



# REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG



**Dissertação de Mestrado**

**“Avaliação de compósitos cimentícios com  
adição de fibras curtas originadas de placas  
de circuito impresso”**



**Autor: Herbert Radispiel Filho**

**Orientador: Profa. Dra. Kátia Monteiro Novack**



**Junho de 2013**



# REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

**Herbert Radispel Filho**

**“Avaliação de compósitos cimentícios com adição de fibras curtas originadas de placas de circuito impresso.”**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processos de fabricação

Orientador: Profa. Dra. Kátia Monteiro Novack

Ouro Preto, junho de 2013

R129a Radispiel Filho, Herbert.  
Avaliação de compósitos cimentícios com adição de fibras curtas originadas de placas de circuito impresso [manuscrito] / Herbert Radispiel Filho – 2013.  
xiv, 115 f.: il. color.; graf.; tab.;

Orientadora: Profª Drª Kátia Monteiro Novack.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Rede Temática em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processos de Fabricação.

1. Placa de circuito impresso - Teses. 2. Compósitos poliméricos - fibras curtas - Teses. 3. Cimento - Adições - Teses. 4. Cimento - Aditivos - Teses. 5. Concreto - Teses. I. Novack, Kátia Monteiro. II. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 620.168:666.94

Catálogo: [sisbin@sisbin.ufop.br](mailto:sisbin@sisbin.ufop.br)



**REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**  
**UFOP - CETEC - UEMG**  
Pós-Graduação em Engenharia de Materiais



**“Avaliação de Compósitos Cimentícios Com Adição de Fibras Curtas Originadas de Placas de Circuito Impresso”**

**Autor: Herbert Radispiel Filho**

Dissertação defendida e aprovada, em 05 de junho de 2013, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof.<sup>a</sup> Kátia Monteiro-Novack (Doutora) – Orientadora  
Universidade Federal de Ouro Preto / REDEMAT / DEQUI

Prof. Ricardo Pinheiro Domingues (Doutora)  
Universidade Federal de Ouro Preto / REDEMAT / DEMET

Prof. Augusto César da Silva Bezerra (Doutor)  
Centro Federal de Ensino Tecnológico de Minas Gerais – Campus Araxá

## **Agradecimentos**

Agradeço em primeiro lugar a Deus que iluminou o meu caminho durante esta caminhada.

Agradeço também a minha esposa, Maria Isabel, que de forma especial e carinhosa me deu força e coragem, me apoiando nos momentos de dificuldades, quero agradecer também as minhas filhas, Giovanna e Júlia, que iluminaram de maneira especial os meus pensamentos me levando a buscar mais conhecimentos.

À prof. Dra. Kátia, pela paciência na orientação e ajudas que tornaram possível a conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Augusto, pela parceria, incentivo, contribuição e ensinamentos prestados no decorrer deste trabalho.

Ao Laboratorista Ricardo do Laboratório de Edificações CEFET/MG - Campus Araxá, pela ajuda sempre que solicitada.

A minha orientanda de iniciação científica Walgiane, pela ajuda na confecção dos corpos de prova e corte das placas.

Ao CDTN nas pessoas dos Srs. João Batista Santos Barbosa e Ivan Braga pela realização dos ensaios DRX e FTIR.

A empresa CBMM, na pessoa do Eng. Daniel Pallos Fridman pela realização dos ensaios MEV.

Ao CEFET/MG, por investir na capacitação e qualificação de seus servidores.

A REDEMAT, por oferecer o mestrado em Engenharia de Materiais.

Aos amigos e colegas, pelo incentivo e pelo apoio constante.

“Ninguém ignora tudo. Ninguém sabe tudo. Todos nós sabemos alguma coisa. Todos nós ignoramos alguma coisa. Por isso aprendemos sempre”.

