

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

Édina Quissini Casagrande

**COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS
DE POLIPROPILENO E COM ADIÇÃO DE CINZA
VOLANTE: ESTUDO DO DESEMPENHO EM PAVIMENTOS
DE CONCRETO**

Porto Alegre
dezembro 2012

ÉDINA QUISSINI CASAGRANDE

**COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS
DE POLIPROPILENO E COM ADIÇÃO DE CINZA
VOLANTE: ESTUDO DO DESEMPENHO EM PAVIMENTOS
DE CONCRETO**

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: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Coorientadora: Angela Graeff

Porto Alegre
dezembro 2012

ÉDINA QUISSINI CASAGRANDE

**COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS
DE POLIPROPILENO E COM ADIÇÃO DE CINZA
VOLANTE: ESTUDO DO DESEMPENHO EM PAVIMENTOS
DE CONCRETO**

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

Porto Alegre, dezembro de 2012

Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
PhD pela University of Leeds
Orientador

Angela Graeff
PhD pela University of Sheffield
Coorientadora

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

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

Profa. Estela Oliari Garcez (UFPeI)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Dedico este trabalho a meus pais, por todo apoio e incentivo não só no período da graduação, mas em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador professor Luiz Carlos Pinto da Silva Filho por toda ajuda, dedicação e conselhos durante o trabalho, por sempre demonstrar o quanto a inovação é necessária e estimulante.

Agradeço a minha coorientadora a doutora Ângela Graeff por todo o tempo dedicado ao trabalho, pela ajuda, conselhos e amizade, por sempre buscar a eficiência e instigar todos ao seu redor.

Agradeço a professora Carin Schmitt por todo o auxílio e dedicação para o aperfeiçoamento deste trabalho.

Agradeço ao engenheiro e mestrando Josué Chies por toda a ajuda, amizade não só no trabalho de conclusão, mas durante toda a faculdade.

Agradeço ao engenheiro e mestrando Vitor Perrone por todo o conhecimento cedido, pelo auxílio, pelas conversas e por disponibilizar seus resultados.

Agradeço a engenheira e doutoranda Vânia Peres por toda a ajuda e disponibilidade.

Agradeço ao bolsista Kássio Stein pelo comprometimento e amizade durante o trabalho.

Agradeço a toda a equipe do LEME, ao bolsista Wagner Ellwanger, ao Euripedes Martins Fontes e Edgar Wallace Pereira Lucas.

Agradeço a equipe da empresa Eletrobrás Furnas de Goiânia por ter cedido o equipamento para o ensaio de abrasão, especialmente ao engenheiro Alexandre Castro.

Agradeço a minha família que sempre me incentivaram nesta etapa, meus pais, meu irmão Douglas e minha cunhada Angélica.

Agradeço ao meu namorado Casemiro, por todo apoio e compreensão durante o desenvolvimento do trabalho de conclusão.

Agradeço aos meus grandes amigos Bruna Grochot, Lucas Schlatter, Tânia Torres, Tatiane Scaramussa pela ajuda e amizade neste ano.

Viver é como andar de bicicleta: é preciso estar em constante movimento para manter o equilíbrio.

Albert Einstein

RESUMO

O concreto é um dos materiais usados na execução de pavimentos. Por possuir alta resistência à compressão e um comportamento frágil resulta em uma baixa resistência à tração do mesmo. Vários materiais já foram estudados com o objetivo de reduzir o comportamento frágil do concreto. Um deles é a fibra de polipropileno, que caracteriza-se como um compósito cimentício, e já comprovou-se que seu uso aumenta a capacidade de deformação da estrutura. Diversas pesquisas verificaram que a adição de cinza volante potencializa o efeito da fibra na matriz cimentícia. Este trabalho tem como objetivo avaliar a adição de fibra de polipropileno e cinza volante em pavimentos de concreto. Em pesquisas anteriores foi criada uma nova classe de compósitos com uma redução do teor de fibra, cerca de 2% do volume total. Este tipo de compósito foi denominado *Engineered Cementitious Composites*. O traço estudado baseou-se na dissertação de mestrado de Perrone, porém foi alterada a relação entre água e os aglomerantes hidráulicos (cimento e cinza volante). O traço foi avaliado nos ensaios de flexão, de desgaste superficial por abrasão e de trabalhabilidade. Os ensaios de flexão foram analisados através de métodos distintos: método Perrone, método Garcez e o referente à ASTM C1399. No primeiro método, avaliou-se um aumento de 26% na capacidade de deflexão. Já no método Garcez, onde há uma zona de concentração de tensões, o ECC apresentou um módulo de ruptura à flexão de 5,36 MPa, e deflexão máxima de 6,64 mm, ambos inferiores aos resultados obtidos por Garcez. Os resultados do ensaio baseado na Norma ASTM C1399 não foram válidos, pois a primeira fissura não atingiu 0,2 mm, mesmo assim, realizou-se o ensaio e obteve-se o padrão de deformação, tendo uma resistência residual média (ARS) de 3,26 MPa. Já no ensaio de desgaste por abrasão, a superfície no final do ensaio apresentou-se sem grandes deteriorações, tendo somente 3,15% de perda de massa. Ao avaliar o índice de consistência da mistura pelo ensaio da *flow table* verificou-se que a coesão da mistura foi aceitável, possuindo uma boa trabalhabilidade. Constata-se que em todos os ensaios de flexão ocorreram os processos de múltiplas pequenas fissuras, conhecido como *strain hardening*. Desta forma, pode-se constatar que o ECC avaliado nesta pesquisa é uma potencial alternativa em pavimentos de concreto, visto que aumenta a capacidade de deformação preservando a vida útil do mesmo.

Palavras-chave: Compósito Cimentício com Fibra de Polipropileno. Cinza Volante em Concretos. Pavimentos de Concreto. Alta deformabilidade

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática para o delineamento da pesquisa	19
Figura 2 – Manifestações patológicas em trecho pavimentado com concreto na avenida Protásio Alves, Porto Alegre	22
Figura 3 – Fator de forma nas fibras	24
Figura 4 – Concentração de tensão num concreto sem e com fibras adicionadas	26
Figura 5 – Curva de tensão x deformação típica do SHCC	28
Figura 6 – Comparativo do processo de fissuração entre um concreto convencional e um ECC	28
Figura 7 – Exemplo do processo <i>self healing</i>	30
Figura 8 – Fibras de polipropileno de alta tenacidade adotadas na pesquisa	34
Figura 9 – Curva granulométrica da areia fina	37
Figura 10 – (a) misturador usado no trabalho e (b) mistura após a execução	39
Figura 11 – Causas físicas da deterioração do concreto	40
Figura 12 – Ensaios realizados na pesquisa	41
Figura 13 – Modelo genérico da <i>flow table</i> usada no ensaio	42
Figura 14 – Esquematização do ensaio de flexão: método Perrone	44
Figura 15 – Modelo adotado para o ensaio de flexão: método Perrone	44
Figura 16 – Modelo genérico do ensaio de flexão a quatro pontos	45
Figura 17 – Esquematização do ensaio de flexão a quatro pontos	46
Figura 18 – Modelo genérico do ensaio da Norma ASTM C1399	48
Figura 19 – Representação esquemática do ensaio Norma ASTM C1399.....	49
Figura 20 – Modelo genérico do gráfico gerado no ensaio ASTM C1399	50
Figura 21 – Equipamento utilizado no Método de Liu	51
Figura 22 – Modelo genérico do equipamento de ensaio de desgaste superficial por abrasão da empresa Eletrobrás Furnas	52
Figura 23 – Equipamentos adotados no ensaio de desgaste superficial por abrasão	53
Figura 24 – Compósito ECC no momento da retirada do cone de aço	55
Figura 25 – Compósito ECC no fim do ensaio de trabalhabilidade	55
Figura 26 – Tensão (MPa) x deslocamento no ponto de aplicação de carga (mm) obtido por Perrone	57
Figura 27 – Tensão na flexão (MPa) x deslocamento no ponto de aplicação de carga (mm) deste estudo	58
Figura 28 – Processo de múltipla fissuração durante a aplicação do carregamento	59
Figura 29 – Resistência à flexão (MPa)x deflexão (mm) do traço PPECC 1	60

Figura 30 – Resistência à flexão (MPa) x deflexão (mm) do traço PPECC 3	61
Figura 31 – Resistência à flexão (MPa) x deflexão (mm) do traço PPECC 5	61
Figura 32 – Resistência a flexão (MPa) x deflexão (mm)	63
Figura 33 – (a) corpo de prova no fim do ensaio e (b) superfícies laterais após o término do ensaio	64
Figura 34 – Resultado do corpo de prova 1 do ensaio da Norma ASTM C1399	65
Figura 35 – Resultado do corpo de prova 2 do ensaio da Norma ASTM C1399	66
Figura 36 – Resultado do corpo de prova 3 do ensaio da Norma ASTM C1399	66
Figura 37 – Resultado do corpo de prova 4 do ensaio da Norma ASTM C1399	67
Figura 38 – Processo de múltipla fissuração ocorrido no ensaio	67
Figura 39 – Resultados dos ensaios de desgaste superficial por abrasão	68
Figura 40 – (a) corpo de prova 1 antes de iniciar o ensaio (b) corpo de prova 1 ao completar 72 horas de ensaio	69
Figura 41 – (a) corpo de prova 2 antes de iniciar o ensaio (b) corpo de prova 2 ao completar 72 horas de ensaio	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de resistência mecânica à tração, deformações na ruptura e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibras e matrizes	23
Tabela 2 – Propriedades das fibras de polipropileno de alta tenacidade fornecidas pelo fabricante	34
Tabela 3 – Propriedades químicas e físicas das três classes dos materiais pozolânicos ..	35
Tabela 4 – Comparação das resistências mecânicas à compressão	36
Tabela 5 – Traço do ECC desenvolvido no estudo	38
Tabela 6 – Traços adotados por Garcez (2009) para os ensaios de flexão	47
Tabela 7 – Resumo dos resultados obtidos do ensaio de flexão de Perrone	57
Tabela 8 – Resumo dos resultados obtidos no ensaio do método Perrone	59
Tabela 9 – Módulo de ruptura à flexão e deflexão última dos compósitos estudados por Garcez (2009)	62
Tabela 10 – Módulo de ruptura à flexão e deflexão última dos corpos de prova ensaiados	62
Tabela 11 – Resultados obtidos nos ensaios da Norma ASTM C1399	65
Tabela 12 – Resumo dos dados obtidos no ensaio de desgaste superficial por abrasão ..	69

LISTA DE SIGLAS

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

ECC – *Engineered Cementitious Composites*

LEME – Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

LVDT – *Linear Voltage Differential Transducer*

MOR – Módulo de Ruptura

PVA – Álcool Polivinílico

SHCC – *Strain Hardening Cementitious Composites*

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma_{\text{máx}}$ – tensão máxima (MPa)

$\sigma_{\text{mín}}$ – tensão mínima (MPa)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	17
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	17
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	17
2.2.1 Objetivo Principal	17
2.2.2 Objetivos Secundários	17
2.3 HIPÓTESE	18
2.4 PRESSUPOSTO	18
2.5 PREMISA	18
2.6 DELIMITAÇÕES	18
2.7 LIMITAÇÕES	18
2.8 DELINEAMENTO	19
3 CONCRETO EM PAVIMENTOS	21
3.1 CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRAS	23
3.1.1 Propriedades das fibras	24
3.1.2 Interação fibra-matriz	25
3.2 <i>ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES (ECC)</i>	27
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL	32
4.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA	32
4.2 MATERIAIS ADOTADOS	33
4.2.1 Fibras de polipropileno	33
4.2.2 Cinza volante	34
4.2.3 Cimento	36
4.2.4 Aditivo	36
4.2.5 Agregados	36
4.3 DOSAGEM DO CONCRETO	37
4.4 EXECUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	39
4.5 ENSAIOS ADOTADOS	40
4.5.1 Ensaio de trabalhabilidade	41
4.5.2 Ensaio de Flexão	43
4.5.2.1 Ensaio de Flexão: método Perrone	43
4.5.2.2 Ensaio de Flexão: método Garcez	45
4.5.2.3 Ensaio de Flexão: ASTM C1399	48

4.5.3 Ensaio de desgaste superficial por abrasão	50
5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	54
5.1 ENSAIO DE TRABALHABILIDADE	54
5.2 ENSAIO DE FLEXÃO: MÉTODO PERRONE	56
5.3 ENSAIO DE FLEXÃO: MÉTODO GARCEZ	60
5.4 ENSAIO DE FLEXÃO: ASTM C1399	64
5.5 ENSAIO DE DESGASTE SUPERFICIAL POR ABRASÃO	68
6 CONCLUSÕES	71
REFERÊNCIAS	74
APÊNDICE A	76

1 INTRODUÇÃO

Material mais usado na indústria da construção civil, o concreto sempre ganhou destaque em sua utilização. Composto por uma pasta (cimento e água) que juntamente com um agregado miúdo transforma-se em argamassa e, somado a um agregado graúdo, gera o que se conhece como concreto convencional.

Um das propriedades de maior destaque do concreto é sua elevada resistência à compressão, entretanto possui baixa resistência à tração (da ordem de 10% da resistência à compressão). A baixa resistência à tração é normalmente contornada com a introdução de armaduras de aço no mesmo, formando assim o que se denomina de concreto armado.

Visando modificar o comportamento frágil do concreto sob aplicação de esforços de tração sem a presença de aço, muitas pesquisas foram realizadas adicionando vários tipos de materiais e compósitos ao concreto. Segundo Magalhães (2010, p. 1), nas últimas décadas, um número grande de materiais cimentícios reforçados com fibras foram desenvolvidos, tendo como objetivo aumentar a tenacidade, elevar a resistência ao impacto, retardando e controlando o processo de fissuras, fazendo com que a estrutura possua aberturas menores, aumentando assim sua durabilidade ao longo do tempo.

Entre os estudos realizados, o Grupo de Pesquisa do ACE-MRL (*Advanced Cementitious Materials – Materials Research Laboratory*) da Universidade de Michigan, nos Estados Unidos, desenvolveu uma categoria diferenciada de compósitos cimentícios de alto desempenho reforçados com fibras. Esta classe foi denominada de *Engineered Cementitious Composites – ECC*. Li (2003, p. 215, tradução nossa) descreve os ECC como compósitos cimentícios de alta ductilidade reforçados com fibras. Possuindo uma adição máxima de apenas 2% de fibras em relação ao volume total, esses compósitos foram projetados para resistir a altas tensões de tração e elevadas cargas de cisalhamento. Com uma alta ductilidade, estes compósitos têm uma grande capacidade de absorção de energia e de deformações sob carregamentos de tração, que são efeitos da capacidade de formação de diversas múltiplas fissuras com pequenas aberturas, que ocorrem durante o seu processo de ruptura.

As fibras de maior utilização são as de PVA e de polietileno, cuja comercialização, em grande escala, já é comum nos Estados Unidos. Garcez (2009, p. 76) afirma que as fibras mencionadas conseguiriam ser importadas para uso em pesquisas científicas, porém a importação torna-se um limitador na aplicação em estruturas reais, nas quais a quantidade necessária é muito maior.

Houve então uma busca por fibras produzidas e distribuídas nacionalmente, o que aumentaria as possibilidades de uma aplicação dos ECC em condições fora das pesquisas acadêmicas brasileiras. Um dos grupos de pesquisas dedicados a estudos de ECC no Brasil é o LEME (Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais) na UFRGS. Entre as diversas fibras que são estudadas nesse laboratório, adotou-se neste trabalho a fibra de polipropileno que já é fabricada e comercializada no Brasil. Hoje em dia busca-se a adição de cinza volante, um resíduo gerado da indústria termoelétrica, diminuindo assim a quantidade de cimento. A cinza aumenta a tenacidade do compósito e auxilia no desempenho da fibra.

Algumas pesquisas já foram desenvolvidas com esse tipo de compósito. Como exemplo, tem-se um estudo da aplicação deste material para recapeamento de pavimentos, desenvolvido por Garcez em 2009. Tendo em vista a possibilidade de aprimoramento dos *Engineered Cementitious Composites*, o presente trabalho visa a caracterização do desempenho dos compostos cimentícios reforçados com fibras de polipropileno. Foi feita uma análise do comportamento dos mesmos ao realizar os ensaios de flexão por três métodos distintos, nos quais se verificou o processo de propagação das fissuras, de desgaste de superfície, medindo a deterioração ocasionada ao aplicar abrasão nos corpos de prova e, por fim, de trabalhabilidade, avaliando o comportamento no estado fresco.

Além da introdução descrita acima, o trabalho apresenta-se em mais três capítulos. No segundo capítulo, consta o detalhamento do método de pesquisa, como o objetivo principal, as limitações e delimitações do estudo. O capítulo 3 descreve as principais características de uma matriz cimentícia reforçada com fibra, além de uma análise das propriedades mais importantes a serem analisadas nas fibras e na matriz e as interações necessárias, visando aprimorar o desempenho do concreto em pavimentos. Ainda no capítulo 3, são apresentados os estudos dos *Engineered Cementitious Composites* – ECC –, no qual destaca os atributos deste tipo de compósito.

O capítulo 4 traça todo o programa experimental, com a descrição de todos os materiais utilizados, os métodos de ensaios adotados e as adequações necessárias. O capítulo 5 expõe a análise e discussão dos resultados obtidos e, por fim, o capítulo 6 relata as conclusões da pesquisa, destacando as vantagens e melhorias da adição de fibra de polipropileno e de cinza volante em pavimentos de concreto.

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: frente aos resultados de pesquisas anteriores, são observadas melhorias no desempenho mecânico ao se fazer uso de compósitos cimentícios reforçados com fibras de polipropileno e com adição de cinza volante?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

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

2.2.1 Objetivo principal

Visando aumentar a durabilidade dos pavimentos de concreto, esse trabalho tem como objetivo principal a verificação do desempenho mecânico de concretos reforçados com fibras de polipropileno e com a substituição de parte do cimento por cinza volante aplicados em pavimentações comparativamente aos resultados de pesquisas realizadas anteriormente.

2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário do trabalho é realizar uma análise crítica do método de ensaio à flexão mais adequado para ECC estudado.

