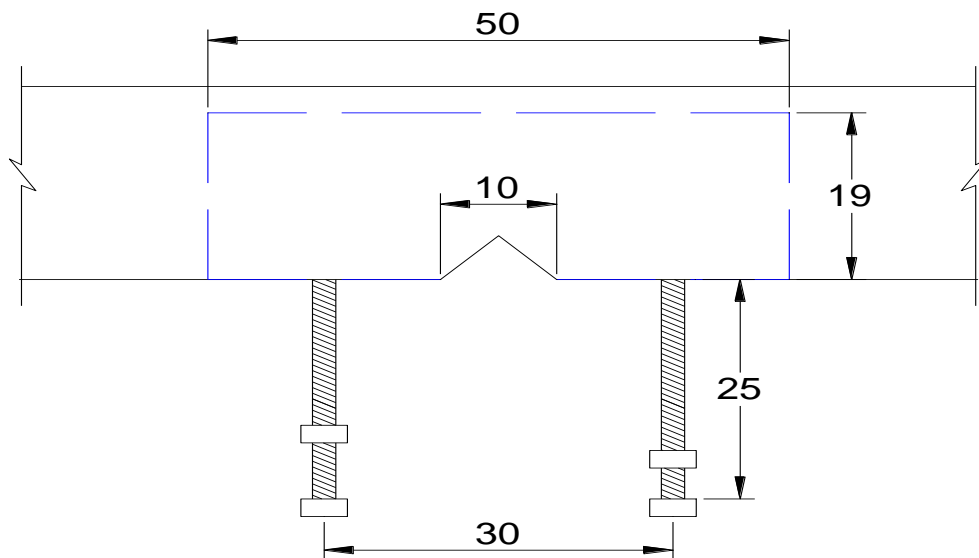
A

Bloco de alumínio



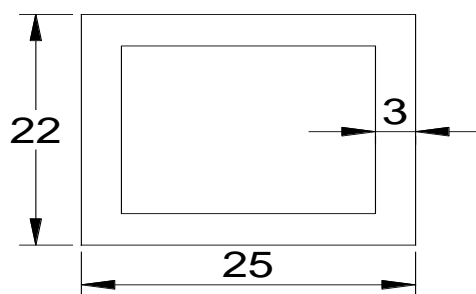
B

Detalhe suporte dos LVDT



C

Perfil de alumínio

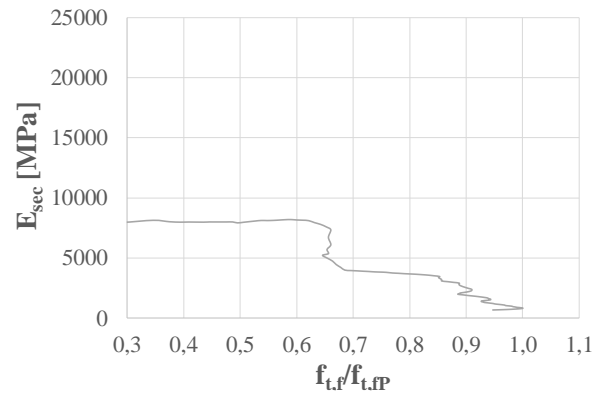
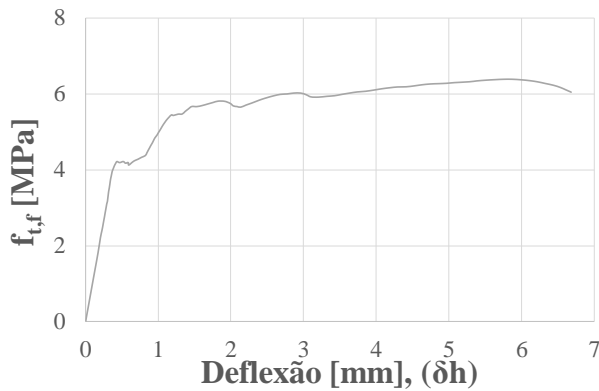


APÊNDICE B – ENSAIOS À FLEXÃO EM VIGAS QUATRO PONTOS

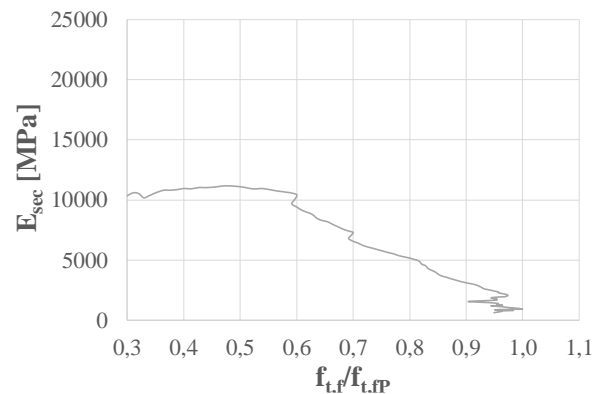
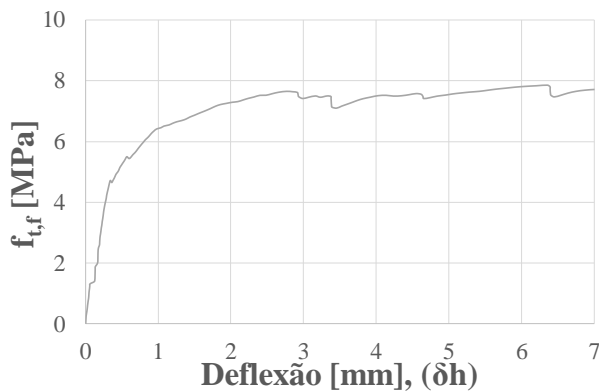
B.1. RESULTADOS DAS MISTURAS ALTERNATIVAS

Prensa:	LAPOL, capacidade 50 kN
Velocidade de carga:	1,2 mm/min
Data dos ensaios:	27/03/2015
Tempo de cura:	28 dias, câmara úmida
Operador:	Maikon, Camilo Muñoz
Dimensões médias CP [mm]	15 x 70 x 305

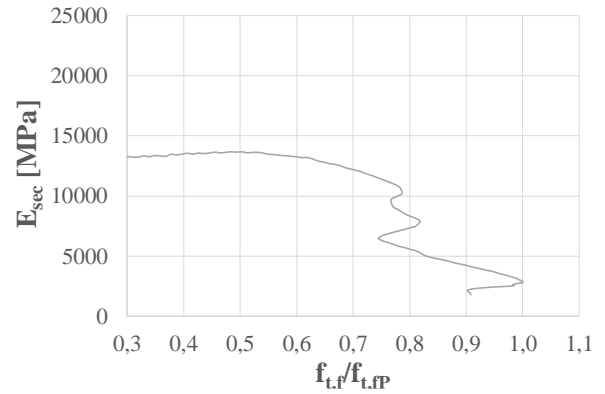
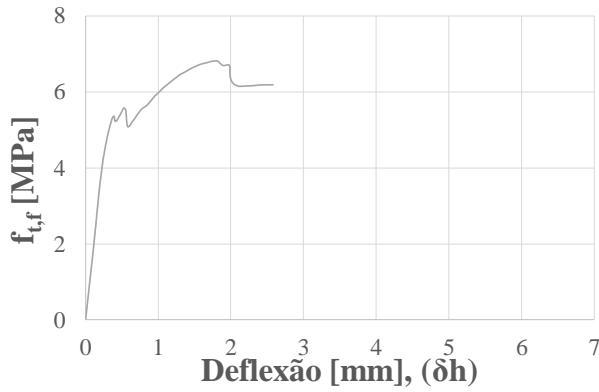
MA 80/20 CP2



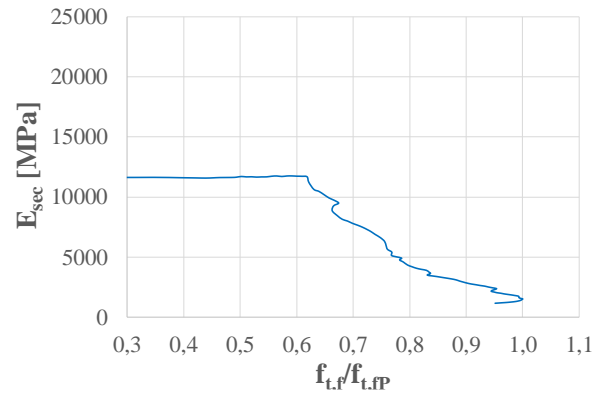
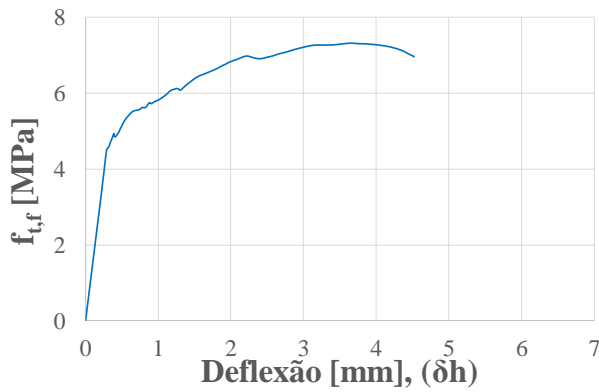
MA 80/20 CP3



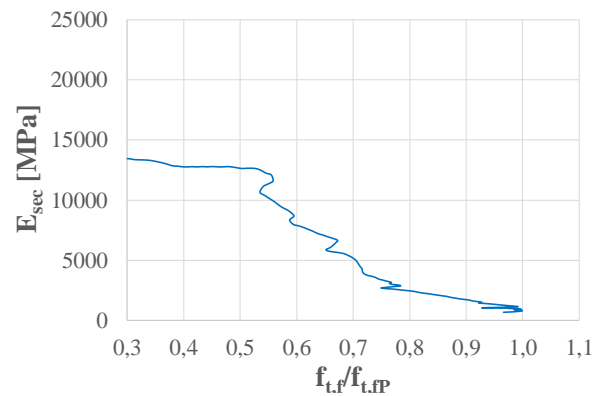
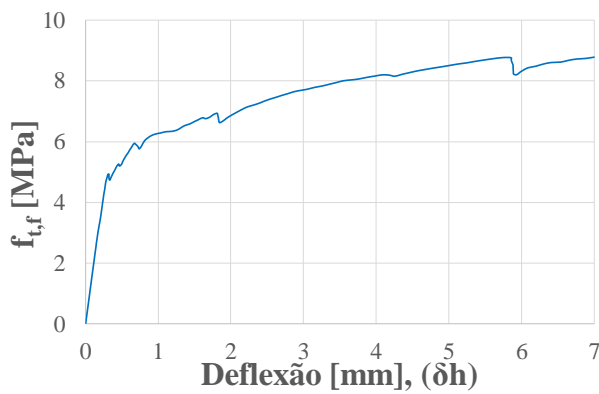
MA 80/20 CP4



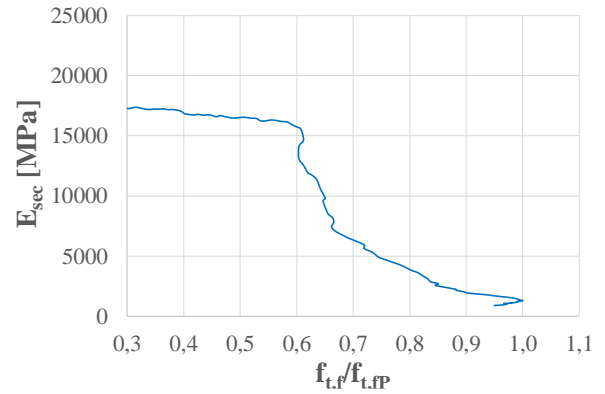
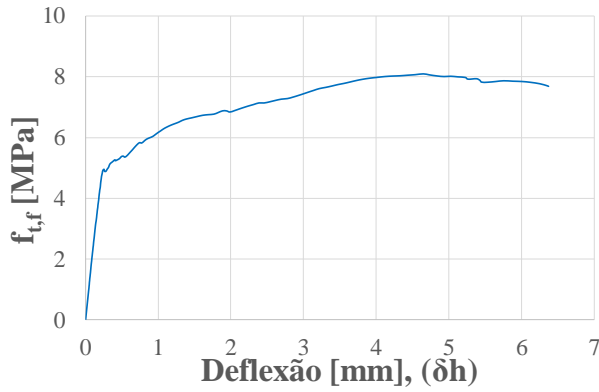
MA 50/50 CP1



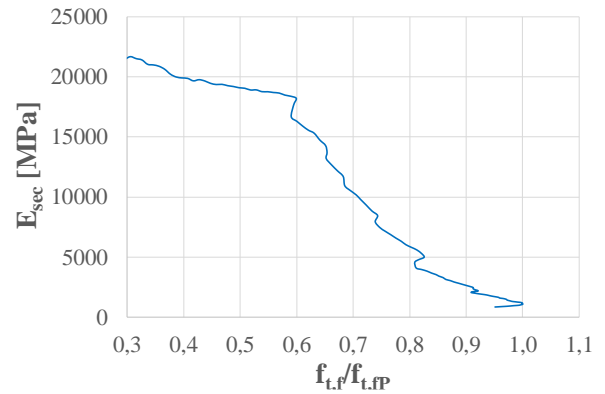
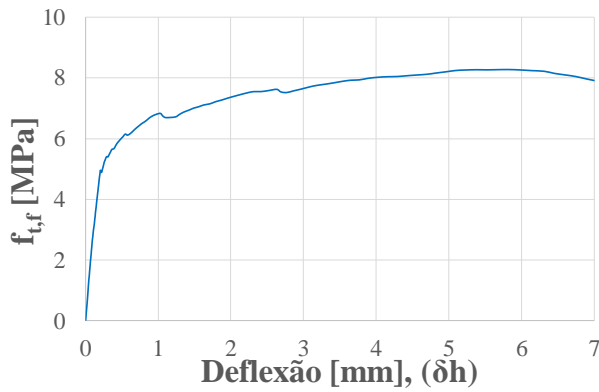
MA 50/50 CP2



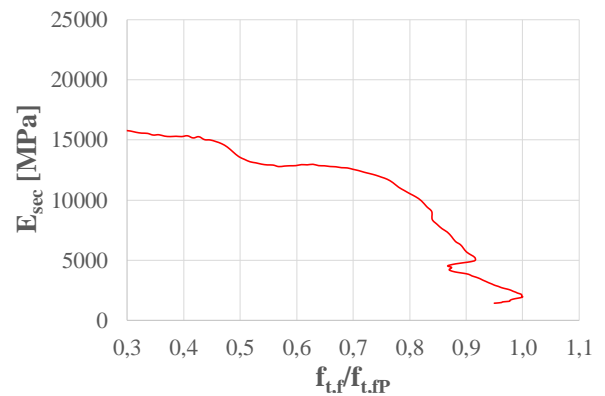
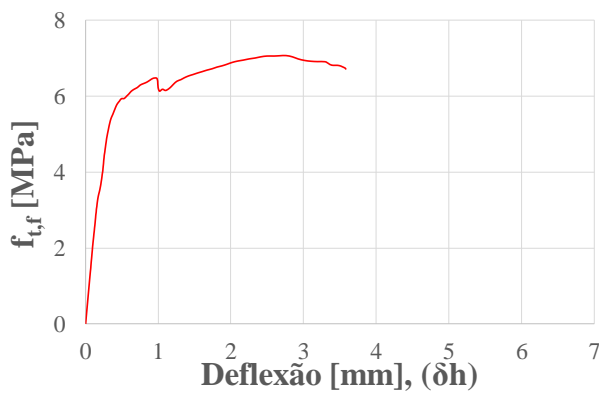
MA 50/50 CP3



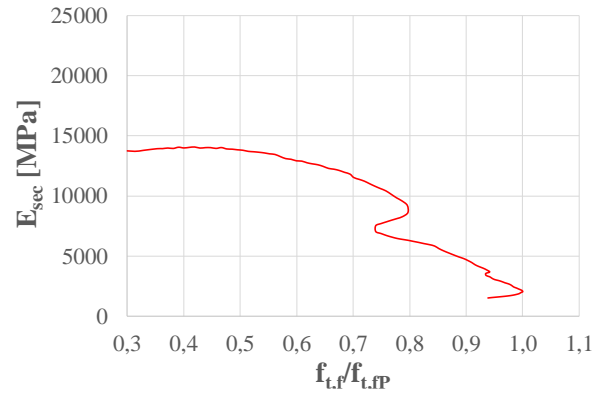
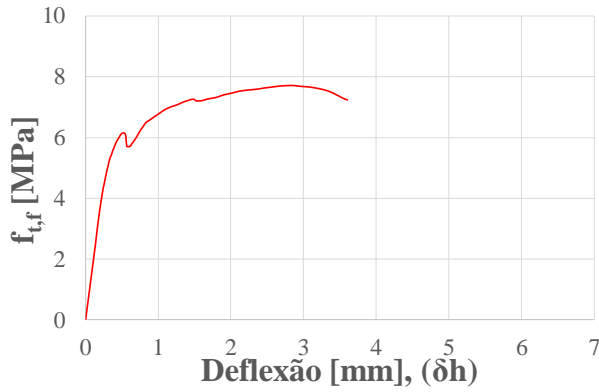
MA 50/50 CP4



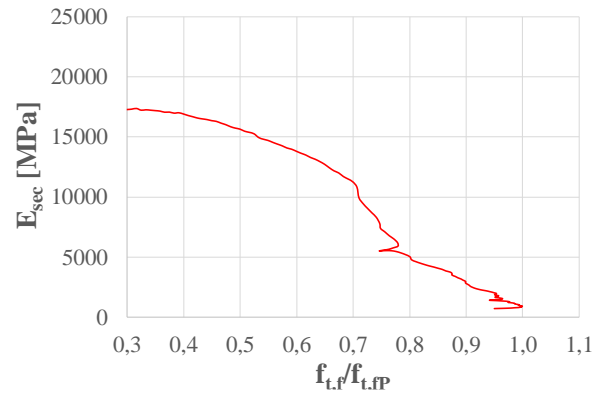
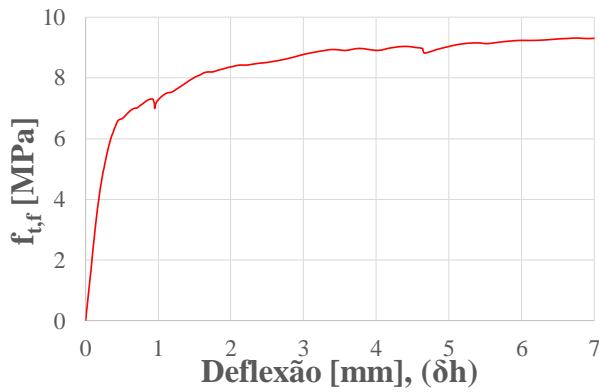
MA 20/80 CP1



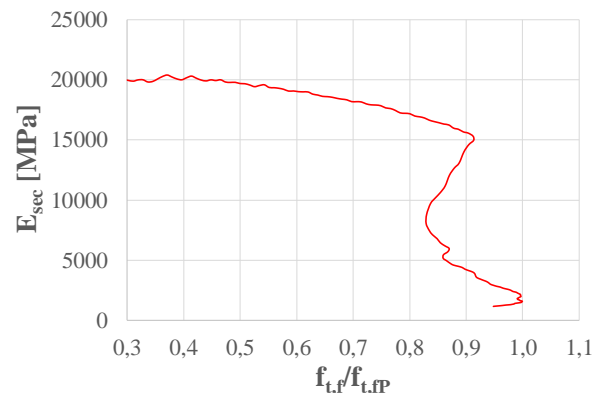
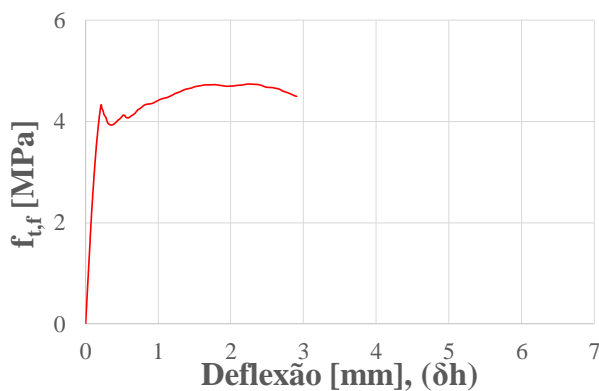
MA 20/80 CP2



