

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

Magnon Donin

**REVESTIMENTOS DE PAVIMENTOS:
ESTUDO DA ADERÊNCIA NA APLICAÇÃO DE
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ALTO DESEMPENHO
PARA RECAPEAMENTO**

Porto Alegre
dezembro 2015

MAGNON DONIN

**REVESTIMENTOS DE PAVIMENTOS: ESTUDO DA
ADERÊNCIA NA APLICAÇÃO DE COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS DE ALTO DESEMPENHO PARA
RECAPEAMENTO**

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

Orientador: Washington Peres Núñez
Coorientador: Camilo Andrés Muñoz Rodríguez

Porto Alegre
dezembro 2015

MAGNON DONIN

**REVESTIMENTOS DE PAVIMENTOS: ESTUDO DA
ADERÊNCIA NA APLICAÇÃO DE COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS DE ALTO DESEMPENHO PARA
RECAPEAMENTO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2015

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

Eng. Camilo Andrés Muñoz Rodríguez
MSc. pelo PPGEC/UFRGS
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Dra. pelo PPGA/UFRGS
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Washington Peres Núñez
(UFRGS)
Dr. pelo CPGEC/UFRGS

Eng. Camilo Andrés Muñoz Rodríguez
(UFRGS)
MSc. pelo PPGEC/UFRGS

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti
(UFRGS)
DSc. pela COPPE/UF RJ

Profa. Ângela Gaio Graeff
(UFRGS)
PhD. pela University of Sheffield

Dedico este trabalho aos meus pais e irmãos, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Washington Peres Núñez, orientador deste trabalho, e ao doutorando Camilo Andrés Muñoz Rodríguez, coorientador deste trabalho, pela atenção concedida e por transmitirem conhecimento teórico e prático para a realização da pesquisa e concretização do trabalho.

Agradeço à Profa. Carin Schmitt, por toda a sua paciência, dedicação e esforço em aprimorar este trabalho durante a sua fase de concepção.

Agradeço aos demais professores da UFRGS que tive a oportunidade de ter aula e que me ajudaram, mesmo que indiretamente, com a realização deste trabalho.

Agradeço ao LAPAV e ao LEME por disponibilizar o espaço físico, equipamentos manuais e mecânicos, materiais para a concepção dos corpos de prova e mão-de-obra qualificada para que este trabalho pudesse ser realizado.

Agradeço à minha família e aos meus amigos pelo apoio, paciência e compreensão durante todo o período da faculdade, e principalmente durante a realização deste trabalho.

Agradeço, também, aos meus colegas de faculdade com quem convivi o período da graduação e que foram fundamentais para a consolidação do aprendizado na Engenharia Civil.

Quando a única ferramenta de que você dispõe é um martelo, todos os problemas começam a parecer-se com pregos.

Abraham Maslow

RESUMO

Visando melhorar o desempenho dos concretos de cimento Portland para recapeamento de pavimentos, vários estudos mostraram que a adição de fibras apresenta resultados satisfatórios no controle do processo de fissuração aumentando a ductilidade e a capacidade de deformação do material. Neste sentido, um grupo de pesquisadores americanos desenvolveram o *Engineered Cementitious Composites* (ECC), um compósito cimentício de alto desempenho reforçado com fibras. Este concreto apresenta elevado teor de cimento e através de um volume de fibras da ordem de 2%, apresenta excelente desempenho na propagação de fissuras e, conseqüentemente, na durabilidade do recapeamento. Nos últimos anos o Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME) vem desenvolvendo estudos com o objetivo de adaptar o ECC a materiais locais. Entre as principais adaptações pode-se destacar a utilização de fibras de polipropileno e materiais pozolânicos visando a concepção de misturas mais viáveis economicamente e mais ambientalmente sustentáveis. A utilização deste compósito depende, no entanto, de boa aderência com o pavimento existente, pois é fundamental que as camadas trabalhem de forma monolítica reduzindo os esforços de tração no concreto. Um ensaio de cisalhamento entre as diferentes camadas mostra-se como uma importante forma de análise e é apresentado neste trabalho. A partir desta metodologia pode-se encontrar as tensões de ruptura por cisalhamento entre camadas de CA (Concreto Asfáltico) e camadas de recapeamento em ECC. Foram moldados 4 corpos de prova sem nenhum tratamento na interface das camadas, e o valor médio das tensões de cisalhamento encontrado foi de 949 kPa, valor considerado satisfatório visto a comparação com outros estudos relacionados.

Palavras-chave: Pavimentos. *Engineered Cementitious Composites*.
Aderência. Ensaio de cisalhamento

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas de pesquisa	18
Figura 2 – Defeitos em pavimentos flexíveis	21
Figura 3 – Defeitos em pavimentos rígidos	22
Figura 4 – Fibras de polipropileno	26
Figura 5 – Curvas tensão-deformação à tração características entre o ECC/CCP	28
Figura 6 – Aspecto de fissuração de um compósito cimentício de elevada deformação	28
Figura 7 – Comparativo entre a fissuração de um concreto convencional e um ECC	29
Figura 8 – Sistema não aderido com duas linhas neutras	34
Figura 9 – Sistema monolítico com uma linha neutra	35
Figura 10 – Esquema de corpo de prova para o ensaio de aderência de Fortes (1999)	37
Figura 11 – Etapas da estratégia do programa experimental	39
Figura 12 – Croqui dos cortes para cada placa	40
Figura 13 – Relação para a obtenção dos corpos de prova	40
Figura 14 – Esquema do corpo de prova para o ensaio de aderência	41
Figura 15 – Cimento CP V – ARI utilizado	42
Figura 16 – Curva granulométrica a areia e Osório utilizada neste trabalho	43
Figura 17 – Agregado miúdo utilizado no ECC	43
Figura 18 – Fibras de polipropileno utilizadas no ECC	44
Figura 19 – Local da extração das placas de concreto asfáltico	45
Figura 20 – Limpeza da superfície das placas de concreto asfáltico	46
Figura 21 – Preparação do ECC (a) misturador utilizado; (b) materiais secos; (c) mistura após a adição de água e aditivo; (d) mistura após a adição das fibras de PP	48
Figura 22 – (a) modelo da <i>flow table</i> utilizado e (b) ensaio realizado	50
Figura 23 – Fôrma com a placa de concreto asfáltico	51
Figura 24 – Concretagem do ECC	52
Figura 25 – Utilização da mesa vibratória	53
Figura 26 – Placas após o tempo de cura	54
Figura 27 – (a) corte das placas e (b) peças após o corte das placas	55
Figura 28 – Processo de colagem dos corpos de prova com resina epóxi	56
Figura 29 – Corpos de prova para ensaio	57
Figura 30 – Equipamento utilizado no ensaio	58
Figura 31 – Momento da falha nos corpos de prova	59
Figura 32 – Ruptura dos corpos de prova	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades das fibras de PVA e de polipropileno (PP)	31
Tabela 2 – Comparação das resistências a compressão	42
Tabela 3 – Propriedades das fibras de polipropileno fornecidas pelo fabricante	44
Tabela 4 – Traço desenvolvido no estudo	47
Tabela 5 – Resultados do <i>flow table</i>	50
Tabela 6 – Resultados obtidos no ensaio de cisalhamento realizado entre o CA e o ECC	62
Tabela 7 – Resultados obtidos no ensaio de cisalhamento estático realizado por Fortes (1999)	63

LISTA DE SIGLAS

ACE-MRL – *Advanced Cementitious Materials – Materials Research Laboratory*

CA – Concreto Asfáltico

CCP – Concreto de Cimento Portland

CCR – Concreto Compactado com Rolo

ECC – *Engineered Cementitious Composites*

LPAV – Laboratório de Pavimentação

LEME – Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais

LMR-PMI – Laboratório de Mecânica das Rochas do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

PE – Polietileno

PP – Polipropileno

PVA – Poli-Vinil-Álcool

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

USP – Universidade de São Paulo

WTUD – *Whitetopping* Ultradelgado

LISTA DE SÍMBOLOS

A – área das interfaces das placas (m^2)

P_{rup} – carga de ruptura (kN)

τ_{rup} – resistência ao cisalhamento (kPa)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	16
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA	16
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	16
2.2.1 Objetivo Principal	16
2.2.2 Objetivos Secundários	16
2.3 PRESSUPOSTO	16
2.4 PREMISA	17
2.5 DELIMITAÇÕES	17
2.6 LIMITAÇÕES	17
2.7 DELINEAMENTO	17
3 CONCRETOS EM PAVIMENTOS	20
3.1 DEFINIÇÕES	20
3.1.1 Defeitos em pavimentos	20
3.1.2 Avaliação para recuperação de pavimentos	23
3.2 CONCRETOS CONVENCIONAIS	24
3.3 CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRAS	25
3.3.1 Propriedades das fibras	25
3.3.2 Engineered Cementitious Composites (ECC)	26
3.3.2.1 Histórico	26
3.3.2.2 Principais características do material	27
3.3.2.3 ECC – Experiência LEME/UFRGS	30
3.3.2.4 Considerações finais sobre o ECC	31
4 ADERÊNCIA DE PAVIMENTOS	33
4.1 DEFINIÇÕES.....	33
4.2 COMPORTAMENTO MONOLÍTICO ENTRE CAMADAS	33
4.3 ENSAIO DE CISALHAMENTO DE INTERFACES ADERIDAS	36
5 PROGRAMA EXPERIMENTAL	39
5.1 ESTRATÉGIA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	39
5.2 MATERIAIS UTILIZADOS	41
5.2.1 Cimento	41
5.2.2 Agregado	42
5.2.3 Fibras de polipropileno	43

5.2.4 Aditivo	44
5.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	45
5.3.1 Corte das placas de concreto asfáltico	45
5.3.2 Preparação do ECC	46
5.3.2.1 Dosagem e produção do ECC	46
5.3.2.2 Ensaio de trabalhabilidade	48
5.3.3 Moldagem dos corpos de prova	51
5.3.3.1 Concretagem	51
5.3.3.2 Cura	53
5.3.3.3 Corte das placas	54
5.3.3.4 Obtenção dos corpos de prova	55
5.3.3.5 Ajustes finais nos corpos de prova	56
5.4 ENSAIO DE CISALHAMENTO	57
5.4.1 Apresentação do equipamento para ensaio	57
5.4.2 Procedimentos adotados no ensaio	58
5.4.3 Ruptura dos corpos de prova	59
6 APRESENTAÇÃO E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	62
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Garantir a qualidade funcional das rodovias é algo crucial para o desenvolvimento de uma região. No entanto, sabe-se que uma parcela substancial dos pavimentos se encontra em processo de deterioração, fato que se deve ao tráfego que, muitas vezes, excede os limites normatizados e às condições climáticas a que ficam expostos. Pavimentos em condições deficientes de rodagem prejudicam a segurança dos usuários e causam sérios prejuízos econômicos.

Existem várias formas para realizar uma intervenção de reabilitação em um pavimento deteriorado. Por envolver diferentes complexidades e possuir diversas técnicas, a escolha da melhor intervenção depende da condição de conservação da estrutura. Sabendo disso, uma das técnicas disponíveis e mais eficientes é o recapeamento, que consiste na sobreposição de uma camada ao pavimento existente e degradado (GARCEZ, 2009).

Na execução de um recapeamento, é preciso garantir a diminuição da ocorrência do fenômeno da fissuração por reflexão. Trata-se da propagação de fissuras existentes no substrato para a nova camada de reparação, ocasionando falha prematura e redução da vida útil da sobrecamada. Este problema se agrava frente a fragilidade dos concretos de CCP (Concreto de Cimento Portland) e CA (Concreto Asfáltico) usados tradicionalmente nas operações de reabilitação. Diante deste quadro, o desenvolvimento de novas técnicas e melhorias nos materiais passa a ser de extrema relevância nas linhas de pesquisa da área (GARCEZ, 2009).

Visando o aperfeiçoamento das técnicas usadas, começou-se a estudar a possibilidade do emprego de compósitos cimentícios de alto desempenho reforçados com fibras nas camadas de recapeamento. Um grupo de pesquisa do ACE-MRL (*Advanced Cementitious Materials – Materials Research Laboratory*), da Universidade de Michigan, desenvolveu um compósito cimentício reforçado com fibras de PVA (Poli-Vinil-Álcool), denominado de ECC (*Engineered Cementitious Composites*). Este compósito apresenta ótimo comportamento dúctil à tração ultrapassando os limites do concreto convencional, além disso, permite que se atinjam altos níveis de deformação específica. As características especiais deste material permitem o uso de camadas de recapeamento com menor espessura, gerando uma opção economicamente viável e mais atraente (GARCEZ, 2009).

No Brasil, o desenvolvimento de estudos relacionados ao uso de compósitos cimentícios reforçados com fibras para recapeamento é ainda muito recente. Visto que a utilização de fibras de PVA se torna inviável devido a seu elevado custo, Garcez (2009), em sua tese de doutorado, mostrou que a utilização de fibras de polipropileno pode ser uma boa alternativa para a produção do ECC. Nos últimos anos o LEME - UFRGS (Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais), através dos estudos de Casagrande (2012), Righi (2015), Pereira da Costa (2015) e Muñoz-Rodríguez (em fase de elaboração)¹, vem consolidando o desenvolvimento deste compósito com intuito de adaptá-lo aos materiais locais. Nestes estudos, a utilização de fibras de polipropileno e cinza de casca de arroz para concepção do ECC apresentam-se como excelentes opções para criar misturas sustentáveis e mais viáveis economicamente.

É preciso considerar, no entanto, que somente o uso de fibras não garante a prevenção quanto a formação de fissuras por reflexão. Cuidados com a aderência entre o substrato e a camada de recapeamento passam a ser fatores de extrema importância pelo fato destas camadas serem bastante delgadas. Fortes (1999) define que a principal hipótese de cálculo das estruturas de pavimentos compostos, passa pela aderência entre os materiais. Estes materiais devem trabalhar em conjunto para garantir uma significativa redução dos esforços de tração no concreto.