2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que, com a adição de fibras de polipropileno junto com cinza volante em pavimentos de concreto, observa-se um desempenho mecânico superior nos seguintes ensaios: de flexão: pelo método Perrone et al. (2012), Garcez (2009) e da Norma ASTM C1399; e de desgaste superficial por abrasão, frente aos resultados de pesquisas anteriores.

2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que a incorporação de fibras de polipropileno num teor em torno de 2% em relação ao volume do compósito, baseados na teoria dos ECC proposta por Li (2003) e nos estudos desenvolvidos por Garcez (2009), além da adição de 40% de cinza volante em relação à quantidade de cimento, resultam em desempenhos mecânicos satisfatórios, ainda que as referências utilizadas não tenham empregado a cinza volante com as mesmas especificações deste estudo.

2.5 PREMISSA

O trabalho tem como premissa que o estudo do emprego de novos materiais aos pavimentos de concreto é indispensável para melhorar o desempenho dos mesmos, quando submetidos às solicitações mecânicas, para diminuir o número e a gravidade das manifestações patológicas atualmente observadas, bem como para aumentar a vida útil das estruturas.

2.6 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo de compósitos cimentícios contendo 2% de fibras de polipropileno em relação ao volume total e 40% de cinza volante proporcionalmente a quantidade de cimento.

2.7 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) a realização dos seguintes ensaios: de trabalhabilidade, de flexão e de desgaste da superfície por abrasão;

- b) o emprego de um tipo de fibra de polipropileno fornecido pela empresa Brasilit-Saint Gobain e uma cinza volante de Classe C cedida pela Pozofly.

2.8 DELINEAMENTO

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

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) escolha dos procedimentos de ensaio;
- c) elaboração do programa experimental;
- d) realização dos experimentos;
- e) comparação dos resultados;
- f) análise final e conclusões.

Figura 1 – Representação esquemática para o delineamento da pesquisa



(fonte: elaborada pela autora)

Depois de definido o tema a ser desenvolvido, o primeiro passo foi a **pesquisa bibliográfica**, que teve como objetivo aprofundar o conhecimento teórico através de trabalhos já publicados, bem como livros e referências técnicas. Esta etapa estendeu-se durante todo o trabalho, visto que a atualização constante para o embasamento teórico é fundamental.

Após obter uma parcela da pesquisa bibliográfica concluída, iniciou-se a **escolha dos procedimentos de ensaio**, na qual foi realizada a verificação das normas estrangeiras a serem adotadas nos ensaios, bem como alguma possível adequação dos procedimentos utilizados. A **elaboração do programa experimental** teve como objetivo definir todas as variáveis a serem estudadas e a amostragem escolhida.

Definido todo o planejamento experimental, iniciou-se então a **realização dos experimentos**, a primeira parte prática do trabalho. Primeiramente, foram moldados os corpos de prova necessários e, após 28 dias, foram realizados os ensaios propostos. Assim, podendo-se realizar a **comparação dos resultados** obtidos entre si, junto com os resultados coletados de pesquisa bibliográfica, validando ou não a hipótese proposta.

Por fim, a última etapa consistiu na **análise final e conclusões** fazendo o encerramento do trabalho, verificando se os resultados adquiridos estão de acordo com a hipótese e os objetivos propostos.

3 CONCRETO EM PAVIMENTOS

Os pavimentos de rodovias podem ser classificados entre rígidos e flexíveis. De forma geral, os rígidos são compostos por placas de concreto. Já os flexíveis são os quais se usa cimento asfáltico como revestimento.

Até 1950, os pavimentos de concreto foram muito empregados no processo de urbanização das cidades em expansão no País, entre elas São Paulo e Recife. Porém, quando se instalou a primeira refinaria de petróleo, o cenário mudou, já que o cimento asfáltico não precisaria mais ser importado. Houve, então, um aumento de novos materiais com preços mais competitivos substituindo o concreto convencional (BALBO, 2005, p. 1297).

Hoje em dia, a situação é outra: devido ao mau dimensionamento dos pavimentos asfálticos e os excessos de carga aplicados nos mesmos, estes podem apresentar custos elevados de manutenção e diminuindo sua durabilidade no decorrer do tempo. Segundo Balbo (2005), os pavimentos de concreto podem ser uma boa opção, pois desenvolvem uma maior longevidade e uma manutenção de menor custo comparado com outros pavimentos. Ademais, são considerados como uma boa escolha para a utilização em rodovias com tráfego pesado, vias urbanas expressas e corredores de ônibus.

Os pavimentos de concreto são estruturas com tendência a apresentar manifestações patológicas devido a altos carregamentos cíclicos e às exposições ambientais agressivas, o que pode acabar deteriorando a estrutura do pavimento (GARCEZ, 2009, p. 1). Mesmo sendo o concreto um material com a maior aptidão para esse uso, ainda apresenta algumas restrições em suas propriedades, muitas vezes relacionadas com a sua má execução. A figura 2 demonstra manifestações patológicas de pavimentos de concreto localizados no corredor de ônibus da avenida Protásio Alves, em Porto Alegre. Estas patologias diminuem as condições de segurança, conforto e durabilidade do pavimento, resultando numa diminuição da vida útil.

Figura 2 – Manifestações patológicas em trecho pavimentado com concreto na avenida Protásio Alves, Porto Alegre



(fonte: fotos da autora)

Segundo Figueiredo (2005, p. 1197), o concreto apresenta uma alta resistência à compressão, porém uma baixa resistência quando submetidos a esforços de tração. Assim, o concreto acaba tornando-se um material com alta fragilidade, rompendo sem atingir grandes deformações. A baixa resistência do concreto simples à tração foi suprida pela introdução de armaduras de aço, o que define o concreto armado.

De acordo com a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), para o dimensionamento da seção resistente à tração da estrutura, considera-se para fins de cálculo somente a resistência do aço empregado, uma vez que a resistência à tração do concreto é tão irrelevante a ponto de poder ser desconsiderada, por questão de segurança. O uso do aço no concreto é muito comum na construção civil. Porém, a armadura pode apresentar problemas de deterioração como a corrosão, que pode diminuir a vida útil dessas estruturas.

Com o objetivo de proporcionar melhorias na resistência à tração do concreto, pesquisadores iniciaram o estudo da adição de fibras no mesmo. Caracterizado por ser um compósito (material que possui pelo menos duas fases distintas), o concreto com adição de fibras é conhecido como compósito cimentício reforçado com fibras. No próximo item são apresentadas as principais propriedades das fibras a serem analisadas. E, posteriormente, são abordados os *Engineered Cementitious Composites*, uma classe especial de compósitos cimentícios.

3.1 CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRAS

A reduzida capacidade do concreto de resistir a esforços de tração está diretamente vinculada a sua dificuldade de interromper a propagação das fissuras, por que o processo de fissuração acontece transversalmente à direção principal da tensão. Logo, a capacidade de carga da estrutura diminui a cada fissura desenvolvida no concreto.

O reforço com fibras adicionadas no concreto teve como objetivo principal controlar o seu processo de fissuração. Magalhães (2010, p. 1) afirma que as fibras aumentam a capacidade de absorção de energia e a resistência ao impacto, ocasionando assim uma diminuição do tamanho das aberturas das fissuras. Fissuras com aberturas grandes são uma porta de entrada para agentes deteriorantes da estrutura que diminuem a vida útil do pavimento.

Uma diversa gama de fibras já foi estudada como alternativa de reforço para concreto nas últimas décadas. Na tabela 1 verifica-se os valores de resistência mecânica à tração, de deformação na ruptura e do módulo de elasticidade para diversos tipos de fibras e matrizes. Com uma grande variedade de fibras estudadas, buscou-se a compreensão das propriedades das fibras juntamente com a interação fibra-matriz mais adequada para melhorar a eficiência dos materiais compósitos cimentados. Nos próximos itens são detalhadas essas principais propriedades necessárias para a caracterização da fibra.

Tabela 1 – Valores de resistência mecânica à tração, deformações na ruptura e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibras e matrizes

Material	Diâmetro (μm)	Densidade (g/cm^3)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	190-210	0,5-2,0	0,5-3,5
Vidro	9-15	2,60	70-80	2-4	2-3,5
Amianto	0,02-0,4	2,60	160-200	3-3,5	2-3
Polipropileno	20-200	0,9	1-7,7	0,5-0,75	8,0
Kevlar	10	1,45	65-133	3,6	2,1-4,0
Carbono	9	1,9	230	2,6	1,0
Nylon	-	1,1	4,0	0,9	13-15
Celulose	-	1,2	10	0,3-0,5	-
Acrílico	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3,0
Polietileno	-	0,95	0,3	0,7x10	10,0
Fibra de madeira	-	1,5	71	0,9	-
Sisal	10-50	1-50	-	0,8	3,0
Matriz de cimento	-	2,50	10-45	3,7	0,02

(fonte: BENTUR; MINDESS¹, 1990 apud FIGUEIREDO, 2005, p. 1198)

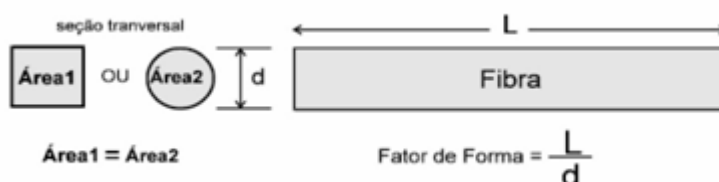
¹ BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. London: [s. n.], 1990.

3.1.1 Propriedades das fibras

O desempenho dos compósitos cimentados está relacionado diretamente às propriedades das fibras. Dentre as principais propriedades a serem analisadas estão a geometria, a aderência entre a fibra e a matriz e o teor da fibra.

A geometria da fibra influencia no desempenho pós-fissuração do concreto. Devido a diversos tamanhos e formatos, criou-se um parâmetro que melhor representa a geometria das fibras, denominado fator de forma. Na figura 3, encontra-se a relação de equivalência do fator de forma.

Figura 3 – Fator de forma nas fibras



(fonte: NUNES, 2006, p. 73)

O fator de forma é a razão entre o comprimento e o diâmetro da seção transversal da fibra. Fibras com comprimentos muito pequenos aumentam a chance de ocorrer o processo de arrancamento destas. Recomenda-se que tenham no mínimo o dobro da dimensão máxima do agregado, fazendo com que reforcem totalmente o concreto e não só a argamassa, trabalhando, assim, como uma ponte de transferência de tensões no concreto (FIGUEIREDO, 2005, p. 1201).

A aderência da fibra/matriz afeta diretamente na resistência, nas deformações ocorridas e no padrão de ruptura de uma estrutura. Uma boa aderência entre a fibra e a matriz leva ao aparecimento de fissuras com menor abertura.

Para um bom desempenho do compósito, o módulo de elasticidade da fibra tem que estar correlacionado diretamente com o da matriz. Por exemplo, um tipo de fibra com módulo de elasticidade baixo só absorverá as tensões numa matriz que tenha um módulo também baixo. Isto acontece, pois, caso a matriz tenha alto módulo, as tensões são absorvidas pela mesma e a fibra não teria nenhuma funcionalidade (FIGUEIREDO, 2005, p. 1197-1198). Na tabela 1, apresentada anteriormente, pode-se visualizar uma grande variação no módulo de elasticidade

das fibras apresentadas. Para cada tipo de fibra deve-se realizar uma análise de suas propriedades, visando uma otimização do seu desempenho.

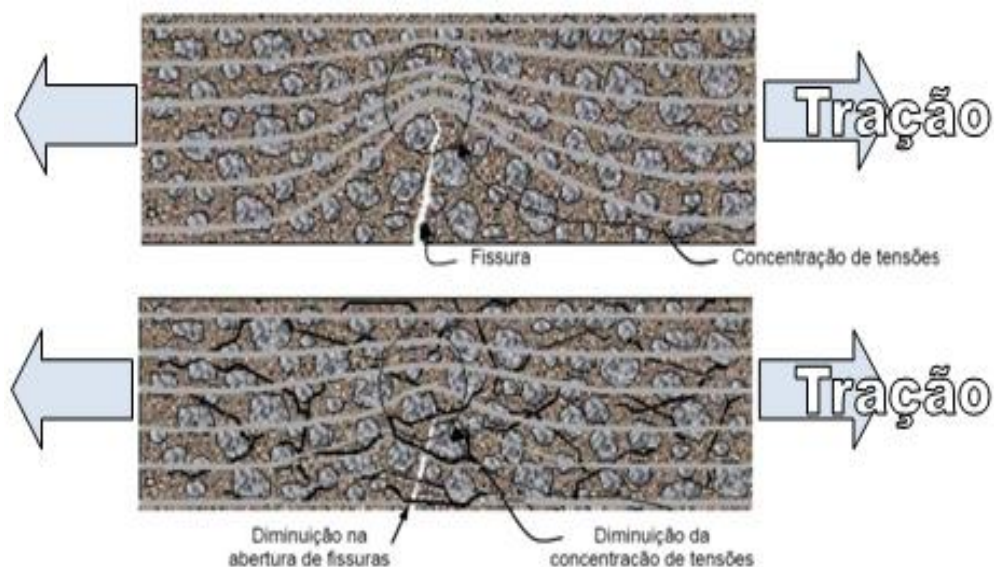
Um alto teor de fibras proporciona uma menor dimensão das fissuras e uma resistência mais elevada na pós-fissuração. Quanto mais fibras inseridas no compósito, maior será sua resistência à esforços de tração, pois maior será a absorção de energia por parte da fibra, aumentando assim as pontes de transferências de tensões entre a matriz e a fibra (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 438). Apesar disso, é importante lembrar que o teor de fibras influencia na trabalhabilidade da mistura: quanto mais fibras adicionadas na matriz, pior será a trabalhabilidade do concreto. Em qualquer tipo de fibra, a diminuição da trabalhabilidade é diretamente proporcional à sua quantidade no compósito. Segundo Figueiredo (2005, p. 1212), isso ocorre porque, quando se adiciona fibras no concreto, aumenta-se a área superficial, fazendo com que a mistura exija uma quantidade de água maior na dosagem. Além disso, quanto maior o teor de fibras, maior é o teor de água incorporado pela mistura, diminuindo a resistência do compósito.

3.1.2 Interação fibra-matriz

A variabilidade do concreto, juntamente com sua baixa resistência à tração, pode ocasionar o aparecimento de fissuração nas estruturas. As fissuras ocorrem de diversas formas, como por exemplo, devido à retração plástica térmica ou a algumas reações químicas do concreto nas suas primeiras idades (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007). Quando ocorre uma fissura num concreto simples, acaba-se criando um obstáculo para a distribuição de tensões ao longo da estrutura. Assim, geram-se pontos de concentração de tensão e, caso seja atingida a resistência máxima do material, ocorrerá a ruptura do material.

O uso das fibras minimiza consideravelmente o processo de fissuração, pois as mesmas se distribuem ao longo da matriz numa forma aleatória, causando uma dissipação da energia ao longo do concreto. Neste quesito, diferem-se da armadura de aço, pois as tensões se concentram ao longo da armadura, ao invés de se distribuírem por todo o compósito (FIGUEIREDO, 2005, p. 1198). Como pode ser observada na figura 4, esta forma aleatória de distribuição resulta numa melhora da resistência de todo o compósito, diminuindo a abertura das fissuras ao minimizar a concentração de tensões.

Figura 4 – Concentração de tensão num concreto sem e com fibras adicionadas



(fonte: adaptada de FIGUEIREDO, 2005, p. 1200)

Não basta obter um estudo das propriedades da fibra, junto com este processo é necessário verificar a interação entre a fibra adotada e determinada matriz. Como visto anteriormente, a matriz precisa ter comportamento semelhante ao da fibra. Um aspecto também importante é a consistência da matriz, pois esta afetará na aderência com a fibra, agindo de forma positiva ou negativa na resistência ao arrancamento e na própria dissipação de energia (FIGUEIREDO, 2005, p. 1199).

As pequenas fissuras no concreto fazem com que concretos reforçados com fibras sejam mais resistentes a agentes corrosivos. Primeiramente, a fissura, porta de entrada de agentes agressivos, é bem menor e, além disso, deve ser considerado que o concreto não possui armadura ou a reduz consideravelmente, o que pode eliminar o processo de corrosão em função da penetração de água e outros agentes agressivos.

Mesmo que não atinjam resistências tão elevadas, os compósitos com altos teores de fibras possuem uma melhoria considerável de ductilidade. Logo, os compósitos reforçados com fibras adquirem capacidade de deformação mais elevada, o que os favorecem quando submetidos à ação de esforços elevados de tração.

3.2 ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES (ECC)

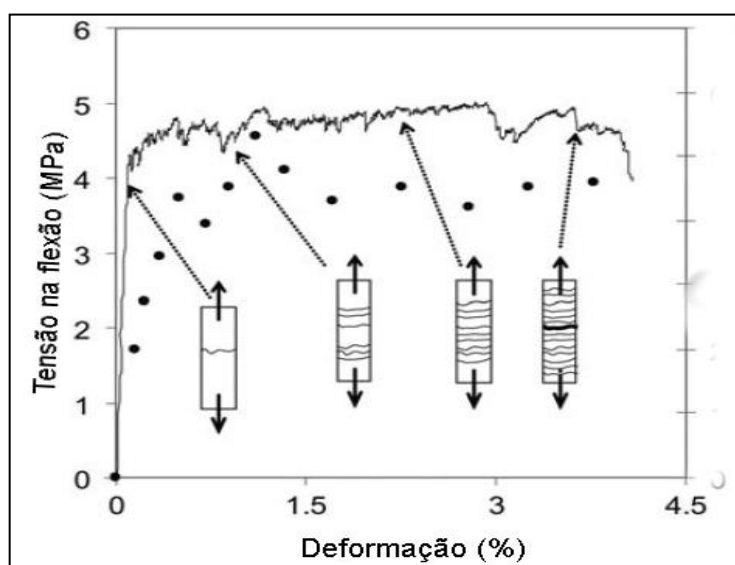
Buscando obter resultados mais promissores neste tipo de estudo, um grupo de pesquisas chamado ACE-MRL (*Advanced Cementitious Materials – Materials Research Laboratory*) na Universidade de Michigan, nos Estados Unidos, como citado anteriormente, desenvolveu um novo tipo de compósito cimentício com alto desempenho. Liderados pelo professor Victor Li, o grupo de pesquisa vem desenvolvendo estudos com baixos teores de fibras, o que é vantajoso para o compósito, pois assim reduziria o custo e facilitaria a trabalhabilidade da mistura. Li (2003, p. 215, tradução nossa) afirma que os ECC possuem uma adição máxima de 2% de fibras em relação ao volume total do compósito, porém estes compósitos foram projetados para resistir a altas tensões de tração e também a elevadas cargas de cisalhamento. Este efeito se deve à capacidade de formação de múltiplas fissuras.