*Paulo Freire*

## RESUMO

A indústria eletroeletrônica vem aumentando a quantidade de sucatas geradas anualmente. A maioria dos produtos eletroeletrônicos não recebe tratamento pós-consumo sendo depositados em aterros sanitários junto com resíduos domésticos. Os resíduos eletroeletrônicos são caracterizados pela presença de metais distribuídos nos gabinetes dos equipamentos, em placas de circuito impresso, fios, cabos elétricos, vidros, polímeros, componentes eletrônicos em geral, e outros. Uma das possíveis soluções para a redução desta sucata é o reaproveitamento destes materiais. Assim, este reaproveitamento poderá minimizar as quantidades perdidas, gerando subprodutos que podem agregar valor econômico a estes resíduos. Dentre os resíduos gerados pelo descarte de equipamentos eletroeletrônicos estão as placas de circuitos impresso. Estas placas podem ser de fenolite, fibra de vidro, fibra de poliéster, filme de poliéster, filmes específicos à base de diversos polímeros, que possuem a superfície coberta numa ou nas duas faces por fina película de cobre, prata, ou ligas à base de ouro, níquel, entre outras. Nestas placas são desenhadas pistas condutoras que representam o circuito onde são fixados os componentes eletrônicos. Os metais e as ligas utilizados nas placas de circuito impresso, uma vez separados, podem ser reaproveitados, e este reaproveitamento já foi pesquisado. Após a retirada de todos os componentes eletrônicos e metais da placa de circuito impresso sendo neste caso, a placa de fibra de vidro FR-4, sobra uma placa de plástico reforçado com fibra de vidro. Esta placa é um material composto da aglomeração de finíssimos filamentos de vidro altamente flexíveis. Estes filamentos quando adicionados à resina poliéster (ou outro tipo de resina) produzem um material que apresenta alta resistência à tração, flexão e impacto, sendo muito empregados em aplicações estruturais. Devido a estas propriedades, demonstrou-se através de ensaios que este composto de resina epóxi e fibras de vidro, quando adicionado à compósito cimentício, como concretos e argamassas, melhorou o desempenho mecânico do mesmo, tornando viável a utilização de fibras originadas de placas de circuito impresso em compósitos cimentícios.

Palavras-chaves: Placa de circuito impresso, Fibras curtas, Adições, Concreto.

## ABSTRACT

The quantity of waste generated by the electronic industry has increased year by year. The majority of electronic products are not treated after consumption but buried in landfills together with household waste, instead. The residues produced by this industry contain metals on their components such as cabinets, printed circuit boards (PCB), wires, electrical cords, glasses, polymer, electronics in general, and others. One of the possible solutions for this problem is recycling these residues to develop new products. This process would reduce the quantity of material lost by the electronic industry as well as aggregate economic value to it. PCB are one the residues generated by this industry. These boards can be made by phenolite, fiberglass, polyester fiber, polyester film, specific films based on different polymers that contain their surface covered by a fine pellicle of copper, silver, or alloys of gold and nickel. On these boards are drawn conductive tracks that represent the circuit where the electronic components are fixed. Once the metals and the alloys used on the circuit plates are separate, they can be reutilized, although this process has already been studied. After separating all the electronic components and metals from the boards a plastic plate is left. This plastic plate is reinforced by fiberglass. This plate is a material formed by a fine agglomerate of highly flexible glass filaments. These filaments when added to a polyester resin (or another type of resin) make a high resilience material being frequently used in structural application. Due to these properties, it's shown through testing that this material made by epoxy resin and fiberglass when added to cementitious composite such as concrete and mortars, improved the mechanical performance of the same, which makes viable the use of fibers originating from printed circuit boards in cementitious composite structures.

# SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>iv</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xii</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 Importância do tema.....	15
1.2 Relevância científica da pesquisa.....	17
1.3 Objetivos .....	19
1.3.1 Objetivo Geral .....	19
1.3.2 Objetivos específicos.....	19
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>20</b>
2.1 A indústria eletroeletrônica .....	20
2.2 Classificação dos eletroeletrônicos .....	21
2.3 Resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos – REEE .....	22
2.4 A composição física e química dos – REEE .....	24
2.5 Placas de circuito impresso – PCI.....	27
2.6 Laminado FR-4 .....	29
2.7 Reciclagem de placas de circuito impresso.....	31
2.8 Compósito cimentício .....	33
2.9 Componentes do concreto .....	35
2.10 Reforço de concreto com fibras .....	36
2.11 Fibras.....	37
2.12 Desempenho de concretos reforçados com fibras curtas .....	39
2.13 Resistência à compressão .....	40
2.14 Resistência à tração .....	41
2.15 Resistência à flexão .....	42
2.16 Resistência ao impacto e à fadiga .....	43
2.17 Durabilidade .....	44
2.18 Retração e fluência .....	44