O presente trabalho tem como objetivo estudar o fenômeno da aderência entre o ECC sobreposto a uma camada de CA. Para a realização deste estudo, é desenvolvido um ensaio laboratorial com o intuito de obter as tensões de ruptura por cisalhamento entre os dois materiais. A parte final do trabalho apresenta os valores encontrados e é feita uma comparação com resultados obtidos de outras pesquisas.

¹ Tese em fase de elaboração com título “Avaliação do comportamento mecânico de um ECC (*Engineered Cementitious Composites*) com fibras de polipropileno no recapeamento de pavimentos” do autor Camilo Andrés Muñoz Rodríguez, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Doutorado em Engenharia Civil), Orientador Washington Peres Núñez com previsão de publicação em 2017, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: diante dos ensaios realizados com a aplicação do ECC, a resistência de ruptura por cisalhamento obtida entre a camada de recapeamento e a camada asfáltica é adequada aos esforços a que estará submetida numa rodovia?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a análise da eficiência da camada de recapeamento de ECC sobre o pavimento asfáltico quanto à resistência ao cisalhamento para as condições de estudo.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) apresentação da descrição do ensaio de cisalhamento realizado;
- b) determinação da resistência ao cisalhamento na interface das camadas de ECC/CA.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que o ensaio de cisalhamento estático proposto por Fortes (1999), apresenta resultados satisfatórios para camadas de recapeamento com placas de concreto convencional e pode ser usado para o caso de aplicação do ECC.

2.4 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que a aderência entre as camadas de ECC/CA é indispensável para que o recapeamento responda adequadamente aos esforços aos quais estará sujeito em campo.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao emprego do ECC para recapeamento, com estudo na interface desta camada sobreposta a um pavimento asfáltico.

2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

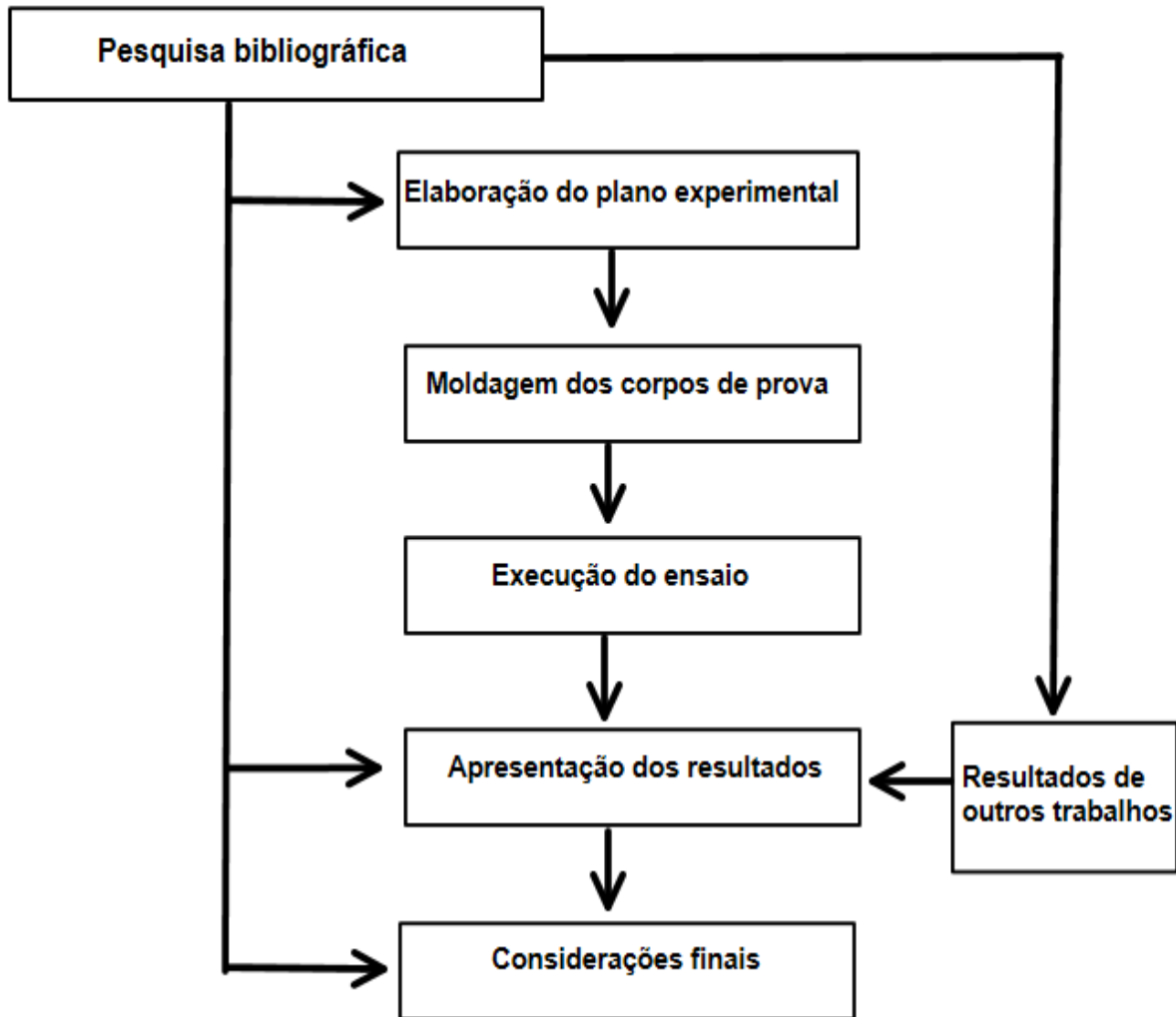
- a) realização de somente um ensaio;
- b) utilização de apenas um traço de ECC;
- c) preparação de apenas quatro corpos de prova.

2.7 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) elaboração do plano experimental;
- c) moldagem dos corpos de prova;
- d) execução do ensaio;
- e) análise e comparação dos resultados;
- f) considerações finais.

Figura 1 – Diagrama das etapas de pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

A **pesquisa bibliográfica** foi realizada ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho e teve como objetivo desenvolver um embasamento teórico referente ao assunto. Para tanto, fez-se o uso de normas e da bibliografia técnica, tais como livros, trabalhos de conclusão, teses e dissertações. Com a pesquisa bibliográfica, foi possível obter todos os dados necessários para o desenvolvimento do trabalho e a garantia da validade das análises e considerações finais.

Na **elaboração do plano experimental** foram retomadas as pesquisas realizadas no LEME. Através dos estudos de Righi (2015) e de Muñoz-Rodríguez (em fase de elaboração)¹ foram definidos os materiais, o traço, a ordem e os tempos de mistura a serem empregados na preparação do ECC. Quanto ao ensaio, por nunca ter sido realizado com camada de reapreamento de ECC, o trabalho baseou-se no método de ensaio de cisalhamento estável

proposto por Fortes (1999), com o qual se obteve tensões de cisalhamento para camadas de recapeamento com concreto convencional.

A etapa de **moldagem dos corpos de prova** foi constituída seguindo os procedimentos adequados de elaboração. Escolheu-se as placas de concreto asfáltico na pista de experimentos do LAPAV (Laboratório de Pavimentação) e utilizou-se os materiais e equipamentos disponíveis no LEME para a preparação do ECC e a concretagem das fôrmas.

Na sequência do trabalho, após a cura e os procedimentos de preparação dos corpos de prova, que envolveu corte e colagem das placas com resina epóxi, além de alguns ajustes finais, seguiu-se para a **execução do ensaio**. O ensaio de cisalhamento foi realizado no LEME através de uma prensa mecânica onde foi aplicada uma força axial de compressão levando os corpos de prova à ruptura. Esta força aplicada em função da área da interface das camadas nos forneceu as tensões de cisalhamento entre as placas.

Na parte de **apresentação dos resultados** são apresentados os valores obtidos pelo ensaio e em seguida é feita uma comparação com os **resultados de outros trabalhos** nesta mesma linha de pesquisa, entre eles, o ensaio realizado por Fortes (1999) para concretos convencionais. Com isso, a ideia é observar o comportamento da camada de recapeamento de ECC frente à ruptura por cisalhamento.

Por fim, nas **considerações finais**, faz-se o encerramento do estudo com a avaliação do alcance dos objetivos propostos, além de sugestões para estudos futuros na área.

3 CONCRETOS EM PAVIMENTOS

A pavimentação de uma via está diretamente relacionada com a melhoria operacional do tráfego. As boas condições de rolamento oferecem aos usuários melhores condições de segurança, um maior conforto no deslocamento do veículo, a diminuição de ruídos e traz uma expressiva redução nos custos operacionais, isto porque as condições de superfície dos pavimentos estão associadas aos custos de operação e de manutenção dos veículos. Além disso, a regularidade permite o desenvolvimento de maiores velocidades gerando economia de combustível e economia nos tempos de viagem (BALBO, 2007, p. 15).

Este capítulo apresenta uma abordagem inicial sobre pavimentos com algumas definições, principais defeitos e avaliação para recuperação dos mesmos. Além disso, aborda sobre concreto convencional e, também, o concreto reforçado com fibras, utilizado neste trabalho.

3.1 DEFINIÇÕES

Tradicionalmente, os pavimentos são classificados em flexíveis e rígidos. Os flexíveis constituídos por um revestimento betuminoso sobre uma base granular e os rígidos constituídos por placas de cimento Portland assentado sobre o solo de fundação (MEDINA, 2005, p. 16).

Segundo Bernucci et al. (2006, p. 9) os pavimentos flexíveis são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída de agregados e ligantes asfálticos. Possui basicamente quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito.

Quanto aos pavimentos rígidos Bernucci et al. (2006, p. 9) define como aqueles que possuem revestimento com placa de cimento Portland. Sua espessura é definida em função da resistência à flexão das placas e das resistências das camadas subjacentes. Possui subcamada denominada como sub-base pois a qualidade do material desta camada equivale a sub-base de pavimentos flexíveis.

3.1.1 Defeitos em pavimentos

Devido a ação de carregamentos cíclicos e à exposição ambiental, os pavimentos são estruturas predispostas a desenvolver processos de deterioração. A partir da liberação ao tráfego inicia-se

a degradação incremental, que ocorre ao longo da vida útil, e provoca perda gradativa da qualidade funcional e da segurança da estrutura. A evolução dos processos de degradação é intensificada pelo tráfego solicitante, que muitas vezes excede os limites previstos em projeto, ou é agravada pelas condições climáticas variadas e intensas a que ficam expostos (GARCEZ, 2009, p. 1).

Existem inúmeros defeitos que podem surgir tanto em pavimentos flexíveis quanto nos rígidos. Entre os principais defeitos em pavimentos flexíveis o DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2003, p. 2-3) destaca os afundamentos, as fendas, as ondulações, os escorregamentos, os buracos, entre outros. Já entre os defeitos em pavimentos rígidos o DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2004, p. 1-3) destaca o alçamento de placas, as fissuras de canto, placas divididas, fissuras lineares, quebras localizadas, entre outros. A figura 2 ilustra problemas em pavimentos flexíveis e a figura 3 problemas em pavimentos rígidos.

Figura 2 – Defeitos em pavimentos flexíveis



(fonte: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2003)

Figura 3 – Defeitos em pavimentos rígidos



(fonte: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2004)

Uma parte considerável dos defeitos abordados acima, principalmente nos pavimentos flexíveis, está associada ao processo da propagação das fissuras, que Balbo (2007, p. 280-281) define como:

A propagação das fissuras (por vezes denominada reflexão de fissuras) é um fenômeno que ocorre pelo contato pleno de uma camada superior de mistura asfáltica com uma camada inferior (mistura asfáltica ou base cimentada) que apresenta fissuras em sua superfície (as juntas transversais induzidas em concretos ou camadas cimentadas subjacentes são incluídas aqui) [...]. Na região de contato, onde existe a fissura na camada inferior, quando solicitada por uma carga, ocorre um estado diferenciado de tensões. Se a fibra inferior da mistura asfáltica do revestimento trabalha à tração na flexão, a fissura no topo da camada inferior tende a se abrir em um ponto que, por sua presença, apresentará descontinuidade de distribuição de esforços.

Garcez (2009, p. 3) reforça que a fissuração por reflexão ocorre, em muitas situações, quando as fissuras existentes na camada existente de um pavimento tende a se propagar rapidamente para a nova camada de reparo (recapeamento). Esta propagação de fissuras acarreta falha prematura e reduz consideravelmente a vida útil da sobrecamada do pavimento.

Por último, o fenômeno da fadiga em pavimentos que Balbo (2007, p. 261, grifo do autor) define como:

O fenômeno da fadiga relaciona-se ao fato de que muitos materiais, sendo sucessivamente solicitados em níveis de tensão inferiores àqueles de ruptura (para dado modo de solicitação), pouco a pouco desenvolvem alterações em sua estrutura

interna, que resultam na perda de características estruturais originais. Isso gera um processo de **microfissuração progressiva** que culmina no desenvolvimento de fraturas e, conseqüentemente, no rompimento do material.

3.1.2 Avaliação para recuperação de pavimentos

Diante dos diversos problemas que podem surgir nos pavimentos, a recuperação dos mesmos torna-se necessária. Porém, antes de partir para as ações de reabilitação é preciso saber a real condição do pavimento existente. Neste sentido, avaliações funcionais e estruturais passam a ser importantes pois geram como resultado diretrizes gerais quanto ao estado atual do pavimento proporcionando a escolha correta do tipo de reabilitação a empregar.

Segundo Bernucci et al. (2006, p. 463) a avaliação funcional tem como objetivo verificar a condição da superfície do pavimento. É feita através do levantamento e análise dos defeitos superficiais, e da condição de irregularidade longitudinal dos pavimentos. Os principais defeitos considerados em uma avaliação funcional são: área trincada e severidade do trincamento, as irregularidades longitudinais e as deformações permanentes.