Para obter um concreto muito deformável com esse pequeno volume de fibras, o grupo de pesquisa baseou-se nos princípios da micromecânica e da mecânica da fratura. Garcez (2009, p. 13) afirma que uma das características mais notáveis destes compósitos com baixos teores de fibras é a alta ductilidade que proporcionam à estrutura.

Mesmo não tendo resistências tão elevadas, os ECC apresentam uma alta capacidade de deformação pós-pico de carregamento. Este comportamento foi denominado *strain-hardening*, e gera o desenvolvimento de múltiplas microfissuras através de uma transferência de carregamentos entre as fibras existentes. Ao transferir a carga para a fibra esta carrega outro ponto da matriz, criando uma nova pequena fissura. Este repetitivo processo resulta numa alta ductilidade da estrutura, fazendo com que o concreto resista por mais tempo antes de romper e com uma carga mais elevada, tendo deformações superiores a 3% (LI, 2003, tradução nossa).

Por isso, este tipo de compósito também é conhecido como SHCC – *Strain Hardening Cementitious Composites* – que traduzido consistiria em um compósito cimentício com escoamento. Quando aplicados carregamentos em SHCC, esses apresentam capacidade de deformar 300 vezes mais que concretos convencionais. Como já mencionado anteriormente, isto ocorre devido às propriedades micromecânicas do compósito e, também, a uma boa interação entre a fibra e a matriz cimentícia (QIAN; LI, 2007, tradução nossa). Na figura 5, observa-se um gráfico no qual constam as tensões e deformações típicas de SHCC.

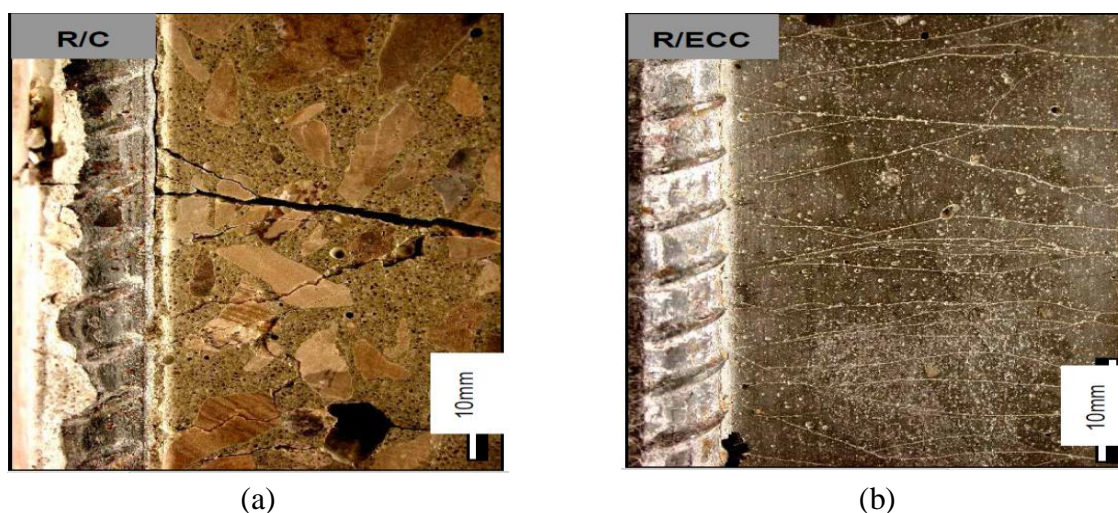
Figura 5 – Curva de tensão x deformação típica do SHCC



(fonte: LI; YANG, 2007)

Uma das características principais dos SHCC é possuir altos teores de cimento, chegando a utilizar duas a três vezes mais, comparando com o concreto convencional. O alto teor de cimento auxilia na dispersão das fibras e no controle da tenacidade da matriz. Este controle determina o comportamento *strain hardening* do compósito, fazendo com que o processo de múltipla fissuração possa ocorrer antes da ruptura ou arrancamento das fibras (MAGALHÃES, 2010, p. 15). A figura 6(a) apresenta o processo de fissuração no concreto convencional, uma fissura com uma grande abertura, já na figura 6(b) várias pequenas fissuras com pequenas aberturas caracterizam o ECC.

Figura 6 – Comparativo do processo de fissuração entre um concreto convencional e um ECC



(fonte: LI, 2003)

Dentro das fibras adotadas pelo grupo de pesquisa da Universidade de Michigan, uma das que obteve melhores resultados foi a fibra de PVA (Álcool Polivinílico). Já disponível no mercado norte-americano, esta apresenta um custo relativamente baixo nos Estados Unidos, tendo um grande volume para a distribuição em escala comercial.

Garcez (2009, p. 21-23), afirma que ECC com fibras de PVA tem as fissuras estabilizadas em 1% de deformação. Após isto, as fissuras não tem um aumento significativo até o momento da ruptura do compósito, ou seja, após 5% de deformação à tração. Durante este intervalo – entre 1 e 5% –, o aumento de deformação é gerido por novas microfissuras, mantendo as aberturas das fissuras existentes constantes, sem aumentar seu tamanho.

Em ECC ocorre o processo de autocicatrização das fissuras. Este processo é conhecido como *self-healing*, e pode eliminar uma parte das fissuras do concreto nas primeiras idades, submetido a certas condições ambientais de exposição. Para que ocorra o processo de *self healing*, é necessário que os corpos de prova estejam em condições ambientais específicas, tenham em sua composição certos componentes reativos e possuam fissuras com pequenas aberturas. O concreto quando submetido a ciclos de molhagem e secagem e variações de umidade com presença de gás carbônico, promovem a hidratação de partículas expostas presentes nas fissuras (GARCEZ, 2009).

Em função de possuírem uma baixa relação entre água e aglomerante e pouca porosidade, a hidratação do agregado hidráulico pode não ser concluída no momento da mistura do compósito. Isto gera a presença de anidros no compósito que só reagirão em contato com a água posteriormente. O concreto, comparado com outros materiais é o único que possui cimento não hidratado em sua mistura, ficando este armazenado nos poros em todo o compósito (LI; YANG, 2007, tradução nossa).

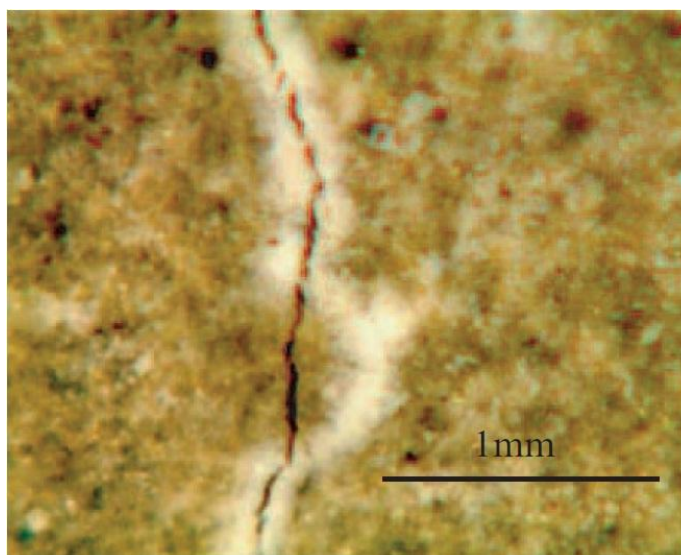
Porém, para que ocorra o processo de “costura” das fissuras, estas não devem possuir aberturas maiores que 150 μm . Para que o *self healing* ocorra de forma mais eficaz é recomendado fissuras com até 50 μm de abertura. Este processo é mais comum em ECC, visto que o processo *strain hardening* gera múltiplas fissuras que possuem aberturas pequenas (LI; YANG, 2007, tradução nossa).

Quando ocorrem ciclos de molhagem e secagem, a presença da água e do gás carbônico reage com os aglomerantes hidráulicos expostos nas aberturas das fissuras. Essa hidratação tardia

gera cristais que unem as paredes das fissuras, expandindo e preenchendo o vazio existente. Este processo acontece nas primeiras idades e é característico em estruturas com grande área superficial de contato com o ambiente, como pontes e pavimentos (LI; YANG, 2007, tradução nossa).

A autocicatrização das fissuras soluciona um dos problemas mais comuns nestes tipos de estruturas: a retração plástica. Além disto, influencia também na deformação nos primeiros carregamentos, pois “costura” a fissuração aumentando assim a capacidade do compósito de absorver energia. A figura 7 apresenta em exemplo do processo *self healing*, podendo constatar uma faixa branca em volta da fissura.

Figura 7 – Exemplo do processo *self healing*



(fonte: LI; YANG, 2007)

Os ECC reforçados com fibras de PVA podem ser aplicados em pavimentos de rodovias e pontes, mas também já foram estudados para outros fins, como por exemplo, muro de contenção de barragens. Além de sua alta capacidade de deformação sob esforços de tração, também possuem elevada resistência a esforços de cisalhamento, como em prédios sujeitos a terremotos. As fibras dos compósitos adicionadas no núcleo do prédio dissipam a energia do abalo sísmico, não danificando a estrutura do edifício (LI, 2003, tradução nossa).

Como a aplicação das fibras de PVA seria inviável no Brasil, devido ao alto custo de importação e o déficit de quantidade para aplicação em escala comercial, buscou-se outro tipo de fibra com propriedades semelhantes que fosse fabricado no País. A que obteve maior

paridade com a fibra japonesa foi a de polipropileno, avaliada por Garcez em 2009, a qual já é comercializada no Brasil e possui um custo mais baixo. Assim, esta é a fibra empregada neste estudo.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental tem como base a definição do escopo da pesquisa. Dentre os processos abordados neste capítulo consta inicialmente a estratégia da pesquisa, após esta descrição, aborda-se a dosagem do concreto, ou seja, o traço desenvolvido. Em seguida o detalhamento dos materiais adotados, bem como as descrições das propriedades de cada um e, por fim, os procedimentos de ensaio explorados.

4.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

Após o término da revisão bibliográfica, obteve-se um conhecimento mais aperfeiçoado para delimitação das variáveis a serem desenvolvidas no programa experimental. Adotado o tipo de fibra a ser estudada, aprofundou-se então no estudo do tipo de compósito a ser desenvolvido, ou seja, a definição do ECC característico. Buscaram-se os materiais adotados em um traço já pré-estabelecido e os devidos ensaios a serem realizados para avaliar o desempenho do compósito estudado.

O traço adotado baseia-se no trabalho desenvolvido por Perrone (em fase de elaboração)² para o desenvolvimento de sua dissertação de mestrado, alterando somente sua relação entre água e aglomerantes hidráulicos (cimento e cinza volante). Estabeleceu-se assim, uma quantidade fixa de todos os materiais sem variar nenhum dos elementos. O mesmo traço foi adotado para todos os corpos de prova dos ensaios propostos.

Os ensaios foram baseados na avaliação do tipo de deterioração que os pavimentos de concreto podem sofrer durante sua vida útil. Visando obter uma análise voltada a pavimentação com este tipo de compósito, os ensaios descritos abaixo tem como objetivo simular o desempenho do compósito quando submetidos a algumas solicitações características como flexão e abrasão e avaliar a trabalhabilidade da mistura. Nos próximos itens são abordados a dosagem do concreto, o detalhamento dos materiais utilizados e as especificações dos ensaios realizados.

² Dissertação em fase de elaboração com título “Estudo da utilização de lajes de continuidade de SHCC para substituição de juntas de dilatação tradicionais em pontes” do autor Vítor Cury Perrone, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

4.2 MATERIAIS ADOTADOS

Para que o desenvolvimento de um ensaio seja eficaz, primeiramente deve-se realizar um estudo dos materiais a serem adotados. Neste caso, está a escolha da fibra a ser estudada, os elementos que constituem o concreto e os aditivos necessários para uma maior eficácia do compósito.

4.2.1 Fibras de polipropileno

Com um custo baixo, as fibras de polipropileno possuem características específicas destacando-se perante as outras. Essas se devem a sua cadeia polimérica, a qual afeta diretamente a sua resistência e o seu comportamento. O polipropileno caracteriza-se por ser um plástico inodoro, incolor e atóxico, tendo uma densidade de 900 kg/m^3 (FÉLIX, 2002, p. 4).

As fibras de polipropileno foram sendo modificadas ao longo do tempo para melhorar seu desempenho. Atualmente, já existem no mercado alguns tipos de fibras com alta tenacidade. Garcez (2009, p. 78-79) afirma que este tipo de fibra é capaz de aumentar a resistência do compósito mantendo a mesma compatibilidade com a base cimentícia. Isto ocorre devido às fibras de polipropileno de alta tenacidade possuírem um tratamento especial para obter uma melhor interação entre a fibra e a matriz. Mesmo tendo módulos diferentes, uma boa aderência entre a fibra e a matriz influencia diretamente no desempenho da fibra.

Garcez (2009) avaliou apenas 2% de fibras de polipropileno com alta tenacidade nos experimentos de sua tese de doutorado. Esta fibra foi aplicada reforçando o concreto de recapeamento de pavimentos. A fibra escolhida foi do fabricante Brasilit-Saint Gobain, a qual tem suas propriedades listadas na tabela 3, possuindo um comprimento de 10 mm e diâmetro de $12 \mu\text{m}$.

Tabela 2 – Propriedades das fibras de polipropileno de alta tenacidade fornecidas pelo fabricante

Propriedades	
Densidade (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)

Como analisado anteriormente, o teor de fibras influencia na eficiência do compósito. Nos seus estudos, Garcez (2009) e Perrone et al. (2012) obtiveram resultados satisfatórios com 2% de volume de fibra em seus corpos de prova. Assim, o compósito com a fibra de polipropileno possui uma das características de um ECC: possuir volumes de fibras nesta ordem de grandeza. A figura 8 apresenta a fibra de polipropileno a ser estudada na pesquisa.

Figura 8 – Fibras de polipropileno de alta tenacidade adotadas na pesquisa



(fonte: foto da autora)

4.2.2 Cinza Volante

Como já visto neste trabalho, os ECC requerem altos teores de cimento na mistura, o que acaba encarecendo o concreto. O grupo de pesquisa do professor Victor Li buscou outro material que, adicionado na mistura, reduzisse o consumo de cimento. Dentre várias opções, a que obteve melhores resultados foi a cinza volante.

A cinza adotada na pesquisa foi cedida pela empresa Pozofly, localizada em Tubarão, Santa Catarina. A cinza volante fornecida é classificada como Classe C, a qual obedece aos requisitos da Norma NBR 12653 – Materiais Pozolânicos. Segundo a NBR 12653 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992, p. 2), devido a suas origens, os materiais pozolânicos são divididos em três classes: C, N e E. A classificação é devido as suas propriedades químicas e físicas, como é apresentado na tabela 4.

Tabela 3 – Propriedades químicas e físicas das três classes dos materiais pozolânicos

Propriedades	Classe N	Classe C	Classe E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ % máx.	70,0	70,0	50,0
SO ₃ % máxima	4,0	5,0	5,0
Teor de umidade % máxima	3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo % máxima	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponíveis em Na ₂ O % máxima	1,5	1,5	1,5
Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias. % mínima	75,0	75,0	75,0
Índice de atividade pozolânica com o cal aos 7 dias. % máxima	6,0	6,0	6,0
Água requerida % máxima	110,0	110,0	110,0

(fonte: adaptada de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992)

A cinza volante é um resíduo gerado pelo processo de combustão nas usinas termoeletricas. No processo de combustão do carvão, somente é queimado a matéria volátil e o carbono. Esses resíduos são as impurezas minerais (argilas, quartzos e feldspatos) fundidas a altas temperaturas. Ao submeter a temperaturas mais baixas, ocorre a solidificação das partículas, e a parte que é arrastada pela corrente de gás é chamada cinza volante (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 296-297).

Além de aproveitar esse resíduo das usinas, o seu emprego diminui o consumo de cimento que, no seu processo, emite gás carbônico na atmosfera. Assim, a cinza volante se apresenta como uma solução sustentável e econômica em compósitos cimentícios.

Garcez (2009, p. 85) afirma que a adição da cinza volante em concreto reforçados com fibras ajuda a controlar a tenacidade da matriz. Além de aumentar a resistência em idades mais avançadas, a cinza volante gera uma evolução mais lenta da tenacidade e da resistência nas primeiras idades do concreto.

4.2.3 Cimento

O cimento adotado para este trabalho foi o CP V-ARI da marca CAUÊ, fornecido pela empresa Cimpasso. A NBR 5733 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991, p. 2) descreve este tipo de cimento como de alta resistência inicial, sendo o nome ARI designado a cimentos com alta resistência desde os 7 dias. A tabela 5, disponibilizada pela Empresa, demonstra o comportamento nas idades iniciais de concretos com uso de cimento CP V acima dos valores mínimos solicitados pela Norma.

Tabela 4 – Comparação das resistências mecânicas à compressão

Resistências mecânicas à compressão (MPa)				
Idades	1 dia	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)

4.2.4 Aditivo

No estudo, foi usado o aditivo superplastificante Glenium 54 fornecido pela empresa BASF com base de éter policarboxílico. Este tipo de aditivo possui alta eficiência na redução de teor de água, comparado com os mais comumente utilizados. Chegando a reduzir de três a quatro vezes mais o teor, sem perder a consistência do concreto, estes superplastificantes reduzem a tensão superficial da água e também aumentam a fluidez do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 282).