2.19	Interação matriz-fibra.....	45
2.20	Considerações.....	55
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>57</b>
3.1	Materiais.....	57
3.1.1	Fibras.....	57
3.1.2	Agregado miúdo.....	57
3.1.3	Aglomerante.....	59
3.1.4	Água.....	60
3.2	Métodos.....	60
3.2.1	Produção das Fibras.....	60
3.2.2	Produção de Pó de Fibras.....	64
3.2.3	Confecção de Corpos de Prova.....	64
3.2.4	Análise térmica.....	70
3.2.5	Análise química da fibra.....	70
3.2.6	Absorção de água.....	70
3.2.7	Ensaio mecânicos.....	71
3.2.8	Análise ótica.....	74
<b>4</b>	<b>RESULTADOS e DISCUSSÕES.....</b>	<b>75</b>
4.1	Análise térmica.....	75
4.2	Difração de Raios X.....	77
4.3	Análise de FTIR.....	78
4.4	Análise EDS.....	80
4.5	Absorção de água.....	82
4.6	Compressão axial da argamassa referência.....	84
4.7	Resistência à tração das fibras.....	86
4.8	Tração na flexão da argamassa referência.....	86
4.9	Tração na flexão do compósito.....	88
4.10	Ensaio Pullout.....	94
4.11	Análises óticas.....	95
4.12	Análise microscópica.....	99
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>105</b>
<b>6</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>107</b>
<b>7</b>	<b>PUBLICAÇÃO.....</b>	<b>108</b>

<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>109</b>
----------	---	------------

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Composição dos equipamentos nos REEE .....	23
Figura 2.2 - Placas de circuito impresso .....	28
Figura 2.3 - Formação da DGEBA.....	30
Figura 2.4 - Estrutura química do Tetrabromobisfenol A (TBBPA) .....	31
Figura 2.5 - Estrutura química de Imidazole.....	31
Figura 2.6 - Composição típica dos REEE.....	33
Figura 2.7 - Influência no teor de fibras na curva tensão x deformação na compressão. ....	40
Figura 2.8 - Características da curva carga x deslocamento .....	42
Figura 2.9 - Mecanismo de controle da propagação das fissuras.....	45
Figura 2.10 - Representação do arrancamento da fibra da matriz.....	46
Figura 2.11 - Representação das tensões de cisalhamento na interface .....	47
Figura 2.12 - Representação da fibra e da matriz na vizinhança da fissura .....	48
Figura 2.13 - Exemplo da variação da eficiência entre a interface fibra e o concreto com a forma da fibra. ....	50
Figura 2.14 - A importância da resistência à tração da fibra.....	50
Figura 2.15 - Dosagem x Fator de forma (L/D) .....	51
Figura 2.16 - Esquema de um ensaio de flexão.....	52
Figura 2.17 - Fator de forma da fibra. ....	52
Figura 2.18 - Energia absorvida (%) versus fator de forma (L/D).....	53
Figura 2.19 - Concreto reforçado com fibras onde há compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo. ....	54
Figura 2.20 - Concreto reforçado com fibras onde não há compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo.....	55
Figura 3.1 - Fibras obtidas após o corte das placas de circuito impresso. ....	57
Figura 3.2 - Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado. ....	58
Figura 3.3 - Placas de circuito impresso (sucatas de equipamentos eletrônicos).....	61
Figura 3.4 - Remoção dos componentes eletrônicos.....	61
Figura 3.5 - Banho com solução de hidróxido de sódio (A) e cloreto de ferro (III) (B).....	62
Figura 3.6 - Placas após remoção das trilhas. ....	62
Figura 3.7 - Fibras obtidas após o corte das placas de circuito impresso. ....	63