Quanto a avaliação estrutural de um pavimento, Balbo (2007, p. 404) tem como objetivo a completa caracterização física da estrutura. Trata-se de um conhecimento preliminar, com um bom grau de detalhamento, e é o ponto de partida para a avaliação de necessidades de reabilitação do pavimento. Através da avaliação estrutural se define as camadas existentes, os materiais que as compõem e as suas espessuras, além da indicação do estado de degradação presente nas camadas, em geral fatores inviáveis de serem determinados apenas com avaliações de defeitos superficiais.

Para Bernucci et al. (2006, p. 441) a avaliação de pavimentos tem como conceitos associados:

- a) serventia: qualidade do pavimento, num determinado instante, quanto aos aspectos para o qual foi construído em relação ao conforto ao rolamento e segurança;
- b) desempenho: variação da serventia ao longo do tempo (ou do tráfego) de uso do pavimento;
- c) gerência: administração, gestão e otimização dos recursos aplicada ao planejamento, projeto, construção, manutenção e avaliação dos pavimentos;
- d) restauração: conjunto de operações destinadas a restabelecer na íntegra ou em parte as características técnicas originais de um pavimento (intervenções); incluem as ações de manutenção denominadas preventivas e reforço;

- e) manutenção preventiva: operação de correções localizadas que não atingem a maioria da superfície do pavimento, repondo pequena parcela da condição de serventia;
- f) reforço: operação de restauração onde se aproveita o valor residual da estrutura do pavimento e acrescenta-se nova camada de mistura asfáltica (também dito recapeamento). Atualmente, pode incluir a fresagem de parte do revestimento antigo além da colocação de nova camada estrutural de revestimento ou camadas de reposição de conforto ao rolamento;
- g) reconstrução: operação de refazer o pavimento, no todo desde o subleito, ou mais comumente atualmente a partir da sub-base por retirada total dos materiais de base e revestimentos antigos e substituição por novos materiais ou por reciclagem dos mesmos sem ou com adição de estabilizantes tais como asfalto-espuma, cimento Portland ou cal hidratada. Após a reciclagem constrói-se nova capa asfáltica como revestimento.

Em resumo o estudo da condição do pavimento existente é o ponto inicial para a definição das alternativas de reabilitação. Sendo que o recapeamento se apresenta como uma das opções de reabilitação, é fundamental que se escolha concretos feitos com materiais de boa qualidade para sua concepção e que o processo de execução respeite as normas vigentes.

3.2 CONCRETOS CONVENCIONAIS

O concreto convencional é um dos materiais mais utilizados na indústria da construção civil. Composto por uma pasta (água e cimento) e agregados, a principal propriedade deste material é a sua elevada resistência à compressão (CASAGRANDE, 2012, p. 14). Na pavimentação, o recapeamento com concretos convencionais, tanto com CCP quanto com CA, torna-se uma opção bastante utilizada na reabilitação de pavimentos deteriorados.

No entanto, a utilização de concretos convencionais para recapeamento tem como um dos seus principais problemas a frequente perda de durabilidade, fato que se deve principalmente a inapropriada seleção dos materiais empregados (GARCEZ, 2009, p. 47). A propagação das fissuras, muitas vezes se torna rápida e a degradação prematura da camada de reparo é inevitável. A constante evolução da área da pavimentação faz com que novos materiais para recapeamento, como por exemplo o uso de fibras, surgem para melhorar o desempenho dos concretos.

3.3 CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Para Casagrande (2012, p. 23), a baixa capacidade de o concreto resistir a esforços de tração traz dificuldades para interromper a propagação das fissuras. Isto ocorre porque a fissuração acontece transversalmente à direção principal da tensão e por isso a capacidade de carga da estrutura diminui a cada fissura desenvolvida. Com isso, o reforço com fibras adicionadas no concreto é importante, pois tem como principal objetivo controlar o processo de fissuração.

3.3.1 Propriedades das fibras

Casagrande (2012, p. 24-25) afirma que as propriedades das fibras estão relacionadas diretamente com o desempenho dos compósitos cimentados. As principais propriedades a serem analisadas são:

- a) a geometria: influência no desempenho pós-fissuração do concreto;
- b) a aderência entre a fibra e a matriz: afeta diretamente na resistência, nas deformações ocorridas e no padrão de ruptura da estrutura. Uma boa aderência leva ao aparecimento de fissuras com menores espessuras;
- c) teor de fibra: está diretamente relacionado com a trabalhabilidade do material, pois quanto mais fibras forem adicionadas à matriz pior será a trabalhabilidade do concreto.

Os compósitos com altos teores de fibras, mesmo que não atinjam resistências tão elevadas, atribuem uma considerável melhoria na ductibilidade do material. Com isso estes compósitos, ao serem submetidos à ação de esforços elevados de tração, adquirem uma capacidade de deformação mais elevada (CASAGRANDE, 2012, p. 26).

Entre as fibras mais utilizadas nacionalmente e que apresentam uma série de vantagens na sua aplicação pode-se citar as fibras de polipropileno. Casagrande (2012, p. 71) conclui que:

O reforço de fibras de polipropileno propõe um avanço no concreto simples (sem armadura de aço), atingindo uma alta deformabilidade. Isto deve-se a capacidade das fibras de absorverem e transmitirem homogeneamente a carga ao longo da estrutura. A dosagem ideal da fibra influencia neste comportamento, pois um alto teor de fibras afeta na quantidade de água e ar incorporado na mistura, alterando assim a resistência final e a trabalhabilidade da mesma.

Estas fibras possuem boa tenacidade sendo capazes de promover um reforço efetivo nos compósitos cimentícios, além de apresentarem durabilidade, compatibilidade com bases

cimentícias e custo mais acessível quando comparado a outras fibras. A figura 4 ilustra as fibras de polipropileno.

Figura 4 – Fibras de polipropileno



(fonte: CASAGRANDE, 2012, p.34)

3.3.2 Engineered Cementitious Composites (ECC)

Frente aos problemas enfrentados na aplicação de concretos convencionais para recapeamento, fica evidente a necessidade de desenvolver técnicas mais eficientes, a fim de evitar ou dificultar, entre outras, a ocorrência da fissuração por reflexão. Neste sentido, grupos de pesquisa começaram a desenvolver compósitos cimentícios de alto desempenho reforçados com fibras para criar camadas de recapeamento. Uma das vantagens deste tipo de material é que possui ótimo comportamento dúctil a tração, ultrapassando as limitações do concreto convencional diante das mesmas solicitações (GARCEZ, 2009, p. 4-5). Este item apresenta a origem do ECC, bem como suas principais características e conclusões a respeito de sua empregabilidade. Além disso, apresenta o ECC desenvolvido por pesquisadores do LEME/UFRGS, um compósito adaptado à materiais nacionais, com a utilização de fibras de polipropileno.

3.3.2.1 Histórico

O ECC surgiu através de um grupo de pesquisadores do ACE-MRL (*Advanced Cementitious Materials – Materials Research Laboratory*), da Universidade de Michigan. Este grupo, liderado pelo Prof Victor Li, criou e obteve sucesso com um tipo de compósito de alto

desempenho reforçado com fibras de PVA. A criação deste material foi baseada na aplicação de conceitos de micromecânica e mecânica da fratura, fatores determinantes para obtenção de um material muito deformável com um volume baixo de fibras, da ordem de 2%. Este fator é importante, pois teores elevados de fibras podem prejudicar a trabalhabilidade e encarecer a fabricação destes compósitos. (GARCEZ, 2009, p. 5)

3.3.2.2 Principais características do material

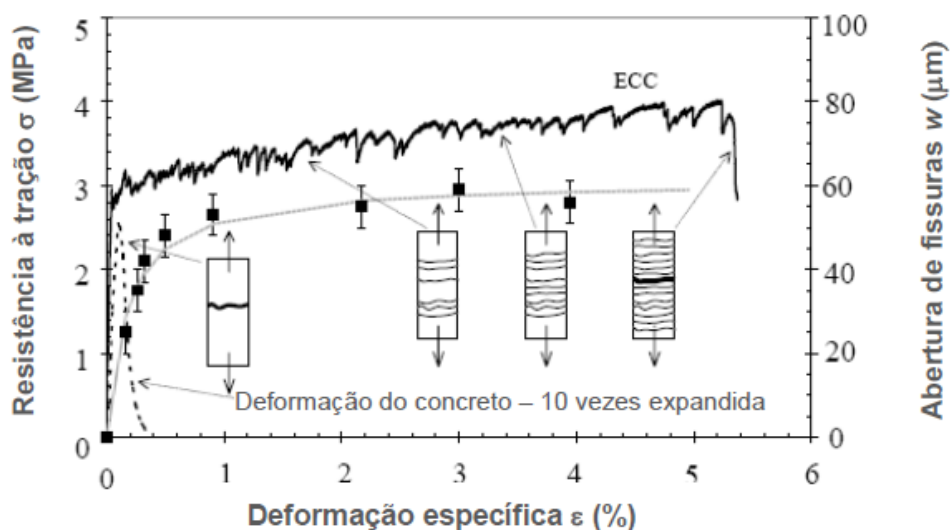
O ECC possui várias características especiais tendo um comportamento mecânico diferenciado. Para Garcez (2009, p. 13) o ganho de ductilidade é a principal vantagem dos compósitos reforçados com fibras. O comportamento dúctil acontece porque esses compósitos exibem uma relação constitutiva pós-pico de carregamento que se caracteriza pelo comportamento *strain-hardening* e pelo desenvolvimento de um processo de múltiplas fissuras.

O comportamento *strain-hardening* é uma das características mais importante de um ECC e é detalhado por Garcez (2009, p. 15, grifo do autor) como:

Já nos ECCs, a primeira fissura é seguida por um aumento ou pelo menos uma estabilização na capacidade de carga do compósito. Isto ocorre porque o carregamento, primeiramente suportado pela matriz, é transferido, após a abertura da primeira fissura, para uma grande quantidade de fibras de pequeno diâmetro, de boa capacidade à tração e adequada aderência à matriz, que interceptam a fissura. Estas fibras conseguem suportar as cargas e transferir o carregamento para outro ponto da matriz, provocando a abertura de uma nova fissura, que irá mobilizar e transferir o carregamento às fibras existentes nesta nova região. Este mecanismo se repete de forma sucessiva, permitindo que microfissuras múltiplas se desenvolvam ao longo do compósito, mas preservando a integridade global e evitando a ruptura do elemento. Este comportamento, [...], é denominado *de strain-hardening*.

O comportamento *strain-hardening* é apresentado na figura 5 no gráfico que relaciona a resistência à tração, a deformação específica e a abertura de fissuras entre um ECC e um concreto convencional.

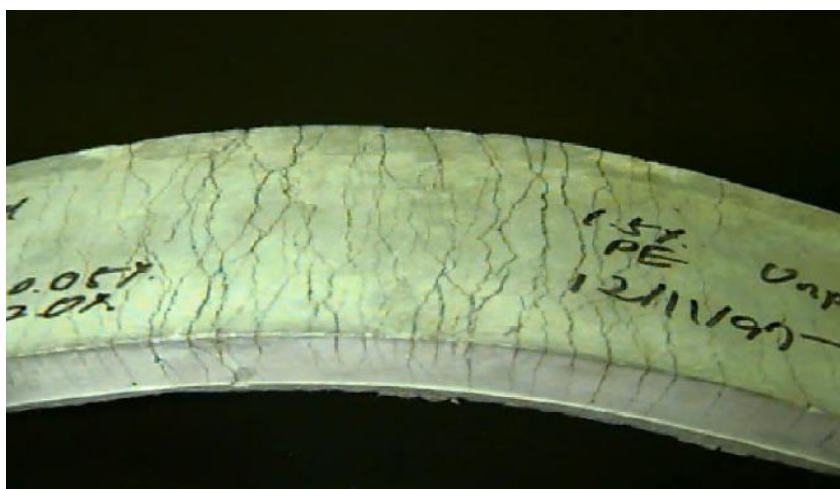
Figura 5 – Curvas tensão-deformação à tração características entre o ECC/CCP



(fonte: WEIMANN e LI², 2003 apud GARCEZ, 2009, p. 6)

Este comportamento *strain-hardening* explica a alta ductilidade do ECC, que quando comparado a concretos convencionais, tem uma probabilidade menor de sofrer uma falha estrutural. Estes compósitos podem sofrer grandes deformações sem romper. A figura 6 apresenta o aspecto de fissuração de um ensaio à flexão realizado em um corpo de prova produzido com ECC reforçado com fibra de PE (Polietileno).

Figura 6 – Aspecto de fissuração de um compósito cimentício de elevada deformação

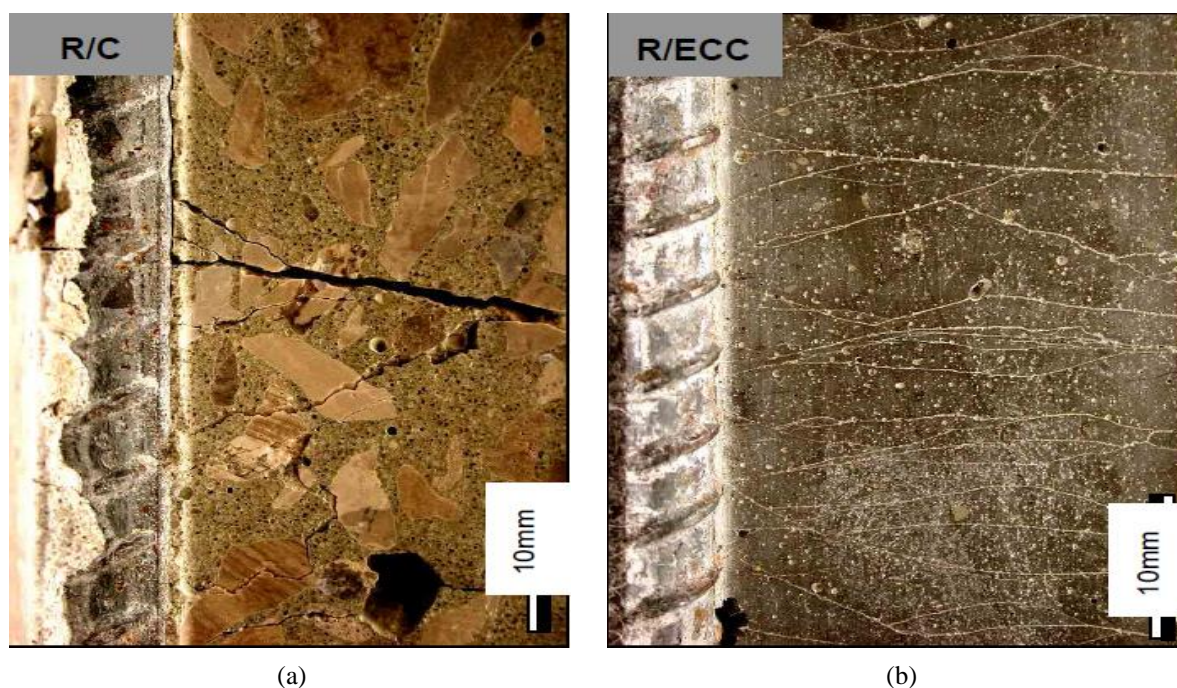


(fonte: Li e Kanda, 1998)

² WEIMANN, M. B. e LI, V. C. **Hygral Behavior of Engineered Cementitious Composites (ECC)**. International Journal for restoration of Buildings and Monuments Vol. 9, No 5, 513-534, 2003.