4.2.5 Agregados

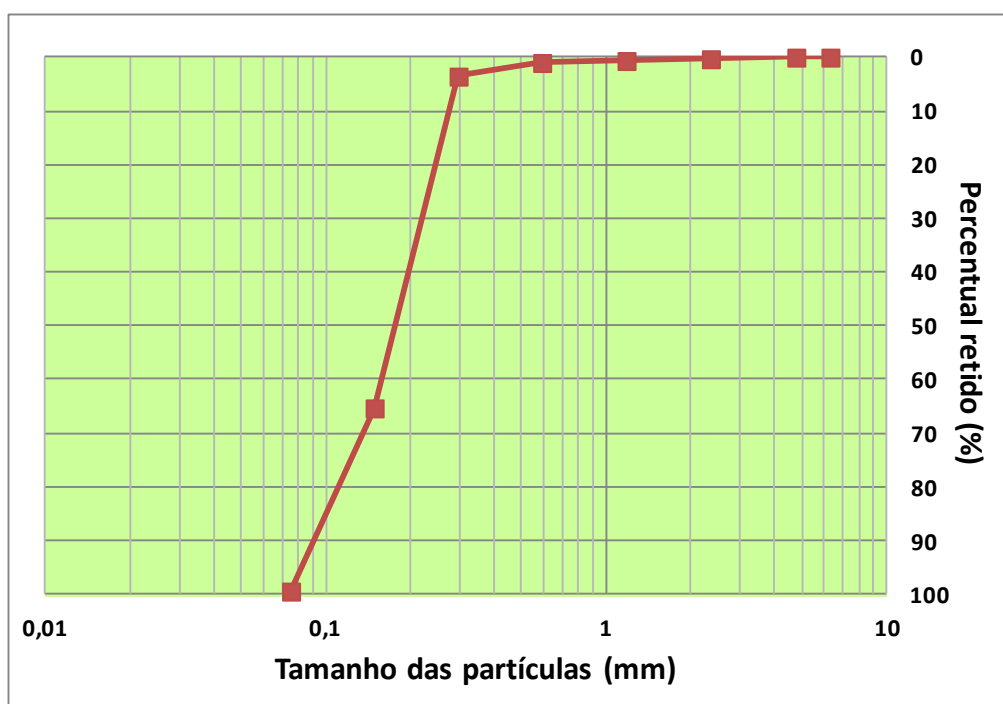
O agregado é uma parte importante do concreto; mesmo não entrando em reações químicas complexas com a água, como é o caso do cimento. As propriedades dos agregados requerem uma compreensão e análise adequada no momento da escolha de qual tipo empregar. Mehta e Monteiro (1994, p. 239) salientam:

As características dos agregados que são importantes para a tecnologia do concreto incluem porosidade, composição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial das partículas, resistência à compressão, módulo de elasticidade e os tipos de substâncias deletérias presentes. Estas características derivam da

composição mineralógica da rocha matriz (que é afetada pelos processos geológicos de formação da rocha), das condições de exposição às quais a rocha foi submetida antes de gerar o agregado, e dos tipos de operação e equipamentos usados para a produção do agregado.

Em geral, os agregados dividem-se em grãos e miúdos. No ECC, o uso de agregados grãos acaba prejudicando o desempenho da matriz cimentícia. Como já discutido no capítulo 3, o tamanho do agregado influencia o comportamento da fibra na matriz. Nas pesquisas com ECC, é usual optar somente por agregados miúdos. Na figura 9 consta a granulometria da areia usada neste trabalho. Esta areia fina foi utilizada por Perrone et al. (2012) e é semelhante à usada por Garcez (2009).

Figura 9 – Curva granulométrica da areia fina



(fonte: elaborada pela autora)

4.3 DOSAGEM DO CONCRETO

Em sua pesquisa, Perrone avaliou diversos traços, porém o teor de fibra foi mantido constante, no valor de 2% do volume total, validando assim o compósito como um ECC. Alguns traços tiveram a adição de cinza volante e outros não. A adição de cinza volante variou nos seguintes níveis: 0,4; 0,8; e 1,2 em relação à proporção de cimento inserido. Além disso, vários teores de agregado miúdo foram avaliados. Os teores de areia propostos foram 18%, 24%, 30% e

36% em relação ao volume total do compósito. A relação entre a água e aglomerantes manteve-se constante em todas as amostras, o valor determinado foi 0,35 (em fase de elaboração)³.

Um dos resultados que obteve melhor desempenho nesta pesquisa foi o traço com 24% de areia e 0,4 de cinza volante. Com os resultados obtidos pelo pesquisador observou-se que a relação água cimento afetou no resultado. Isso deve-se à adição de fibra de polipropileno, pois aumenta a área superficial do compósito exigindo uma quantidade maior de água. Influenciando assim diretamente na trabalhabilidade da mistura e conseqüentemente no desempenho final do compósito, como já foi mencionado por Figueiredo (2005).

Partido disto, o trabalho em estudo desenvolve-se com um traço com 2% de fibra de polipropileno em relação ao volume da mistura, 24% do teor de areia em função do volume total, 0,4 adicionado de cinza volante em relação à proporção de cimento e por fim uma relação entre água e cimento mais cinza volante de 0,33. Na tabela 2 encontra-se detalhadamente o traço adotado.

Tabela 5 – Traço do ECC desenvolvido no estudo

TRAÇO ECC ADOTADO					
CIMENTO	CINZA VOLANTE	AREIA	FIBRA DE POLIPROPILENO	SUPER PLASTIFICANTE	Relação ÁGUA/ (CIMENTO + CINZA VOLANTE)
1*	0,4*	24%**	2%**	1%**	0,33

* cimento e cinza volante estão estabelecidos em traço

** areia, fibra de polipropileno e super plastificante estão estabelecidos em função do volume total

(fonte: elaborada pela autora)

Depois de elaborado o traço, definiu-se os tipos de materiais adotados e a escolha dos devidos ensaios, assim iniciando a moldagem dos corpos de prova. No próximo item são abordadas características de cada material utilizado, suas propriedades e algumas adequações necessárias.

³ Dissertação em fase de elaboração com título “Estudo da utilização de lajes de continuidade de SHCC para substituição de juntas de dilatação tradicionais em pontes” do autor Vítor Cury Perrone, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

4.4 EXECUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A moldagem dos corpos de prova adotados na pesquisa seguiu os procedimentos propostos por Perrone et al. (2012). A mistura dos materiais aconteceu em um misturador mecânico planetário especial para argamassas. Inicialmente misturaram-se os materiais secos (cimento, cinza volante e areia), após adquirir uma homogeneidade, adicionou-se água e aditivo superplastificante na mistura. Por fim, em um tempo cronometrado de 2 minutos inseriu-se a fibra de polipropileno na mistura, separando-as manualmente. Após todas as fibras inseridas, aumentou-se a velocidade da mistura e a mesma foi mantida por 5 minutos a fim de obter a aderência entre a fibra e a matriz cimentícia. Na figura 23(a) consta o misturador usado no trabalho e na figura 23(b) a mistura no fim da execução.

Figura 10 – (a) misturador usado no trabalho e (b) mistura após a execução



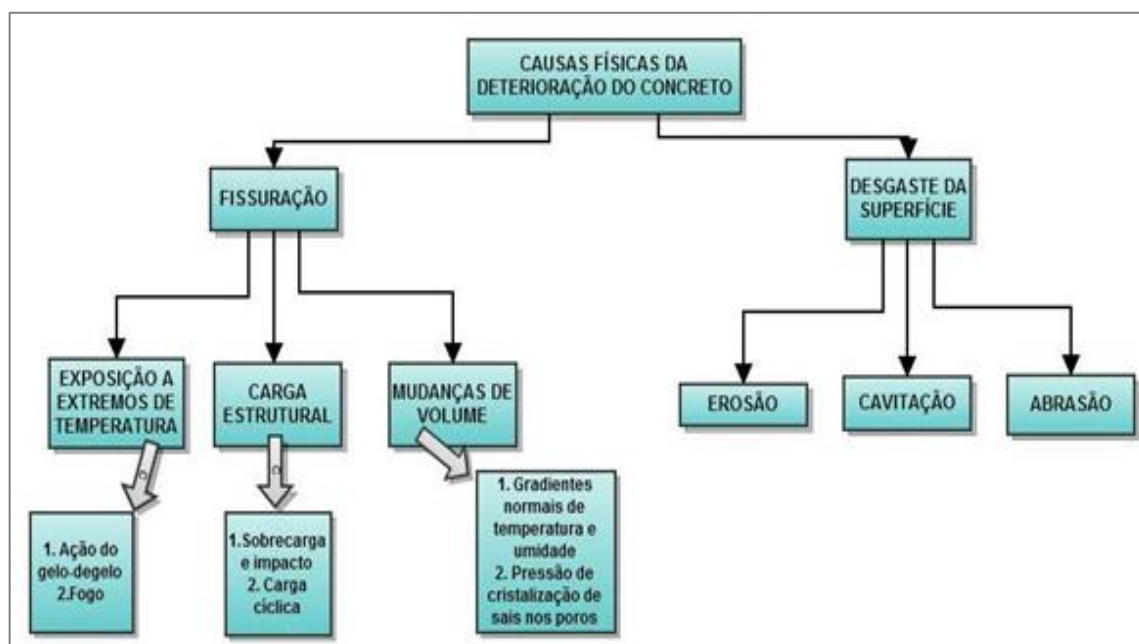
(fonte: fotos da autora)

Após a finalização da mistura, iniciou-se o processo de moldagem dos corpos de prova. Os corpos de prova foram colocados em uma mesa vibratória com o objetivo de ocorrer o completo espalhamento do compósito ao longo das formas. Os corpos de prova foram inseridos em uma câmara úmida por 24 horas, após este período foram feitas as desmoldagens. Por fim, os corpos de prova foram inseridos novamente na câmara úmida com temperatura 23°C com variação de mais ou menos 2 graus e umidade relativa do ar acima de 90%.

4.5 ENSAIOS ADOTADOS

A deterioração física no concreto em geral é causada por dois fatores: o processo de fissuração do concreto e o desgaste de superfície. O processo de fissuração ocorre por três fatores: cargas estruturais aplicadas, temperaturas extremas no ambiente – como gelo-degelo e fogo – ou mudanças no volume no concreto. O desgaste de superfície pode acontecer devido à abrasão, à erosão, às reações químicas ou à cavitação da estrutura. Todos estes processos são independentes e podem acontecer simultaneamente (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 128). Na figura 10, é apresentado um fluxograma com as causas físicas que levam à deterioração do concreto.

Figura 11 – Causas físicas da deterioração do concreto



(fonte: adaptado de MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 128)

Os ensaios experimentais realizados em laboratórios têm como objetivo simular estes processos de deterioração do concreto, visando avaliar seu desempenho. Em pavimentos de concreto, existem alguns ensaios de grande importância: flexão e desgaste à superfície por abrasão. Para compósitos cimentícios reforçados com fibras verificar a trabalhabilidade do mesmo é de igual relevância, visto que, a adição da fibra interfere no desempenho da mistura. Na figura 11 encontra-se um fluxograma explicitando os ensaios de verificação que foram desenvolvidos.

Figura 12 – Ensaio realizados na pesquisa



(fonte: elaborada pela autora)

A discriminação dos procedimentos adotados de cada ensaio descrito na figura 11, bem como as dimensões dos corpos de prova, os ajustes das variáveis e os procedimentos de análises são descritos detalhadamente nos próximos itens.

4.5.1 Ensaio de trabalhabilidade

Trabalhabilidade é tipicamente definida como o comportamento do concreto no estado fresco, não sendo uma propriedade intrínseca do concreto. Ela está relacionada com os métodos de execução, de adensamento e de acabamento do material. Dentre os fatores que influenciam diretamente a trabalhabilidade pode-se destacar o tempo de mistura, as características dos agregados, o tipo de cimento adotado, o traço escolhido e a ocorrência de reações químicas (CASTRO, 2007, p. 54).

Dentre os ensaios conhecidos para medida de trabalhabilidade, os de maior destaque são o de abatimento de tronco de cone, de mesa de consistência e, por último, o consistômetro de Ve-Be. Estes ensaios são empíricos, ou seja, são feitas medidas arbitrárias em escalas diferentes. Isso ocorre porque os ensaios possuem equipamentos distintos, gerando diferentes medidas de trabalhabilidade, o que dificulta a realização da comparação entre eles (CASTRO, 2007, p. 51-52).

Como já mencionado no capítulo 3, a adição de fibras influencia na trabalhabilidade do compósito. Segundo Mehta e Monteiro (1994), a adição de fibra reduz consideravelmente a trabalhabilidade da mistura. A diminuição da trabalhabilidade esta diretamente associada com

a concentração volumétrica de fibras no concreto. Um ensaio que pode determinar o índice de consistência para o tipo de compósito usado neste trabalho é o descrito na Norma NBR 7215, conhecido como *flow table*.

De acordo com a NBR 7215 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996), o método da *flow table* consiste em moldar o concreto no estado fresco em um cone de aço com grandezas de 125 mm no diâmetro inferior e 80 mm no diâmetro superior, apoiados em uma mesa circular com 500 mm de diâmetro. A mesa possui uma haste fixada em seu centro, que é fixada em uma guia que gera rotações, provocando assim, movimentos ascendentes, que transmitem energia na mistura. Todos os componentes devem estar limpos e umedecidos. A figura 22 apresenta o equipamento utilizado no ensaio.

Figura 13 – Modelo genérico da *flow table* usada no ensaio



(fonte: foto da autora)

Segundo a NBR 7215 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996), o concreto deve ser inserido no cone em três camadas homogêneas, aplicando 15, 10 e 5 golpes respectivamente em cada camada através de um soquete com 17 cm de altura. Logo após retira-se o cone e aplica-se 30 golpes em 30 segundos na mesa, a fim de espalhar a mistura. Ao fim dos golpes, mede-se o quanto o concreto se espalhou em duas direções, tendo como resultado final a média das mesmas.

4.5.2 Ensaio de Flexão

O desempenho do pavimento de concreto à flexão é um dos principais determinantes de sua durabilidade. Um comportamento inadequado a essas solicitações gera a deterioração da estrutura através do aparecimento de fissuras, por isso seu ensaio é de grande importância na análise de materiais em pavimentação. Além disso, os pavimentos normalmente estão submetidos a esforços de flexão, o que explica a necessidade de entender-se o comportamento à flexão para dimensionar adequadamente a estrutura.

Para uma caracterização efetiva do desempenho do compósito foram realizados três tipos de ensaio de flexão. O primeiro, realizado por Perrone em 2012, o segundo, realizado por Garcez em 2009, e o terceiro ensaio obedecendo a Norma ASTM C1399 avaliando a resistência residual, na qual é suportada pela fibra. Para cada ensaio foram realizados 4 corpos de prova afim de garantir uma segurança estatística nos resultados obtidos e todos os ensaios ocorreram após 28 dias de cura em uma câmara úmida com temperatura 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar maior que 90%. Nos itens a seguir são detalhados cada ensaio proposto, bem como seus procedimentos, peculiaridades e adaptações

4.5.2.1 Ensaio de Flexão: método Perrone

Este ensaio de flexão foi desenvolvido por Perrone et al. em 2012, e usado em sua tese de dissertação, a qual esta em fase de elaboração. Baseado em Magalhães (2010), o ensaio tem como base a Norma ASTM C1609 – *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete* –, realizados em quatro pontos do corpo de prova. Os corpos de prova têm dimensões de 300 mm x 70 mm x 15 mm onde a carga aplicada concentra-se igualmente dividida entre os dois terços do vão, a uma distância de 77 mm dos apoios e o vão possui 231 mm de distância entre os apoios. A figura 12 detalha a configuração do ensaio.

Figura 14 – Esquemática do ensaio de flexão: método Perrone



(fonte: PERRONE et al., 2012)

O ensaio foi avaliado através dos deslocamentos ocorridos em função da carga aplicada. O deslocamento medido foi o do próprio equipamento: uma prensa com capacidade para 50 kN. A velocidade de aplicação da carga foi 1,2 mm/minuto (PERRONE et al., 2012). Para os ensaios desta pesquisa o deslocamento foi medido através de LVDT (*Linear Voltage Differential Transducer*) no meio do vão, obtendo assim uma curva relacionando tensão por deformação, analisando a abertura das fissuras ao longo do ensaio. Na figura 13 consta a esquematização do modelo adotado na pesquisa.

Figura 15 – Modelo adotado para o ensaio de flexão: método Perrone



(fonte: foto da autora)

4.5.2.2 Ensaio de Flexão: método Garcez

A Norma ASTM C7802 – *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete* – (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2002a, tradução nossa) propõe um ensaio à flexão aplicado em 4 pontos no corpo de prova. Segundo a Norma, os corpos de prova devem ter dimensões de 153 x 153 x 534 mm. Porém, Qian e Li (2007) utilizaram corpos de prova menores, com dimensões de 355 x 50 x 75 mm, nos seus ensaios de ECC (utilizando fibras de PVA), e Garcez (2009) adotou estas mesmas dimensões (355 x 50 x 75 mm) em seus estudos com fibra de polipropileno.

O ensaio de flexão a quatro pontos consiste em aplicar uma carga crescente distribuída em quatro pontos simétricos, numa estrutura apoiada em dois suportes equidistantes. A carga é aplicada lentamente e gera resultados de módulo de ruptura à flexão, módulo de elasticidade e módulo de tenacidade. Assim, os ensaios de resistência à flexão determinam principalmente o módulo de ruptura (MOR), ou seja, a tensão máxima que a estrutura resiste (GARCEZ, 2009, p. 92). A figura 14 apresenta o modelo genérico do ensaio de flexão a quatro pontos.