Figura 3.8 - Guilhotina Mecânica Industrial. ....	63
Figura 3.9 - Pó de fibras. ....	64
Figura 3.10 - Desenho do corpo-de-prova e apoios. ....	66
Figura 3.11 - Argamassadeira utilizada na produção de corpos de prova.....	67
Figura 3.12 - Molde para corpos de prova prismático. ....	67
Figura 3.13 - Corpos de prova prismático.....	68
Figura 3.14 - Corpos de prova e moldes cilíndricos ....	68
Figura 3.15 - Corpos de prova cilíndricos com fibra embutida. ....	69
Figura 3.16 - Corpos de prova cilíndricos cortados com fibra embutida. ....	69
Figura 3.17 - Equipamento de ensaios de compressão.....	71
Figura 3.18 - Equipamento de ensaio universal durante o experimento ....	72
Figura 3.19 - Desenho técnico das peças do suporte.....	73
Figura 3.20 - Desenho técnico do suporte (A), equipamento de ensaio universal durante o experimento (B).....	73
Figura 4.1 - Curvas de DSC da amostra de fibra curta de placas de circuito impresso.....	75
Figura 4.2 - Curvas de TGA da amostra de fibra curta de placas de circuito impresso.....	75
Figura 4.3 - Curvas de DSC das amostras argamassa e compósito.....	76
Figura 4.4 - Curvas de TGA das amostras de argamassa e compósito cimentício. ....	77
Figura 4.5 - Difratograma de XRD da fibra de placa de circuito impresso. ....	77
Figura 4.6 - Curva FTIR da amostra do pó de fibras. ....	78
Figura 4.7 - Espectro representando a amostra do compósito cimentício. Análise de área-argamassa. ....	80
Figura 4.8 - Espectro representando a amostra de fibras de placa de circuito impresso. Analise de área – Placa de Circuito.....	81
Figura 4.9 - Imagens de fibras (A) e corpos de prova (B) imersos em água.....	82
Figura 4.10 - % de absorção de agua. ....	84
Figura 4.11 - Curvas de carga versus deformação de corpos de prova de fibras. ....	86
Figura 4.12 - Curvas de carga versus deflexão de corpos de prova de fibras. ....	87
Figura 4.13 - Carga suportada pelo corpo de prova prismático referência. ....	87
Figura 4.14 - Curvas de carga versus deflexão na flexão de corpos de com fibras de 60mm. ....	89
Figura 4.15 - Curvas de carga versus deflexão na flexão de corpos de com fibras de 120mm ....	90
Figura 4.16 - Curvas de carga versus deflexão na flexão dos corpos-de-prova particionados com fibras de 60mm.....	91

Figura 4.17 - Curvas de carga versus deflexão na flexão dos corpos-de-prova particionados com fibras de 120mm .....	92
Figura 4.18 - Carga máxima dos corpos-de-prova no ensaio de flexão. ....	93
Figura 4.19 - Curvas carregamento versus deflexão dos corpos-de-prova no ensaio de flexão. ....	94
Figura 4.20 - Curvas de carga versus extensão deslocamento de fibras. ....	95
Figura 4.21 - Imagens ampliadas das fibras originadas de placas de circuito impresso. ....	96
Figura 4.22 - Fibras de 60mm rompidas .....	96
Figura 4.23 - Corpo de prova com fibras de 60mm rompido.....	97
Figura 4.24 - Fibras de 120mm rompidas .....	97
Figura 4.25 - Trinca (corpo de prova com fibras de 120mm). ....	98
Figura 4.26 - Trinca e poros no fragmento de corpo de prova. ....	98
Figura 4.27 - Micrografia representando amostra de compósito cimentício. Aumento 50X... ..	99
Figura 4.28 - Micrografia representando amostra de fibras de placa de circuito impresso. Aumento 100X. ....	100
Figura 4.29 - Micrografia representando amostra de fibras de placa de circuito impresso. Aumento 200X. ....	100
Figura 4.30 - Micrografia representando amostra de fibras de placa de circuito impresso. Aumento 800X. ....	101
Figura 4.31- Micrografia de uma amostra de compósito cimentício com indícios de deslizamento das fibras. Aumento 50X.....	102
Figura 4.32 - Micrografia de uma amostra de compósito cimentício sem indícios de deslizamento das fibras. Aumento 50X.....	103
Figura 4.33 - Micrografia de uma amostra de compósito cimentício, vista lateral. Aumento 50X.....	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela II.1 - Domicílios Particulares com Aparelhos Eletroeletrônicos Domésticos .....	20
Tabela II.2 - Classificação dos eletroeletrônicos pela Diretiva 2002/96/CE – WEEE .....	22
Tabela II.3 - Diagnóstico dos REEE no Estado de MG .....	24
Tabela II.4 - Composição dos materiais presentes em REEE .....	25
Tabela II.5 - Substâncias tóxicas contidas nos REEE, efeitos a saúde humana.....	26
Tabela II.6 - Distribuição da Demanda de PCI's .....	29
Tabela II.7 - Os componentes típicos do tecido de fibra de vidro .....	29
Tabela II.8 - Formulação do FR-4.....	30
Tabela II.9 - Classificação das fibras sintéticas segundo BISFA.....	38
Tabela II.10 - Tipos de fibras .....	39
Tabela II.11 - Evolução dos estudos – Zona de transição fibra de vidro-matriz.....	56
Tabela III.1 - Composição granulométrica do agregado miúdo utilizado.....	58
Tabela III.2 - Características do cimento Portland CP II-E-32. ....	59
Tabela III.3 - Quantidade de corpo de prova prismático.....	65
Tabela III.4 - Quantidade de corpo de prova cilíndrico. ....	66
Tabela IV.1 - Bandas de absorção características da resina epóxi DGEBA.....	79
Tabela IV. 2 - Resultados semiquantitativos obtidos via MEV para a amostra de argamassa do compósito cimentício. ....	80
Tabela IV.3 - Resultados semiquantitativos obtidos via MEV para a amostra de fibra de placa de circuito impresso. ....	81
Tabela IV.4 - Dados do ensaio absorção de água dos corpos de prova referência .....	82
Tabela IV.5 - Dados do ensaio absorção de água das fibras .....	83
Tabela IV.6 - Dados do ensaio absorção de água dos corpos de prova de compósito cimentício.....	83
Tabela IV.7 - Resultados do ensaio de compressão axial .....	85