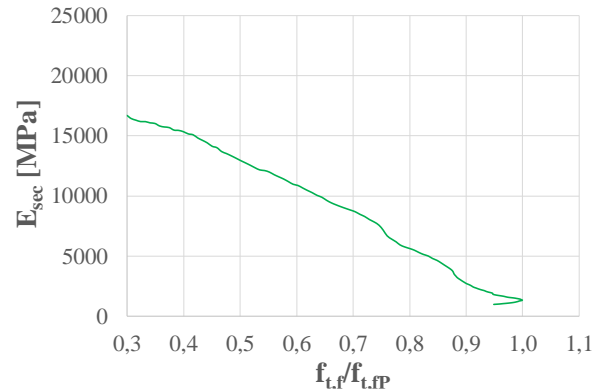
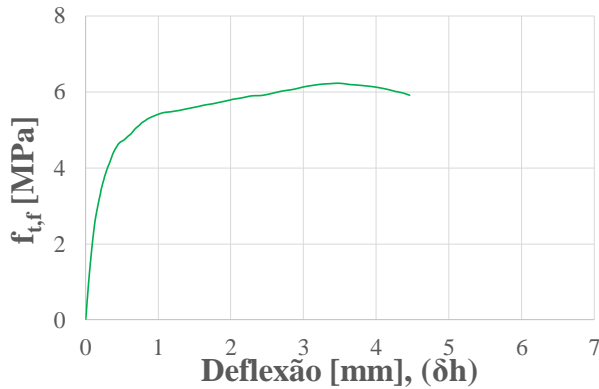
MA 20/80 CP3



MA 20/80 CP4



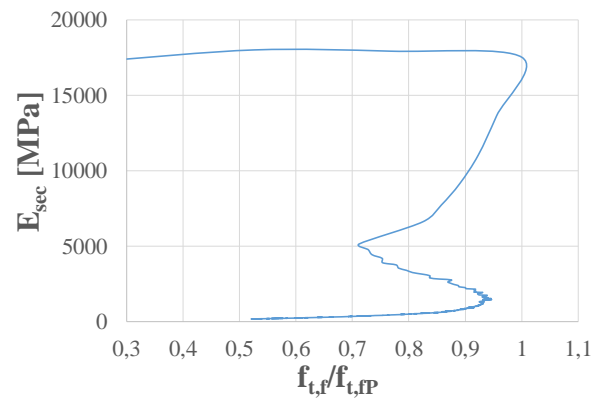
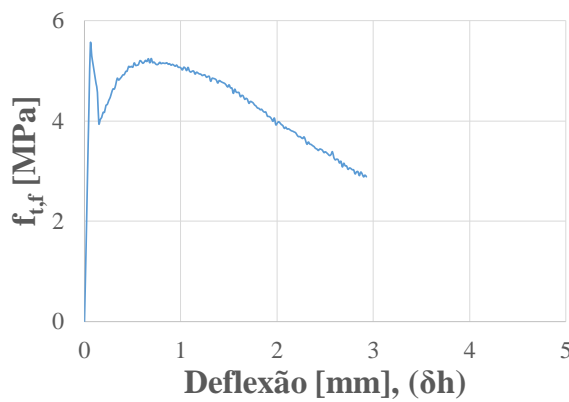
MA 0/100 CP1



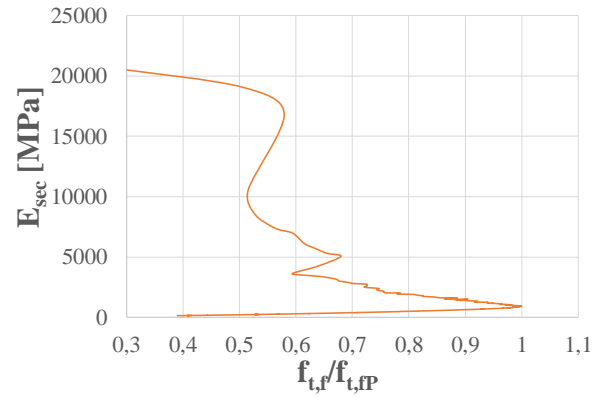
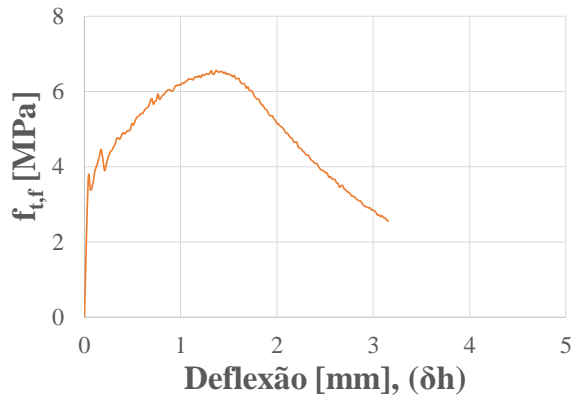
B.2. RESULTADOS ENSAIOS TRAÇÃO NA FLEXÃO

Prensa:	LEME, Shimadzu modelo UFH 2000 kN
Velocidade de carga:	1,2 mm/min
Data dos ensaios:	16/03/2016
Tempo de cura:	28 dias, imersão
Operador:	Camilo Muñoz
Dimensões médias CP [mm]:	100 x 100 x 400
Traço:	ECC _{Ref}

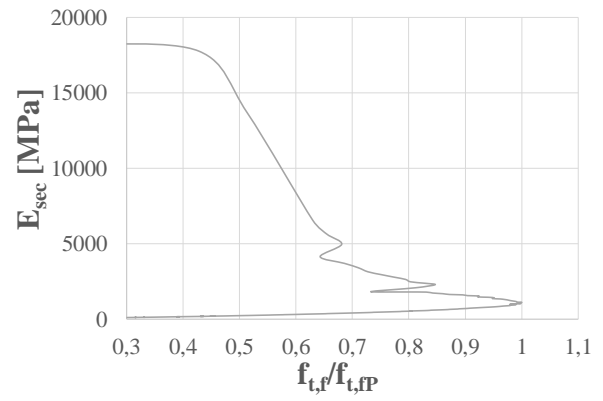
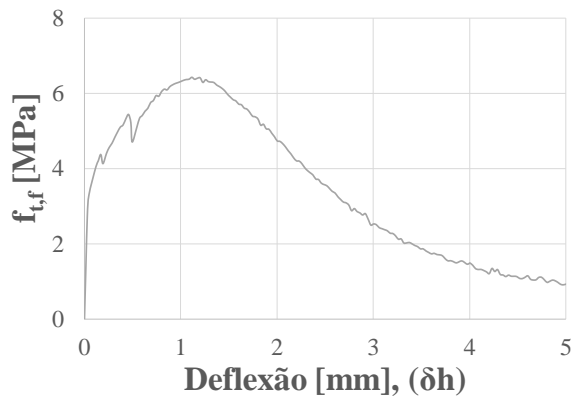
CP1



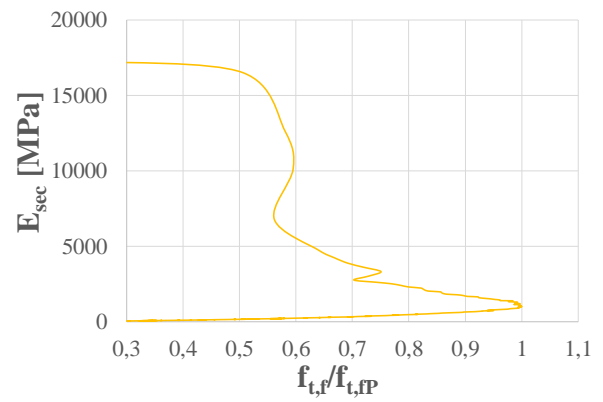
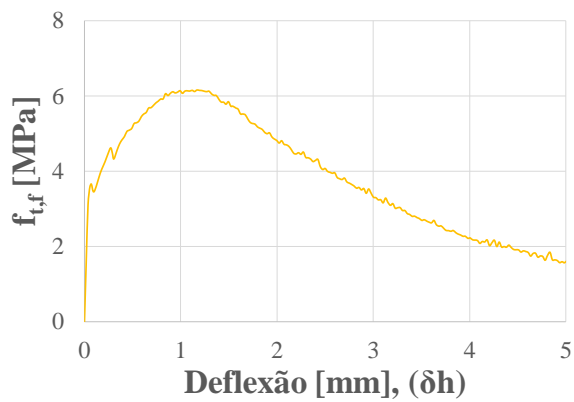
CP2



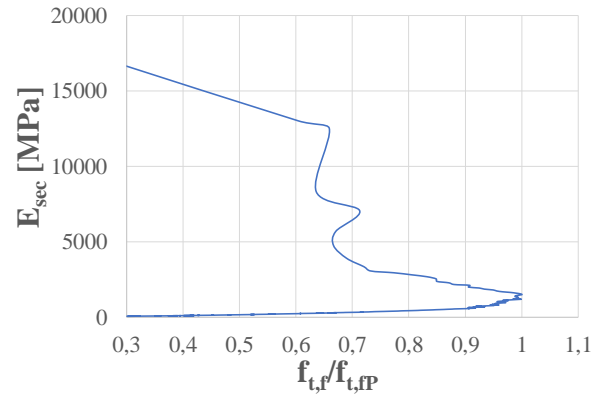
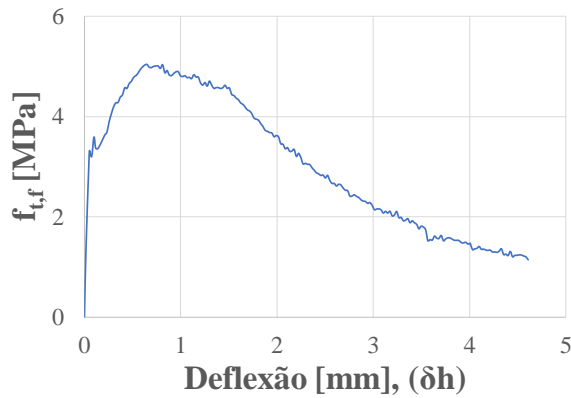
CP3



CP4



CP5



Prensa:

LEME, Shimadzu modelo UFH 2000 kN

Velocidade de carga:

1,2 mm/min

Data dos ensaios:

16/03/2016

Tempo de cura:

28 dias, imersão

Operador:

Camilo Muñoz

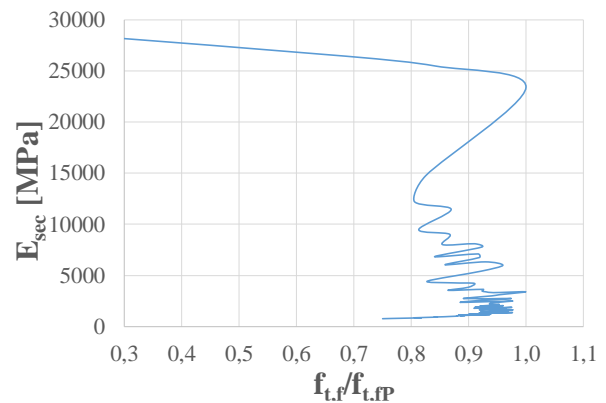
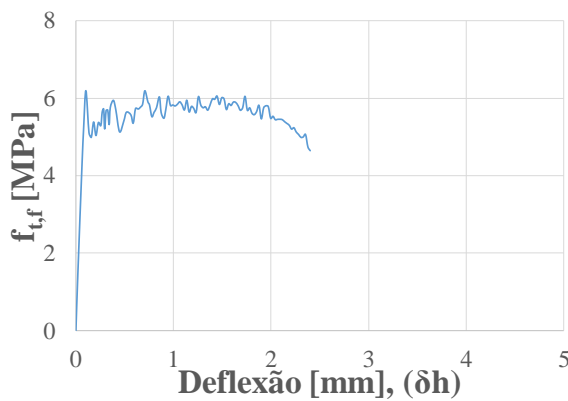
Dimensões médias CP [mm]:

50 x 100 x 400

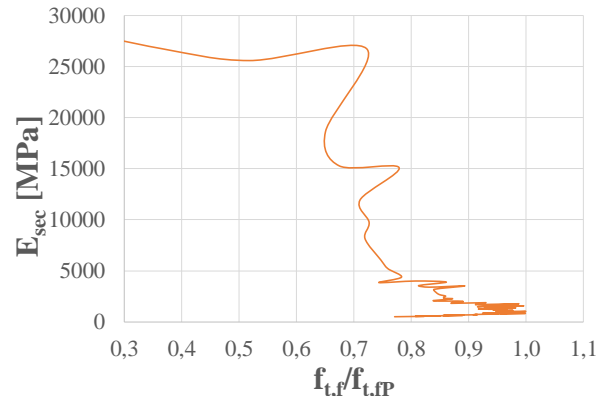
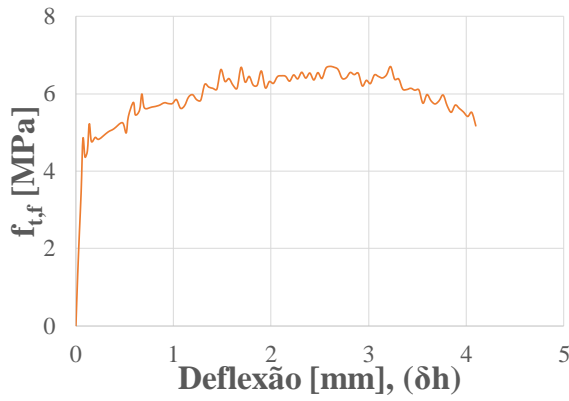
Traço:

ECC_{Ref}

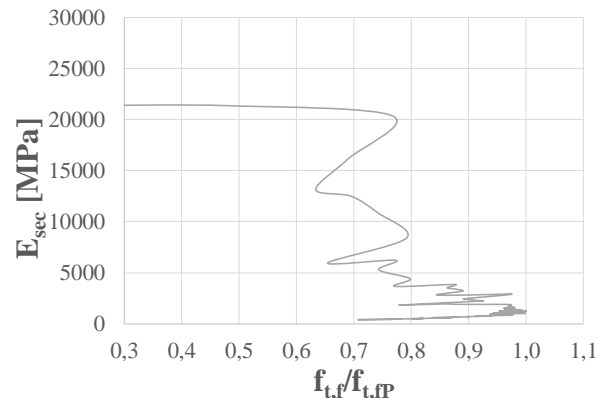
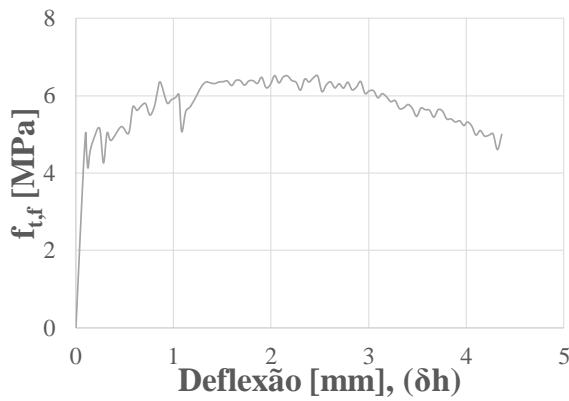
CPI1



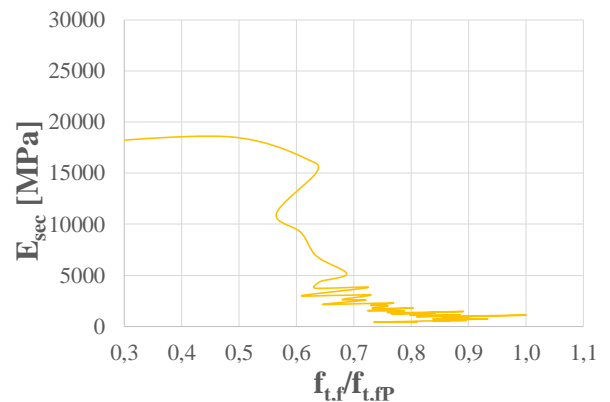
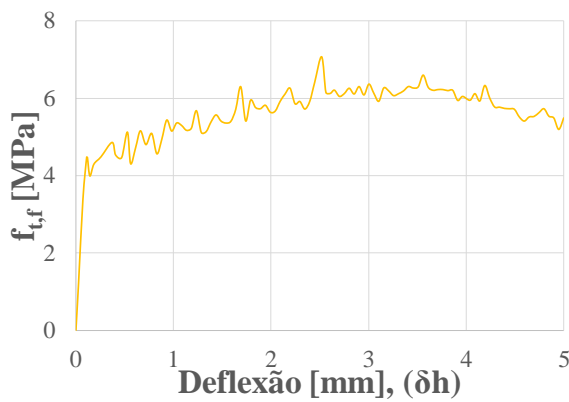
CP2



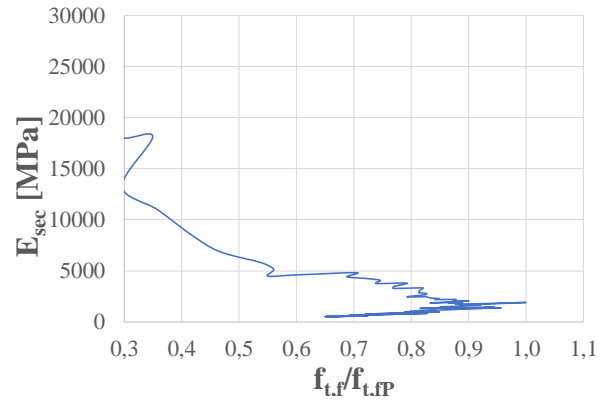
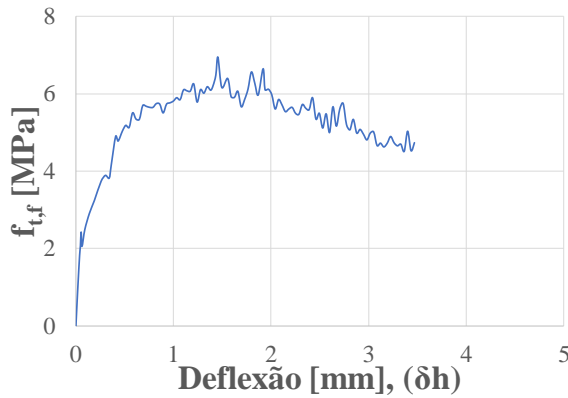
CP3



CP4



CP5



Prensa:

LEME, Shimadzu modelo UFH 2000 kN

Velocidade de carga:

1,2 mm/min

Data dos ensaios:

16/03/2016

Tempo de cura:

28 dias, imersão

Operador:

Camilo Muñoz

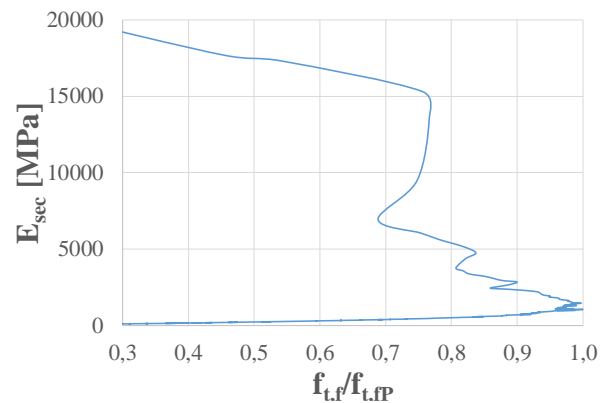
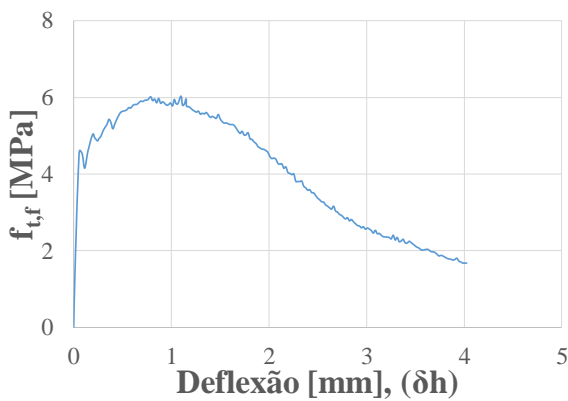
Dimensões médias CP [mm]:

100 x 100 x 400

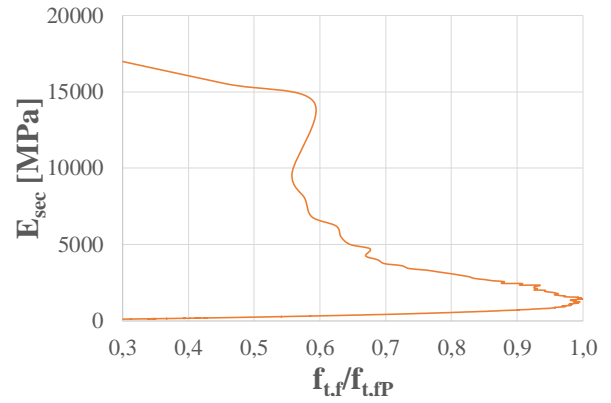
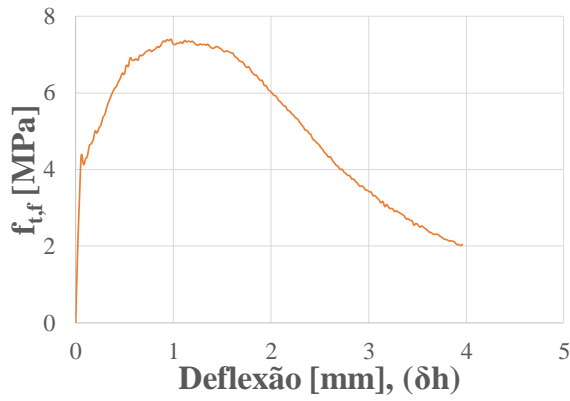
Traço:

ECC_{CCA}

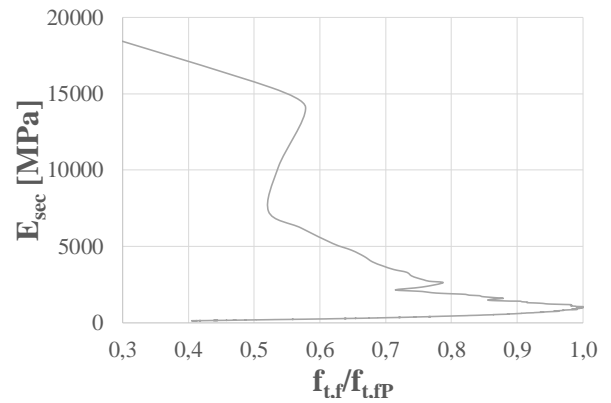
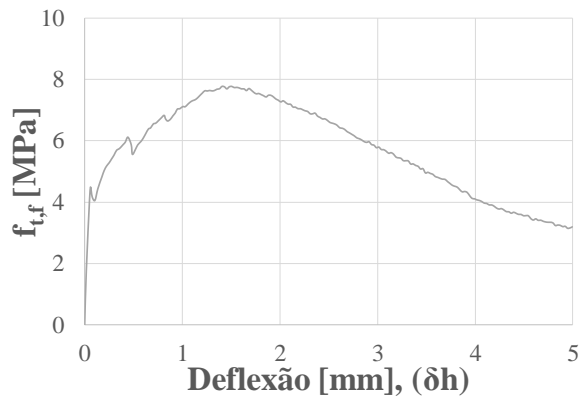
CP1



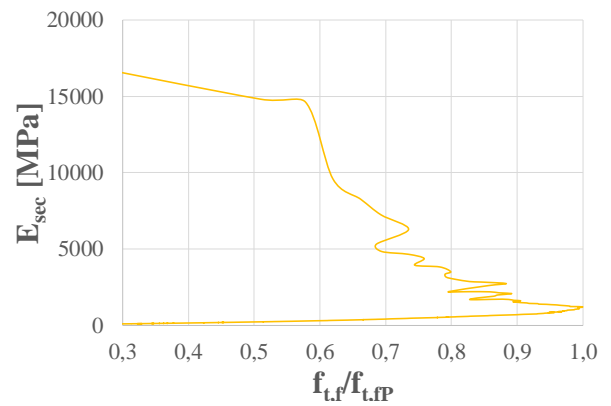
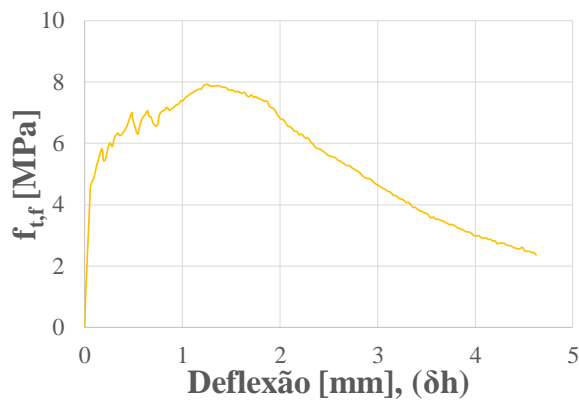
CP2



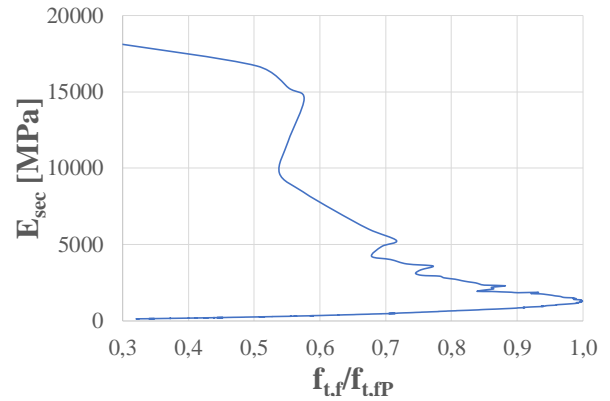
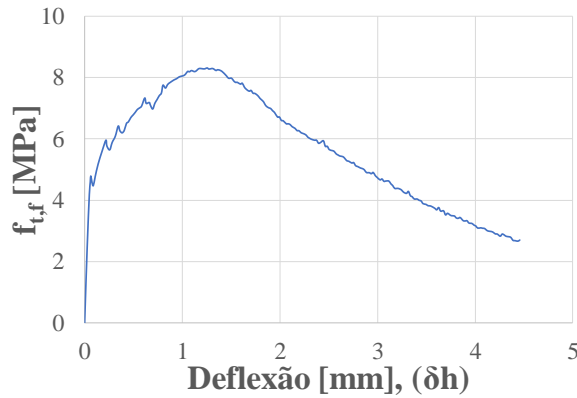
CP3



CP4



CP5



Prensa:

LEME, Shimadzu modelo UFH 2000 kN

Velocidade de carga:

1,2 mm/min

Data dos ensaios:

16/03/2016

Tempo de cura:

28 dias, imersão

Operador:

Camilo Muñoz

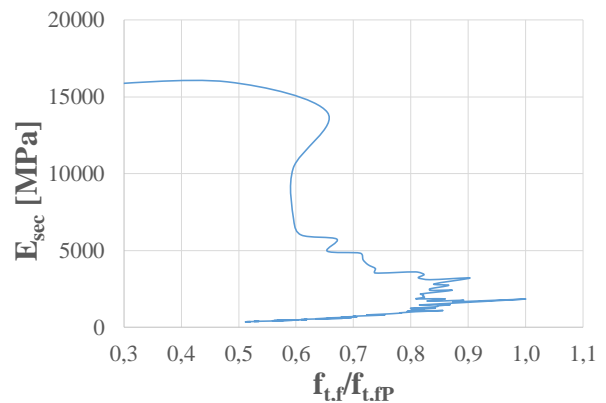
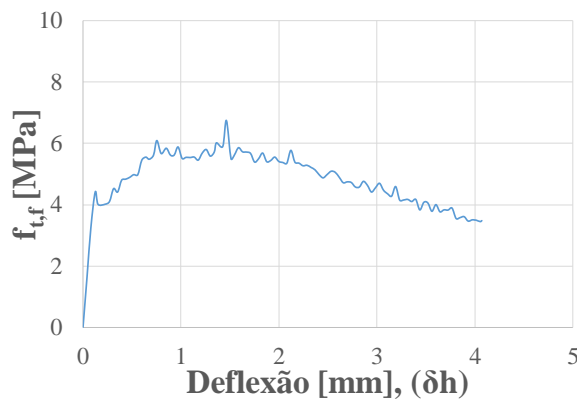
Dimensões médias CP [mm]:

50 x 100 x 400

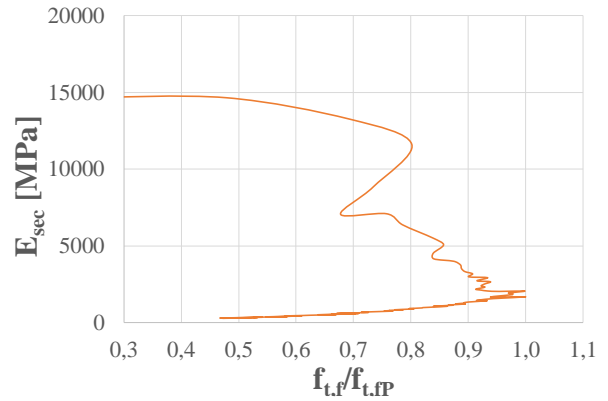
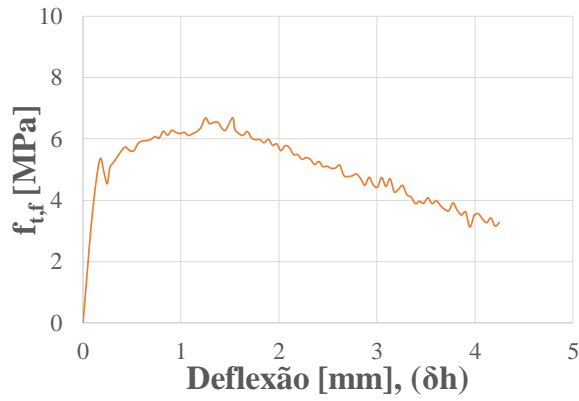
Traço:

ECC_{CCA}

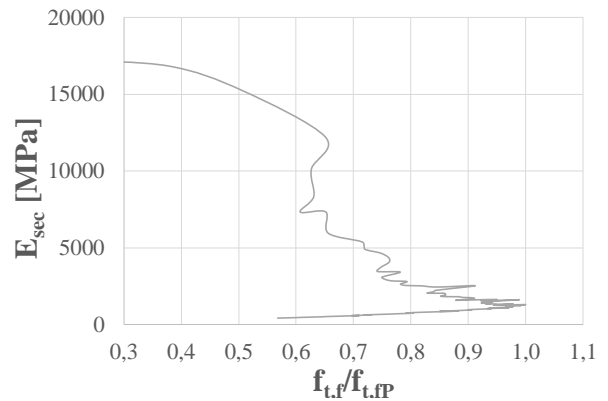
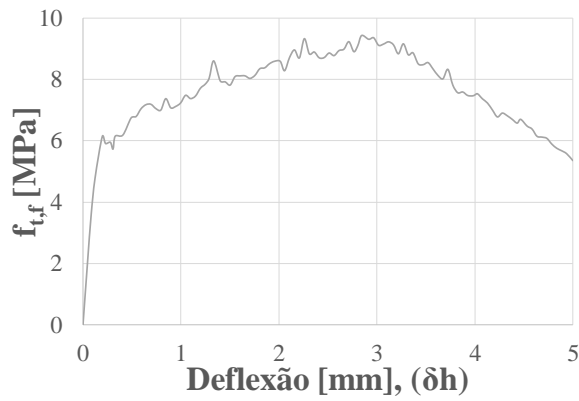
CP1



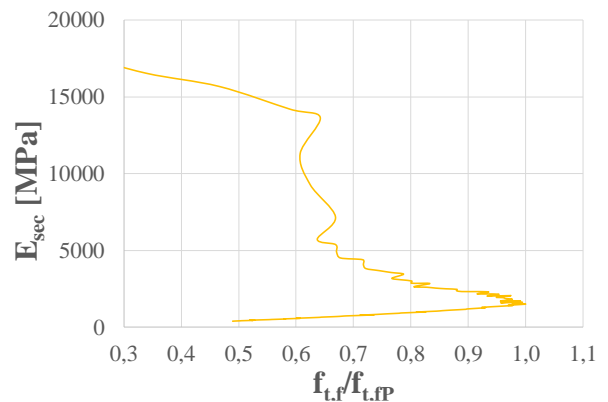
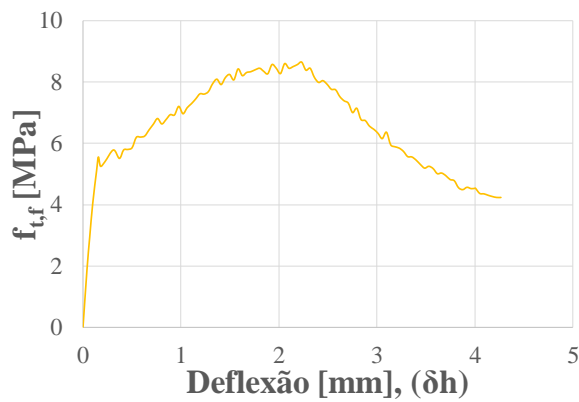
CP2



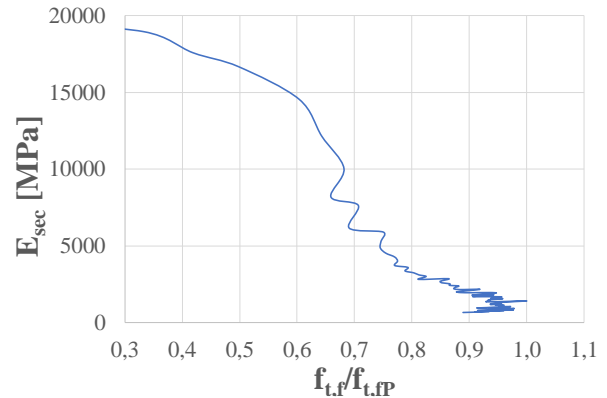
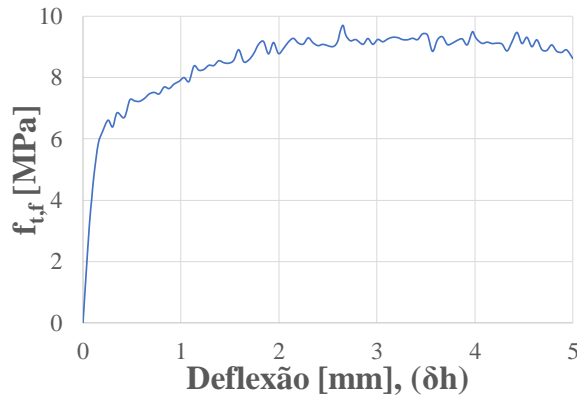
CP3



CP4

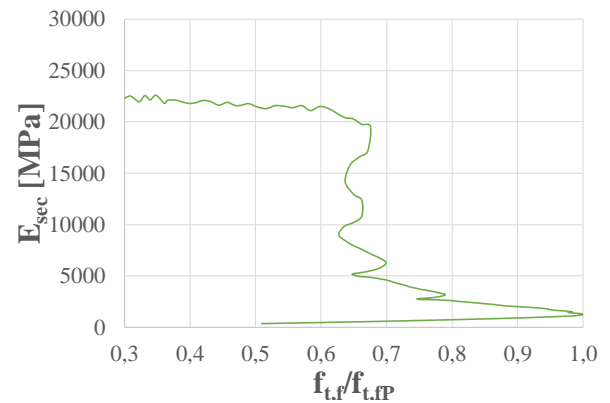
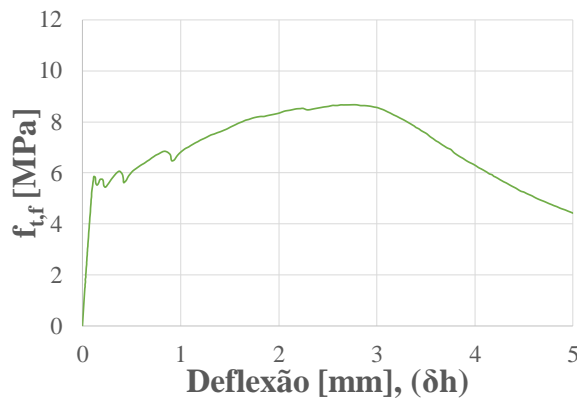


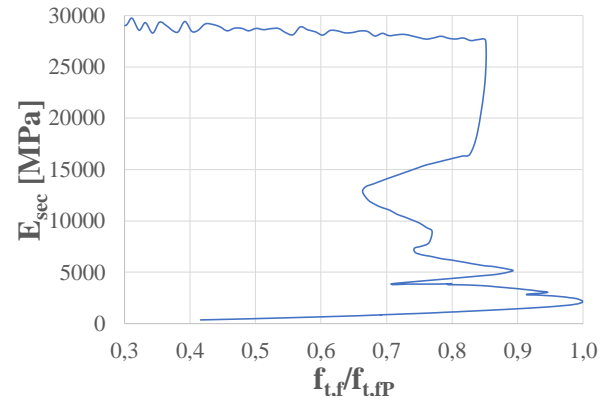
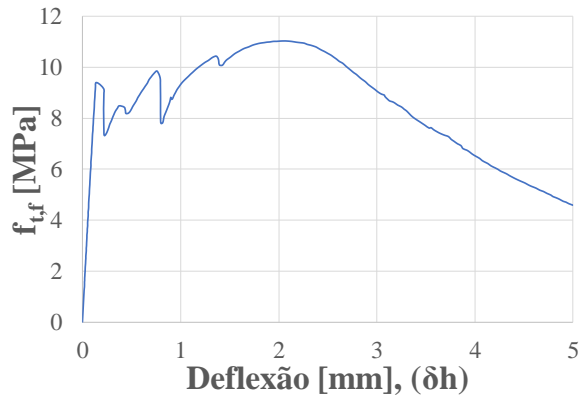
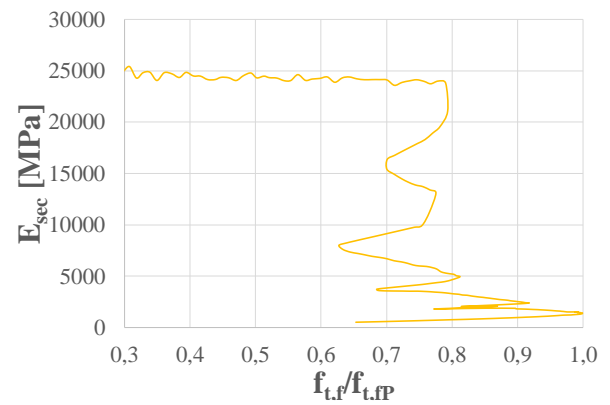
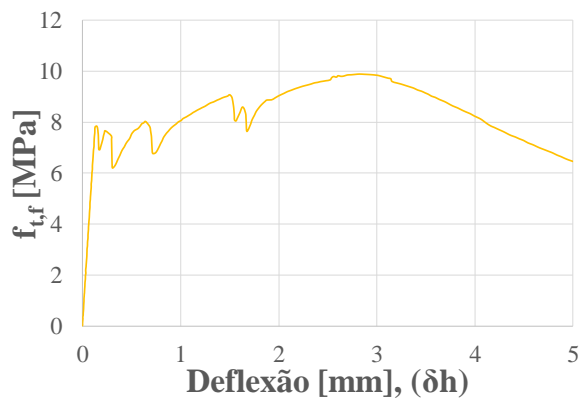
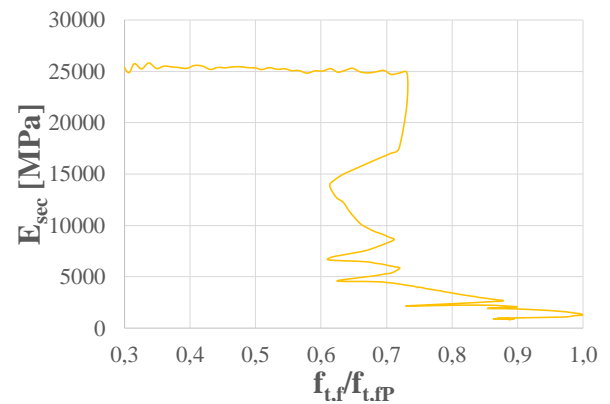
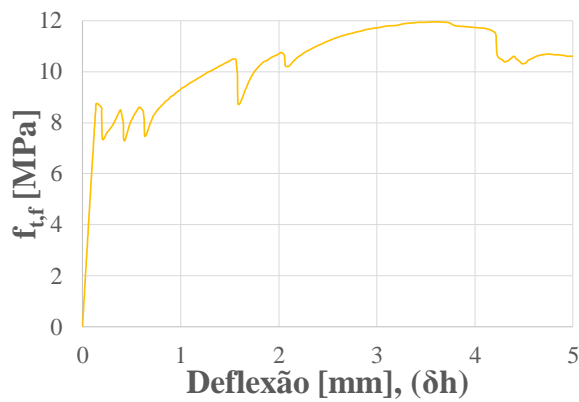
CP5