A figura 7(a) apresenta um comparativo entre o processo de fissuração no concreto convencional e a figura 7(b) a fissuração caracterizada por um ECC. Nota-se que no concreto convencional há o aparecimento de uma grande abertura enquanto no ECC há o aparecimento de microfissurações conforme discutido anteriormente.

Figura 7 – Comparativo entre a fissuração de um concreto convencional e um ECC



(fonte: LI, 2003)

Em resumo, para Garcez (2009), as principais diferenças entre o ECC e o concreto convencional em relação ao comportamento mecânico dos materiais são:

- a) curvas tensão-deformação semelhantes às que são registradas nos ensaios de materiais metálicos, quando submetidos à tração. Este comportamento possibilita níveis de deformação específica que podem chegar a 5%, enquanto concretos convencionais tem níveis de 0,01%;
- b) durante o carregamento o material sofre uma redução em sua rigidez na transição da fase elástica para a inelástica, sem redução em sua capacidade de carga. Isto se deve a ductilidade do material;
- c) devido ao comportamento *strain-hardening*, uma falha estrutural causada pela fratura do compósito tem menor probabilidade de ocorrer em um ECC, em comparação com concretos convencionais.

O ECC também tem excelente capacidade de resistir a esforços de cisalhamento. Diante deste tipo de carregamento o compósito apresenta fissuras alinhadas na direção normal à direção das

tensões principais de tração. Sendo o comportamento à tração dúctil, a resposta ao cisalhamento, conseqüentemente, também é dúctil.

Além das propriedades mecânicas comentadas anteriormente dos ECCs, existe outro ponto positivo resultante da limitação das aberturas devido ao processo de microfissuração, que é conhecido como *self-healing*, definido como a capacidade de auto-restauração do concreto. Segundo Casagrande (2012, p. 30) a esta capacidade de autocicatrização das fissuras soluciona o problema da retração plástica nestes tipos de estruturas. Além disso, tem ligação com a deformação nos primeiros carregamentos, pois aumenta a capacidade do compósito absorver energia.

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

- a) presença de alguns compostos químicos reativos;
- b) exposição a determinadas condições ambientais;
- c) pequena abertura de fissuras, que viabiliza o preenchimento com cristais precipitados.

3.3.2.3 ECC – Experiência LEME/UFRGS

O LEME (Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais) da UFRGS vem realizando diversos estudos visando o aprimoramento de um compósito cimentício de elevada capacidade de deformação. Segundo Muñoz-Rodríguez (em fase de elaboração)¹ os trabalhos abordam a adaptação a materiais locais, a definição de traços com melhores desempenhos, bem como a caracterização por ensaios e procedimentos adaptados às condições próprias do material.

Os estudos começaram com Garcez (2009), que tinha como objetivo em sua tese de doutorado formular um compósito cimentício com materiais disponíveis no Brasil. A principal diferença do ECC proposto é a adição de fibras de polipropileno no lugar das fibras de PVA. Assim sendo, o ECC desenvolvido teria como materiais constituintes cimento, agregado fino, fibras de polipropileno e aditivo superplastificante. A tabela 1 apresenta as principais diferenças entre as fibras de polipropileno (PP) e as fibras de PVA.

Tabela 1 – Propriedades das fibras de PVA e de polipropileno (PP)

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		

(fonte: adaptado de Garcez 2009)

Além da utilização das fibras de polipropileno na concepção deste compósito iniciaram-se estudos referentes a adição materiais pozolânicos na composição do ECC visando a diminuição do consumo de cimento. Casagrande (2012, p. 71) destaca que o emprego de cinza volante ao compósito cimentício pode ser uma alternativa bastante viável, visto que proporciona economia e sustentabilidade. A cinza volante apresenta propriedades pozolânicas semelhantes ao cimento e com isso ajuda a controlar a tenacidade da matriz cimentante.

Mais recentemente, os estudos de Pereira da Costa (2015) com utilização de cinzas de casca de arroz como material de substituição parcial ao cimento, apresentaram bons resultados quanto ao comportamento mecânico do material, em termos de durabilidade, resistência à abrasão e melhora significativa nas propriedades do compósito em relação à conexão e solução dos poros. Nesta mesma linha de pesquisa, estudos de Righi (2015), demonstraram que a utilização de cinzas de cascas de arroz gera bons resultados quanto a ductilidade e resistência à propagação de fissuras.

3.3.2.4 Considerações finais sobre o ECC

As principais conclusões que Garcez (2009, p. 164-165) faz sobre o emprego do ECC para reabilitação de pavimentos são:

- a) a escolha dos materiais mais adequados é um importante passo para se garantir um compósito de alta qualidade e que possa ser enquadrado como ECC. É preciso ter cuidados especiais na dosagem e combinações dos materiais, pois devido a algumas combinações pode ocorrer deterioração da capacidade das fibras;
- b) os resultados mostram que, através de um processo combinado de delaminação e microfissuração da camada de ECC, a concentração das tensões que se desenvolvem nas áreas degradadas do pavimento existente pode ser aliviada. Como causa deste efeito, o ECC constitui uma vantagem considerável no desempenho global do recapeamento, pois a tendência à reflexão de fissuras se torna pequena, e supera um dos maiores limitantes relacionados à durabilidade de recapeamentos com concretos convencionais.

Diante de todos os benefícios que a aplicação de ECC em recapeamentos pode proporcionar Garcez (2009, p. 75-76) conclui que:

[...] os [ECC] se apresentam como uma nova tecnologia na área de compósitos cimentícios de alto desempenho. Estes têm ganhado cada vez mais importância, uma vez que busca pela melhoria das propriedades dos concretos já ultrapassou os limites da comunidade científica, e atualmente encontra aplicação em diversos campos da engenharia civil. Estas melhorias não estão apenas relacionadas às propriedades mecânicas, mas também às questões de durabilidade, sustentabilidade, racionalização de materiais, aprimoramento de processos construtivos.

Atualmente, o Brasil vem desenvolvendo pesquisas de ponta acompanhando as novas tendências mundiais nas áreas de estruturas e de materiais. Com isso a tecnologia dos ECCs, aos poucos, precisa ser inserida no país como material, principalmente, para recapeamentos. Estudos que envolvam a difusão de conhecimento sobre o assunto, a consideração de suas propriedades diferenciadas no dimensionamento de estruturas e o domínio dos métodos de produção do material passam a ser fatores importantes a serem aplicados (GARCEZ, 2009, p. 75-76).

O desenvolvimento de um ECC nacionalizado, ou seja, produzidos com materiais disponíveis e comercializados no mercado brasileiro, seria o primeiro passo para a inserção do compósito na área da pavimentação. Este fator é de extrema importância na produção de ECCs, visto que estes compósitos tem um custo bastante elevado quando comparado a concretos convencionais, fato que se deve principalmente ao elevado teor de cimento e a utilização de fibras (GARCEZ, 2009, p. 76).

4 ESTUDO DA ADERÊNCIA

Neste capítulo é abordada a questão da aderência entre camadas de pavimentos. Inicialmente são apresentadas algumas definições sobre sua importância e alguns conceitos associados e, posteriormente, o ensaio de interfaces aderidas que visa a análise da aderência entre camadas de concreto.

4.1 DEFINIÇÕES

A aderência tem grande importância dentro do campo da engenharia civil sendo fundamental na efetivação do assentamento, por exemplo, de blocos de alvenaria, pisos cerâmicos e peças de revestimento. Em nível microscópico, a aderência pode ser comparada como um efeito aglutinador de diferentes materiais na transformação destes em um material diferente, com propriedades distintas às dos materiais de origem (PEREIRA, 2003, p. 3).

Entre os principais tipos de aderência Pereira (2003, p. 4) cita:

- a) aderência por adesão: refere-se à parcela do efeito macroscópico da aderência, ocasionada por ligações físico-químicas existentes entre os materiais e que são formadas durante as reações do cimento;
- b) aderência por atrito: esta parcela surge devido às forças existentes entre as camadas dos pavimentos e ocorrem durante a retração plástica do material sobreposto;
- c) aderência mecânica: ocorre por possíveis irregularidades macroscópicas existentes na camada de base e que podem gerar intertravamento de agregados presentes nas duas camadas.

Como importantes fatores para desenvolver aderência entre as camadas Pereira (2003, p 5-6) destaca a correta escolha do tipo de cimento e dos agregados, os cuidados com a temperatura de concretagem e o tempo de cura, além do preparo da superfície de base.

4.2 COMPORTAMENTO MONOLÍTICO ENTRE CAMADAS

A boa aderência entre as camadas de pequena espessura, os chamados WTUD (*Whitetopping* Ultradelgado), é fundamental para garantir que as camadas do revestimento trabalhem de forma

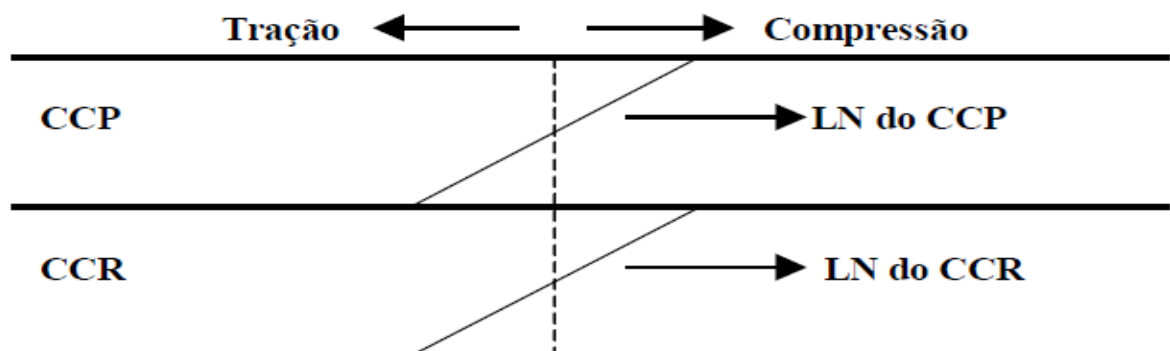
monolítica, reduzindo os esforços de tração. Balbo (2007, p. 59, grifo do autor) define esta forma monolítica das camadas como:

O termo monolítico é empregado para designar a condição de **contato pleno**, antes e após a deformação da estrutura de pavimento, para indicar a continuidade de transmissão de esforços verticais entre as faces de cada camada. Quando houvesse perda desse comportamento monolítico, como seria possível em uma placa de concreto que perdeu apoio em sua face inferior devido à erosão da base, por exemplo, o elemento sem apoio ficaria submetido a estados de tensão bastante críticos em comparação à situação desejável de contato pleno.

Fortes (1999, p. 159-160) reforça que a boa aderência entre as camadas é essencial para o sucesso do pavimento composto, pelo fato que a interface da camada de rolamento e o pavimento remanescente estão sujeitos a esforços de cisalhamento. Se a camada de recapeamento for delgada, no caso de existir aderência entre esta e a camada remanescente, passa a existir uma contribuição estrutural da camada remanescente na região de tração, com isso ocorre redução significativa dos esforços na seção do concreto, e o pavimento passa a desempenhar o papel de seção composta.

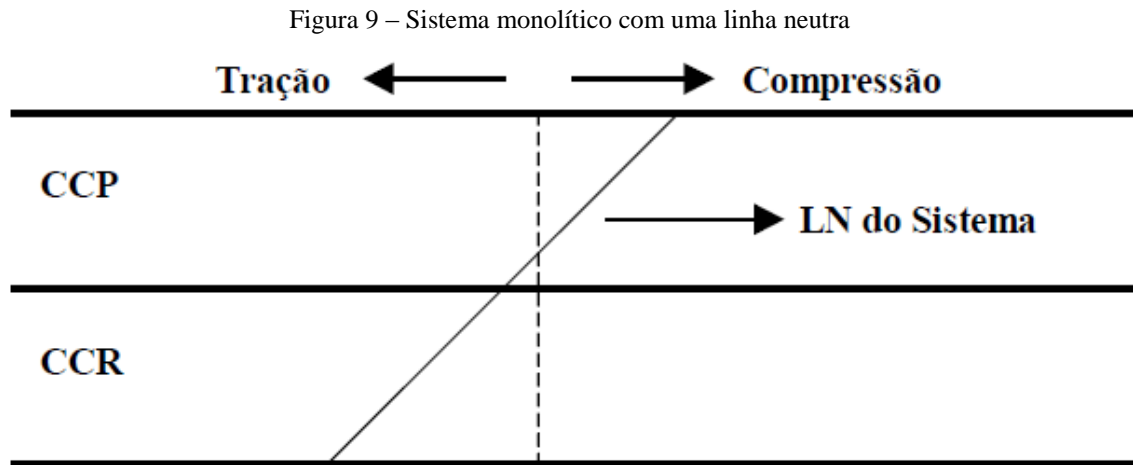
O agente que controla o comportamento monolítico entre as camadas de revestimento é a aderência entre os mesmos. A não existência de aderência, ou seja, quando inexistem ligações rígidas entre os dois materiais, não há compatibilidade de deformações no fundo do CCP (Concreto de Cimento Portland) e no topo do CCR (Concreto Compactado com Rolo). Deste modo, as camadas deformam-se de maneira independente, tendo um comportamento estrutural governado por duas linhas neutras, localizadas a meia altura de suas espessuras e uma em cada camada (PEREIRA, 2003, p. 8). A figura 8 apresenta um sistema de camadas não aderido.