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abinee - Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica  
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ABRACI - Associação Brasileira de Circuitos Impressos  
ABS - Acrilonitrila Butadieno Estireno  
ACI - American Concrete Institute  
ANATEL - Agencia Nacional de Telecomunicações  
ASTM - American Society for Testing and Materials  
BISFA - Bureau International pour la Standardization des Fibers Artificielles  
CBMM - Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração  
CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear  
COPASA - Companhia de Saneamento de Minas Gerais  
CP - Cimento Portland  
Cp - corpo de prova  
CRT - Tubo de Raios Catódicos  
CSH - silicato de cálcio hidratado  
CTE - Coeficiente de Expansão Térmica  
 $d_f$  – diâmetro  
DGEBA- Éter Diglicidílico de Bisfenol A  
Dicy - Dicianodiamida  
DRX - Difração de raios X  
DSC- Calorimetria diferencial de varredura  
EEE - Equipamentos Elétricos e Eletrônicos  
ELETROS - Associação Nacional de Fabricantes de Produtos Eletrônicos  
ERP - European Recycling Platform  
FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente  
FR- 4 - Laminado de fibra de vidro e resina epóxi  
FR-2 - Laminado de papel e resina fenólica  
 $f_s$  – incremento na resistência à tração  
 $f_t$  – resistência à tração  
FTIR - Espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier  
GPa - Gigapascal  
GRID - Global Resource Information Database  
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

KN – quilonewton  
 $\ell_c$  - Comprimento crítico  
MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura  
MF- módulo de finura  
MPa - megapascal  
N – Newton  
NBR - Norma Brasileira  
NM - Norma Mercosul  
ONU - Organização das Nações Unidas  
PCB - Printed circuit boards  
PCI - Placa de circuito impresso  
PCs - Computadores pessoais  
PC - policarbonato  
PVC- Poli (cloreto de vinila)  
REE- Resíduos de Equipamentos  
REEE - Resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos  
TBBPA - Tetrabromobisfenol-A  
TGA – Análise Termogravimétrica  
TICC - Equipamentos de tecnologia da informática de comunicação e de consumo  
WEEE - Waste Electrical and Electronic Equipment  
ZTA - Zona de transição agregado e pasta  
 $\mu\text{m}$  - micrômetro  
 $\sigma_{fu}$  – resistência última à tração  
 $\tau_{au}$  – resistência de aderência  
 $\tau_{fu}$  – resistência da interface ao atrito

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Importância do tema

Um dos setores da indústria que mais se desenvolve hoje em dia é o setor eletroeletrônico. Aliado ao aumento do poder aquisitivo da população, o consumo de bens desta natureza tem crescido continuamente nas últimas décadas e a previsão é de que aumente cada vez mais.

O Brasil é o mercado emergente que gera o maior volume de lixo eletrônico, “Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos” (REEE), per capita a cada ano e é também o país emergente que mais toneladas de geladeiras abandona a cada ano por pessoa e um dos líderes em descartar celulares, TVs e impressoras (Relatório ONU, 2010). A estimativa é de que, no mundo, 40 milhões de toneladas de REEE são geradas por ano. Grande parte certamente ocorre nos países ricos. Só a Europa seria responsável por um quarto desse lixo.

Por ano, o Brasil abandona 96,8 mil toneladas métricas de PCs. O volume só é inferior ao da China, com 300 mil toneladas. Mas, per capita, o Brasil é o líder. Por ano, cada brasileiro descarta o equivalente a meio quilo desse lixo eletrônico. Na China, com uma população bem maior, a taxa per capita é de 0,23 quilo, contra 0,1 quilo na Índia.