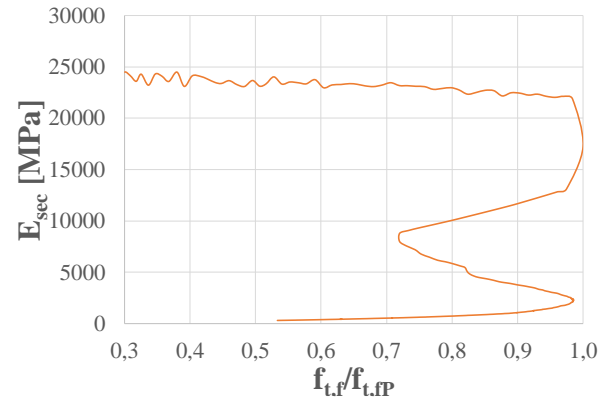
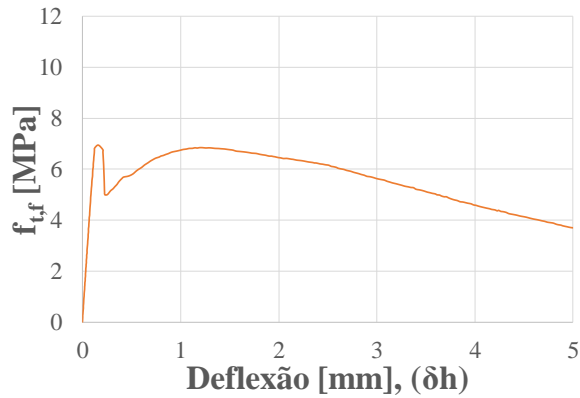
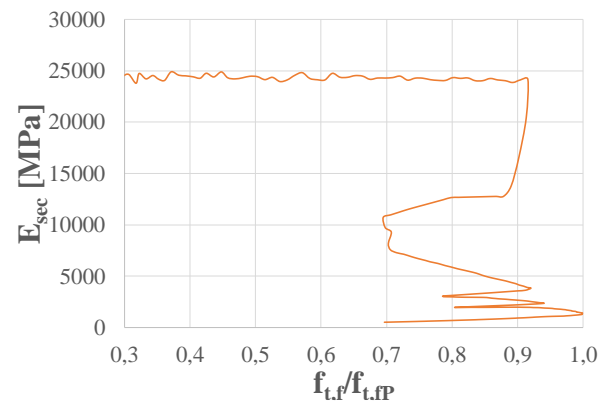
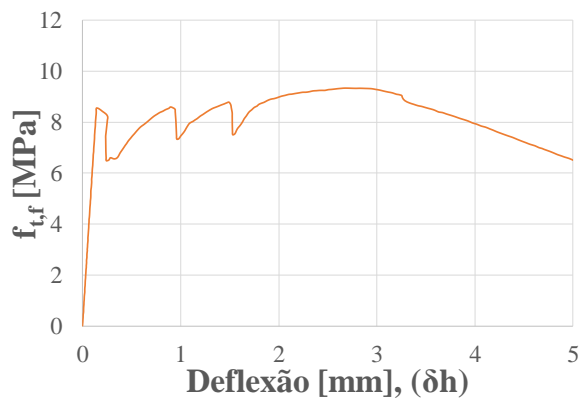
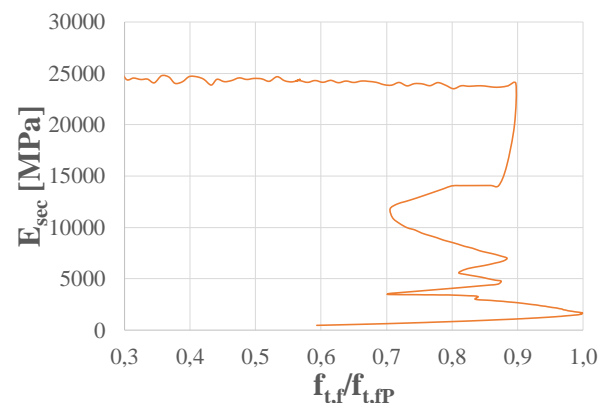
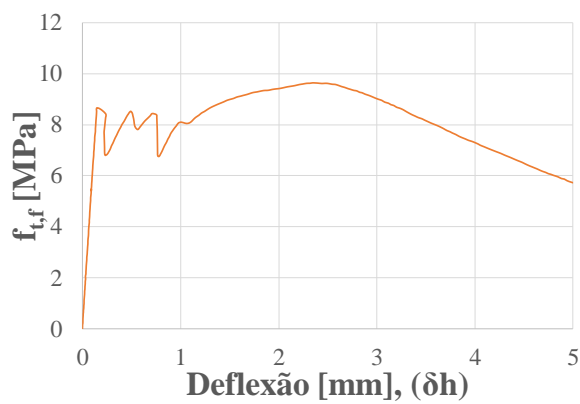


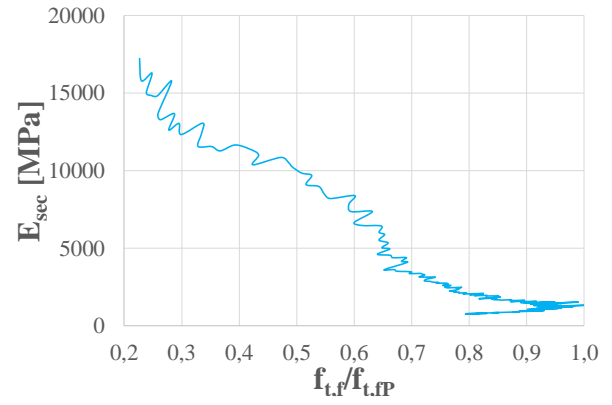
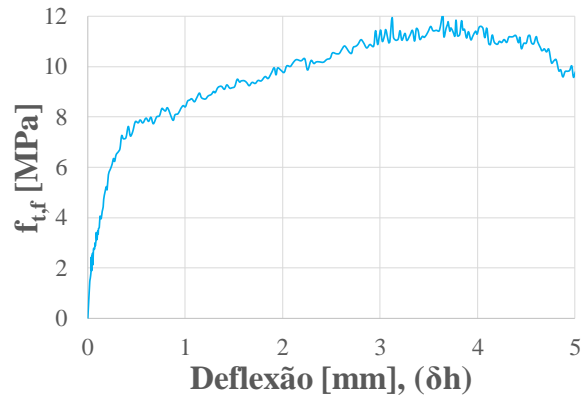
B.3. RESULTADOS ENSAIOS TRAÇÃO NA FLEXÃO - ADICIONAIS

Prensa:	LEME, Shimadzu modelo UFH 2000 kN
Velocidade de carga:	1,2 mm/min
Data dos ensaios:	27/12/2016
Idade dos CP's:	240 dias
Operador:	Camilo Muñoz
Dimensões médias CP [mm]	50 x 100 x 400

CP1 0 dias de imersão – traço: ECC_{Ref}

CP2 2 dias de imersão – traço: ECC_{Ref}CP3 7 dias de imersão – traço: ECC_{Ref}CP4 7 dias de imersão – traço: ECC_{Ref}

CP5 7 dias de imersão – traço: ECC_{CCA}CP6 7 dias de imersão – traço: ECC_{CCA}CP7 7 dias de imersão – traço: ECC_{CCA}

CP8 Viga 302 – traço: ECC_{Ref}

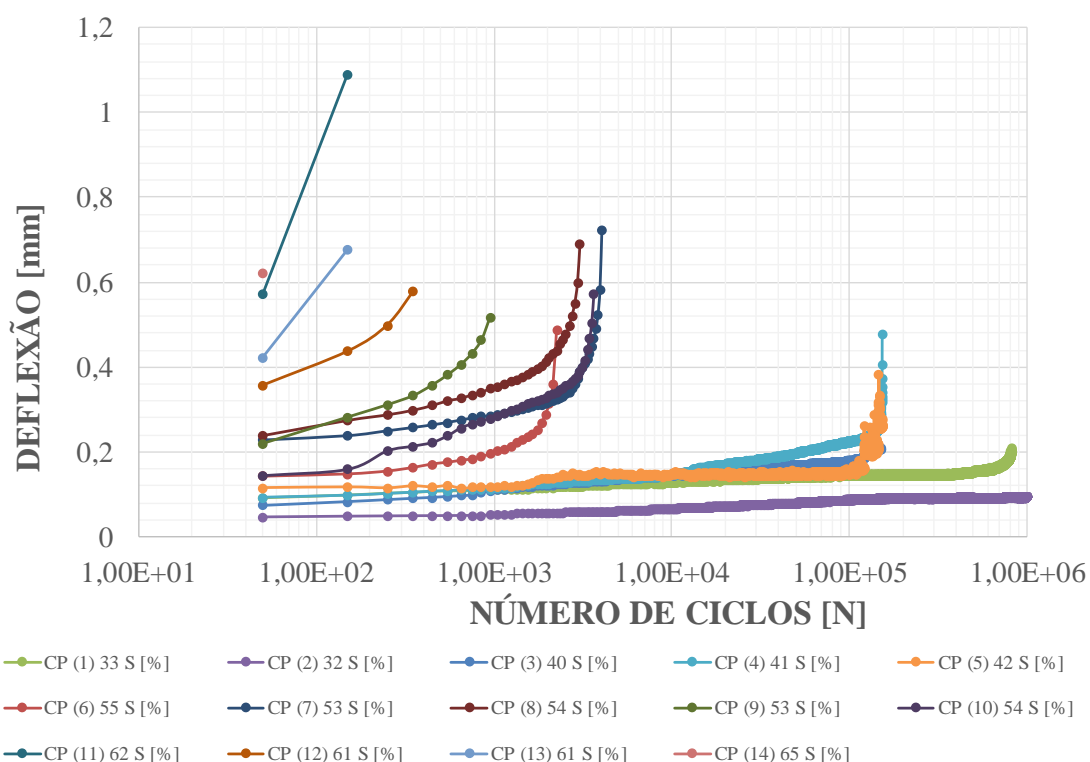
APÊNDICE C – ENSAIOS DE FADIGA

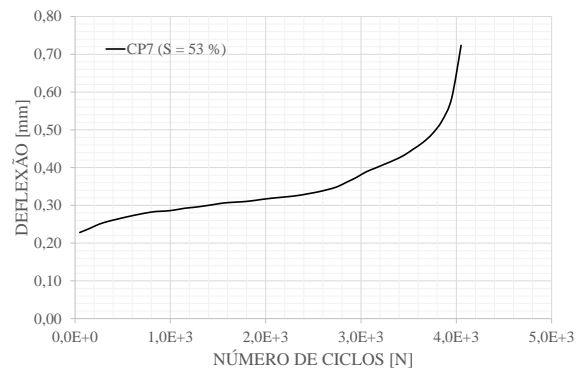
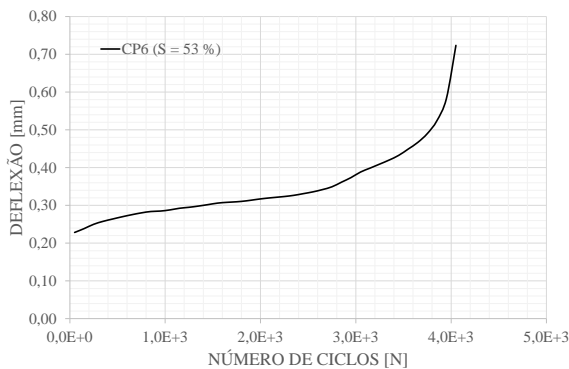
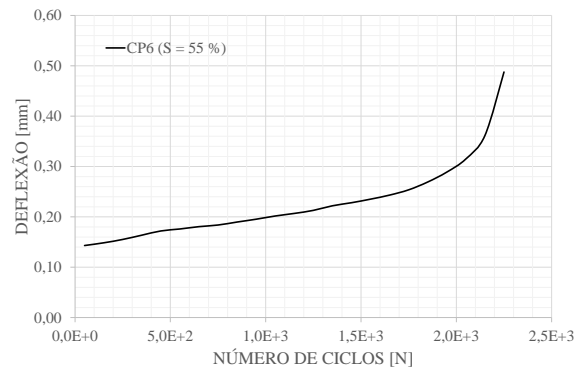
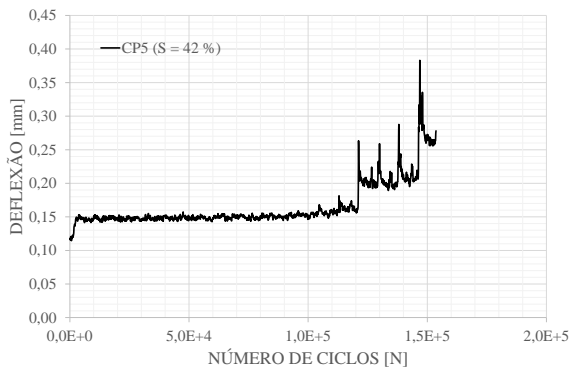
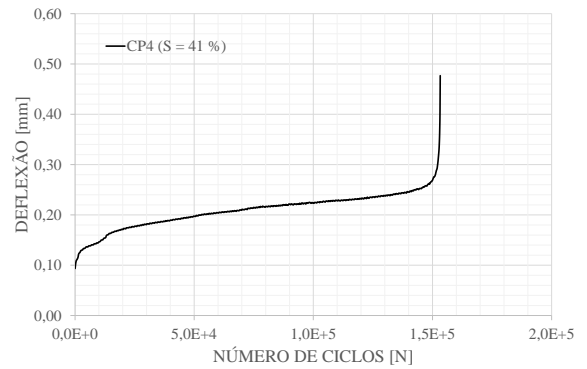
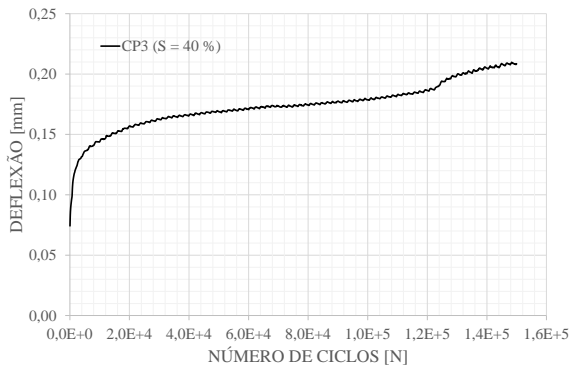
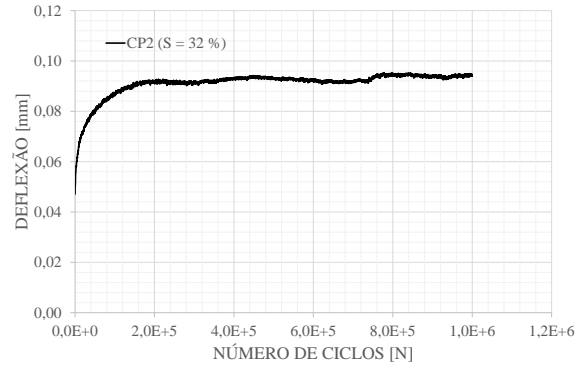
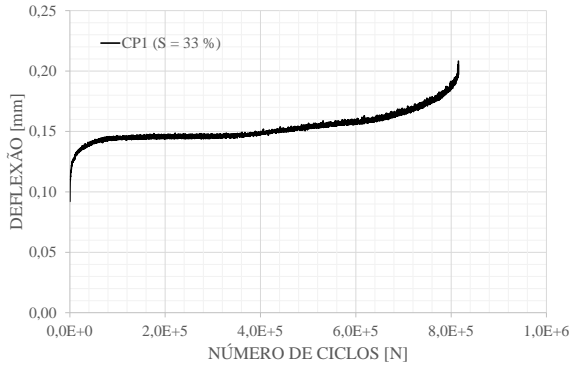
C.1. ENSAIOS DE FADIGA – GENERALIDADES

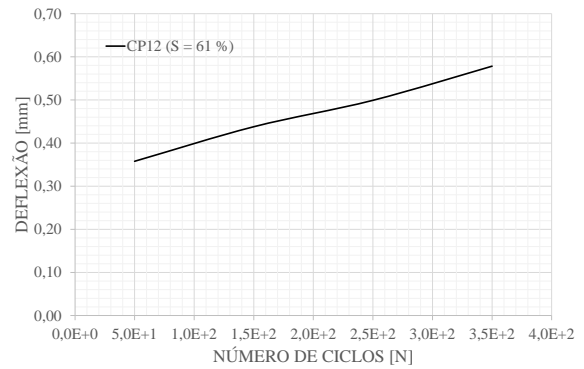
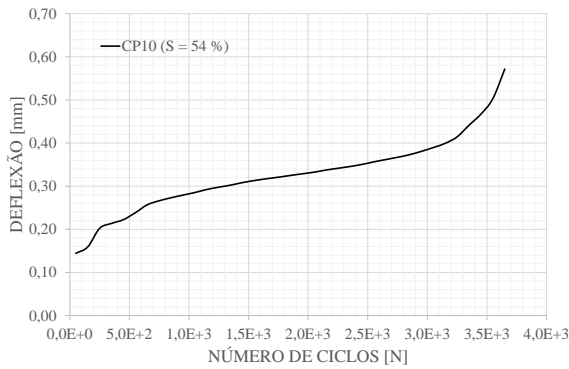
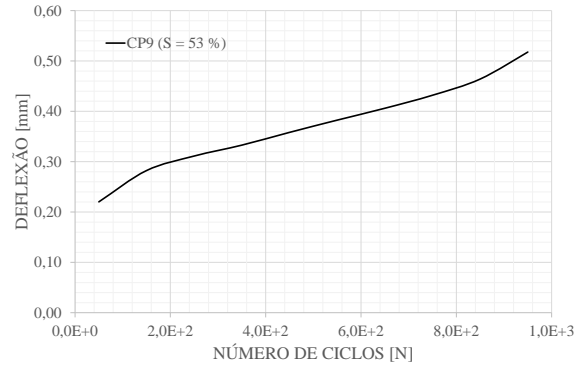
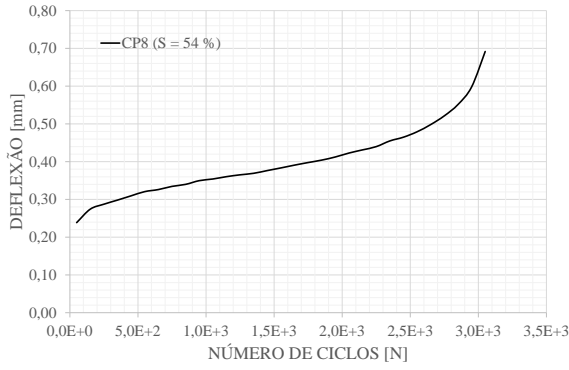
Prensa:	LAPAV, modificado do sistema pneumático para ensaios de fadiga/módulo resiliente de corpos de prova cilíndricos.
Frequência:	4 Hz
Tempo de cura:	ECC _{Ref} 28 dias, imersão; ECC _{CCA} 60 dias, imersão
Idade média dos CP's	220 dias
Operador:	Camilo Muñoz
Dimensões médias dos CP's [mm]	50 x 100 x 400
Critério terminação do ensaio:	Rompimento da viga ou 1 milhão de ciclos
Porcentagens de $f_{t,FP}$ objetivo (S) [%]:	30, 40, 50 e 60