Figura 8 – Sistema não aderido com duas linhas neutras



(fonte: PEREIRA, 2003, p. 9)

No entanto, ao possuir um comportamento monolítico as duas camadas passam a trabalhar juntas, sua interface liga-se rigidamente através da aderência e apenas uma linha neutra passa a governar o comportamento mecânico do pavimento (PEREIRA, 2003, p. 9). A figura 9 apresenta este comportamento que se espera quando tem-se boa aderência entre as camadas sobrepostas.



(fonte: PEREIRA, 2003, p. 9)

Quando os dois materiais aderidos possuem diferentes módulos de elasticidade, as solicitações impostas pelo tráfego induzirão tensões de cisalhamento na interface aderida. Se essa resistência ao cisalhamento consegue suportar os esforços de cisalhamento atuantes, as camadas trabalharão aderidas até que haja inversão deste equilíbrio, que pode ser condicionada pela fadiga das ligações rígidas promotoras de aderência, conforme Fortes (1999) presenciou em estruturas monolíticas de WTUD em seus estudos (PEREIRA, 2003, p. 9).

Ao se tratar do rebaixamento da linha neutra, Pereira (2003, p. 9) afirma que dependerá das propriedades elásticas e das espessuras das duas camadas aderidas. O rebaixamento da linha neutra será maior e as tensões na flexão no fundo da camada de CCP serão menores quanto maior for a espessura ou mais rígida for a camada de base CCR. No entanto, ao passo que o rebaixamento da linha neutra reduz as tensões na interface aderida, há o aumento dos esforços atuantes, em ambos os materiais, no topo do CCP e no fundo do CCR.

4.3 ENSAIO DE CISALHAMENTO DE INTERFACES ADERIDAS

Segundo Balbo (2007, p. 221-222) a medida da resistência da interface aderida entre dois materiais quaisquer é um problema pouco conhecido, porém importante na análise de algumas situações em pavimentação. Um ensaio simples para verificação da resistência ao cisalhamento direto em camadas de materiais diferentes foi concebido pelo laboratório de pavimentos da USP (Universidade de São Paulo). Neste método, uma força vertical é aplicada sobre o topo do material, sendo totalmente transferida nas interfaces aderidas em ambas as camadas, sem que o material central se apoie na base. Neste arranjo estabelecido ocorre a geração de uma força cortante nas interfaces, que em cada lado, equivale à metade da carga vertical aplicada.

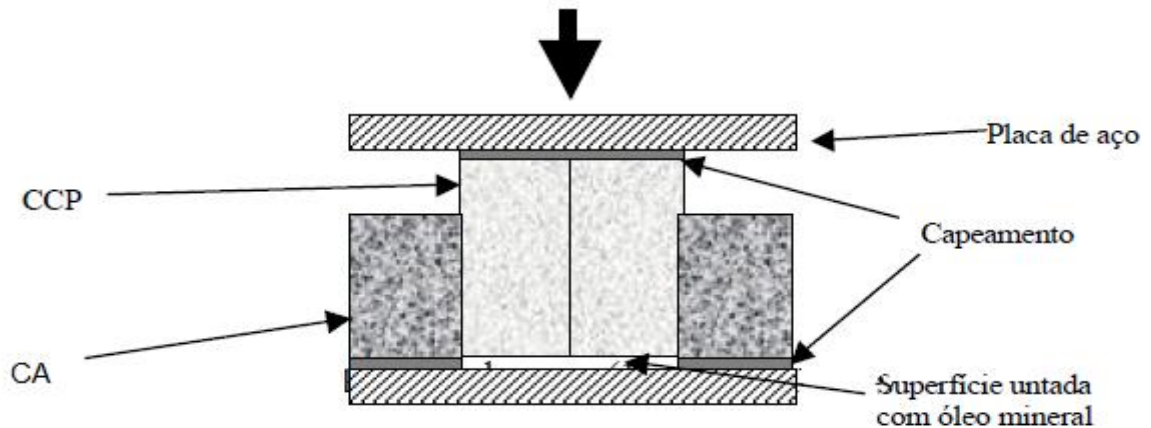
O desenvolvimento deste ensaio é bastante trabalhoso e requer muita precisão na preparação dos corpos de prova, bem como o perfeito alinhamento dos mesmos. Existem vários ensaios para a verificação da tensão de ruptura por cisalhamento em placas aderidas, no entanto, boa parte destes ensaios possuem limitações quanto a aplicação. Fortes (1999, p. 160) atribui estas limitações, basicamente, ao nível de obtenção de valores significativos da resistência ao cisalhamento, a dificuldade de moldagem dos corpos de prova e a disponibilidade de equipamento para ensaio.

Neste contexto, Fortes (1999) propôs um método de cisalhamento estático para verificar as tensões de cisalhamento entre camadas de CA e CCP. A metodologia consistiu na moldagem de corpos de prova com diversos tratamentos entre as interfaces das placas sendo eles:

- a) sem nenhum tratamento;
- b) fresada manualmente;
- c) fresada com fresadora 1000C;
- d) só resina;
- e) fresada mais resina.

Os corpos de prova foram ensaiados com a aplicação de uma força axial que se desenvolveu até a ruptura. A figura 10 apresenta o esquema proposto para obter-se tensões de cisalhamento entre as camadas.

Figura 10 – Esquema de corpo de prova para o ensaio de aderência criado por Fortes (1999)



(fonte: FORTES, 1999)

Fortes (1999, p. 181-182), através da criação do método de cisalhamento estático, cita algumas considerações gerais:

- a) máquinas manuais de aplicação de carga não possuem aplicação de carga contínua e por isso não devem ser usadas nestes tipos de ensaios;
- b) quanto menor a velocidade de aplicação de carga, menor será a carga de ruptura e vice-versa;
- c) a resistência ao cisalhamento é diretamente proporcional à carga de ruptura;

Na análise do tipo de tratamento da interface das placas, Fortes (1999, p. 182-183) apresentou os seguintes resultados:

- a) os corpos de prova que não receberam nenhum tratamento na interface obtiveram um valor de resistência ao cisalhamento médio cerca de 12% inferior ao valor obtido em corpos-de-prova que tiveram a interface fresada;
- b) a fresagem real aumenta em cerca de 14% o valor da resistência ao cisalhamento;
- c) o tratamento da interface com resina sem fresagem leva a um valor de resistência ao cisalhamento 36% acima dos valores encontrados em corpos-de-prova com fresagem. Somando o uso da resina e mais a fresagem o valor aumenta para cerca de 40%.

Os resultados dos ensaios são bastante satisfatórios, e faz com que a resina tenha papel principal no desempenho de camadas ultradelgadas de recapeamento. O aumento da resistência é

significativo e pode ser traduzido pelo aumento de superfície aderida, sendo a resina epóxi atuando como ponte de aderência entre as interfaces das placas estudadas. (FORTES, 1999, p. 183). No entanto, o uso de resina epóxi para unir as camadas representa um custo elevado, o que pode inviabilizar qualquer projeto.

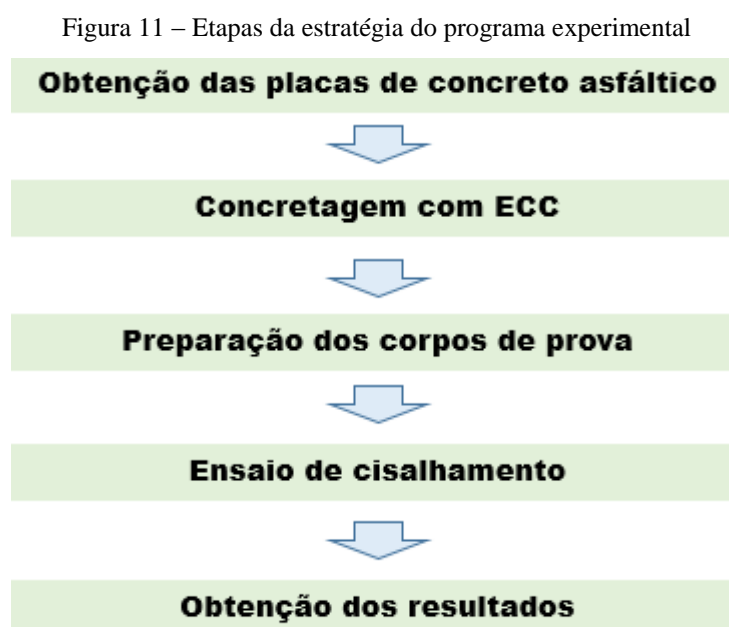
Em resumo, o estudo da aderência entre os materiais de recapeamento e o pavimento existente é fundamental para garantir um adequado comportamento mecânico de pavimentos compostos. Portanto, é necessário estudar as propriedades dos materiais em recente evolução como o ECC. Tendo como referência a metodologia do ensaio de cisalhamento estático criado por Fortes (1999), esta pesquisa irá avaliar a resistência ao cisalhamento entre as camadas de concreto asfáltico e ECC.

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo descreve as etapas do programa experimental montado para atingir o objetivo principal deste trabalho. Entre os processos abordados consta a estratégia do programa experimental, a descrição dos materiais empregados na produção do ECC, a preparação dos corpos de prova e, por fim, o ensaio de cisalhamento realizado para obter os resultados.

5.1 ESTRATÉGIA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

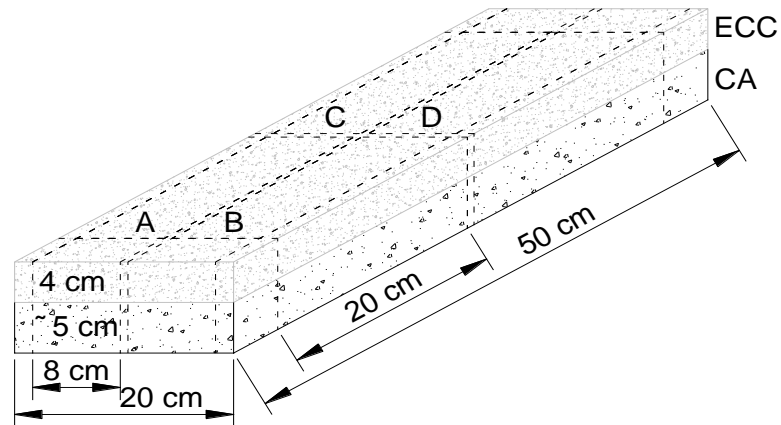
A estratégia de pesquisa foi fundamentada através de diversos estudos referentes ao assunto. A definição dos materiais que seriam empregados na produção do ECC bem como o traço adotado baseou-se nos estudos de Righi (2015) e Muñoz-Rodríguez (em fase de elaboração)¹. Já a modelagem dos corpos de prova e o ensaio de cisalhamento entre os materiais baseou-se nos estudos de Fortes (1999). As etapas da estratégia do programa experimental são apresentadas na figura 11.



(fonte: elaborado pelo autor)

Para a obtenção dos corpos de prova cada placa, de 200 mm x 500 mm, passa por cortes conforme é apresentado na figura 12 com o objetivo de obter 4 peças cada placa com dimensões de 80 mm x 200 mm. Posteriormente 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.

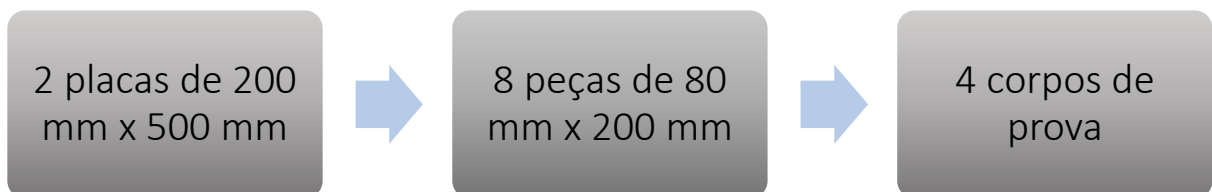
Figura 12 – Croqui dos cortes para cada placa



(fonte: Adaptado de FORTES, 1999 apud MUÑOZ-RODRÍGUEZ (em fase de elaboração)¹)

O objetivo é verificar a resistência ao cisalhamento entre a interface das placas de CA e ECC sem nenhum tratamento específico entre as mesmas, ou seja, apenas com a lavagem da placa de CA. Para atingir resultados significativos será analisado o resultado de 4 corpos de provas constituídos dos mesmos procedimentos de preparação conforme a relação da figura 13.