Figura 16 – Modelo genérico do ensaio de flexão a quatro pontos



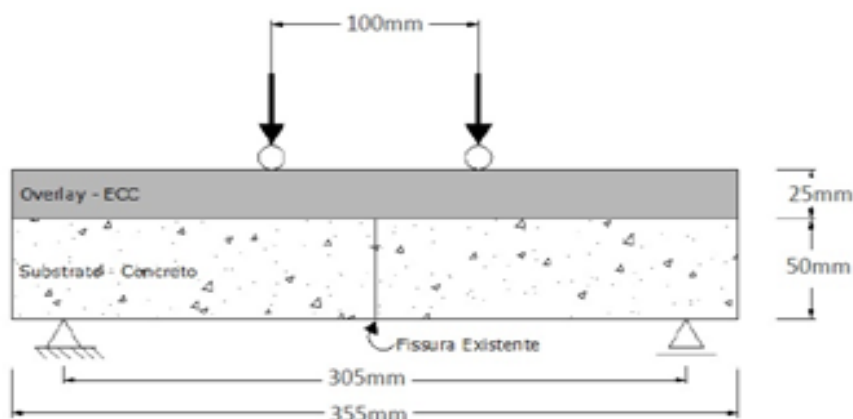
(fonte: GARCEZ, 2009, p. 93)

O ensaio realizado por Garcez (2009) simula uma camada de recapeamento com ECC em pavimentos de concreto já existente que não possuem adição de fibras. No ensaio proposto, verifica-se a simulação de um pavimento com uma fissura pré-existente introduzindo uma zona com concentração de tensões. Devido à fissura existente, somente a camada de

recapeamentos reage estruturalmente. A base de concreto serve exclusivamente para restringir o processo de fissuração da camada de ECC (STANDER⁴, 2007 apud GARCEZ, 2009).

Com um vão livre entre os apoios de 305 mm a carga é aplicada através de quatro pontos, cada par distante 100 mm criando uma seção de momento constante. Os corpos de prova foram levemente desgastados com uma lixadeira de bancada a fim de remover as imperfeições superficiais e garantir uma aplicação de carga homogênea sem nenhuma imperfeição. Em uma prensa servo-hidráulica MTS 810 o carregamento foi aplicado a uma velocidade de 0,1 mm/minuto controlando-se e registrando o deslocamento obtido (GARCEZ, 2009). Na figura 15 consta a esquematização do ensaio realizado por Garcez.

Figura 17 – Esquematização do ensaio de flexão a quatro pontos



(fonte: GARCEZ, 2009, p. 95)

Em seus ensaios Garcez adotou diferentes dosagens de concreto. Mantendo sempre constante a quantidade de fibra de polipropileno (2% em relação ao volume total), variou-se então a proporção de areia, de cinza volante e do tipo de cimento utilizado. Inicialmente buscou-se desenvolver combinações de materiais para obter traços diferenciados que desenvolvem propriedades características dos ECC, como o processo de múltipla fissuração (GARCEZ, 2009, p. 97-98). Na tabela 6 encontram-se os traços usados nos ensaios desse estudo.

⁴ STANDER, H. **Interfacial Bond Properties for ECC Overlay Systems**. 2007. 114 f. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Stellenbosh, South Africa, 2007.

Tabela 6 – Traços adotados por Garcez (2009) para os ensaios de flexão

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

(fonte: adaptada de GARCEZ, 2009, p. 97)

Após avaliar os conceitos de micromecânica, os traços adotados foram o PPECC1, o PPECC3, o PPECC5 devido aos seguintes desempenhos citados por Garcez (2009, p. 112):

O primeiro foi escolhido por apresentar a resistência à tração mais elevada, apesar da limitada capacidade de deformação. O segundo foi escolhido por apresentar valores moderados de resistência e de deformação última, além de ser composto por cimento tipo V, material preferencial para aplicações de pavimentos. O terceiro foi escolhido em função de sua característica ecológica.

A prensa computadorizada adotada neste trabalho tem uma carga máxima de 200 kN, da marca Shimadzu. Para os ensaios do método descrito acima adaptou-se o uso de LVDT em cada face lateral do corpo de prova. A média aritmética dos dois LVDT indicou o deslocamento ocorrido no corpo de prova e a carga aplicada foi obtida através da leitura da prensa. Para cada traço foram ensaiados 5 corpos de prova. A determinação do módulo de ruptura (MOR) baseou-se na teoria elástica das vigas. Para o cálculo da tensão aplicada foi obtido através do cálculo do momento aplicado no centro do corpo de prova a partir da fórmula 1 (PERRONE et al., 2012).

(fórmula 1)

Onde:

σ = tensão na flexão (MPa);

P= força total aplicada (N);

L= vão do corpo de prova durante o ensaio (mm);

b= largura do corpo de prova (mm);

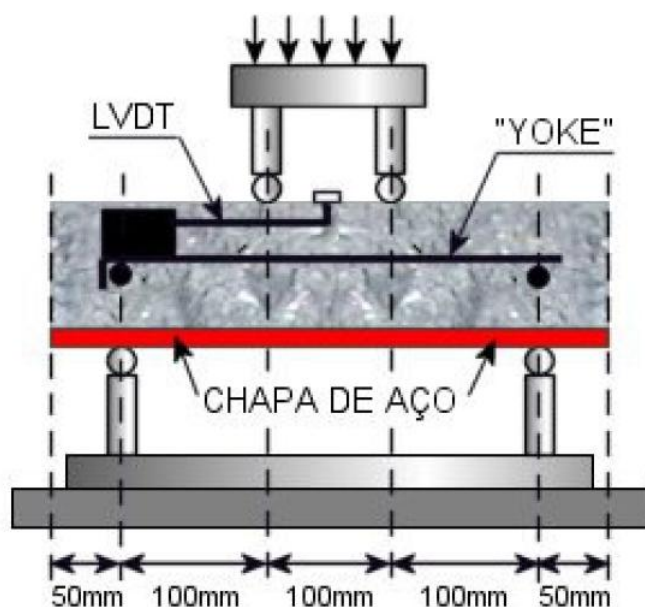
h = altura do corpo de prova (mm).

4.5.2.3 Ensaio de Flexão: ASTM C1399

Nos ensaios tradicionais de flexão, os valores de tensões e deformações residuais podem ser alterados em função do deslocamento brusco do corpo de prova. Devido à energia dissipada do conjunto (prensa + corpo de prova) no momento da primeira fissura os resultados podem ser distorcidos em função da perda de capacidade de suporte do corpo de prova devido à movimentação do sistema (TIGUMAN; FIGUEIREDO, 2005).

Com o objetivo de avaliar com mais precisão a tensão residual de concretos reforçados com fibras, desenvolveu-se a Norma norte-americana ASTM C1399 – *Standard Teste Method for Obtaining Average Residual Strength of Fiber Reinforced Concrete*. O ensaio consiste basicamente em inserir uma placa de aço na parte de baixo do corpo de prova no momento de aplicação da carga até atingir a primeira fissura. A placa de aço tem como objetivo absorver a energia dissipada pelo sistema afim de não ocorrer nenhuma instabilidade (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2002b, tradução nossa). A figura 16 demonstra de forma genérica o modelo de ensaio.

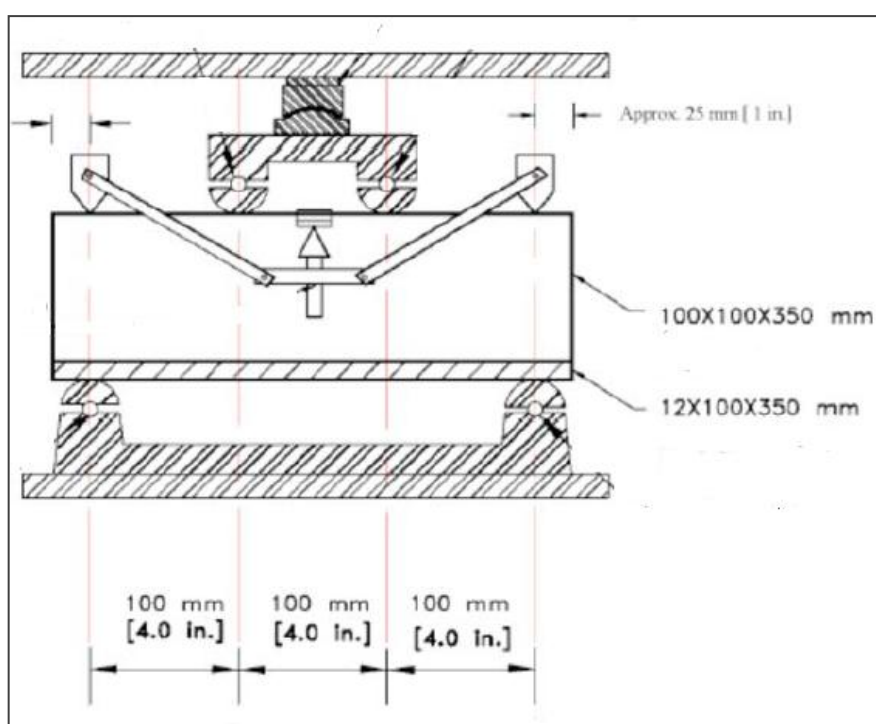
Figura 18 – Modelo genérico do ensaio da Norma ASTM C1399



(fonte: adaptado de TIGUMAN; FIGUEIREDO, 2005)

Segundo a Norma ASTM C1399 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2002b, tradução nossa), a chapa de aço é inserida até o corpo de prova atingir deslocamentos de no máximo 0,2 mm, caso contrário o ensaio é inválido. Após esta etapa, o ensaio é pausado, retira-se a chapa de aço e continua-se o ensaio, avaliando assim a tensão residual do mesmo. Os corpos de prova tinham dimensões 100 mm x100 mm x350 mm, com vão entre os apoios de 300 mm e a carga aplicada a quatro pontos distanciados em 100 mm. Na figura 17 encontra-se um esquema proposto pela Norma.

Figura 19 – Representação esquemática do ensaio Norma ASTM C1399



(fonte: adaptada de AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2002b)

A tensão residual de cada corpo de prova é determinada através da resistência residual média dos seguintes deslocamentos fixados: 0,50 mm, 0,75 mm, 1,0 mm e 1,25 mm, realizando uma média destes resultados, segundo a fórmula 2 determinada pela ASTM C1399 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2002b, tradução nossa):

$$ARS = \frac{P_{0,50} + P_{0,75} + P_{1,00} + P_{1,25}}{4} \cdot \frac{L}{b \cdot h^2} \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

ARS= resistência residual média (MPa);

$P_{0,50}+P_{0,75}+P_{1,0}+P_{1,25}$ = somatório das cargas nos respectivos deslocamentos (N);

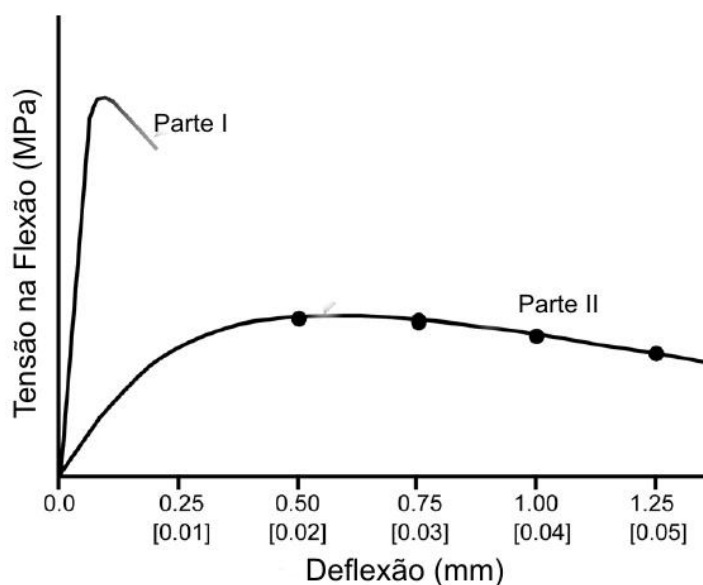
b= largura do corpo de prova (mm);

h= altura do corpo de prova (mm);

L= vão do corpo de prova durante o ensaio (mm).

Com o uso de LVDT adaptados no centro do vão, obteve-se a medição dos deslocamentos. A prensa computadorizada utilizada foi da marca Shimadzu, com carga máxima de 200 kN. Com os dados obtidos de cada ponto de deformação obtém-se uma curva relacionando tensão na flexão com deformação do corpo de prova. Esta curva reprensenta uma avaliação mais precisa do comportamento da fibra no compósito. Logo, o resultado final consta de um gráfico o qual tem uma curva representando o carregamento inicial com a placa de aço e outro, constando a aplicação de carga sem a placa, liberando a deformação do corpo de prova. Na figura 18 consta o gráfico genérico proposto pela Norma ASTM C1399.

Figura 20 – Modelo genérico do gráfico gerado no ensaio ASTM C1399



(fonte: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2002b)

4.5.3 Ensaios de desgaste superficial por abrasão

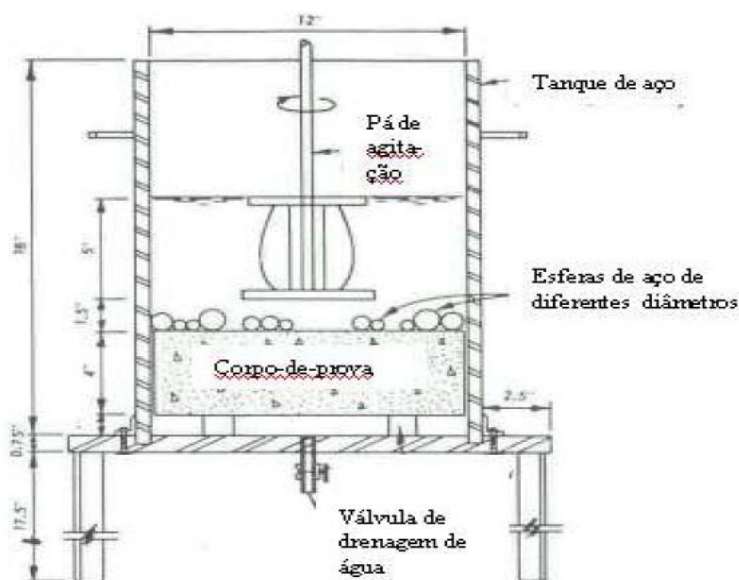
Como visto na figura 10, uma das causas da deterioração do concreto é o desgaste em sua superfície, caracterizado por uma perda de massa específica. No caso de pavimentos, os

desgastes são ocasionados pelo tráfego de veículos, resultando em um desgaste por abrasão. Devido ao excesso de ciclos repetitivos no pavimento de concreto, o processo de abrasão diminui sua vida útil (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 129).

Atualmente, existem vários tipos de ensaios que tentam simular a abrasão em concretos. Porém, vale salientar que estes ensaios não são indicadores de durabilidade. O que pode ser determinado são comparativos em cada ensaio aplicado, visto que cada procedimento possui variáveis distintas entre si. Também, para prever um indicador de durabilidade sob desgaste superficial, leva-se em conta outros fatores como o material empregado e os tipos de ações de desgastes que a superfície estaria sujeita (VIECILI, 2004, p. 40).

Um dos métodos que melhor simula o desgaste superficial em pavimentos de concreto é o Método de Liu. Desenvolvido em 1978 por Liu, inicialmente tinha por finalidade medir o desgaste abrasivo em barragens. O equipamento consiste em um cilindro metálico no qual acomoda o corpo de prova e adiciona-se 70 esferas de aço com diâmetros distintos (25 esferas de 13 mm de diâmetro, 35 esferas com 19 mm de diâmetro e 10 esferas com 25 mm de diâmetro). Deve-se inserir água no cilindro juntamente com uma haste que promove em torno de 1200 rotações por minuto, durante 72 horas de ensaio analisando-se assim a perda de massa ao longo do procedimento em várias medições (VIECILI, 2004, p. 41). A figura 19 esquematiza o equipamento usado no Método de Liu.

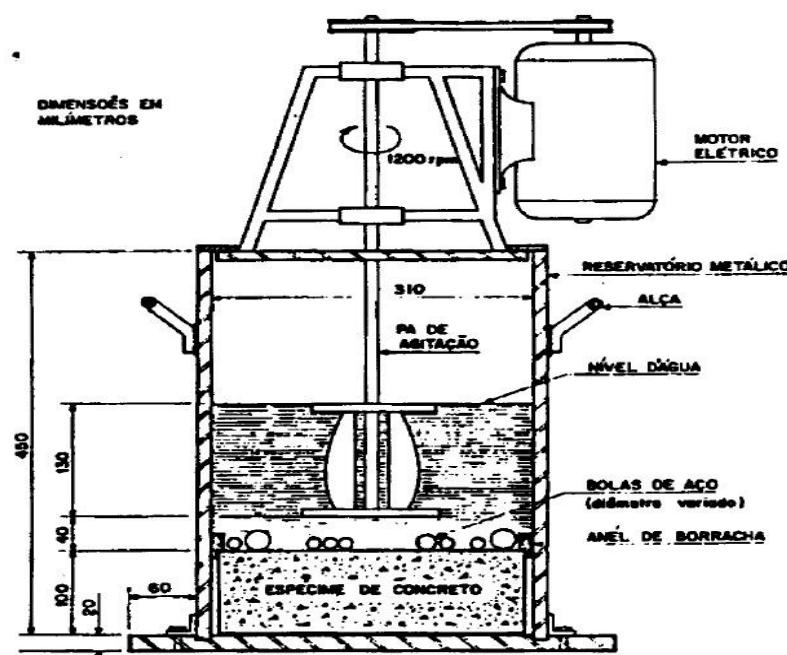
Figura 21 – Equipamento utilizado no Método de Liu



(fonte: VIECILI, 2004)

Atualmente no País, um dos laboratórios que possui equipamento similar ao criado por Liu, é Laboratório de Tecnologia do Concreto da empresa Eletrobrás Furnas, localizado em Goiânia, porém com algumas alterações. O corpo de prova, possui as mesmas dimensões estabelecidas por Liu, 30 cm de diâmetro e 5 cm de altura. Entretanto a quantidade de esferas de aço inseridas é distinta; totalizando 60 esferas. Para efeitos de carga abrasiva são inseridas 25 esferas de aço de 12,5 mm, 25 unidades de 19,0 mm e 10 unidades de 25,0 mm de diâmetro. A velocidade de rotação continua a mesma (1200 rotações por minuto) e as medições são realizadas nas primeiras 24 horas, no fechamento de 48 horas e por fim, 72 horas. Em cada medição interrompe-se o ensaio e realiza-se a pesagem da amostra. A figura 20 detalha o equipamento utilizado em Furnas.