C.2. CURVAS DE DEGRADAÇÃO – DEFLEXÃO

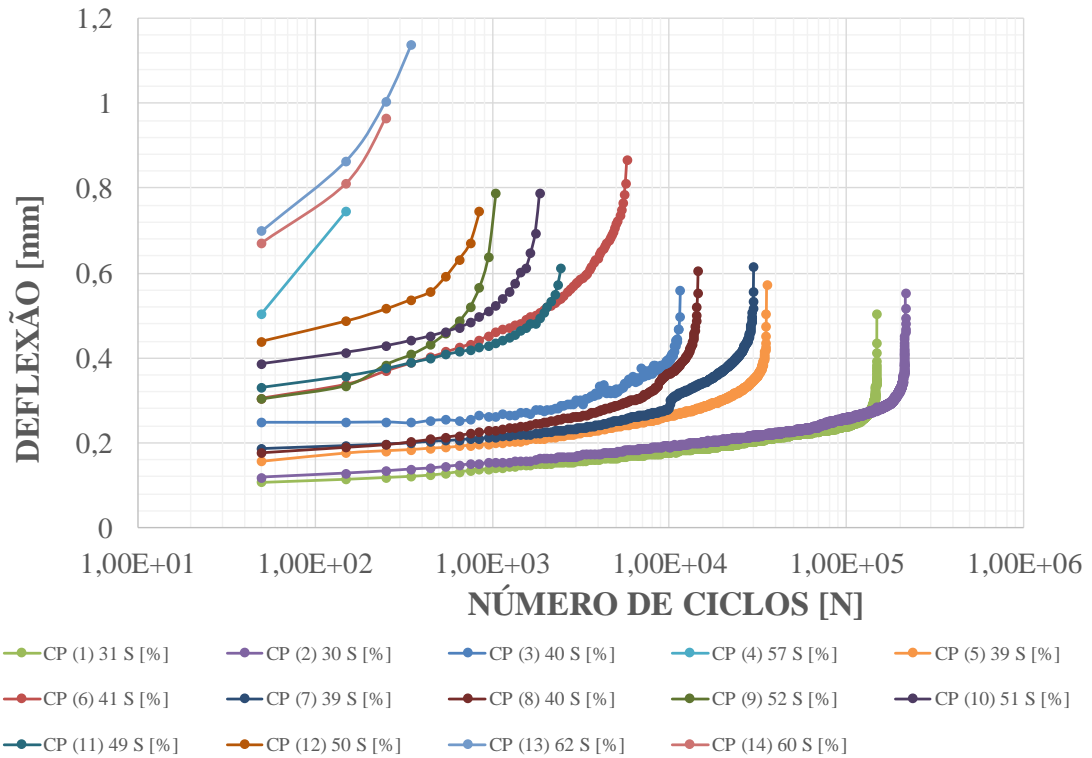
Traço: ECC_{Ref}

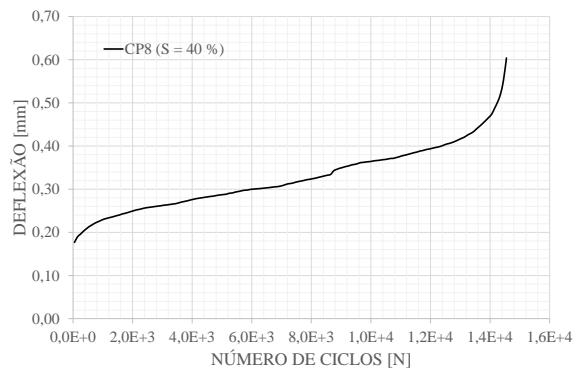
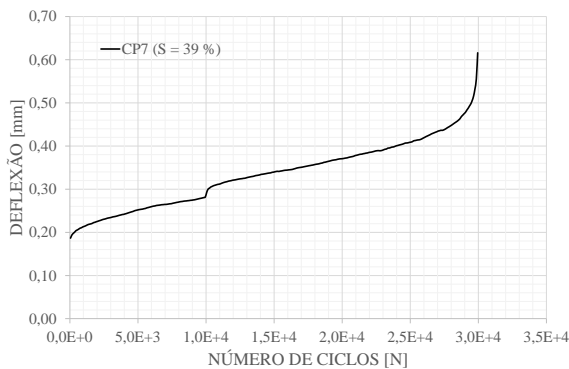
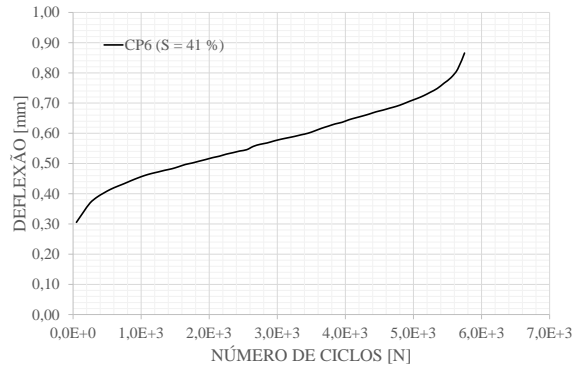
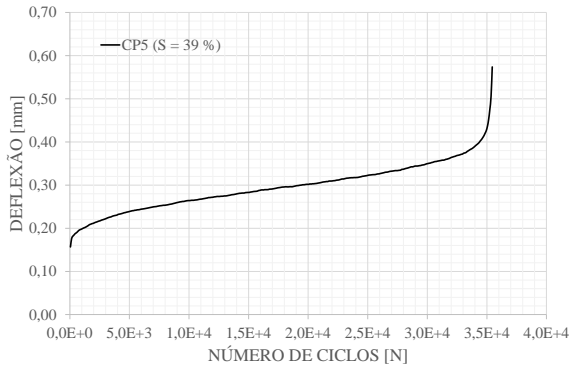
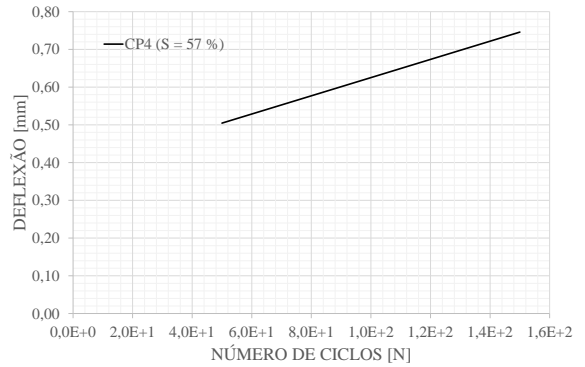
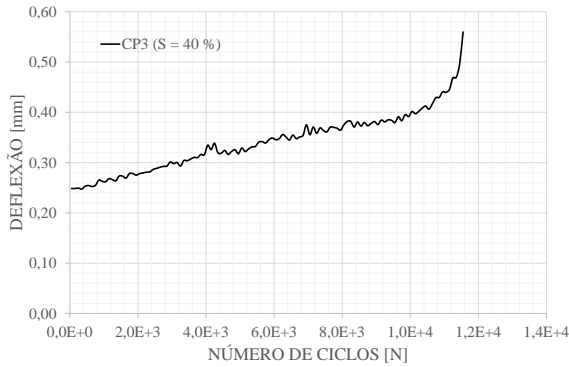
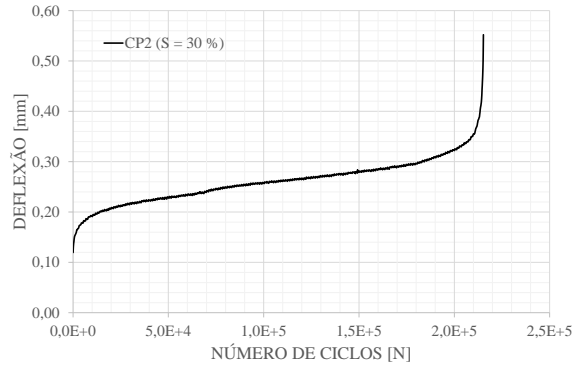
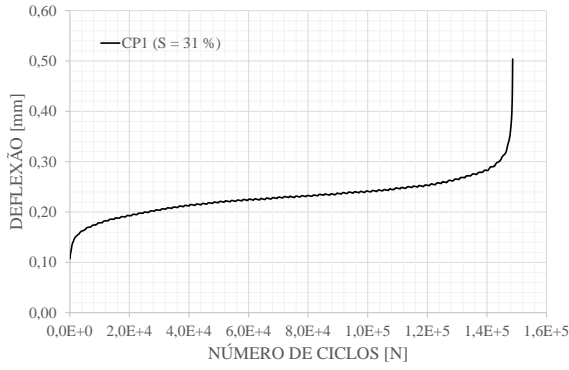


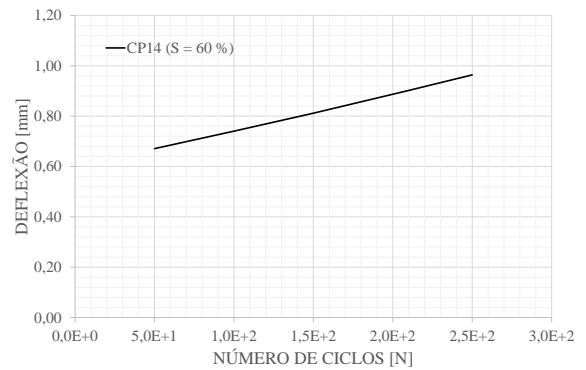
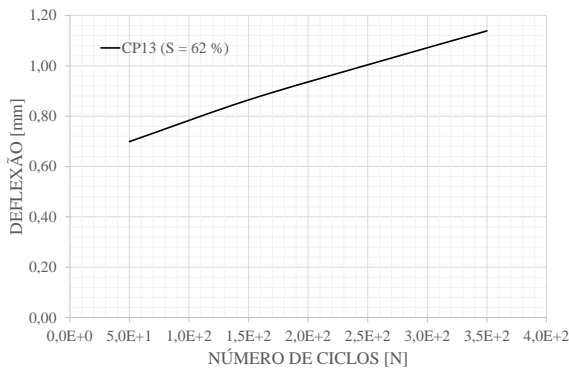
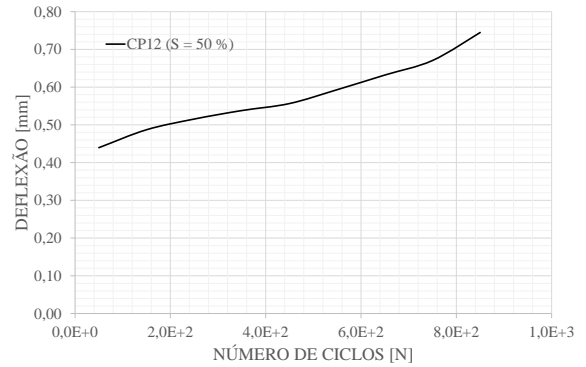
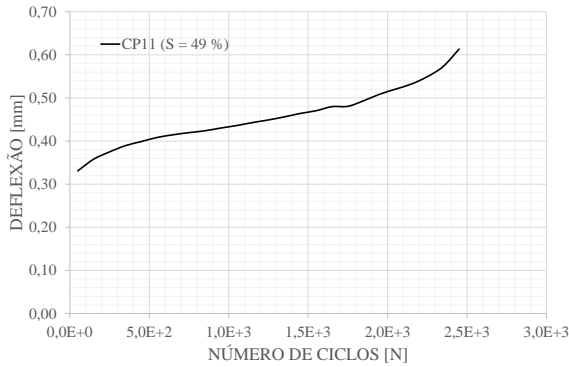
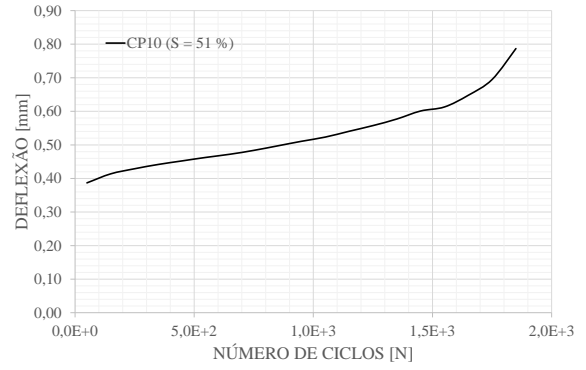
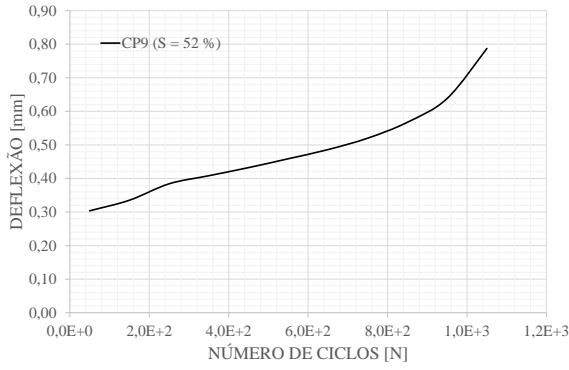




Traço: ECC_{CCA}

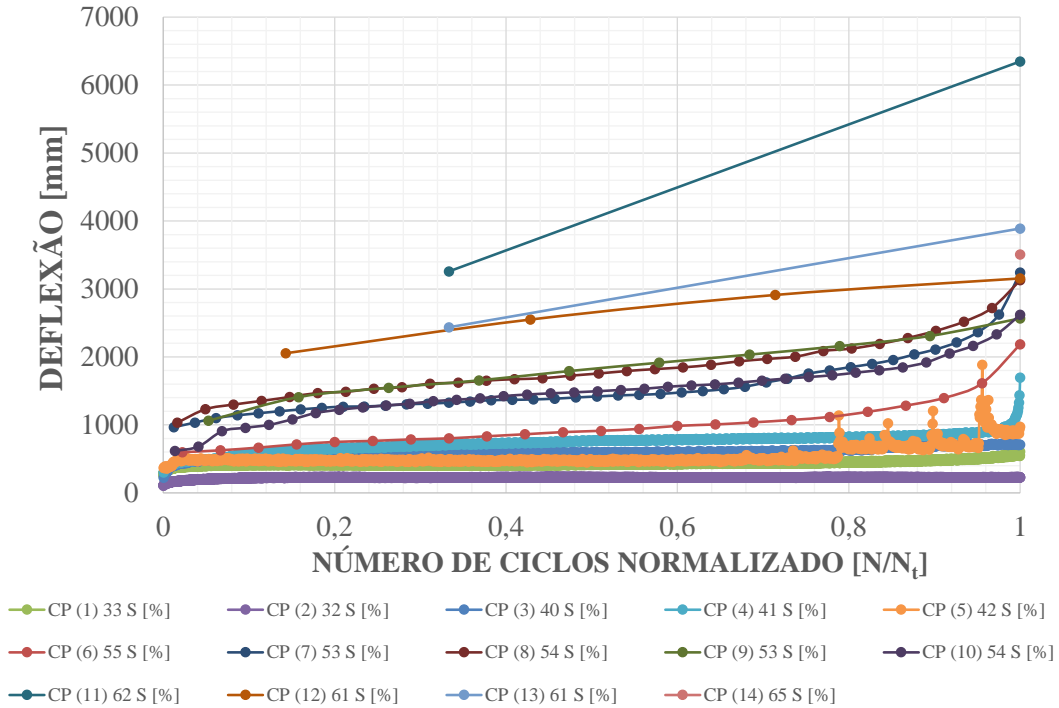




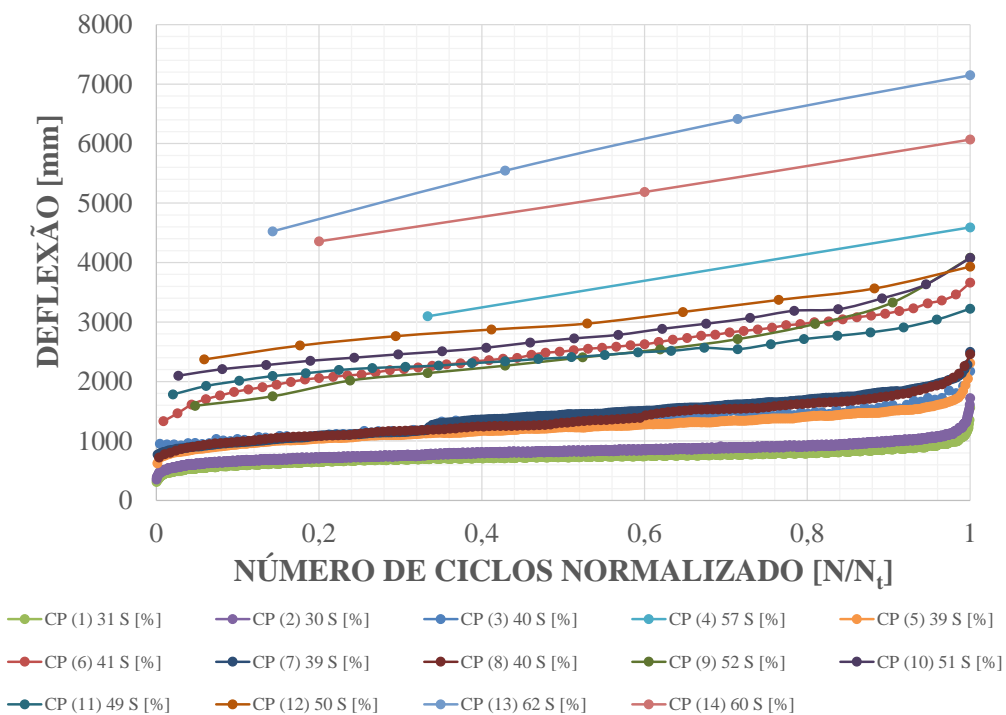


C.3. CURVAS DE DEGRADAÇÃO – DEFLEXÃO (NÚMERO DE CICLOS NORMALIZADO – N/N_t)