Figura 13 – Relação para a obtenção dos corpos de prova

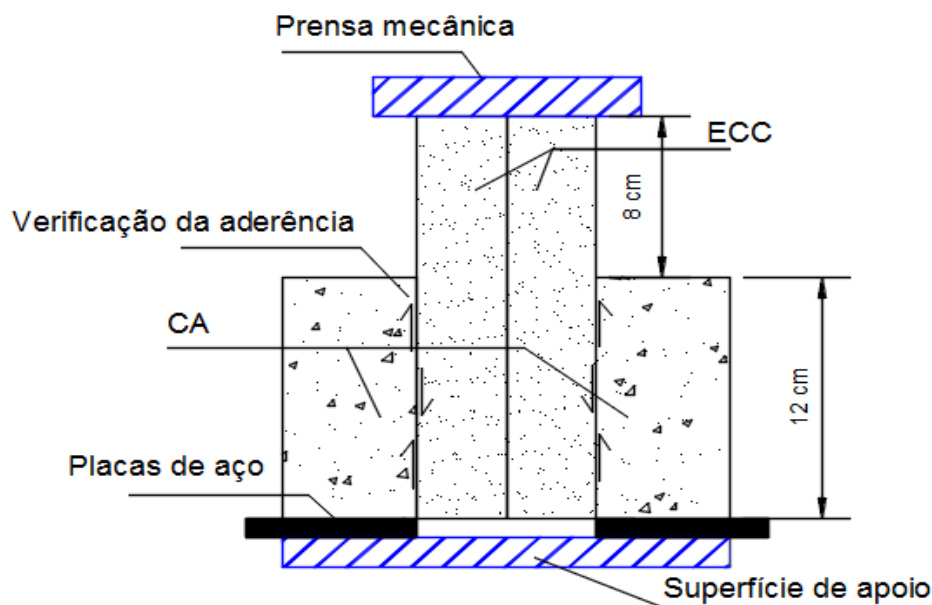


(fonte: elaborado pelo autor)

O processo final, antes do ensaio, consiste na conformação dos corpos de prova através de alguns ajustes nas placas de CA e uma verificação no plano de contato entre o corpo de prova e a prensa mecânica. Além disso, são necessárias duas placas de aço para apoiar o corpo de

prova na superfície onde é aplicada a carga de ruptura. O esquema final de um corpo de prova antes do ensaio é apresentado na figura 14.

Figura 14 – Esquema do corpo de prova para o ensaio de aderência



(fonte: adaptado de FORTES, 1999)

5.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Neste item são apresentadas as características básicas dos materiais utilizados no programa experimental. Para que o desenvolvimento do ensaio atinja níveis satisfatórios e eficazes, é fundamental a correta escolha dos materiais adotados na produção do compósito cimentício.

5.2.1 Cimento

O cimento utilizado neste trabalho foi o CP V-ARI da marca CAUÊ disponível no LEME, fornecido pela empresa Cimpasso. Segundo a NBR 5733 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991, p. 2) este tipo de cimento é de elevada resistência inicial, sendo o nome ARI designado a cimentos com alta resistência desde os 7 dias. A tabela 2, disponibilizada pela empresa, apresenta uma comparação entre as resistências à compressão nas idades iniciais de concretos com uso de cimento CP V – ARI, com cimento comum e valores mínimos solicitados pela Norma. A figura 15 apresenta o cimento utilizado na produção do ECC.

Tabela 2: Comparação das resistências a compressão

Resistências mecânicas à compressão (MPa)				
Idades	24h	3 dias	7 dias	28 dias
Cauê Estrutura	26,5	40,5	46,2	54,2
Cimento Comum	11	26	31,2	39
Norma NBR 5733	>14,0	>25,0	>34,0	-

(fonte: site do fabricante)

Figura 15 – Cimento CP V- ARI utilizado

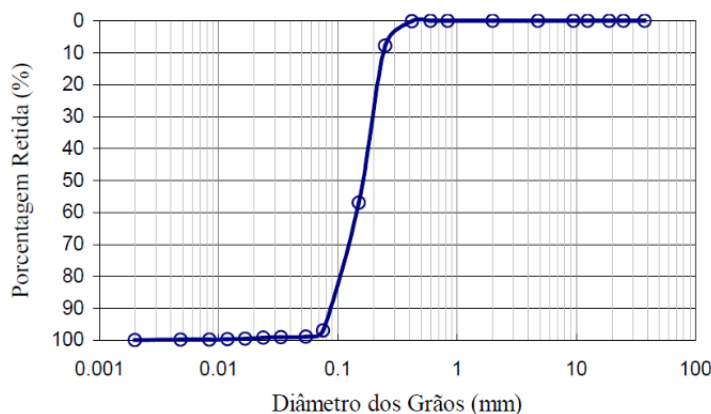


(fonte: foto do autor)

5.2.2 Agregados

Conforme já mencionado no capítulo 3, o ECC é produzido apenas com agregados miúdos. O tamanho do agregado influencia no comportamento da fibra na matriz e portando a utilização de agregados graúdos prejudicaria o desempenho do compósito. É proposto neste trabalho a utilização da areia de Osório, com curva granulométrica apresentada na figura 16, estudada por Casagrande (2005), disponível no LEME e bastante parecida com a areia utilizada por Garcez (2009) em sua pesquisa. A figura 17 apresenta o agregado miúdo utilizado, tratando-se de uma areia fina, limpa e homogênea.

Figura 16: Curva granulométrica da areia de Osório utilizada neste trabalho



(fonte: CASAGRANDE, 2005 apud MUÑOZ-RODRÍGUEZ (em fase de elaboração)¹)

Figura 17 – Agregado miúdo utilizado no ECC



(fonte: foto do autor)

5.2.3 Fibras de Polipropileno

De acordo com as pesquisas desenvolvidas no LEME, tem se obtido resultados satisfatórios com o emprego deste tipo de fibra. As fibras de polipropileno se tornam uma excelente alternativa para a produção dos ECCs, pois além de terem um custo baixo em relação as fibras de PVA, possuem características específicas como aumento de resistência e ganho de eficiência no compósito. Neste trabalho escolheu-se as fibras de polipropileno de alta tenacidade produzidas e distribuídas pela empresa Brasilit-Saint Gobain, as quais têm suas propriedades apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades das fibras de polipropileno fornecidas pelo fabricante

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 à álcalis	Excelente

(fonte: GARCEZ, 2009)

Nos estudos realizados por Li (2003), Garcez (2009) e Righi (2015) foi avaliado que a porcentagem de 2% de fibras de polipropileno em relação ao volume total do compósito apresenta os resultados melhores resultados na preparação do ECC. Esta porcentagem de fibras foi adotada neste trabalho. Na figura 18 são apresentadas as fibras de polipropileno utilizadas.

Figura 18 – Fibras de polipropileno utilizadas no ECC



(fonte: foto do autor)

5.2.4 Aditivo

Com o objetivo de proporcionar trabalhabilidade nas misturas e facilitar a dispersão das fibras, sem que fosse necessário aumentar a relação água/cimento, empregou-se o aditivo superplastificante TEC FLOW 8000 da marca Grace. Este aditivo é desenvolvido para concretos de alto desempenho e entre seus benefícios destaca-se a redução acentuada de água

para atingir a mesma consistência de amassamento, o aumento da fluidez e o aumento da coesão do concreto.

5.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A preparação dos corpos de prova consistiu em várias etapas. Primeiramente escolheu-se as placas de concreto asfáltico, preparou-se o ECC e efetuou-se a concretagem das fôrmas. Posteriormente, após a cura das placas, realizou-se a moldagem dos corpos de prova com a realização de cortes, colagem com epóxi e ajustes finais, conforme apresentado na estratégia de pesquisa. Toda as etapas de preparação dos corpos de prova são descritas nos itens abaixo.

5.3.1 Cortes das placas de concreto asfáltico

O processo para preparação dos corpos de prova iniciou-se com a remoção das placas de concreto asfáltico, com dimensões de 200 mm x 500 mm, da pista de pavimentos existente no LAPAV. Com uma serra circular realizou-se o corte deste material até alcançar a base granular. Após, com a ajuda de uma enxada, as placas foram extraídas da pista e, em seguida, efetuou-se uma limpeza inicial com a remoção de material granular que apresentava irregularidades na parte inferior das placas. A figura 19 apresenta o local onde as placas foram retiradas.

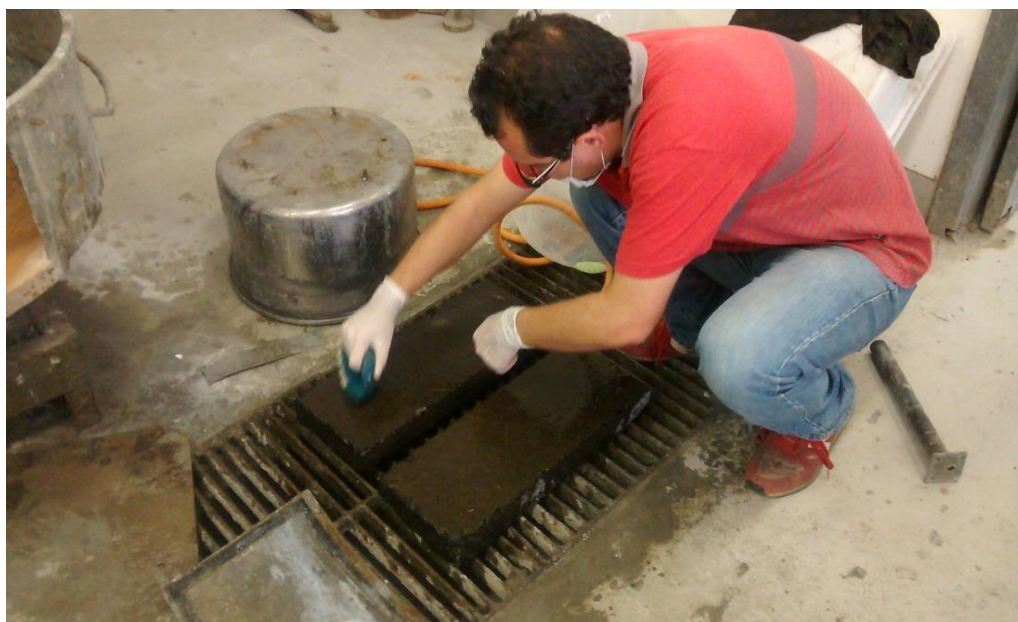
Figura 19 – Local da extração das placas de concreto asfáltico (LAPAV-UFRGS)



(fonte: foto do autor)

Após a extração das placas foi preciso limpar a superfície das mesmas, para isso utilizou-se um esfregão e lavou-se as placas com água para retirar todas as sujeiras da superfície. O objetivo era a eliminação da poeira, óleos ou outros tipos de contaminantes que pudessem prejudicar a aderência do recapeamento. Não foi usado nenhum produto químico para melhorar a aderência como resinas tipo epóxi ou procedimentos de fresagem da superfície. O objetivo principal da experiência era a verificação da capacidade de aderência entre os materiais, no caso o concreto asfáltico e o ECC, então a limpeza da superfície de contato entre os materiais tornava-se importante. A figura 20 apresenta o processo de limpeza das placas.

Foto 20 – Limpeza da superfície das placas de concreto asfáltico



(fonte: foto do autor)

5.3.2 Preparação do ECC

A preparação consistiu na determinação do traço utilizado no ECC, os procedimentos adotados de mistura e produção do compósito, além de verificar o índice de consistência do concreto através do ensaio de trabalhabilidade.

5.3.2.1 Dosagem e produção do ECC

Para a definição do traço a ser empregado baseou-se em estudos realizados no LEME no processo de desenvolvimento do ECC. O traço referência apresentado na tabela 4 foi desenvolvido por Righi (2015) e também é usado por Muñoz-Rodríguez (em fase de

elaboração)¹ em sua tese de doutorado. Neste traço, verifica-se a porcentagem de fibras de polipropileno que apresenta o melhor desempenho final do compósito, ou seja, em torno de 2% em relação ao volume total da mistura.

Tabela 4 – Traço desenvolvido no estudo

Traço Referência			
Componentes	Massa específica (g/cm³)	Proporção	Massa (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
Fibra de PP	0,9	0,018	34

(fonte: Righi, 2015)

De posse do traço de referência e da escolha dos materiais adotados iniciou-se a preparação do ECC que pode ser observado na sequência da figura 21. A mistura dos materiais aconteceu através de um (a) misturador mecânico para argamassas. Primeiramente misturou-se os (b) materiais secos (cimento e areia), em torno de 2 minutos, até adquirir uma mistura uniforme, e em seguida adicionou-se a água e o aditivo plastificante (c). Por fim, após verificar homogeneidade entre os materiais, começou-se a inserir as fibras de polipropileno separando-as manualmente. Após a colocação de todas as fibras, aumentou-se a velocidade do misturador e a mesma foi mantida entre 3 a 5 minutos a fim de obter a completa dispersão das fibras (d).

Figura 21 – Preparação do ECC (a) misturador usado no trabalho; (b) mistura dos materiais secos; (c) mistura após a adição de água e aditivo (d) mistura após a adição das fibras de polipropileno



(fonte: fotos do autor)

5.3.2.2 Ensaio de trabalhabilidade

A trabalhabilidade é tradicionalmente definida como o comportamento do concreto em seu estado fresco, não correspondendo a uma propriedade intrínseca do material. Segundo Castro (2007, p. 54), os principais fatores que influenciam diretamente a trabalhabilidade são:

- a) o tempo de mistura;

- b) as propriedades e as características dos materiais empregados;
- c) a adição de qualquer mineral em substituição ao cimento;
- d) a ocorrência de reações químicas;
- e) as proporções relativas dos materiais que constituem a mistura.

Como já comentado no item 3.3.1 deste trabalho, a adição de fibras de polipropileno influencia na trabalhabilidade da mistura reduzindo-a consideravelmente. A concentração de fibras no concreto é diretamente relacionada com a perda da trabalhabilidade, por isso, foi necessário determinar o índice de consistência do concreto logo após a sua preparação. O *flow table* é uma medida para avaliar a trabalhabilidade do traço desenvolvido.

O método *flow table* consiste na moldagem do concreto no estado fresco, logo após a preparação no misturador mecânico, em um cone de aço com 125 mm de diâmetro inferior e 80 de diâmetro superior. Este cone é apoiado em uma mesa circular com 500 mm de diâmetro, e que possui uma haste em seu centro onde é fixada em uma guia que gera rotações, movimentos ascendentes que transmitem energia a mistura. O equipamento utilizado no ensaio é apresentado na figura 22(a).