Figura 22 – Modelo genérico do equipamento de ensaio de desgaste superficial por abrasão da empresa Eletrobrás Furnas



(fonte: cedido por Eletrobrás Furnas)

Os corpos de prova foram ensaiados simultaneamente em dois equipamentos distintos. Inicialmente os corpos de prova foram submersos em água, após atingir a completa saturação. Iniciou-se então o ensaio medindo o peso do corpo de prova saturado, visto que durante todo o ensaio o mesmo permanece sempre submerso em água. O resultado final foi obtido através da média aritmética dos dois corpos de prova a fim de se obter um gráfico que contenha um percentual de perda de massa ao longo do ensaio, analisando-se também visualmente a

superfície durante o processo de desgaste. Na figura 21 constam os dois equipamentos adotados no ensaio.

Figura 23 – Equipamentos adotados no ensaio de desgaste superficial por abrasão



(fonte: foto da autora)

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados os resultados dos ensaios descritos no programa experimental: ensaios de flexão; método Perrone, Garcez e ASTM C1399; de desgaste superficial por abrasão e por fim de trabalhabilidade. Em ensaios adaptados dos métodos descritos consta o comparativo entre os resultados obtido nesta pesquisa e os obtidos pela bibliografia. Primeiramente, é abordada a etapa de execução e moldagem dos corpos de prova, com o procedimento de moldagem adotado, descrevendo todo o processo. Logo após, cada item descreve a análise e discussão de cada ensaio realizado neste trabalho.

5.1 ENSAIO DE TRABALHABILIDADE

Mesmo não sendo um ensaio destrutivo, o ensaio de trabalhabilidade ou consistência deve ser avaliado em concreto reforçados com fibras. O presente ensaio avalia o grau de consistência do compósito, o quanto será sua fluidez e facilidade de execução.

No ensaio adotado a medida em um dos eixos do corpo de prova foi 198,2 mm e em outro 200,6 mm, logo o índice de consistência resultou em 199,4 mm. Quando foram realizadas as moldagens dos corpos de prova não se observou nenhuma grande dificuldade de trabalhabilidade e nenhum acúmulo concentrado de fibras. Visto que as fibras aumentam à área superficial do concreto, a dosagem adequada da água é importante, pois influencia na consistência da mistura e na trabalhabilidade do concreto em estado fresco. Na figura 40 observa-se a mistura no momento da retirada do cone de aço.

Figura 24 – Compósito ECC no momento da retirada do cone de aço



(fonte: foto da autora)

As fibras atuam diretamente na coesão na matriz cimentícia, afetando na fluidez do compósito. A redução do índice de consistência é diretamente proporcional ao volume de fibra inserido na mistura. A relação entre água e cimento com cinza volante na razão de 0,33 adotada neste trabalho resultou em um concreto fluido, com uma coesão adequada, sem apresentar dificuldades de moldagem. Visto que, em pavimentos são grande áreas moldadas em um curto período de tempo a facilidade de trabalhar com a mistura influencia no momento da escolha da mesma. A figura 41 apresenta a mistura ao fim do ensaio.

Figura 25 – Compósito ECC no fim do ensaio de trabalhabilidade



(fonte: foto da autora)

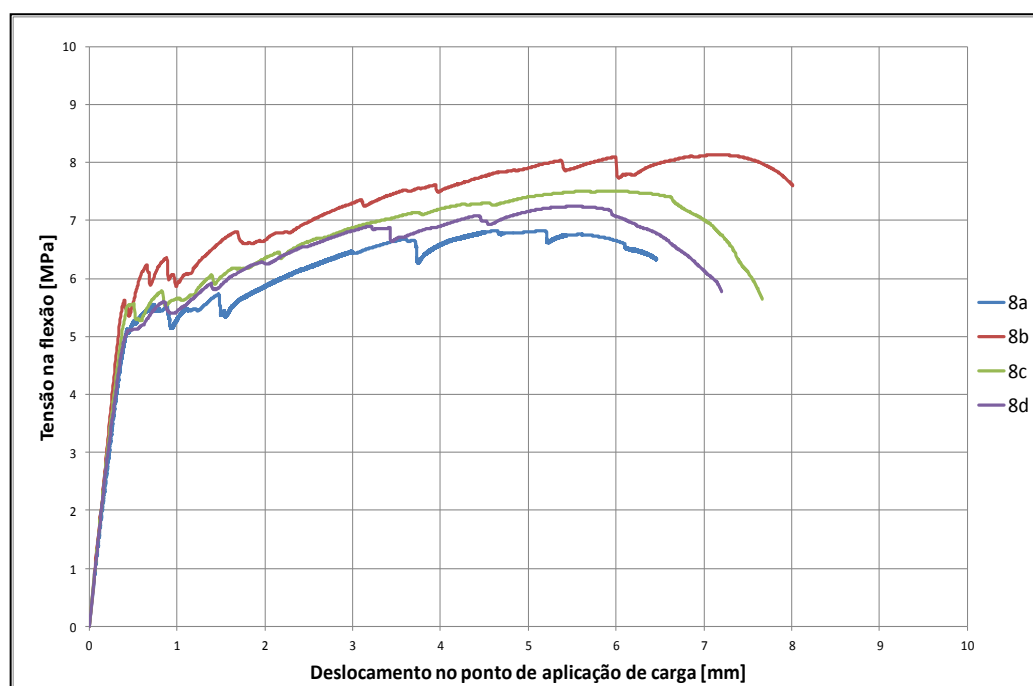
5.2 ENSAIO DE FLEXÃO: MÉTODO PERRONE

Em seus ensaios, Perrone em obteve desempenhos satisfatórios atingindo deslocamentos no ponto de aplicação de carga na ordem de 6,105 mm e com tensões últimas em média de 7,44 MPa (em fase de elaboração)⁵. Na figura 24 consta o gráfico de tensão na flexão por deslocamento no ponto de aplicação de carga obtido no ensaio do pesquisador com o traço de 24% da relação volume de areia pelo volume total e 0,4 de cinza volante proporcional ao cimento.

No gráfico obtido por Perrone, observa-se um aumento efetivo na capacidade de deformação do compósito após o aparecimento da primeira fissura. Em média a primeira fissura aparece em torno de 0,425 mm de deslocamento correspondente a uma tensão média de 5,33 MPa. Como já mencionado no capítulo 3, este aumento de deformação deve-se ao processo conhecido como *strain hardening*, o qual gera múltiplas pequenas fissuras durante o carregamento da estrutura (LI, 2003; PERRONE et al., 2012). Na tabela 7 encontra-se um resumo do ensaio de flexão realizado pelo autor.

⁵ Dissertação em fase de elaboração com título “Estudo da utilização de lajes de continuidade de SHCC para substituição de juntas de dilatação tradicionais em pontes” do autor Vitor Cury Perrone, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Figura 26 – Tensão (MPa) x deslocamento no ponto de aplicação de carga (mm) obtido por Perrone



(fonte: em fase de elaboração)⁶

Tabela 7 – Resumo dos resultados obtidos do ensaio de flexão de Perrone

Corpo de prova	Tensão 1ª fissura (MPa)	Deslocamento 1ª fissura (mm)	Tensão última (MPa)	Deslocamento último (mm)
CV0424_1	5,10	0,427	6,83	5,447
CV0424_2	5,62	0,397	8,13	7,281
CV0424_3	5,50	0,427	7,50	6,067
CV0424_4	5,11	0,449	7,24	5,624
Média	5,33	0,425	7,43	6,105
Desvio padrão	0,23	0,018	0,47	0,716
Coef. variação	4,3%	4,4%	6,4%	11,7%

(fonte: em fase de elaboração)⁷

Nos ensaios do presente trabalho, a principal variável em relação ao ensaio mencionado foi a diminuição da relação entre a água e o cimento junto com a cinza volante. Teoricamente em qualquer estrutura, quando se reduz a quantidade de água no compósito, diretamente aumenta-se a resistência. Para concretos reforçados com fibras a água influencia na boa dispersão entre

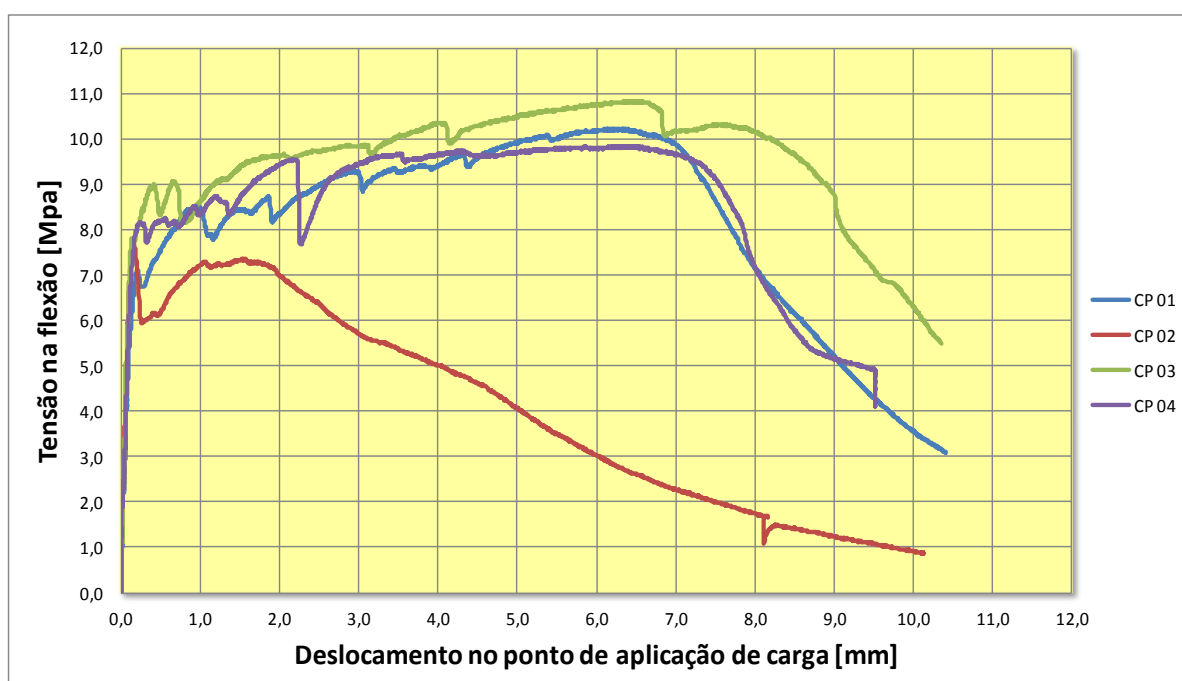
⁶ Dissertação em fase de elaboração com título “Estudo da utilização de lajes de continuidade de SHCC para substituição de juntas de dilatação tradicionais em pontes” do autor Vitor Cury Perrone, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

⁷ idem.

a fibra e a matriz. A figura 25 apresenta os resultados obtidos dos 4 corpos de prova ensaiados neste trabalho através do método proposto.

No gráfico da figura 25, observa-se uma homogeneidade no desempenho dos corpos de prova, exceto no corpo de prova 2, o qual no momento da realização do ensaio encontrava-se com a superfície irregular e inclinada, podendo assim excluí-lo na análise dos resultados. O ensaio foi interrompido quando o deslocamento no ponto de aplicação de carga atingiu em torno de 10 mm.

Figura 27 – Tensão na flexão (MPa) x deslocamento no ponto de aplicação de carga (mm) deste estudo



(fonte: elaborado pela autora)

Verifica-se uma alta capacidade de deformação de todos os corpos de prova, atingindo máximos em torno de 7 mm. Isto ocorre devido às pontes de transferências da tensão entre as fibras espalhadas por todo o compósito, como pode-se observar no gráfico sendo as oscilações de tensões ao longo do ensaio. Cada oscilação representa uma transmissão de tensão entre fibras, aumentando assim a capacidade de deformação e diminuindo a concentração de pontos com alta tensão no compósito. Na figura 26 observa-se o processo de múltipla fissuração ocasionando diversas fissuras menores e paralelas na superfície tracionada do compósito, quando aplicado o carregamento durante o ensaio.

Figura 28 – Processo de múltipla fissuração durante a aplicação do carregamento



(fonte: foto da autora)

Em média a primeira fissura ocorreu com deslocamentos em torno de 0,23 mm e com tensão média de 7,91 MPa. A última fissura ocorreu em 7,71 mm de deslocamentos e com uma tensão de 9,53 MPa. Na tabela 8 encontram-se os valores da deformação e tensão no aparecimento da primeira e última fissura e a tensão máxima atingida em cada corpo de prova.

Tabela 8 – Resumo dos resultados obtidos no ensaio do método Perrone

Corpo de prova	Tensão 1ª fissura (MPa)	Deslocamento 1ª fissura (mm)	Tensão última (MPa)	Deslocamento último (mm)	Tensão máxima (MPa)
CP1	7,105	0,215	10,120	6,938	10,217
CP2	7,586	0,159	-	-	7,645
CP3	8,909	0,364	9,340	8,703	10,830
CP4	8,023	0,201	9,130	7,490	9,830
Média	7,906	0,235	9,530	7,710	9,631
Desvio padrão	0,664	0,077	0,426	0,737	1,201

(fonte: elaborada pela autora)

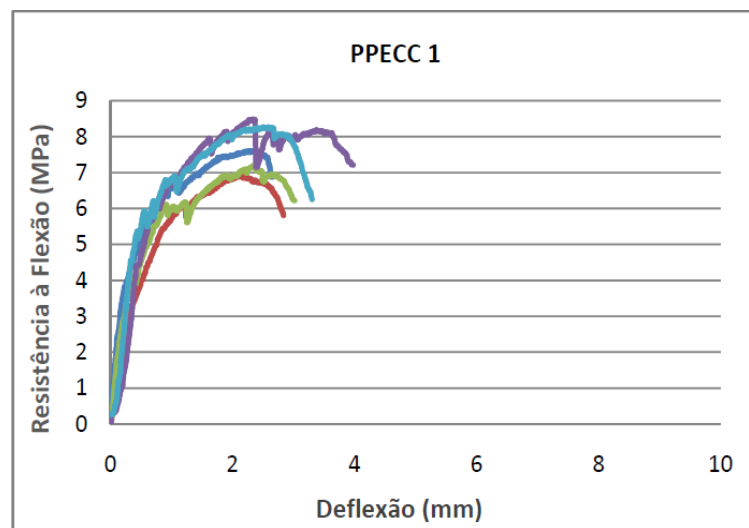
Ao comparar os resultados, nota-se que houve um aumento na capacidade de deformação e na tensão máxima. A primeira fissura ocorreu em um deslocamento menor, porém em uma tensão maior. A última tensão absorvida pelo compósito aumentou em média 28%, e a

deformação no ponto de aplicação de carga 26%, avaliando assim a influencia da água no compósito e quão importante sua dosagem no mesmo.

5.3 ENSAIO DE FLEXÃO: MÉTODO GARCEZ

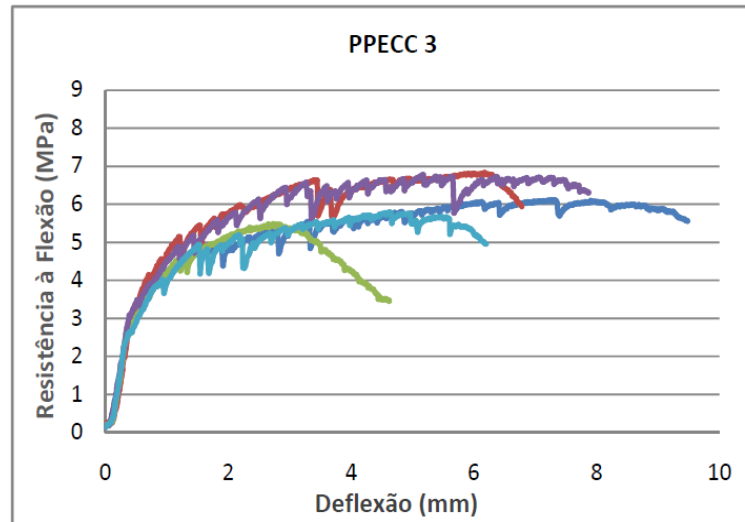
Garcez (2009) em seus ensaios simulou camadas de recapeamento de ECC com traços diferentes. Como já mencionados no capítulo 4, das suas dosagens estudadas somente 3 foram escolhidas para os ensaios de flexão. Como são dosagens distintas, o comportamento ao realizar o ensaio de flexão foi diferente. Foram usados 5 corpos de prova para cada traço ensaiado. Na figura 27 encontra-se o gráfico dos resultados do PPECC 1, na figura 28 verifica-se os dados do PPECC 3 e por fim, a figura 29 apresenta os dados dos PPECC 5.

Figura 29 – Resistência à flexão (MPa) x deflexão (mm) do traço PPECC 1



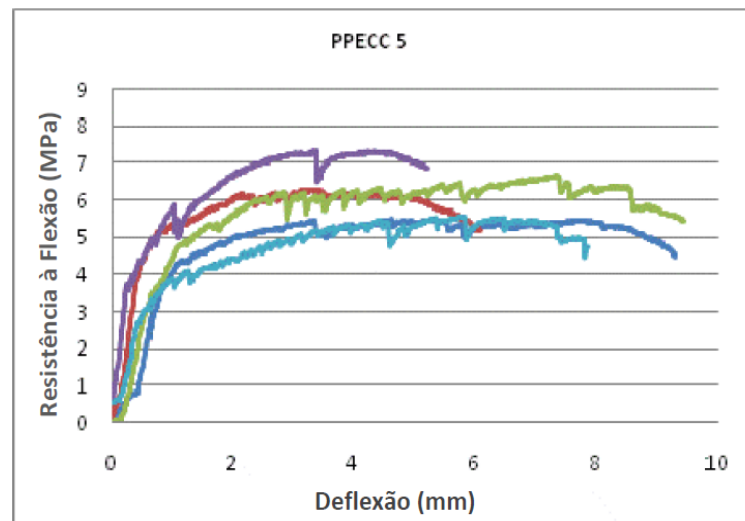
(fonte: GARCEZ, 2009, p. 116)

Figura 30 – Resistência à flexão (MPa) x deflexão (mm) do traço PPECC 3



(fonte: GARCEZ, 2009, p. 116)

Figura 31 – Resistência à flexão (MPa) x deflexão (mm) do traço PPECC 5



(fonte: GARCEZ, 2009, p. 117)

Segundo Garcez (2009), para os resultados propostos o MOR dos compósitos foi superior aos concretos convencionais (4 a 6 MPa). Embora a variação do módulo de ruptura não seja tão significativa, nota-se um grande aumento na capacidade de deflexão de compósitos reforçados com fibras de polipropileno. Em concretos sem adição de fibras, a deflexão depende somente da deformação elástica, que ocorre em pequenas deformações, após ocorrer a primeira fissura o concreto já perde toda a resistência a flexão. Os compósitos PPECC 1, PPECC 2 e PPECC 3 atingiram deflexões últimas médias nos seguintes valores: 3,2 mm; 5 mm e 8 mm

respectivamente. A tabela 9 apresenta os valores dos módulos de ruptura à flexão e deflexão última dos 3 compósitos.