Traço: ECC_{Ref}

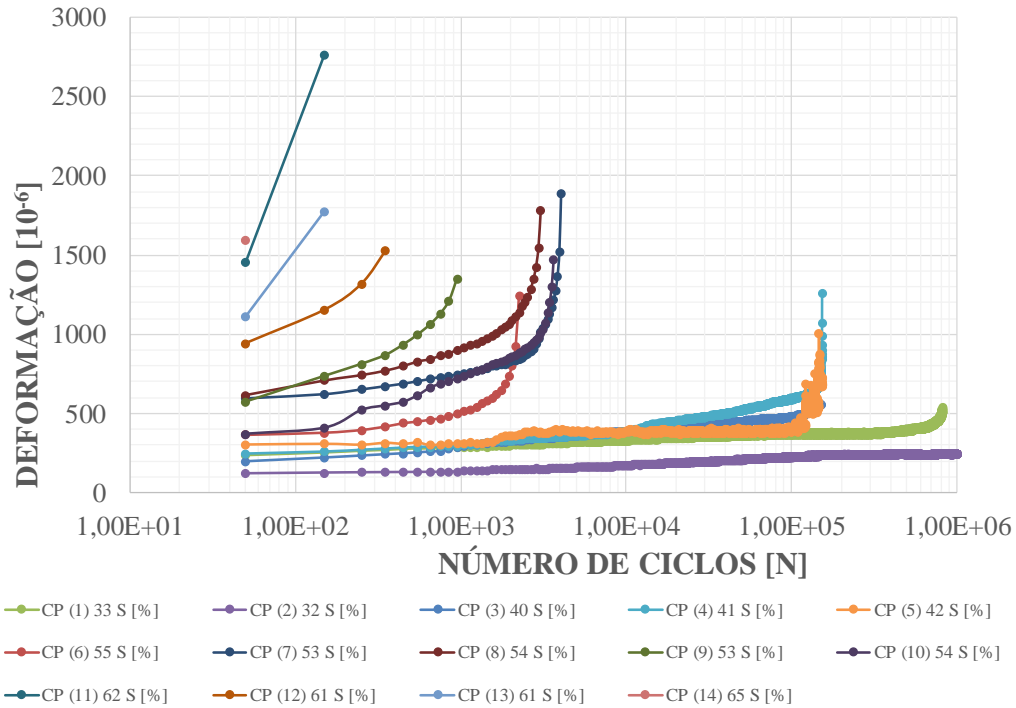


Traço: ECC_{CCA}

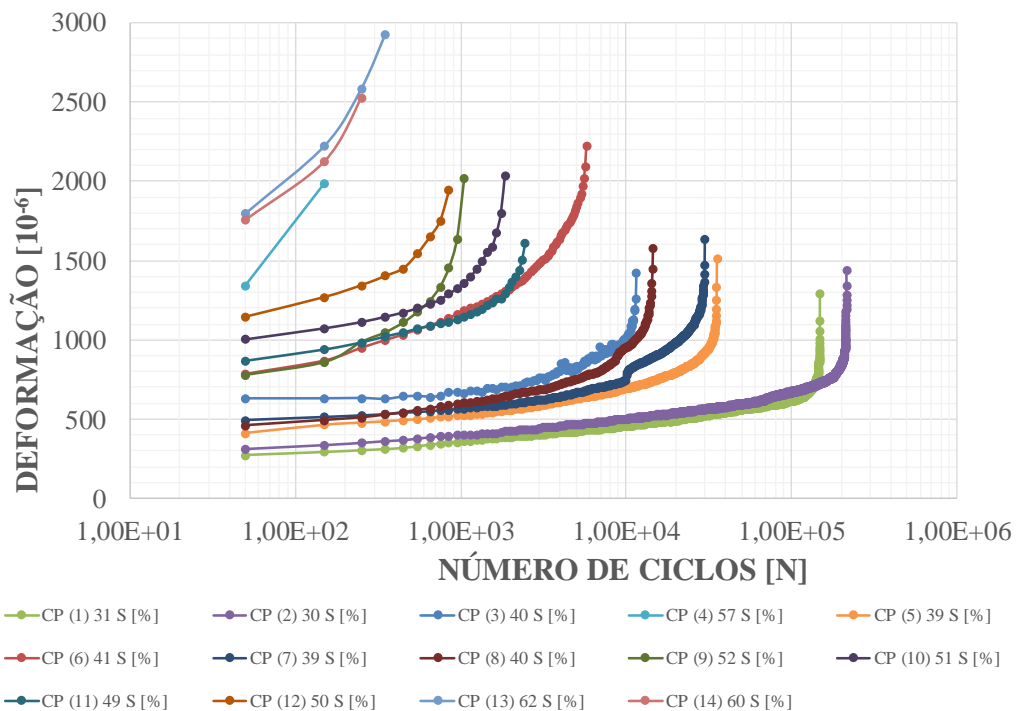


C.4. CURVAS DE DEGRADAÇÃO – DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DE EXTENSÃO

Traço: ECC_{Ref}

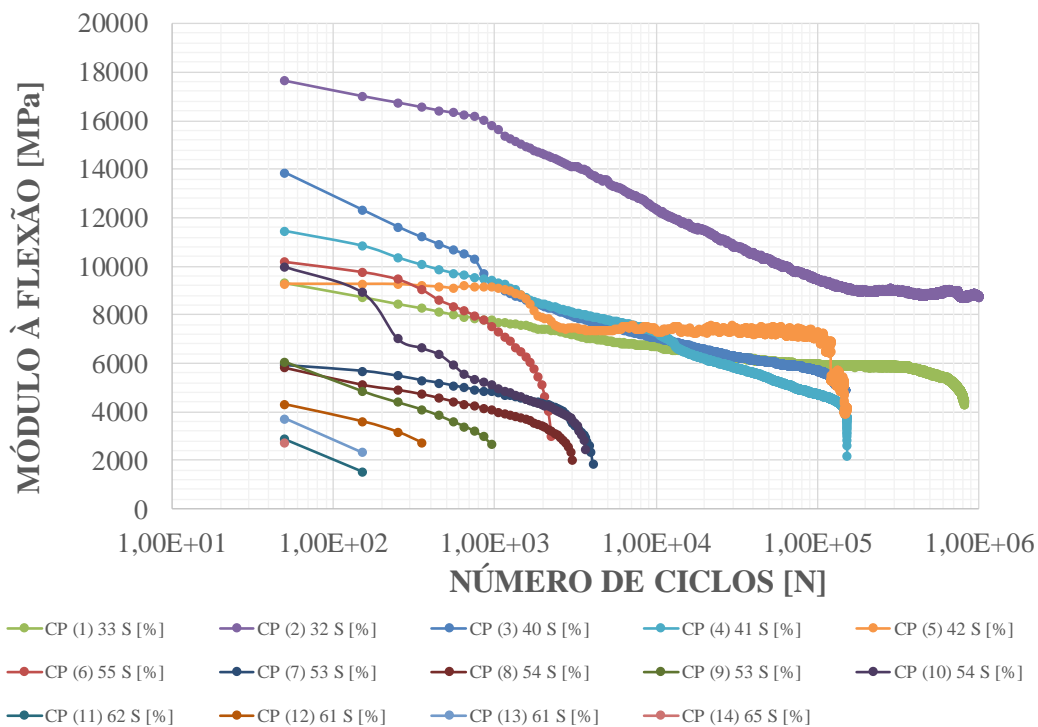


Traço: ECC_{CCA}

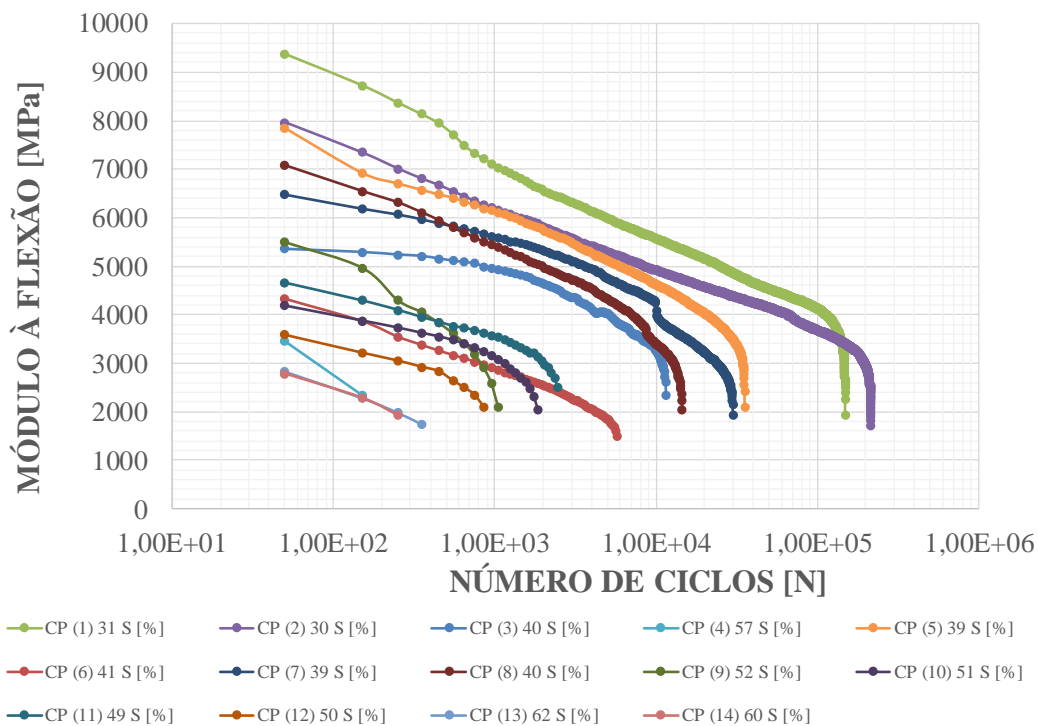


C.5. CURVAS DE DEGRADAÇÃO – REDUÇÃO DO MÓDULO À FLEXÃO

Traço: ECC_{Ref}

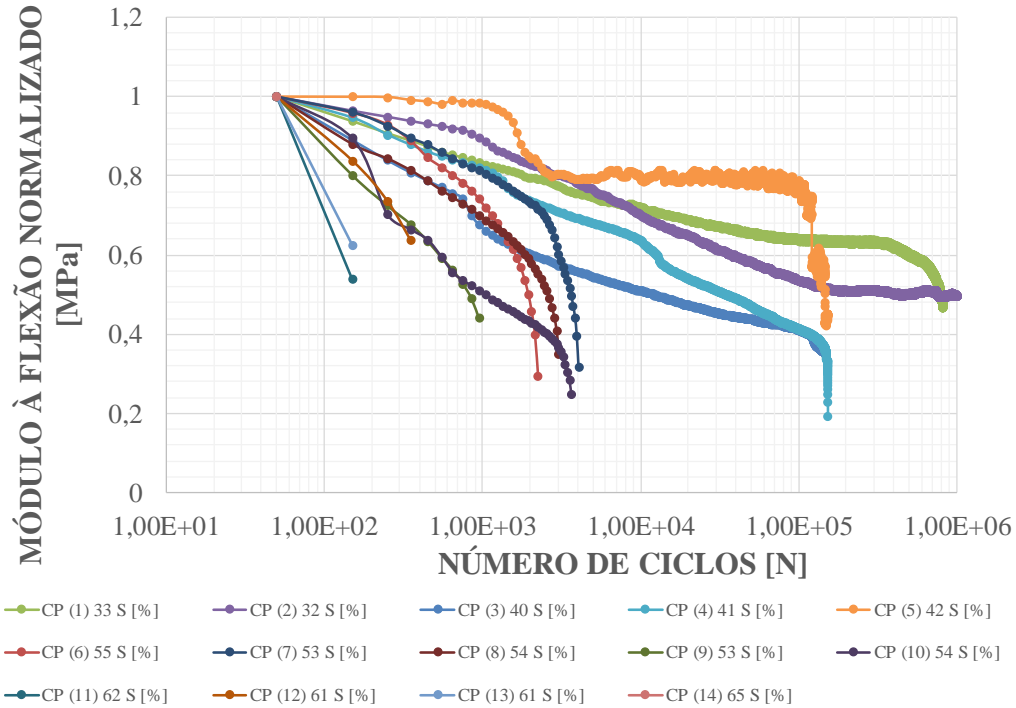


Traço: ECC_{CCA}

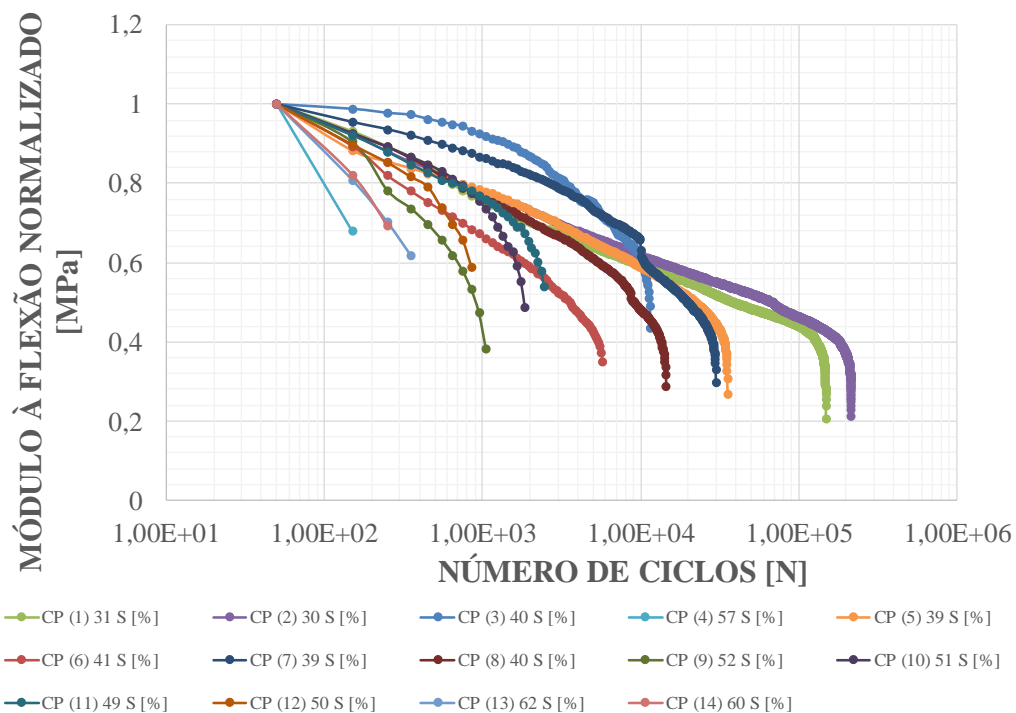


C.5. CURVAS DE DEGRADAÇÃO – REDUÇÃO DO MÓDULO À FLEXÃO (NORMALIZADO)

Traço: ECC_{Ref}

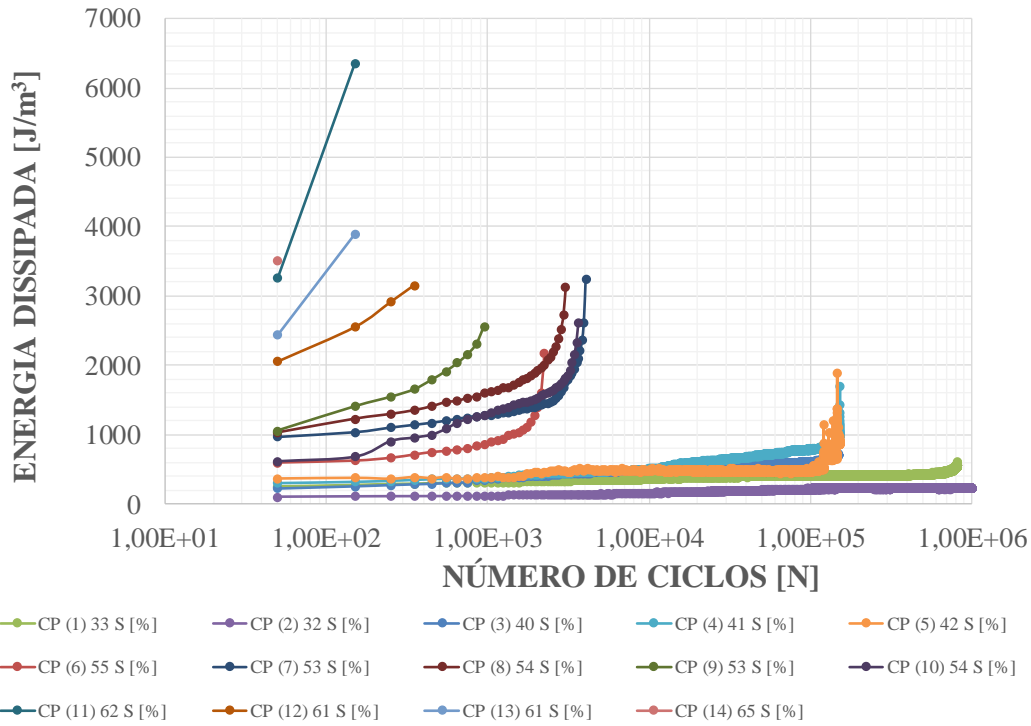


Traço: ECC_{CCA}

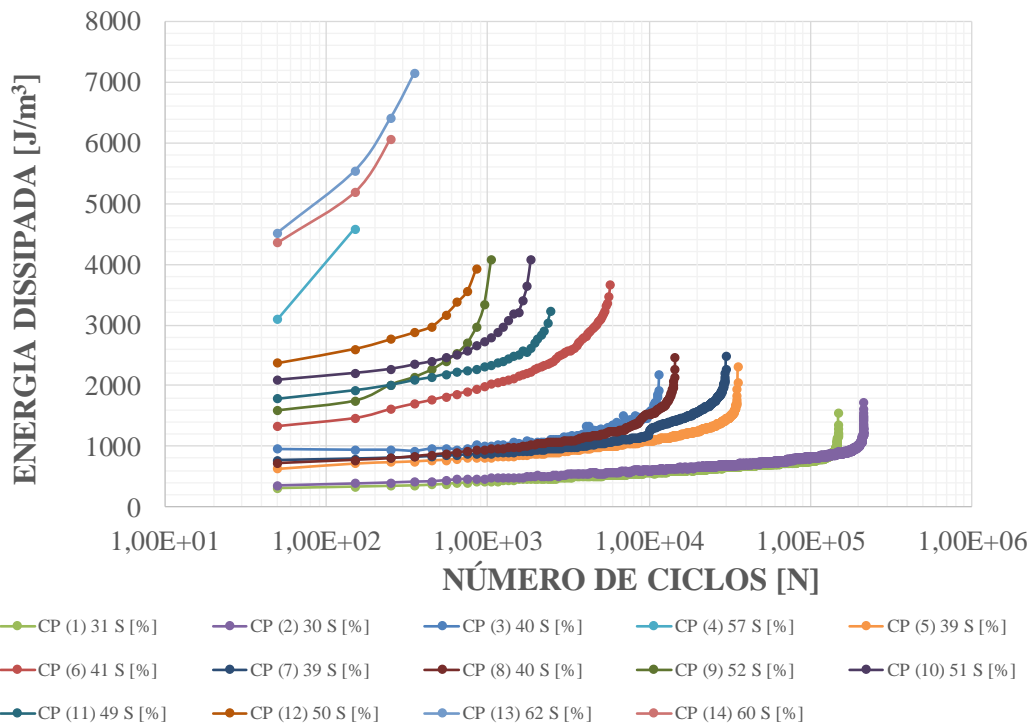


C.6. CURVAS DE DEGRADAÇÃO – ENERGIA DISSIPADA (DE)