Para a realização do ensaio seguiu-se as indicações da norma ASTM C 1437-13. Esta norma estabelece que as superfícies dos equipamentos devem estar limpas e secas para o início da colocação do concreto. É utilizado um cone de aço disposto no centro de uma mesa giratória, o material é disposto por camadas de aproximadamente 2,5 cm e com a ajuda de um bastão metálico são aplicados 20 golpes (sem aplicar pressão, somente com o peso do bastão), uma vez cheio o cone de material e nivelado e limpa a mesa, por 1 minuto é deixado o material em repouso, posteriormente é retirado o cone e aplicados 25 golpes em 15 segundos, com ajuda de um paquímetro são medidos 4 diâmetros. A figura 22(b) apresenta um dos ensaios logo após a aplicação dos golpes na mesa.

Figura 22 – (a) modelo da *flow table* utilizado no ensaio e (b) resultado de um ensaio de avaliação da trabalhabilidade do concreto



(fonte: fotos do autor)

Os resultados são disponibilizados em termos da unidade *flow table*, calculada através da fórmula 1 como a relação entre o fator A e o diâmetro inferior do cone multiplicada por 100, sendo A calculada como a diferença entre o diâmetro médio e o diâmetro inferior do cone. Os resultados são apresentados na tabela 5.

$$Flow\ table = \left(\frac{A}{diâmetro\ inferior\ do\ cone} \right) \times 100 \quad (fórmula\ 1)$$

Sendo:

A: diâmetro médio - diâmetro inferior do cone [cm];

Tabela 5: Resultados do *flow table* das misturas

Designação	Diâmetro médio (cm)	<i>Flow table</i>
Placa 1 - etapa 1	21,38	71,0
Placa 1 - etapa 2	21,63	73,0
Placa 2 - etapa 1	21,63	73,0
Placa 2 - etapa 2	22,13	77,0

(fonte: elaborado pelo autor)

5.3.3 Moldagem dos corpos de prova

Neste item são descritos os passos de moldagem dos corpos de prova. De posse das placas asfálticas iniciou-se a concretagem das fôrmas através do ECC. Após o período de cura do composto efetuou-se os cortes das placas e a junção das peças através de resina epóxi. Ao final realizou-se ajustes para facilitar o ensaio de cisalhamento.

5.3.3.1 Concretagem

O processo de concretagem iniciou-se com o preparo das fôrmas de madeira com dimensões internas de 200 mm x 500 mm. Foi necessário verificar o nivelamento da parte inferior das placas asfálticas com a base da fôrma para garantir o perfeito alinhamento entre os materiais. Além disso, antes da concretagem toda a superfície interna da fôrma foi imprimada com óleo para facilitar o processo da desforma. A figura 23 mostra uma fôrma com a placa de concreto asfáltico momentos antes da concretagem.

Figura 23 – Fôrma com a placa de concreto asfáltico



(fonte: foto do autor)

Para a concretagem foram necessárias duas etapas de preparação do ECC para cada fôrma pois o misturador mecânico tinha capacidade para um volume de concreto em torno de 2 litros, enquanto as fôrmas necessitavam de aproximadamente 3,5 litros. O processo de preparação do

ECC foi apresentado no item 5.3.2. A figura 24 apresenta o ECC sendo colocado em uma das fôrmas.

Figura 24 – Concretagem do ECC



(fonte: foto do autor)

Terminada a concretagem colocou-se as placas em uma mesa vibratória com o objetivo de reduzir o ar e acomodar o compósito até ocorrer o espalhamento completo ao longo das fôrmas. Para regularizar a superfície e dar acabamento final utilizou-se uma desempenadeira lisa. A figura 25 apresenta a utilização da mesa vibratória e o acabamento final de uma das fôrmas.

Figura 25 – Utilização da mesa vibratória

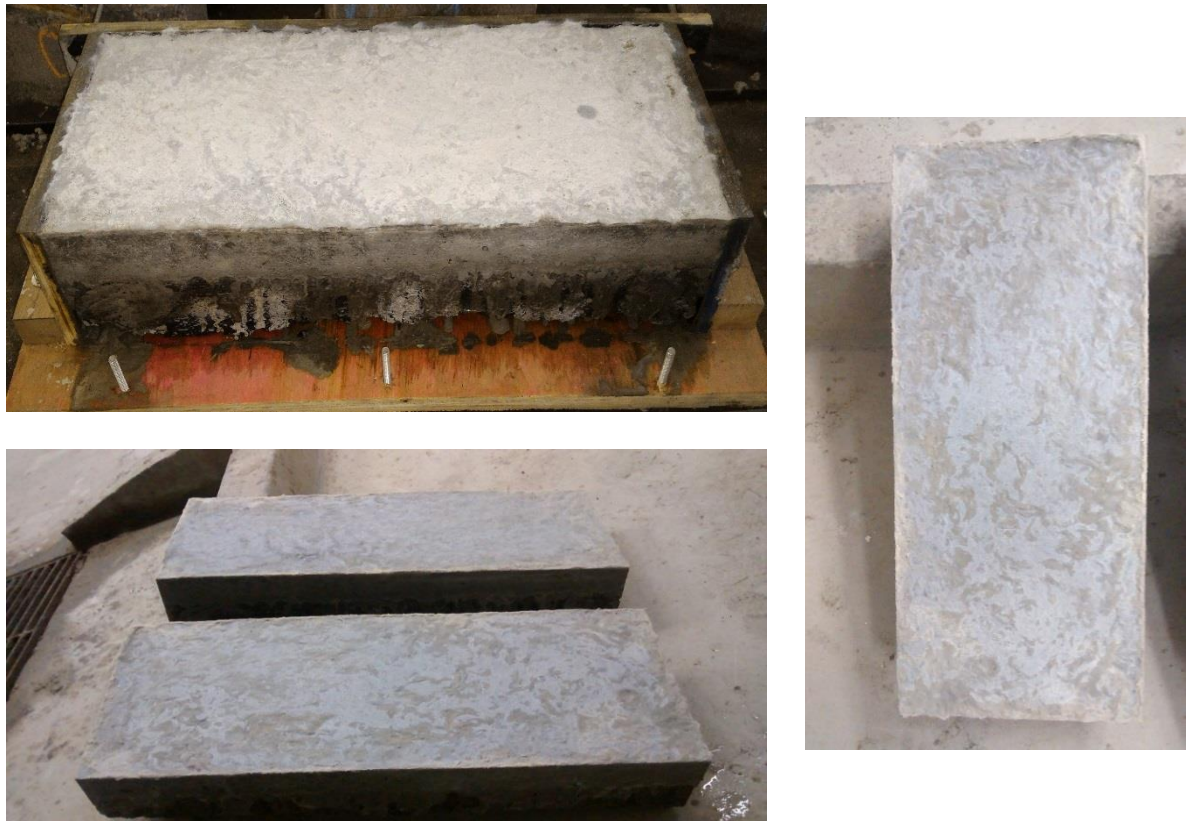


(fonte: próprio autor)

5.3.3.2 Cura

Após a concretagem, colocou-se as placas em uma câmara úmida com temperatura de aproximadamente 23°C e umidade relativa do ar superior a 95%. Após 24 horas, realizou-se a desforma e em seguida colocou-se as placas em uma bandeja com água, onde as mesmas foram mantidas úmidas por aproximadamente 50 dias. Na figura 26 são apresentadas as placas logo após serem retiradas da câmara úmida.

Figura 26 – Placas após o tempo de cura

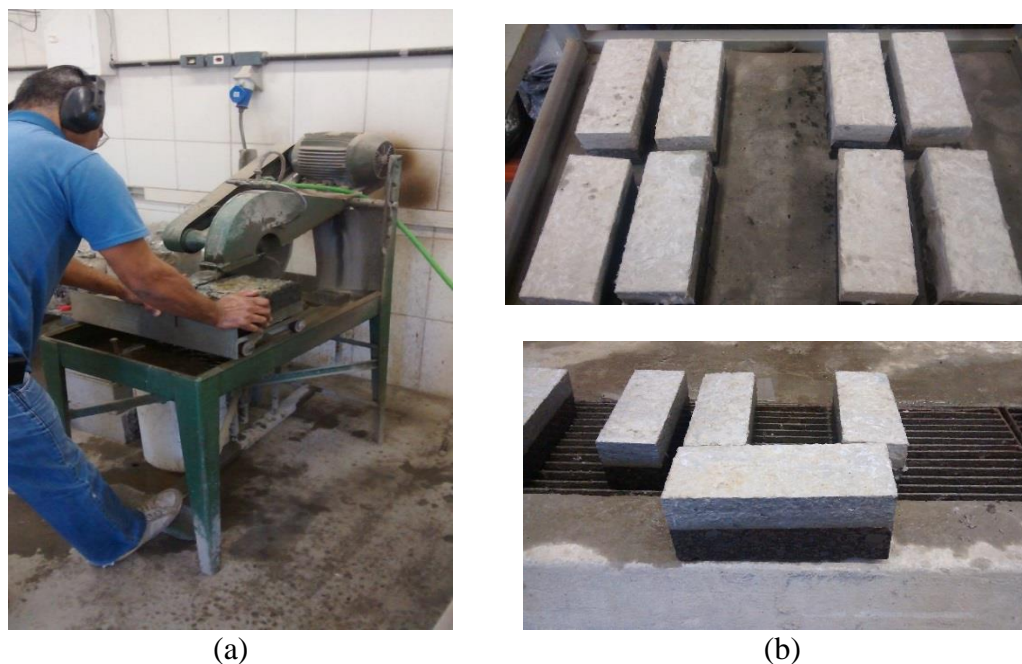


(fonte: foto do autor)

5.3.3.3 Corte das placas

O corte das placas foi realizado com uma serra circular especial para concretos. Os cortes seguiram o padrão apresentado na estratégia do programa experimental deste capítulo e tiveram como objetivo a obtenção de 4 peças de cada placa com dimensões de 80 mm x 200 mm. Com o intuito de se obter uniformidade e melhorar a estética entre as peças foi realizado cortes na base inferior das mesmas, ou seja, na placa de concreto asfáltico. Como resultado final todas as peças ficaram com altura de 80 mm sendo aproximadamente 40 mm de concreto asfáltico e 40 mm de ECC. A execução do corte das placas é apresentada na figura 27(a) e as peças resultantes nas figuras 27(b).

Figura 27 – (a) corte das placas e (b) peças após o corte das placas



(fonte: foto do autor)

5.3.3.4 Obtenção dos corpos de prova

Com o objetivo de obter os corpos de prova as peças foram coladas com resina epóxi duas a duas. A resina usada para a junção dos corpos de prova foi da marca Compound Adesivo produzido pela empresa Vedacit impermeabilizantes. Esta resina é de média viscosidade e atinge altas resistências em baixas idades, proporcionando alto rendimento e excelente aderência em concretos. Segundo o fabricante em 7 dias a resistência a compressão é de 69 MPa e a resistência de aderência chega a 4,72 MPa.

Inicialmente ocorreu o preparo do substrato onde houve uma breve limpeza nos locais em que seria aplicada a resina, com o objetivo de para eliminar o pó e oleosidade oriundos dos processos anteriores. Posteriormente iniciou-se o processo de colagem com resina epóxi que consistia em aplicar o produto na parte superior das peças, ou seja, nas superfícies do ECC, para em seguida, de duas a duas, as peças serem unidas conforme descrito na estratégia do programa experimental. A figura 28 apresenta as peças sendo coladas.

Figura 28 – Processo de colagem dos corpos de prova com resina epóxi



(fonte: foto do autor)

5.3.3.5 Ajustes finais nos corpos de prova

Esperou-se 7 dias para que a resina adquirisse sua máxima resistência e logo após efetuou-se alguns ajustes finais nos corpos de prova. O processo consistiu em cortes transversais nas placas de concreto asfáltico em ambos os lados dos corpos de prova com o objetivo de adquirir a forma desejada para a realização do ensaio. Retirou-se 80 mm de concreto asfáltico de cada lado do corpo de prova através de uma serra circular e com a ajuda de uma prensa para comprimir o material até a descolagem sem prejudicar as outras partes. Na figura 29 é apresentado o estado final dos corpos de prova preparados para serem ensaiados.

Figura 29 – Corpos de prova para ensaio



(fonte: foto do autor)

5.4 ENSAIO DE CISALHAMENTO

A verificação da aderência procedeu-se através do ensaio de cisalhamento estático entre os corpos de prova moldados nas etapas anteriores. Esta metodologia de ensaio mostra-se vantajosa pelo fato da simplicidade dos equipamentos utilizados e pela credibilidade dos resultados. Neste item é descrito o equipamento utilizado, os procedimentos adotados para a correta avaliação da aderência e, por fim, a ruptura dos corpos de prova.

5.4.1 Apresentação do equipamento para ensaio

Os ensaios de aderência foram executados no LEME através de uma prensa Shimadzu modelo UFH 2000kN para ensaios à compressão. A figura 30 apresenta a máquina utilizada para o ensaio.