Tabela 9 – Módulo de ruptura à flexão e deflexão última dos compósitos estudados por Garcez (2009)

Compósito	MOR (MPa)	Deflexão última (mm)
PPECC 1	7,668 ± 0,723	3,200 ± 0,529
PPECC 3	6,181 ± 0,563	6,566 ± 1,123
PPECC 5	6,243 ± 0,826	8,000 ± 0,866

(fonte: GARCEZ, 2009, p. 117)

Nos ensaios realizados neste trabalho seguindo o método de Garcez obteve-se o desempenho somente de 3 corpos de prova. Os resultados do CP 1 foram perdidos, devido a problemas técnicos causados durante a operação da prensa. Em média o módulo de ruptura do ensaio foi 8,02 MPa e a deflexão última resultou em 6,64 mm. Na tabela 10 constam os valores obtidos de cada corpo de prova.

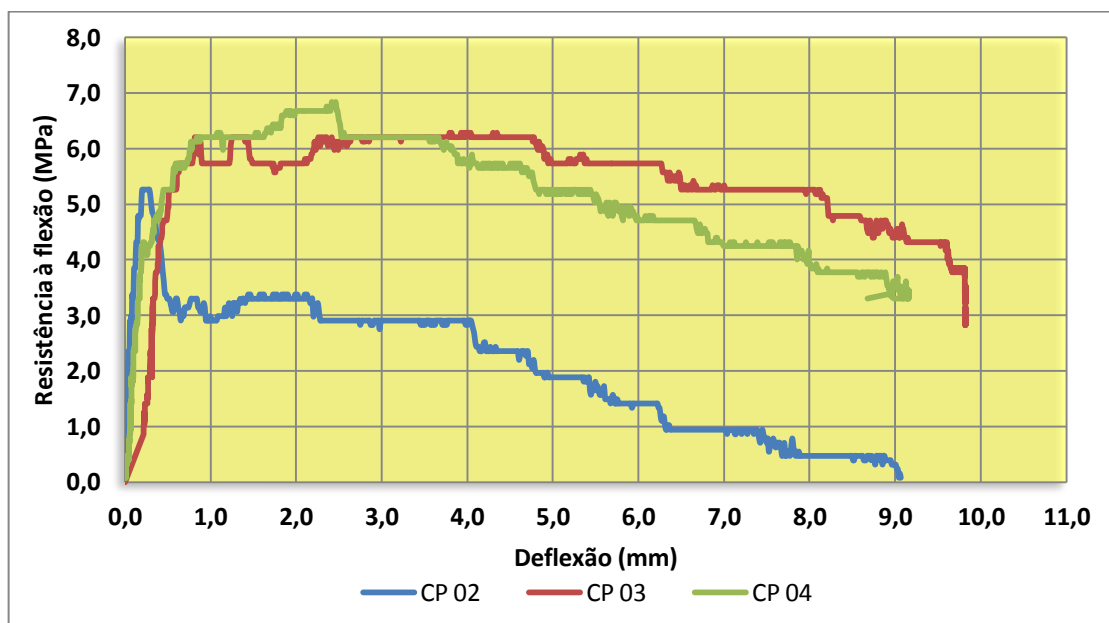
Tabela 10 – Módulo de ruptura à flexão e deflexão última dos corpos de prova ensaiados

Corpo de prova	MOR (MPa)	Deflexão última (mm)
CP 2	2,90	4,04
CP 3	5,26	8,57
CP 4	7,63	7,32
MÉDIA	5,26	6,64
DESVIO PADRÃO	1,93	1,91

(fonte: elaborada pela autora)

No gráfico gerado observou-se uma diminuição da capacidade de carga ao longo do ensaio praticamente linear. Isto deve-se provavelmente em função do aumento da abertura da fissura pré-existente, o que ocasiona uma queda mais brusca da resistência à flexão em comparação ao ensaio sem uma pré fissura existente. Os CP 3 e 4 apresentaram resultados semelhantes, porém o CP 2 não obteve uma capacidade de deflexão razoável. A figura 30 apresenta os resultados obtidos neste trabalho.

Figura 32 – Resistência a flexão (MPa) x deflexão (mm)



(fonte: elaborado pela autora)

Como já mencionado no capítulo 4, o traço PPECC 1 possui uma limitada capacidade de deformação. Comparando a média dos resultados obtidos neste trabalho com este traço, verifica-se que o módulo de ruptura à flexão foi 46% inferior e um houve aumento de deflexão, em torno de 100%. Deve-se verificar que os traços são distintos, e este não possui adição de cinza volante, o que pode influenciar nesta variação.

Em relação ao traço PPECC 3, os resultados são diferentes. Houve uma diminuição de 17,5% do módulo de ruptura à flexão, porém não houve praticamente diferenças na capacidade de deflexão, variando apenas 1,3%. Neste comparativo o cimento CP V foi usado em ambos os traços e a cinza volante também.

Por fim, o traço o PPECC 5 apresentou um desempenho melhor no quesito capacidade de deflexão em comparação ao traço estudado nesta pesquisa. O módulo de ruptura ficou 18% inferior e o valor da deflexão última foi 17% menor. É importante salientar que a capacidade de deflexão do concreto é muito mais importante, pois avalia o desempenho do compósito quanto a tenacidade e/ou ductilidade.

Ao final do carregamento de cada corpo de prova verificou-se que a superfície do mesmo encontrava-se intacta, sem apresentar nenhuma fissura aparente e sem nenhuma deformação ou deterioração. Isto deve-se ao capeamento de ECC absorver toda a energia do

carregamento, transmitindo através das fibras, criando múltiplas pequenas fissuras ao longo das superfícies laterais no ponto de concentração de tensões. Mesmo após perder toda a capacidade de resistência e finalizar o ensaio, a camada de recapeamento permaneceu unida, apesar da fissura pré-existente apresentar dimensões maiores. Uma boa interação entre a fibra influencia neste comportamento, pois auxilia no processo de pontes de transferência dos carregamentos entre as fibras. A figura 31(a) mostra o corpo de prova no fim do ensaio e a figura 31(b) mostra uma das superfícies laterais dos corpos de prova após o fim do ensaio.

Figura 33 – (a) corpo de prova no fim do ensaio e (b) superfícies laterais após o término do ensaio



(fonte: fotos da autora)

5.4 ENSAIO DE FLEXÃO: ASTM C1399

Como já citado no capítulo 4, o ensaio é inválido se a o corpo de prova não fissurar até 0,2 mm. Neste presente ensaio o corpo de prova não atingiu a primeira fissura neste período, porém o procedimento foi realizado normalmente. Ao obter os gráficos de cada corpo de prova observou-se um comportamento parecido ao descrito pela Norma, porém sem apresentar a primeira fissuração.

O ensaio foi dividido em duas partes: a parte I é quando possui a chapa para absorver os carregamentos e a parte II é após retirar a chapa e prosseguir o ensaio até o momento da ruptura. Foram usados quatro corpos de prova e os resultados deles são apresentados a seguir, na tabela 11. Para o cálculo da resistência residual média (ARS) de cada corpo de prova,

adotou-se a fórmula 2, descrita no capítulo 4. Em média os corpos de prova apresentaram ARS de 3,19 MPa e deflexão de 4,56 mm.

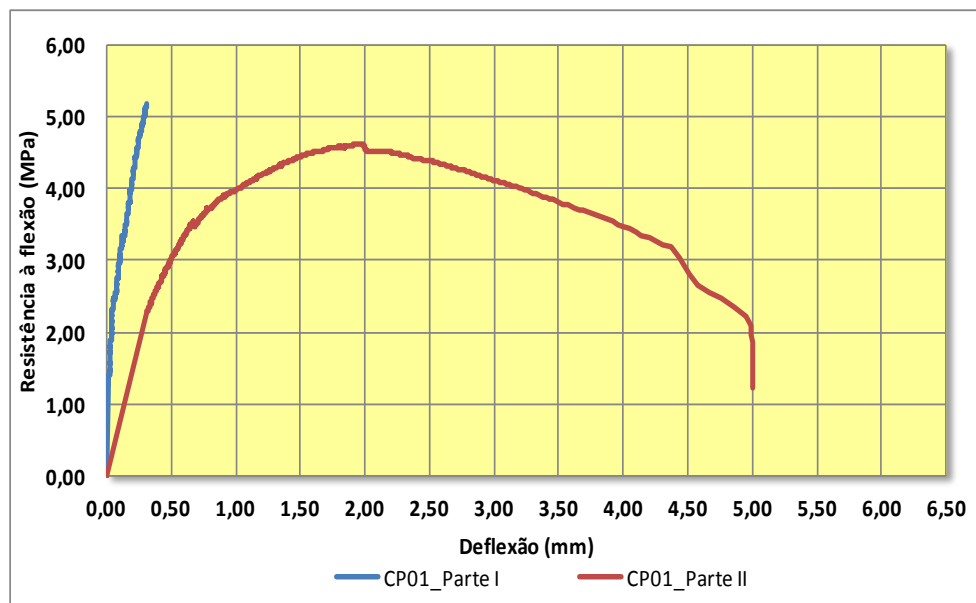
Tabela 11 – Resultados obtidos nos ensaios da Norma ASTM C1399

Corpo de Prova	ARS (MPa)	Deflexão máxima (mm)
CP1	3,725	5,004
CP2	3,237	4,229
CP3	3,193	2,834
CP4	2,605	6,186
Média	3,190	4,563
Desvio Padrão	0,397	1,218

(fonte: elaborada pela autora)

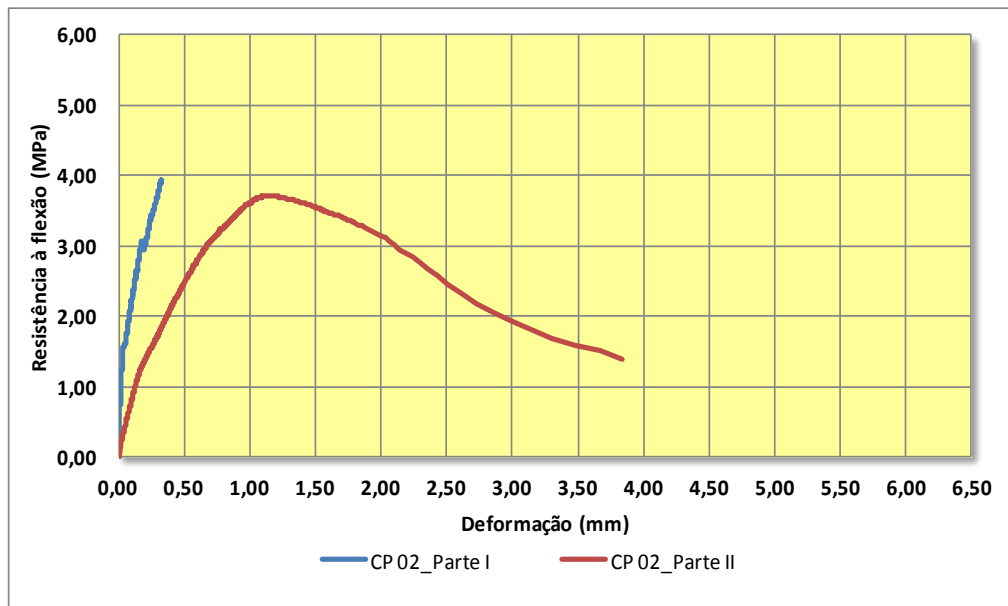
Os gráficos dos carregamentos ocorridos na etapa II de cada ensaio representam uma curva côncava virada para baixo. Todos os corpos de prova apresentaram comportamentos similares, obtendo a curva de resistência residual por deflexão mencionada. Na figura 32, observa-se o gráfico resultante no corpo de prova 1, na figura 33 o gráfico do corpo de prova 2, na figura 34 o gráfico referente ao corpo de prova 3 e, por fim, o gráfico obtido no corpo de prova 4 apresentado na figura 35.

Figura 34 – Resultado do corpo de prova 1 do ensaio da Norma ASTM C1399



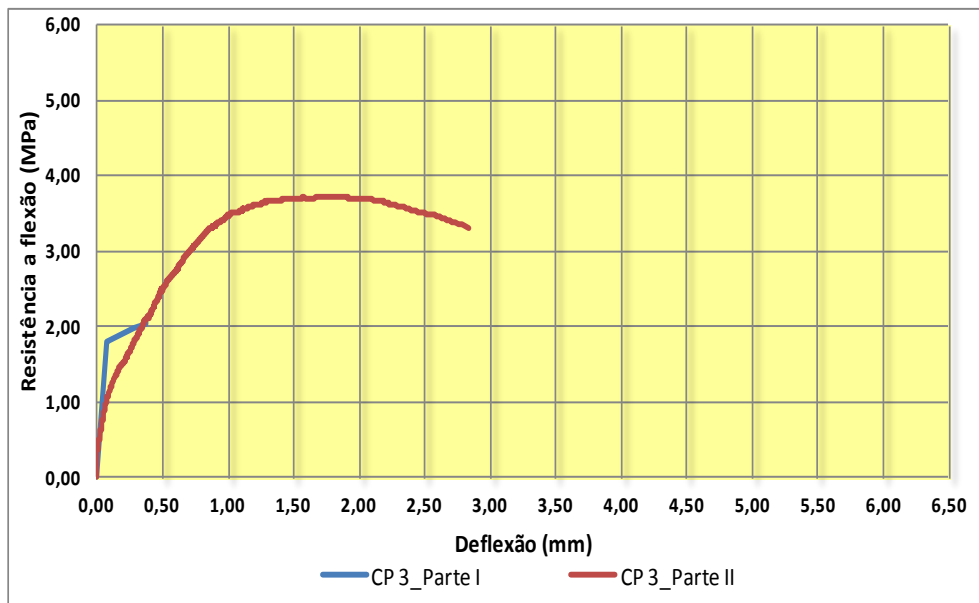
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 35 – Resultado do corpo de prova 2 do ensaio da Norma ASTM C1399



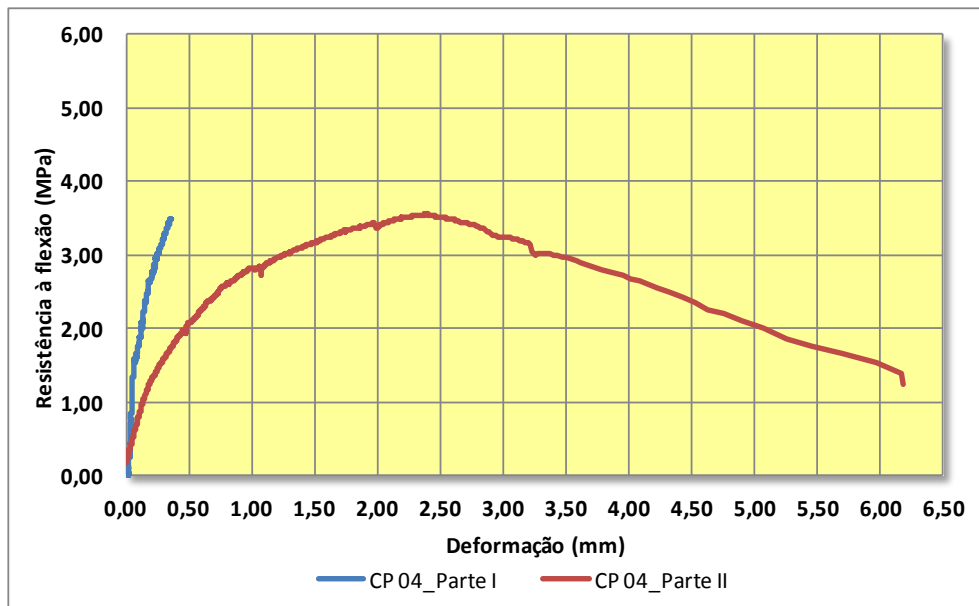
(fonte: elaborado pela autora)

Figura 36 – Resultado do corpo de prova 3 do ensaio da Norma ASTM C1399



(fonte: elaborado pela autora)

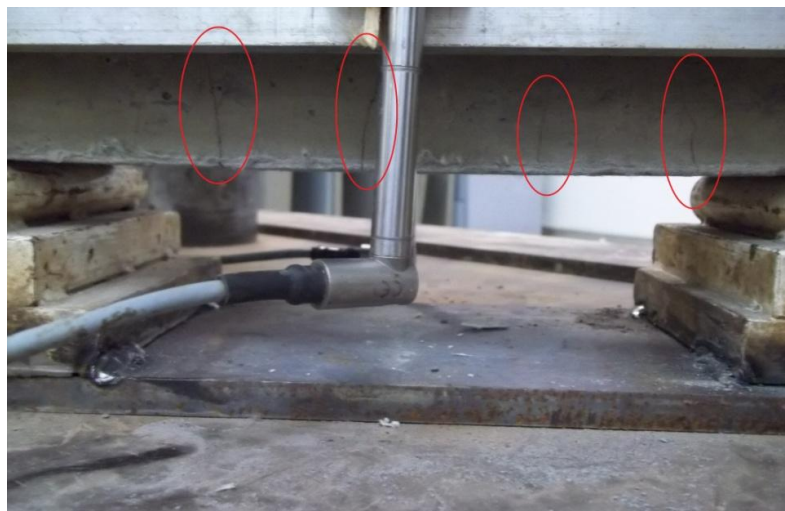
Figura 37 – Resultado do corpo de prova 4 do ensaio da Norma ASTM C1399



(fonte: elaborado pela autora)

Durante o ensaio observou-se o aparecimento de fissuras nas laterais dos corpos de prova, um padrão de fissuração semelhante ao ocorrido nos outros ensaios de flexão. Múltiplas pequenas fissuras paralelas com dimensões semelhantes espalharam-se ao longo da interface lateral. Evidentemente a fissura no centro do vão tem abertura maior, porém as fissuras que aparecem ao redor da mesma evitam que a abertura da fissura principal aumente de tamanho, o que retarda a perda da resistência residual à flexão e aumenta a capacidade de deformação. Observa-se na figura 36 o padrão de fissuração ocorrido no momento do ensaio.