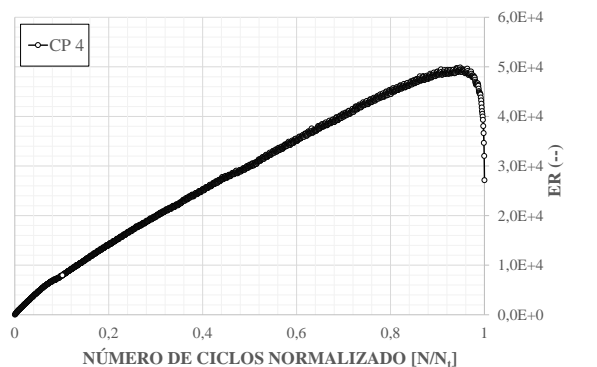
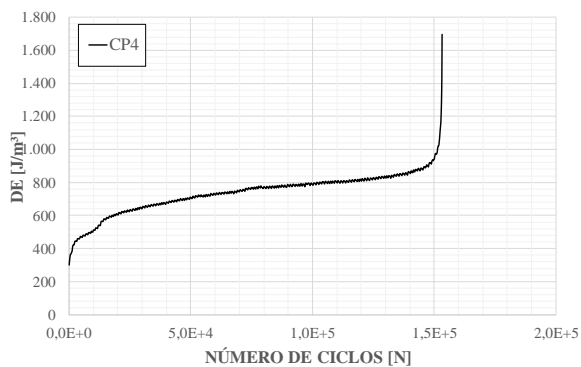
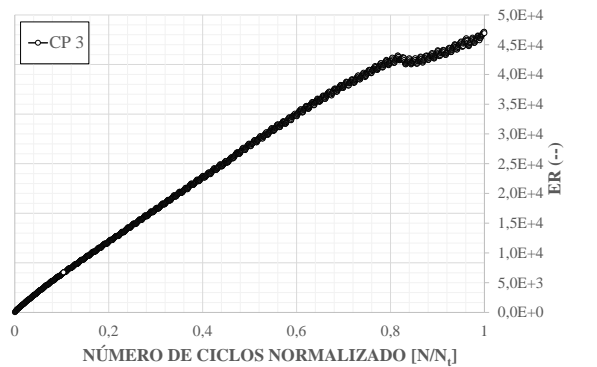
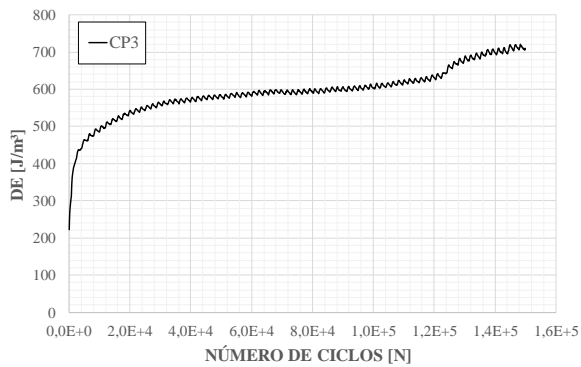
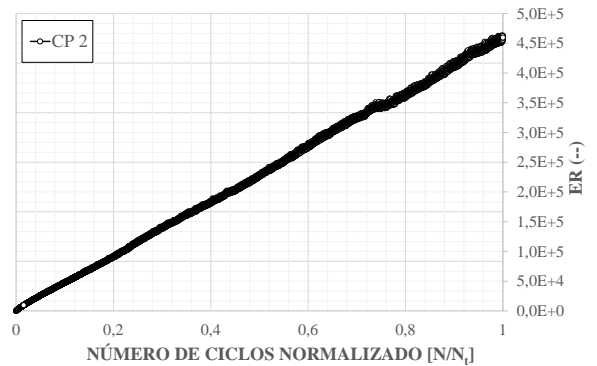
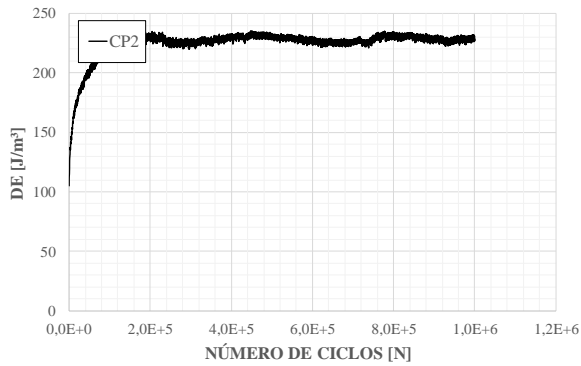
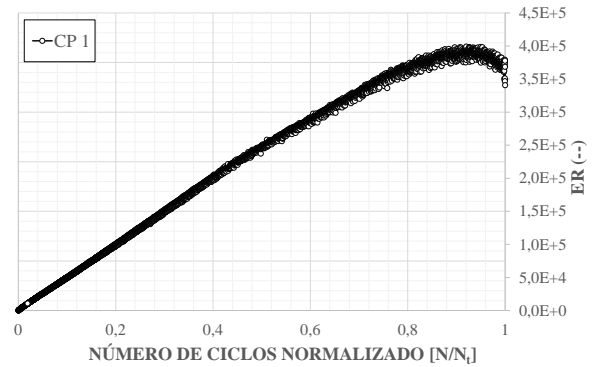
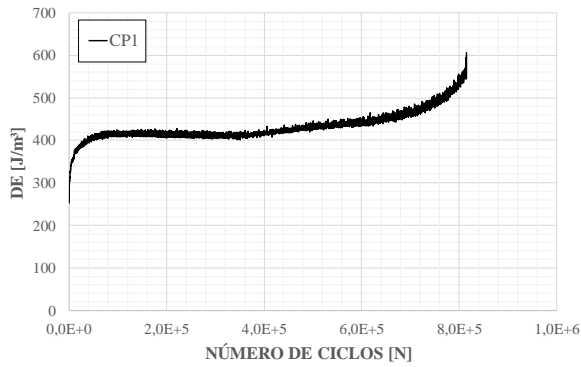
Traço: ECC_{Ref}

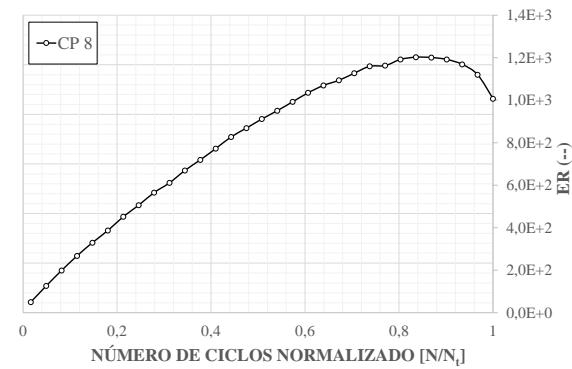
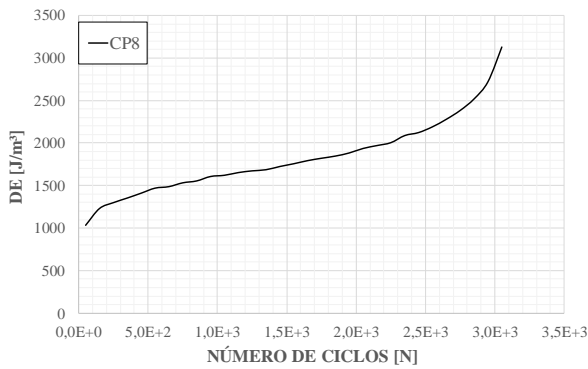
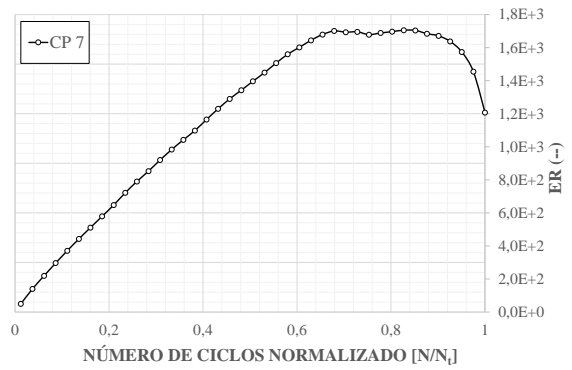
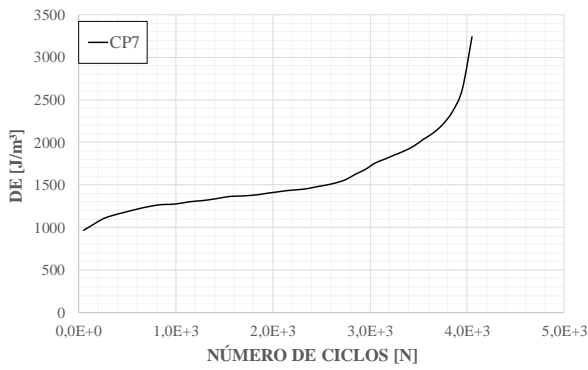
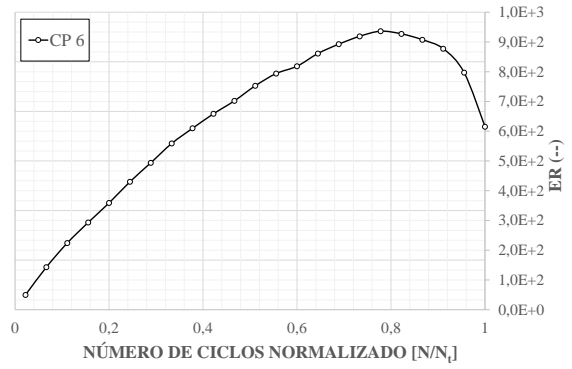
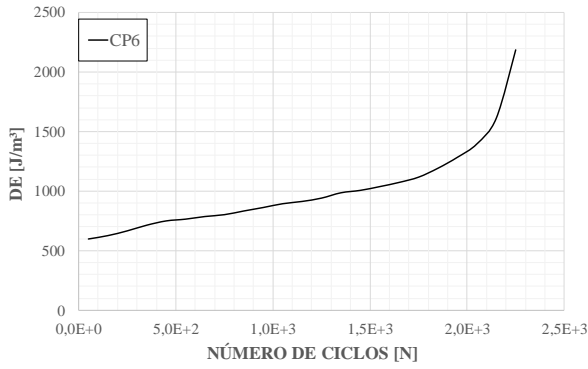
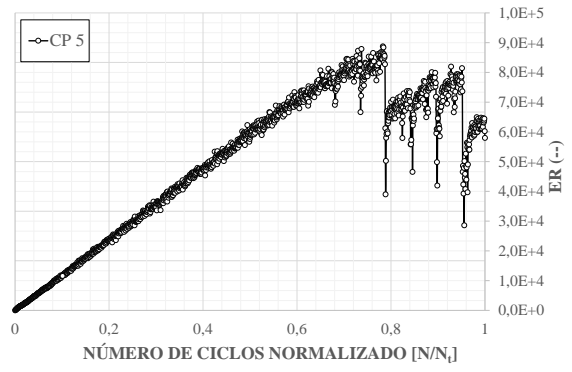
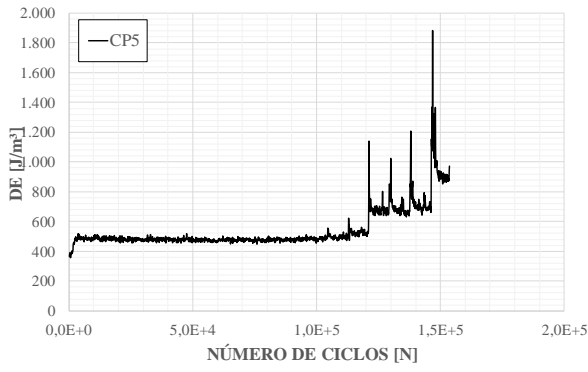


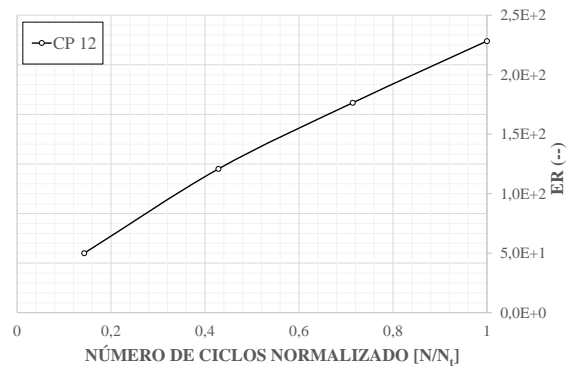
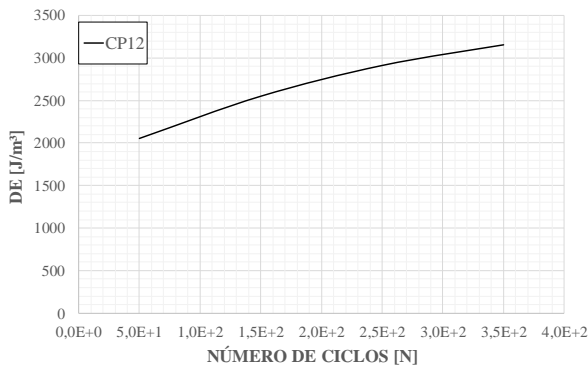
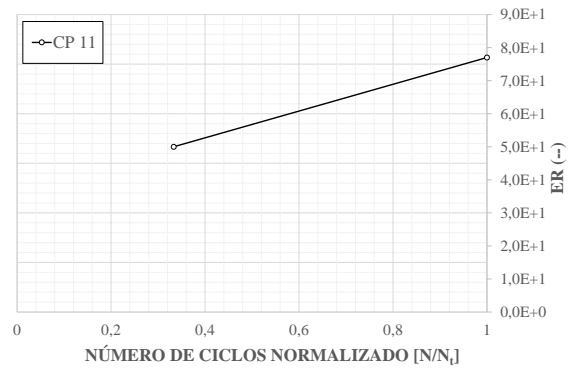
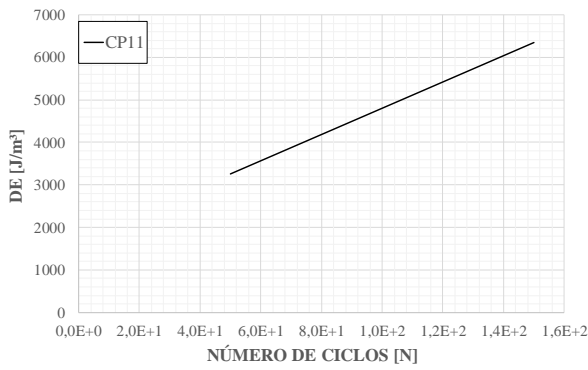
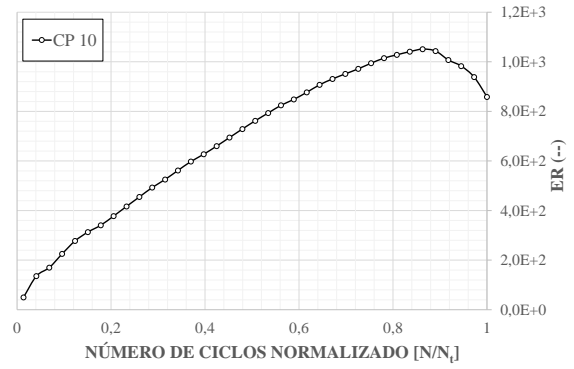
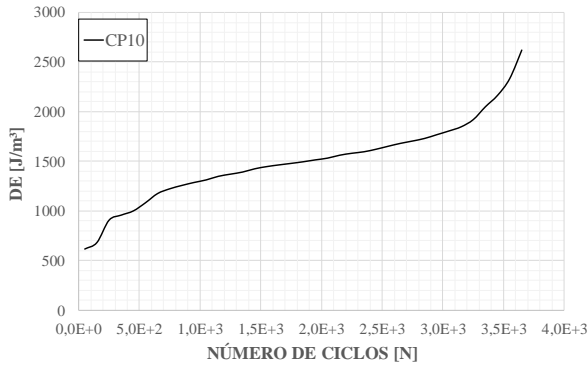
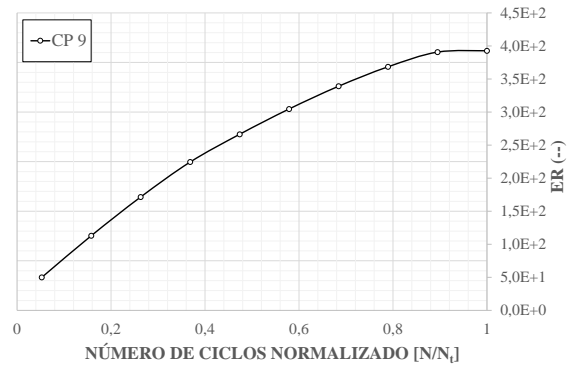
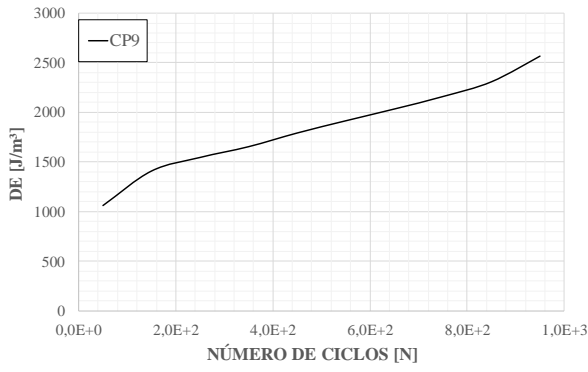
Traço: ECC_{CCA}

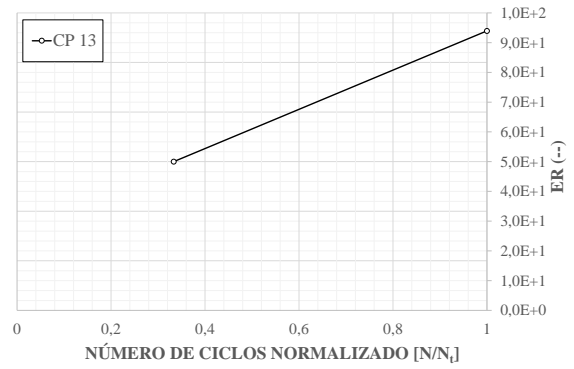
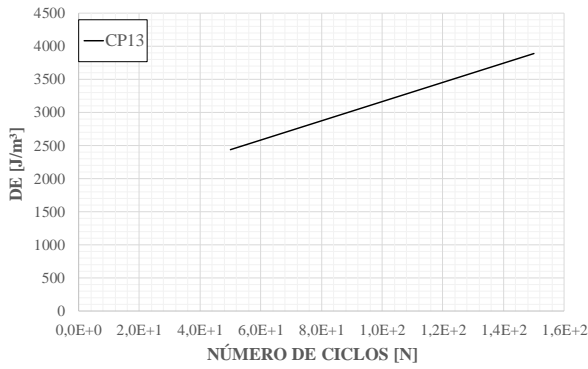


Traço: ECC_{Ref}

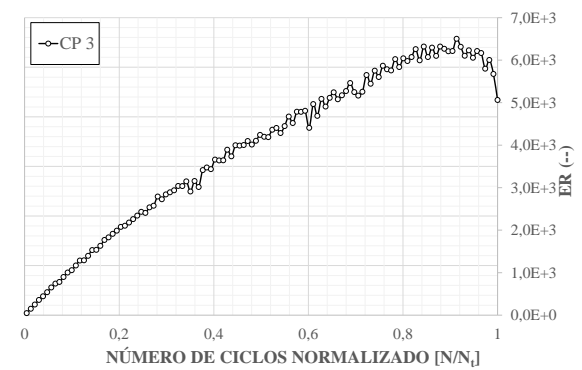
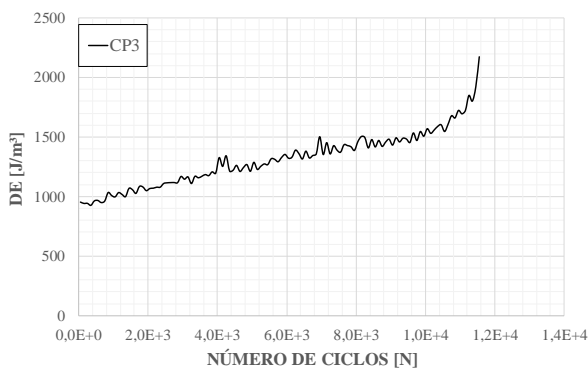
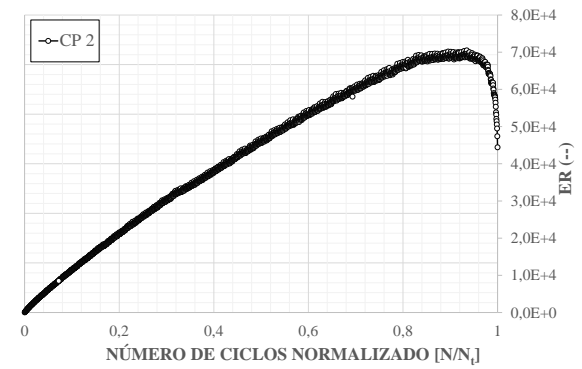
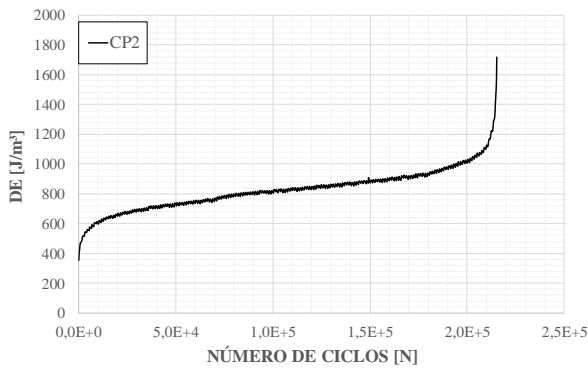
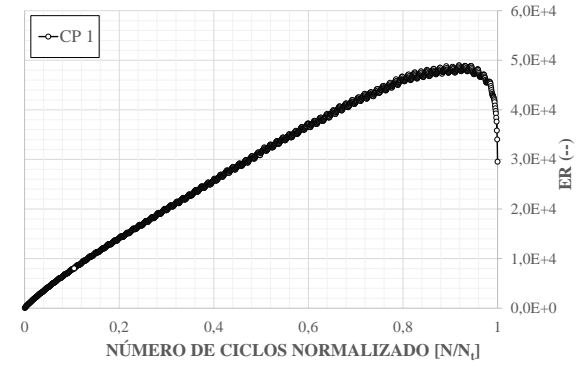
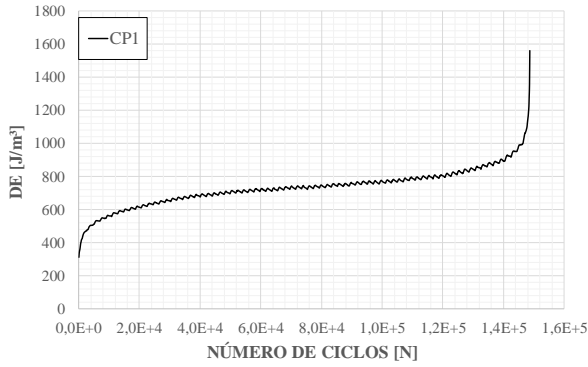