Figura 30 – Equipamento utilizado no ensaio



(fonte: foto do autor)

5.4.2 Procedimentos adotados no ensaio

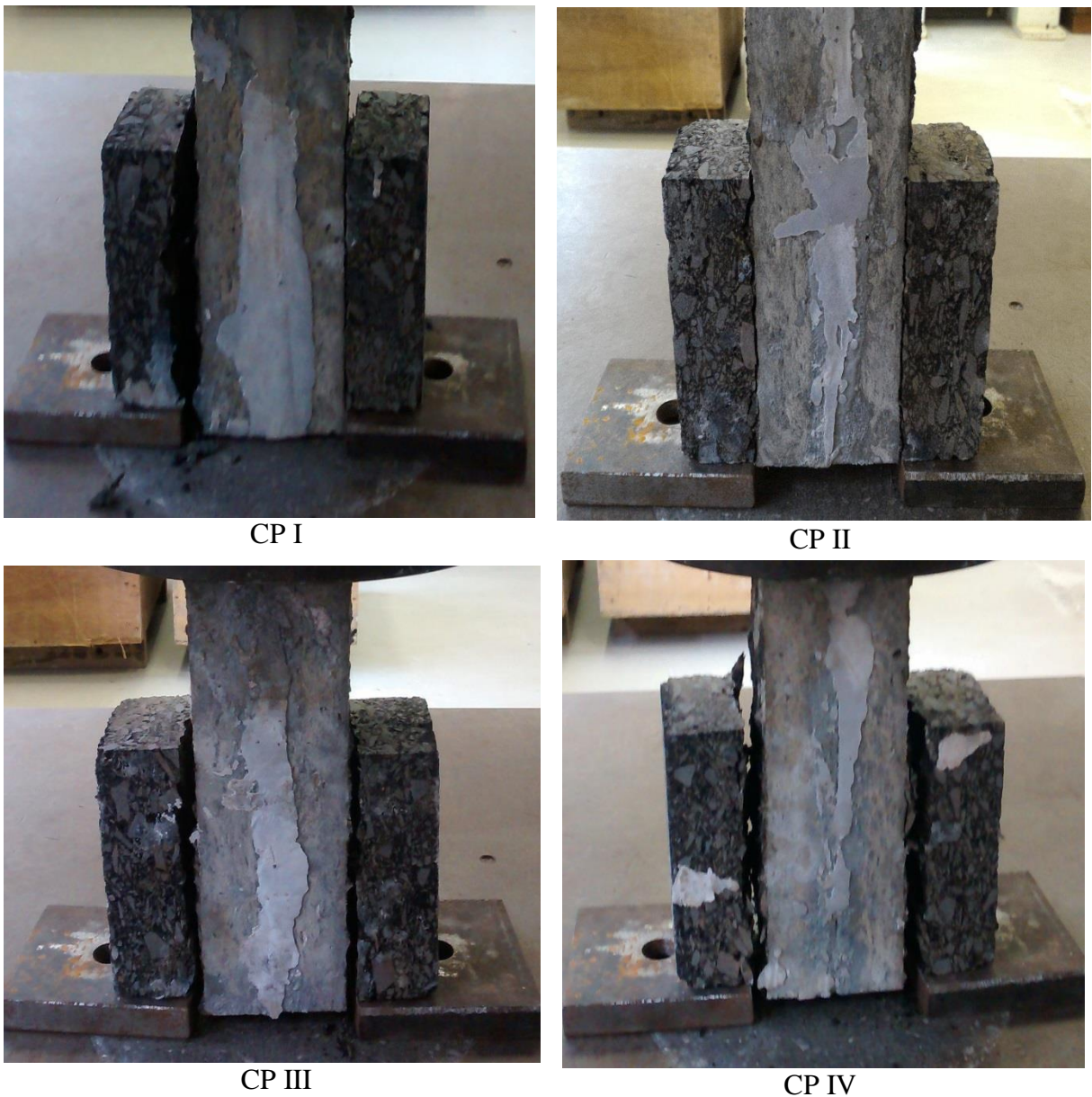
Antes de realizar os ensaios foi necessário verificar se as superfícies que estariam em contato com as placas de aço da prensa estavam devidamente planas, sem imperfeições oriundas das etapas anteriores. Esta verificação garantiu a correta aplicação da carga axial pois fez com que as superfícies capeadas ficassem perpendiculares à lateral do corpo de prova. Além disso utilizou-se duas placas de aço para o apoio e o posicionamento correto do corpo de prova na prensa.

Os corpos de prova foram ensaiados em compressão com o controle da velocidade de aplicação da carga equivalente a 1665 N/s, conforme a metodologia de Fortes (1999).

5.4.3 Ruptura dos corpos de prova

Tomadas todas as providências necessárias iniciou-se os ensaios. Os corpos de prova foram ensaiados em sequência aplicando a carga até a ruptura. O momento da falha nos corpos de prova é apresentado na figura 31, e a ruptura dos mesmos é apresentada na figura 32.

Figura 31 – Momento da falha nos corpos de prova

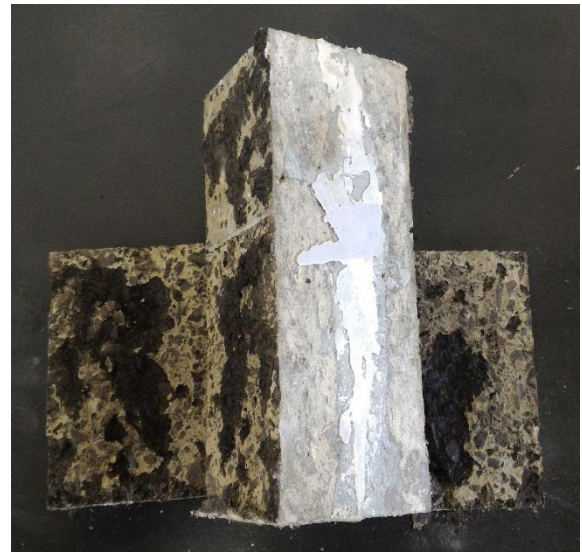


(fonte: foto do autor)

Figura 32 – Ruptura dos corpos de prova



CP I



CP II



CP III



CP IV

(fonte: fotos do autor)

Através da carga de ruptura e a área de ruptura chega-se a resistência ao cisalhamento através da fórmula 2.

$$\tau_{rup} = P_{rup}/A \quad (\text{fórmula 2})$$

Sendo:

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

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

A: área das seções de ruptura [m²].

6 APRESENTAÇÃO E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Este capítulo concentra o desfecho deste trabalho através da apresentação dos resultados quanto a resistência ao cisalhamento entre as camadas de CA e ECC. Além disso, é feita uma comparação de resultados com os resultados obtidos por Fortes (1999) entre camadas de CA e CCP, e o ensaio de arrancamento (*pull off test*).

A tabela 6 apresenta os resultados encontrados no ensaio de cisalhamento realizado, neste trabalho, entre as camadas de CA e o ECC. Os corpos de prova foram preparados sem nenhum tratamento entre a interface das placas conforme apresentado no capítulo 5. Como resultado foi encontrada uma tensão de ruptura média de 949 kPa com desvio padrão de 85 kPa.

Tabela 6 – Resultados obtidos no ensaio de cisalhamento entre o CA e o ECC

Corpo de prova	Área da interface 1 (cm ²)	Área da interface 2 (cm ²)	Área total (m ²)	Carga aplicada (KN)	Tensão de ruptura (KPa)
CP 1	97,430	96,357	0,01938	20,8	1073,3
CP2	93,773	96,960	0,01907	16,8	880,8
CP3	93,370	91,415	0,01848	16,8	909,1
CP4	93,455	97,273	0,01907	17,8	933,2
Média					949,1
Desvio padrão					85,5

(fonte: elaborado pelo autor)

Já a tabela 7 apresenta os resultados obtidos no ensaio de cisalhamento estático entre camadas de CA e CCP realizados por Fortes (1999). Em seus ensaios o tratamento da interface das placas foi levado em conta para as análises dos resultados. Foram feitos corpos de prova sem nenhum tratamento, com dois tipos de fresagem e utilizando resina epóxi para tratamento na interface. Para os corpos de prova que não receberam nenhum tipo de tratamento a tensão de ruptura média por cisalhamento foi de 1637 kPa. No tratamento com fresagem notou-se aumento nas tensões de cisalhamento de cerca de 14% e em tratamento com resina epóxi aumento de cerca de 40% em relação as interfaces sem tratamento.

Tabela 7 – Resultados obtidos no ensaio de cisalhamento estático realizado por Fortes (1999)

Tipo de tratamento	Tensão de ruptura média (kPa)	Desvio padrão (kPa)	Número de CPs ensaiados	Laboratório
Nenhum tratamento	1637	427	4	LMR - PMI
Fresada manualmente	1647	132	8	LMR - PMI
Fresada com 1000 C	1868	299	16	LMR - PMI
Só resina	2540	148	6	LMR - PMI
Fresada mais resina	2616	402	6	LMR - PMI

(fonte: adaptada de FORTES, 1999, p. 181)

Analisando os resultados de Fortes (1999) verifica-se que a resina epóxi é uma boa ponte de aderência entre as camadas, no entanto, seu emprego do ponto de vista econômico se torna praticamente inviável. Partindo desta ideia é que o ensaio de cisalhamento apresentado neste trabalho verificou apenas a aderência sem nenhum tipo de tratamento entre as camadas do CA e do ECC. A fresagem do CA também podia ser uma alternativa em nosso estudo, porém, por apresentar pouco aumento de resistência ao cisalhamento, foi desprezada pois só aumentaria custos.

Visto que os procedimentos de preparação dos corpos de prova seguiram a metodologia desenvolvida por Fortes (1999), porém com camadas diferentes, a comparação dos resultados é uma boa maneira de analisar a eficiência do ensaio. O valor médio obtido no ensaio realizado neste trabalho quanto a resistência de ruptura por cisalhamento entre o CA/ECC foi de 949 kPa, resultado aproximadamente 40% menor quando comparado ao realizado por Fortes (1999) entre as camadas de CA/CCP.

Um fato a considerar é a questão do pequeno valor de desvio padrão entre os corpos de prova deste trabalho mostrando homogeneidade e garantia de que foram bem executados. Conforme já apresentado os valores entre o CA/ECC ficaram entre o intervalo de 880 kPa e 1073 kPa, com desvio padrão de 85 kPa enquanto que os valores entre o CA/CCP apresentaram um intervalo muito maior com valores entre 1210 kPa e 2064 kPa e desvio padrão de 427 kPa.

Entre alguns dos motivos que os valores de resistência entre o CA/ECC apresentaram resultados menos favoráveis que o CA/CCP está na escolha das placas de CA. Nos ensaios realizados por

Fortes (1999) as placas de CA foram moldadas em laboratório enquanto que as placas deste trabalho foram extraídas no campo, portanto, amostras menos homogêneas e muito mais sujeitas a falhas de execução na limpeza superficial. Com esta condição superficial do pavimento existente de CA extraído em campo, a análise da aderência entre as camadas é bem mais próxima de situações reais quanto a eficiência dos valores de resistência ao cisalhamento.

Um ensaio que apresentou resultados com amostras em campo foi o ensaio de arrancamento, também chamado de ensaio de *pull off test*, realizado por WU et al. (1998), onde obteve-se valores de resistência ao cisalhamento para CA/CCP na faixa de 280 kPa e 770 kPa. Os valores encontrados entre camadas de CA/ECC deste trabalho apresentaram praticamente o dobro da resistência quando comparado ao ensaio de *pull off test*, o que sugere que o ensaio de aderência proposto pode ser empregado com confiabilidade.

De maneira geral o ensaio de cisalhamento apresentado neste trabalho é bastante trabalhoso e envolve inúmeras variáveis exigindo, assim, bastante precisão na preparação dos corpos de prova e certos cuidados nas análises de resultados. Levando-se em conta os diversos fatores que podem interferir nos resultados, pode-se concluir que a questão da aderência entre o CA/ECC sem tratamento na interface das camadas apresenta resultados satisfatórios tornando o ECC um excelente material a ser aplicado em recapeamentos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento de novos materiais bem como sua correta aplicação no uso de recapeamentos está em constante evolução na área da pavimentação. Estudos de novas tecnologias que melhorem o desempenho dos concretos são importantes visto que o nível de exigência da qualidade dos pavimentos é cada vez maior.

Neste sentido, como apresentado no decorrer do trabalho, o ECC é um compósito cimentício de alto desempenho que surge como uma nova alternativa com possibilidades de ser empregada em projetos de recapeamento. Entre as vantagens destaca-se principalmente a questão de sua boa performance frente a concretos convencionais, sendo um bom material para se aplicar na reabilitação de pavimentos.

O foco deste trabalho, além de verificar a eficiência entre camadas de CA/ECC, foi o de apresentar a metodologia de preparação dos corpos de prova e realização do ensaio de cisalhamento. Esta forma para a obtenção das tensões de ruptura entre camadas quando bem executada mostra-se de grande eficiência para análise da aderência entre materiais de diferentes módulos de elasticidade. Mesmo sendo uma metodologia trabalhosa, a obtenção das tensões de cisalhamento é obtida através de um ensaio simples e de fácil execução.

Quanto a questão da aderência das camadas verificada através do ensaio de cisalhamento, a aplicação do ECC apenas com limpeza superficial da placa de CA mostrou resultados satisfatórios. Por ser o primeiro ensaio deste tipo com camadas de CA/ECC os resultados são passíveis de discussão visto que a literatura não apresenta muitos estudos referentes a esse assunto.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se fazer o mesmo tipo de ensaio verificando as tensões de cisalhamento entre o CA/ECC, no entanto, com a modificação do traço de ECC. Analisar os resultados com outros traços, como por exemplo a adição de cinza volante ou cinzas de cascas de arroz, é uma importante forma de poder comparar melhor a aderência deste compósito.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: cimento Portland com alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 13749**: revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **ASTM C1437-13**: Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar.

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

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 1. ed. (3. reimpr.). Rio de Janeiro: Petrobras, Abeda, 2006 (reimpr. 2010).

CASAGRANDE, É. Q. **Compósitos cimentícios reforçados com fibras de polipropileno e com adição de cinza volante**: estudo do desempenho em pavimentos de concreto. 2012. 78 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de 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**. Tese de Doutorado, Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CASTRO, A. L. **Aplicação de Conceitos Reológicos na Tecnologia dos Concretos de Alto Desempenho**. 2007. 320 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 005 – TER**: defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – terminologia. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **DNIT 061 – TER**: pavimentos rígidos – defeitos – terminologia. Rio de Janeiro, 2004.

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, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

GARCEZ, E. O. **Investigação do comportamento de *engineered cementitious composites* reforçados com fibras de polipropileno como material para recapeamento de pavimentos**. 2009. 176 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

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 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.

MEDINA, J. de.; MOTTA, L. M. G. da. **Mecânica dos pavimentos**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Imagemaker Interactive, 2005.

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.

PEREIRA DA COSTA, F. B. **Análise da Durabilidade dos Compósitos Cimentícios de Elevada Deformação Reforçados com Fibras**. Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

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**. Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

WU, C.; TARR, S. M.; ARDANI, A.; SHEEHAN, M. **Instrumental and Field Testing of Ultrathin Whitetopping Pavenment** – Paper presented for the TRB meeting of 1998, Washington D.C.