Figura 38 – Processo de múltipla fissuração ocorrido no ensaio



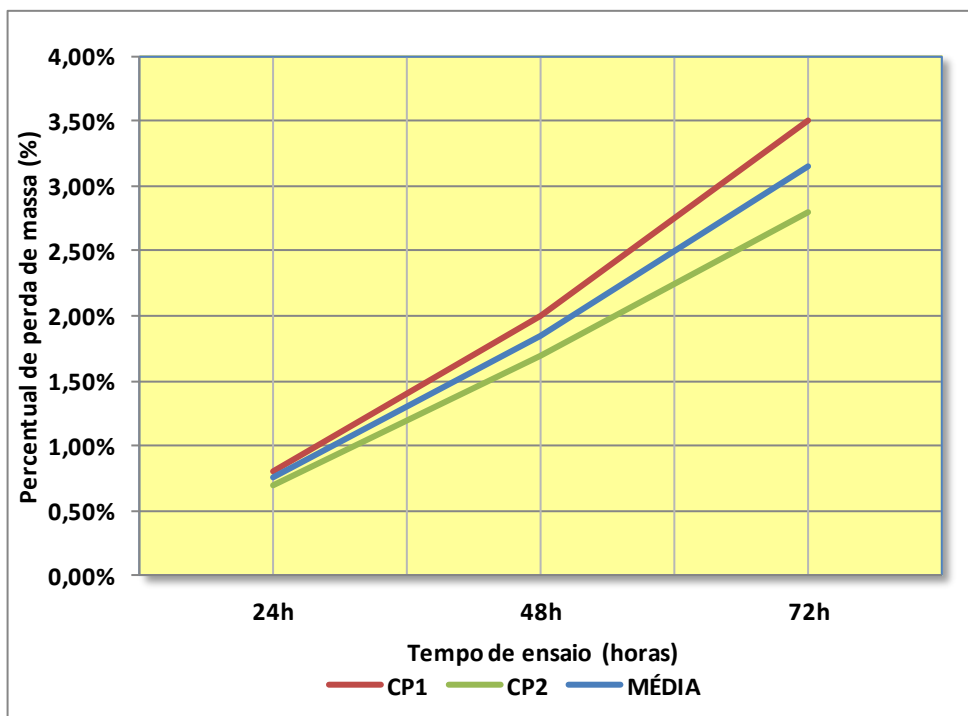
(fonte: foto da autora)

5.5 ENSAIO DE DESGASTE SUPERFICIAL POR ABRASÃO

A adição de fibras de polipropileno pode influenciar no grau de desgaste superficial devido a alguns fatores. A fibra reduz o índice de microvazios, diminuindo assim a quantidade de poros no concreto. Possui um alto módulo de deformação, auxiliando no processo de fissuração das primeiras idades, o que diminui a retração plástica. Como são distribuídas aleatórias encontram-se também na camada superficial, auxiliando na diminuição da exsudação, evitando a diminuição da resistência da parte superior do pavimento (SILVA, 2011).

Para o ensaio de desgaste superficial por abrasão obteve-se um gráfico que verifica a perda de massa do corpo de prova ao longo do ensaio, como já mencionado anteriormente. Os dois corpos de prova apresentaram resultado semelhantes, verificando um desvio padrão no final do ensaio de 0,35%. A perda de massa final média foi igual a 3,15%, segundo é apresentando na figura 37, na qual constam os resultados dos dois corpos de prova ensaiados e a média entre eles.

Figura 39 – Resultados dos ensaios de desgaste superficial por abrasão



(fonte: elaborado pela autora)

Na prática a perda de massa deve alcançar no máximo 4%, segundo a experiência dos resultados deste equipamento. O que valida o resultado do ensaio dentro do recomendado. Vale resaltar que estes dados de perda de massa referem-se ao ensaio descrito acima, não podendo ser comparado diretamente com outros ensaios. Na tabela 12 encontram-se os valores detalhados obtidos no ensaio, a média para cada medição, bem como desvio obtido.

Tabela 12 – Resumo dos dados obtidos no ensaio de desgaste superficial por abrasão

Perda de massa ao longo do ensaio (%)				
Medição	CP1	CP2	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
24h	0,80%	0,70%	0,75%	0,05%
48h	2,00%	1,70%	1,85%	0,15%
72h	3,50%	2,80%	3,15%	0,35%

(fonte: elaborada pela autora)

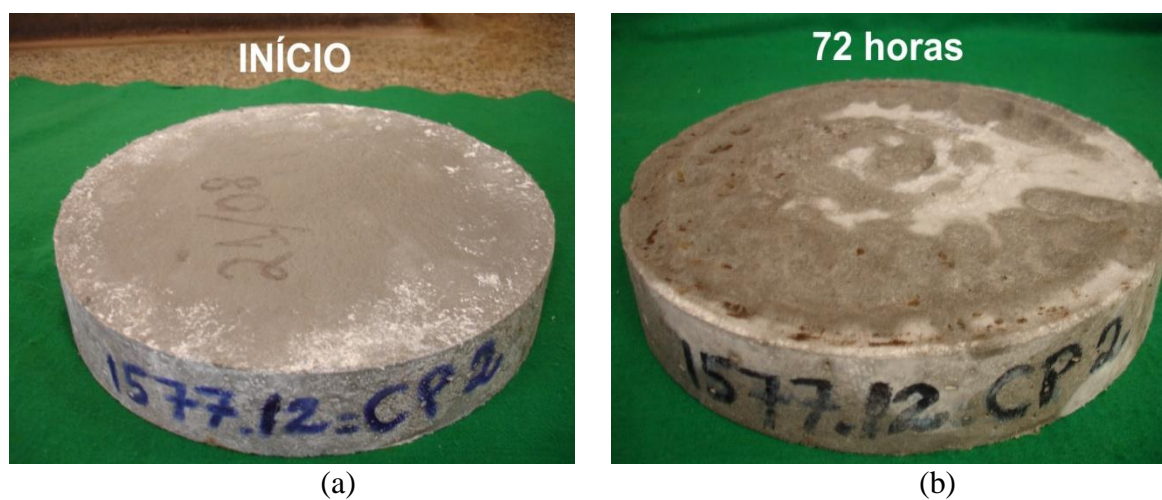
Além da análise quantitativa da perda de massa ao longo do concreto, o aspecto visual também é de válida importância, visto que em pavimentos de concreto as condições em que a superfície do concreto encontra-se pode determinar a duração da vida útil do mesmo. Superfícies desgastadas apresentam chances de ocorrer fissuras maiores que degradam o pavimento, diminuindo a capacidade portante e a sua resistência aos carregamentos. A figura 38(a) apresenta o corpo de prova 1, o qual perdeu mais massa, antes de iniciar o ensaio e na figura 38(b) ao completar 72 horas de ensaio. E na figura 39(a) observa-se o corpo de prova 2 antes de iniciar o ensaio e na figura 39(b) ao finalizar o ensaio.

Figura 40 – (a) corpo de prova 1 antes de iniciar o ensaio;
(b) corpo de prova 1 ao completar 72 horas de ensaio



(fonte: fotos cedidas pela Eletrobrás Furnas)

Figura 41 – (a) corpo de prova 2 antes de iniciar o ensaio (b) corpo de prova 2 ao completar 72 horas de ensaio



(fonte: fotos cedidas pela Eletrobrás Furnas)

Como este tipo de compósito não apresenta agregados graúdos, a superfície após os ensaios apresenta-se praticamente lisa, sem apresentar fissuras, e nenhuma degradação relativamente considerável do corpo de prova. Houve um desgaste homogêneo na superfície do compósito, provavelmente devido a distribuição das fibras ter ocorrido de forma semelhante ao longo da área superficial. Todas as fotos do CP 1 e do CP 2, de cada medição (24 horas e 48 horas), realizados no Laboratório de Tecnologia do Concreto da empresa Eletrobrás Furnas encontram-se no apêndice A do trabalho.

6 CONCLUSÕES

A prática do desenvolvimento de novos compósitos cimentícios deve estar em constante evolução. É de grande importância o estudo da adição de novos materiais que melhoram e aperfeiçoam o desempenho do concreto. Desta forma, esta pesquisa teve como objetivo colaborar com o desenvolvimento destas novas tecnologias empregadas em pavimentos de concreto.

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.

Já comprovou-se em estudos anteriores que a adição de cinza volante auxilia no processo de fissuração no compósito. Devido ao ECC necessitar de um alto consumo de cimento, a cinza adicionada ao cimento pode ser uma alternativa econômica e sustentável. Além de ser um resíduo que seria descartado, a cinza apresenta propriedades pozolânicas semelhantes ao cimento, ajudando a controlar a tenacidade da matriz. Neste trabalho não houve comparativos entre teores de cinza volante, porém nas pesquisas já realizadas em que o traço desta pesquisa se baseou, o uso da proporção adotada foi o que obteve melhores resultados.

Em pavimentos de concreto, avaliar o comportamento da estrutura sob solicitações de flexão é essencial para um adequado dimensionamento. Porém, para avaliar concreto com fibras alguns ensaios mais específicos determinam de forma mais precisa o desempenho do compósito.

No ensaio proposto pelo método Perrone, o comportamento à flexão do compósito gerou resultados satisfatórios. Comparados com resultados da referente pesquisa obteve-se um aumento na capacidade de deformação, em função da redução da quantidade de água inserida na mistura. A capacidade de deformação aumentou em torno de 26% em apenas uma diminuição de 0,02 (de 0,35 para 0,33) da relação entre água e cimento mais cinza volante.

Este ensaio apresentou-se adequado para avaliar o desempenho das fibras, mostrando claramente o processo de múltipla fissuração ocorrido nos corpos de prova.

No ensaio realizado pelo método de Garcez simulando um recapeamento com ECC com um ponto de concentração de tensões, os resultados obtidos mostraram-se regulares. Porém, deve-se avaliar que somente dois dos quatro corpos de prova apresentaram resultados semelhantes. Os resultados obtidos apresentaram valores inferiores ao realizados por Garcez, porém verificou-se um adequado processo de múltiplas pequenas fissuras no ponto de concentração de tensões.

Vale ressaltar que alguns materiais empregados pela referência bibliográfica eram diferentes. A cinza volante usada é de empresa diferente, o que pode afetar em suas propriedades pozolânicas. Todos os outros materiais, como cimento, agregados e aditivos foram produzidos nos Estados Unidos, ao contrário dos materiais desta pesquisa que eram nacionais. Este ensaio aplicado no compósito estudado apresenta-se como uma ótima opção para a determinação da deformação em zonas de acúmulo de tensões.

Por fim, o último ensaio de flexão analisado foi o da Norma ASTM C1399. Como os corpos de prova não atingiram a primeira fissura no valor estipulado pela Norma (0,2 mm de deformações), o ensaio não seria considerado válido. Porém, a fim de obter o comportamento da fibra realizou-se o mesmo.

O padrão de deformação foi homogêneo entre os corpos de prova e calculou-se a resistência residual média, obtendo valores de ARS e deflexão inferiores aos outros ensaios realizados. Desta forma, este ensaio não é o mais adequado para a determinação da deflexão máxima e do padrão de deformação para ECC. Visto que, nos outros ensaios o ECC estudado apresentou o surgimento da primeira fissura em torno de 0,4 a 0,5 mm. Porém, como nos outros ensaios, observou-se o processo de múltiplas pequenas fissuras paralelas e equidistantes ao longo nas superfícies laterais, validando assim o compósito como um ECC.

O compósito estudado obteve um bom desempenho quando ensaiado sob desgaste superficial. Tendo somente perda de massa média de 3,15%, os corpos de prova apresentaram a superfície sem muitas irregularidades. No fim do ensaio verificou-se nos corpos de prova um leve desgaste homogêneo em toda a superfície, sem diagnosticar pontos com concentrações de desgaste. O que comprova que o ECC estudado resiste ao desgaste na superfície, evitando sua

deterioração sem diminuir a vida útil. O ensaio de desgaste superficial por abrasão é fundamental para estruturas como pavimentos, tanto sendo um ECC ou um concreto convencional.

Através do ensaio de trabalhabilidade obteve-se uma análise do índice de consistência. A mistura obteve uma coesão aceitável, possuindo uma relação adequada entre água e cimento mais cinza volante o que proporciona uma boa trabalhabilidade quando aplicado em escala comercial. Este ensaio é fundamental para concretos reforçados com fibras, em virtude da fibra gerar um aumento da quantidade de água e de ar incorporado na mistura.

Dentre os ensaios de flexão realizados, o método Perrone e método Garcez foram os mais adequados para a verificação da influência da fibra de polipropileno e da cinza volante. O primeiro em geral pode avaliar o comportamento da pista do pavimento (não considerando um recapeamento). Já o segundo, pode ser uma boa alternativa para a simulação de recapeamentos de ECC sobre uma camada pré-existente ou sobre juntas de dilatação. No ECC estudado o ensaio da Norma ASTM C1399 não foi apropriado para este tipo de compósito. Todos os ensaios de flexão constaram o processo *strain hardening* comum em ECC, ocorrendo múltiplas pequenas fissuras paralelas.

Visto o bom desempenho do traço estudado nos ensaios adotados, o ECC usado nesta pesquisa representa uma tecnologia interessante para a aplicação em pavimentações, pois apresenta significativas melhorias no desempenho do concreto quando submetidos aos ensaios descritos. Além disto, os materiais utilizados são da indústria nacional, e, ademais, a cinza volante é um resíduo das termoelétricas brasileiras. Com um baixo teor de fibras inseridas no compósito, esta pode ser considerado uma opção promissora para pavimentos de concreto.

Por fim, depois de caracterizado o desempenho do ECC nesta pesquisa, para um melhor desempenho tem-se como sugestão a realização de outros ensaios, como fadiga, simulando cargas cíclicas e, também, ensaios que avaliam o traço adotado durante o processo de *self healing*, a autocicatrização das fissuras.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C78 – 02**: standard test method for flexural strength of concrete. West Conshohocken, Pennsylvania, 2002a.

_____. **ASTM C1399**: standard test method for obtaining average residual-strength of fiber reinforced. West Conshohocken, Pennsylvania, 2002b.

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

_____. **NBR 12653**: materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 7215**: cimento Portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

BALBO, J. T. Pavimentos de concreto viários e pisos industriais de concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Ibracon, 2005. p. 1297-1332. v. 2.

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.

FÉLIX, A. H. O. **Compósitos de polipropileno com fibra de vidro utilizando viniltrimetoxisilano como agente de adesão**. 2002. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Ibracon, 2005. p. 1195-1225. v. 2.

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 Civil) – 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.; YANG, E. H. **Self Healing in Concrete Materials**. Springer: Sybrand van der Zwaag, 2007.

MAGALHÃES, M. S. **Caracterização Experimental de Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras de PVA**: processo de fratura, propriedades térmicas, deformações diferidas e estabilidade térmica. 2010. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) –

Programa Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994.

NUNES, N. L. **Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restritos**. 2006. 253 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PERRONE, V. C.; BARCELOS, M.; STEIN, K.; SILVA FILHO, L. C. P. Avaliação da influência do teor de agregados no comportamento em compressão de compósitos tipo SHCC. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2012, Maceió. **Anais...**

QIAN, S.; LI, V. C. Simplified Inverse Method for Determining the Tensile Strain Capacity of Strain Hardening Cementitious Composites. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 5, n. 2, p. 235-246, June, 2007.

SILVA, C. V. **Contribuição ao estudo do desgaste superficial por abrasão em concretos empregados em pisos**. 2011. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

TIGUMAN, M. P.; FIGUEIREDO, A. D. **Nova técnica de determinação da tenacidade dos compósitos reforçados com fibras: ASTM C1399 (2002)**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005. Boletim Técnico PCC/398.

VIECILI, F. A. **Influência da Utilização dos Endurecedores Superficiais Cimentícios na Resistência à Abrasão de Pisos Industriais de Concreto**. 2004. 99 f. Trabalho de Conclusão (Mestrado em Engenharia) – Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

**APÊNDICE A – Fotos dos corpos de prova
do ensaio de desgaste superficial por abrasão**



Corpo de prova 1: início do ensaio



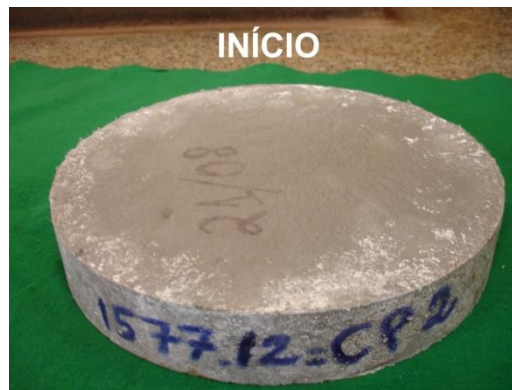
Corpo de prova 1: 24 horas



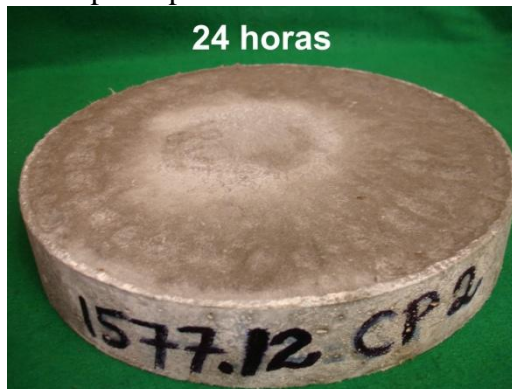
Corpo de prova 1: 48 horas



Corpo de prova 1: 72 horas



Corpo de prova 2: início do ensaio



Corpo de prova 2: 24 horas



Corpo de prova 2: 48 horas



Corpo de prova 2: 72 horas