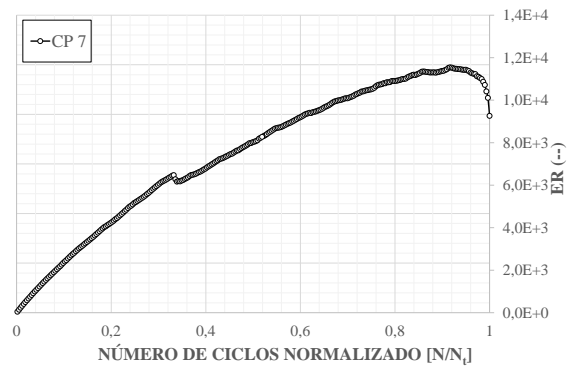
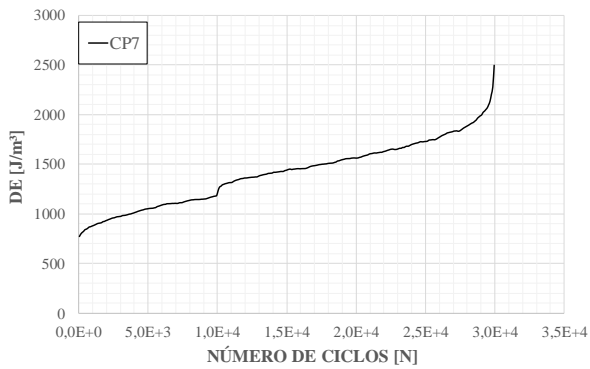
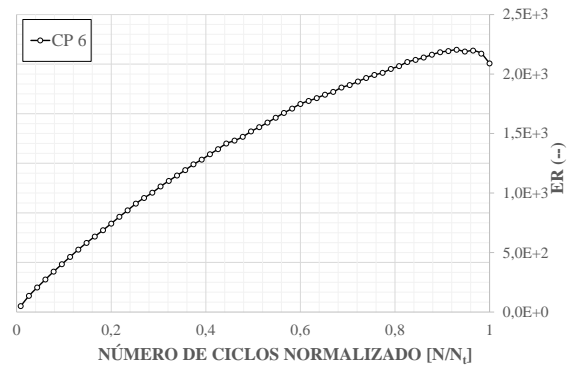
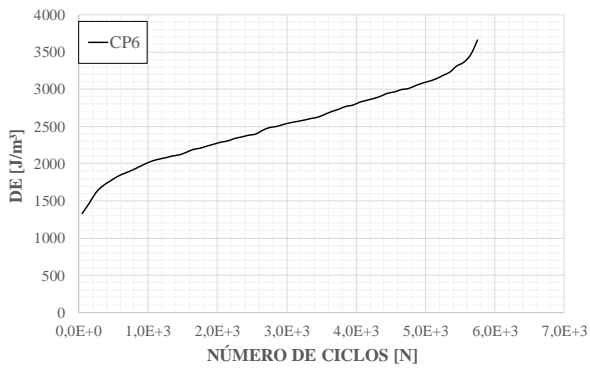
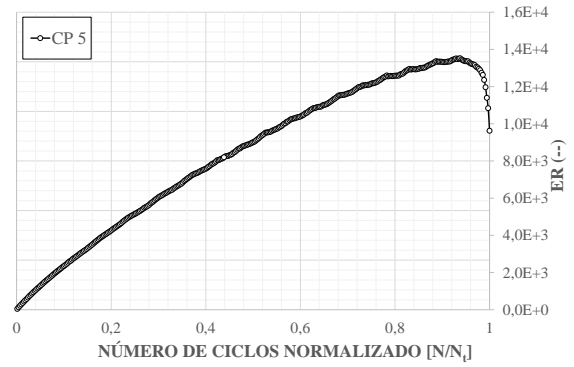
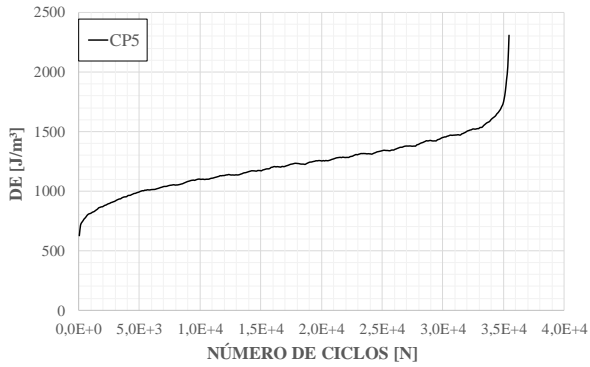
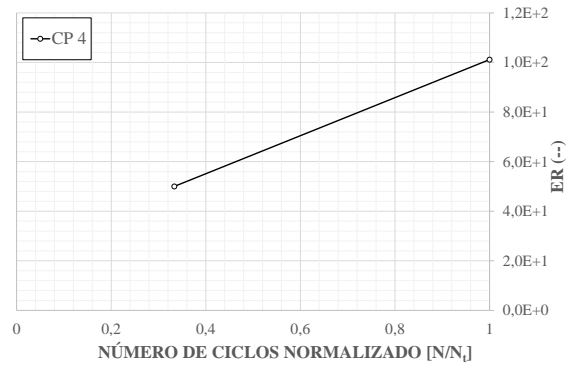
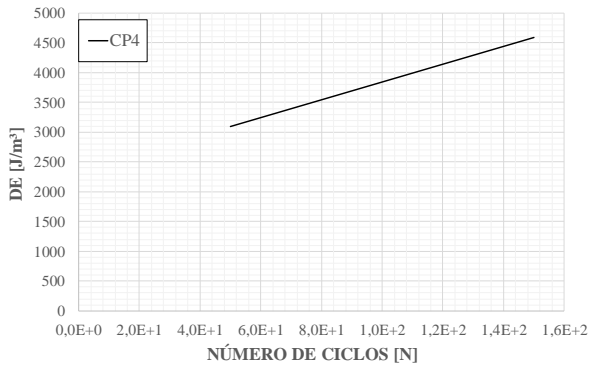


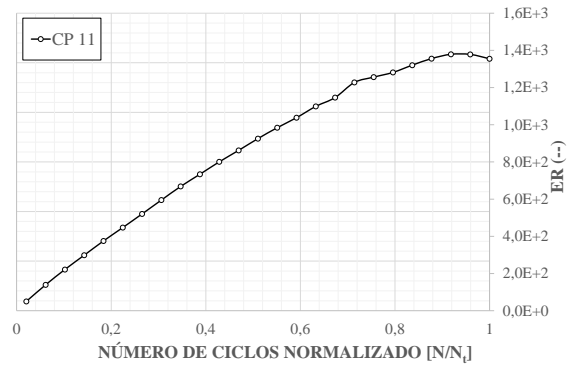
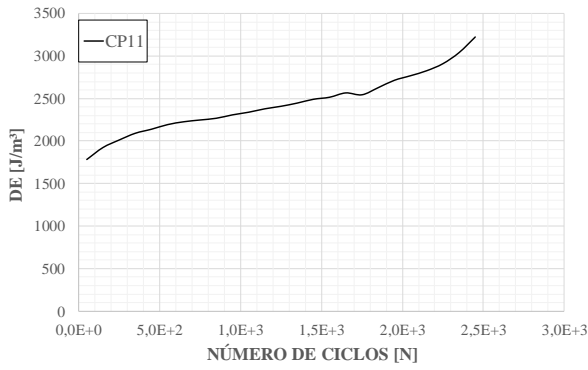
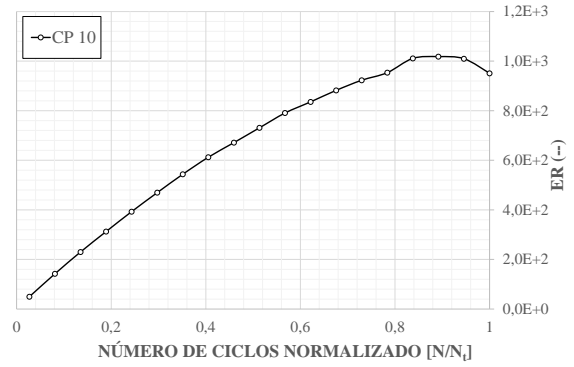
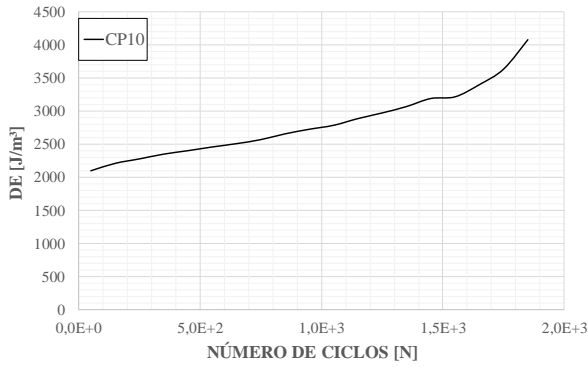
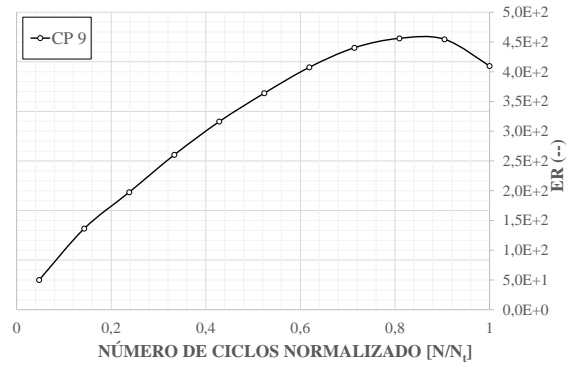
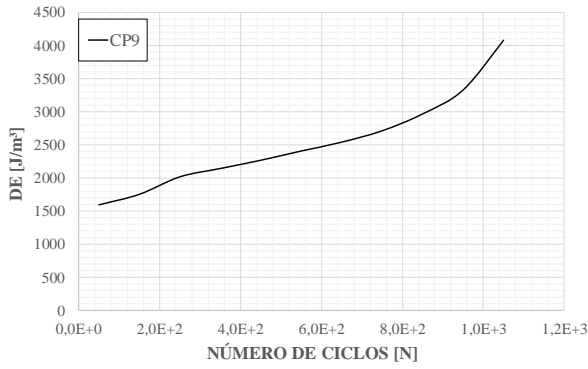
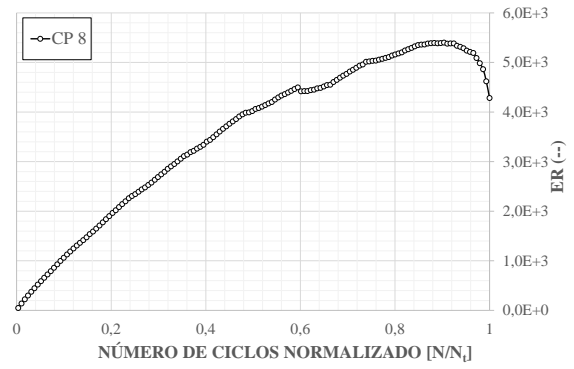
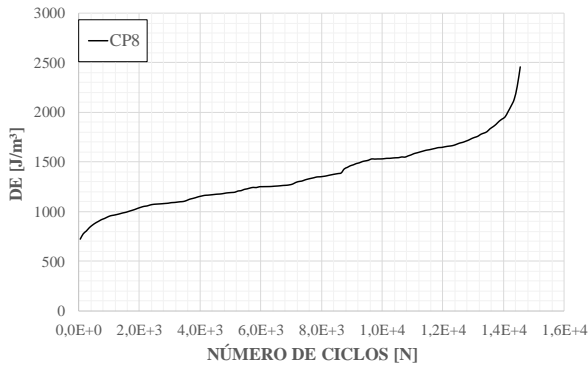


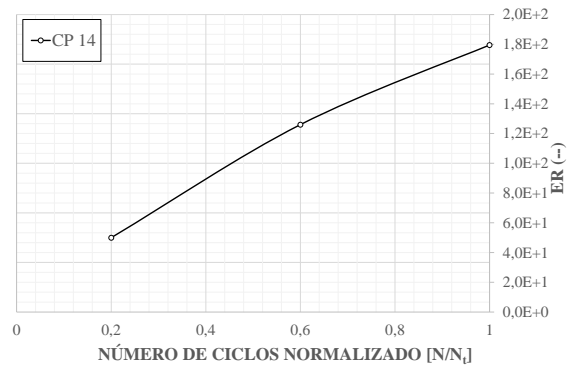
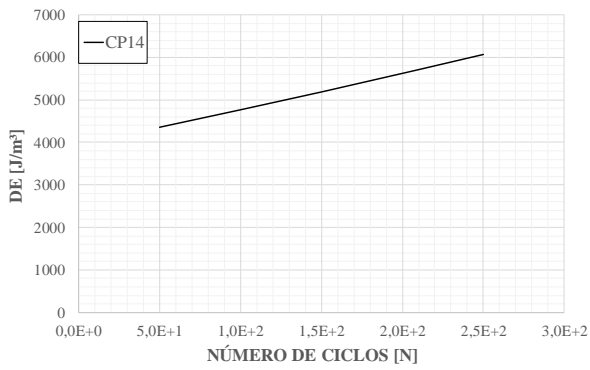
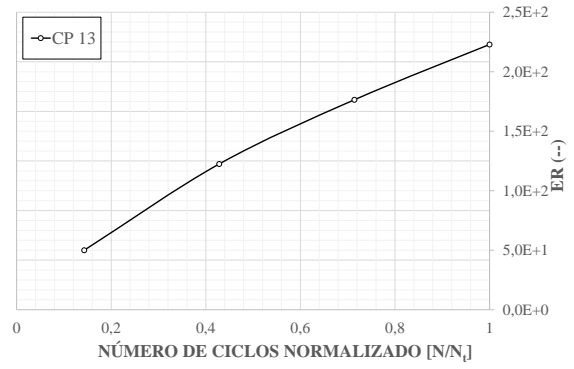
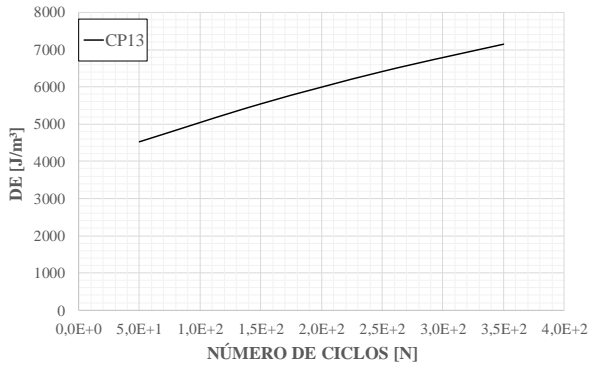
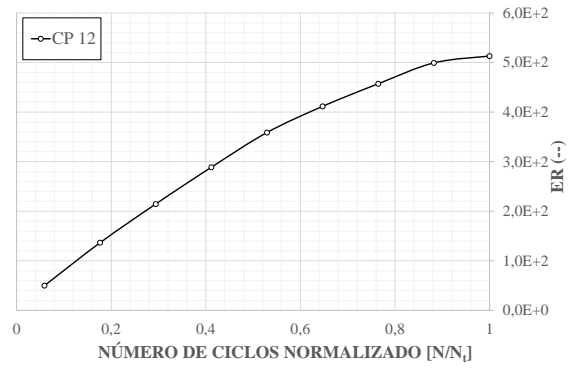
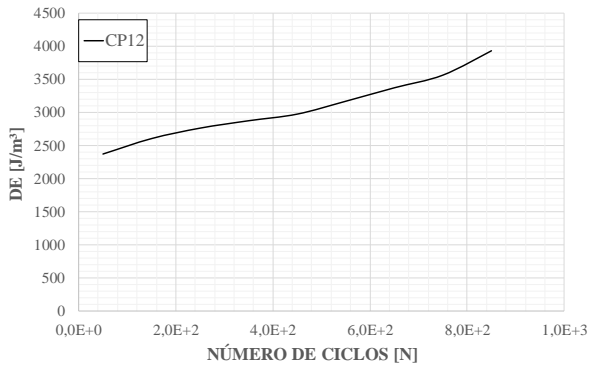


Traço: ECC_{CCA}



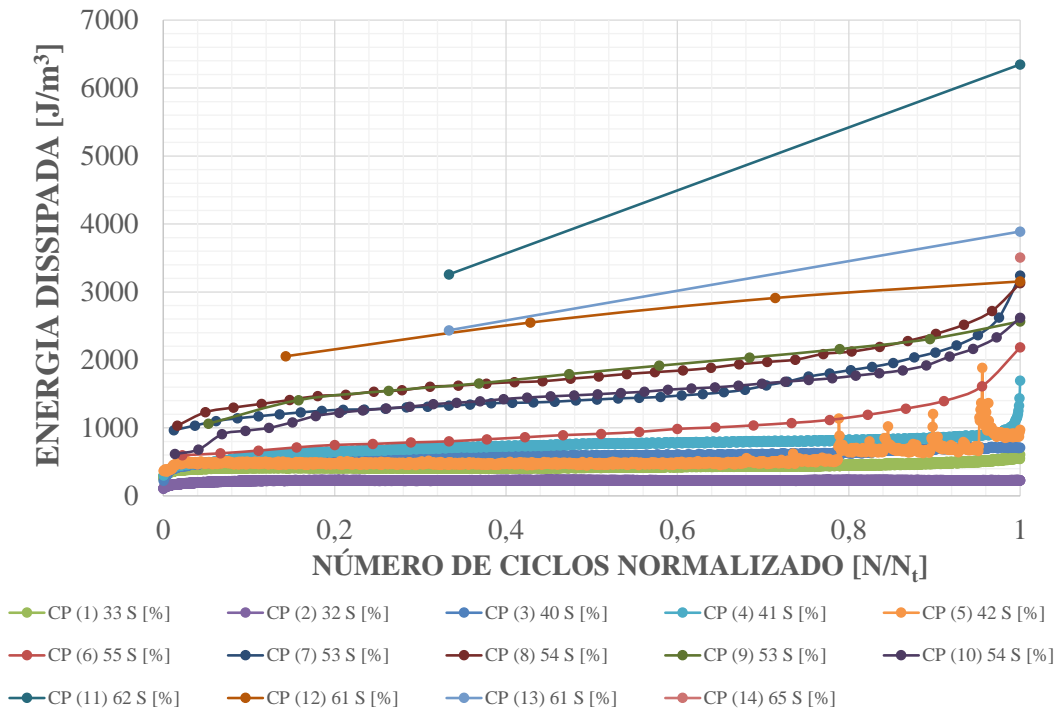






C.7. CURVAS DE DEGRADAÇÃO – ENERGIA DISSIPADA (DE) (NÚMERO DE CICLOS NORMALIZADO – N/N_t)

Traço: ECC_{Ref}



Traço: ECC_{CCA}