Os equipamentos eletroeletrônicos tem em geral uma vida útil curta, pois novos modelos com novas tecnologias surgem a cada dia. Como a produção e o consumo aumentam constantemente, a quantidade de equipamentos obsoletos ou defeituosos aumenta na mesma proporção. Esses equipamentos obsoletos ou defeituosos necessitam ser descartados (SAITO, 1994).

Atualmente muita sucata de equipamento eletroeletrônico é disposta junto com o lixo doméstico, com exceção dos grandes aparelhos (geladeiras, fogões, etc.) cujos materiais são reutilizados pela indústria de produção secundária de metais. Assim, os equipamentos menores são depositados em aterros sanitários ou dispostos sem nenhum tratamento prévio (LEE, 1999). As placas de circuito impresso e seus componentes eletrônicos, que são muito utilizadas em equipamentos da indústria eletroeletrônica, fazem parte dessa sucata. A sua composição é muito heterogênea, contendo de uma maneira geral plásticos, cerâmicos, metais base e metais preciosos. Toda essa mistura torna sua reciclagem bastante difícil mas em

compensação a presença de metais comuns e metais preciosos a torna uma matéria-prima interessante (MENETTI e TENÓRIO,1996). Entretanto a presença de substâncias poluentes na sua composição estimula estudos para evitar a sua disposição diretamente no meio ambiente, podendo causar danos se dispostas de maneira inadequada.

Placas de circuitos impresso são feitas de camadas isolantes de fibra de vidro e resina, sobre as quais são montados os componentes eletrônicos e feita as suas interconexões. O número de placas de circuito impresso fabricadas ao redor do mundo cresce a uma taxa de cerca de 9% ao ano, com a China e Taiwan sozinhos produzindo mais de 200 milhões de metros quadrados dessas placas eletrônicas todos os anos.

Atualmente, somente uma pequena quantidade das placas de circuito impresso passa por um processo de reciclagem. Elas são tipicamente colocadas em fundições de cobre, o que oferece o risco de serem liberadas fumaças tóxicas danosas ao meio-ambiente. A maioria das placas é simplesmente incinerada ou jogada em aterros sanitários, o que libera poluentes tóxicos, tais como metais pesados e dioxinas nas águas subterrâneas e na atmosfera. O meio mais indicado para tratamento dessa sucata eletrônica seria a reciclagem, mesmo porque essa sucata eletrônica pode conter metais de elevado valor comercial, como por exemplo, ouro, prata, platina, estanho e cobre (BARAKAT, 1998; 1999; LEE *et al.*, 2003). Porém, no Brasil existem poucas empresas que atuam no ramo de reciclagem, que possuam tecnologia apropriada e condições de preservação ambiental. Sendo assim, muitas vezes esta sucata eletrônica acaba sendo despejada em aterros sanitários juntamente com o lixo doméstico.

O lixo eletrônico cresce três vezes mais que lixo convencional e, segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), a situação é mais preocupante nos países emergentes. Principalmente no Brasil, campeão na geração de lixo eletrônico por habitante. Tendo em vista que os componentes desses equipamentos eletrônicos, na grande maioria das vezes, contêm elementos nocivos ao meio ambiente e à saúde dos seres humanos, faz-se necessário um gerenciamento apropriado desses resíduos. Para evitar a disposição em aterros, tanto sanitários como industriais, esses equipamentos eletrônicos deveriam ser coletados e processados para reutilização total ou parcial dos seus componentes ou para recuperação de metais e plásticos (MENETTI, 1995; 1996a; 1996b; 1996c; VEIT *et al.*, 2005; CUI e FORSSBERG, 2007).

No Brasil, algumas empresas encontraram na reciclagem de aparelhos descartados uma boa oportunidade de mercado. O negócio ganhou impulso com a Lei nº 12.305/10 que institui a

Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Esta lei é bastante atual e contém instrumentos importantes para permitir o avanço necessário ao País no enfrentamento dos principais problemas ambientais, sociais e econômicos decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos. Prevê a prevenção e a redução na geração de resíduos, tendo como proposta a prática de hábitos de consumo sustentável e um conjunto de instrumentos para propiciar o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos (aquilo que tem valor econômico e pode ser reciclado ou reaproveitado) e a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos (aquilo que não pode ser reciclado ou reutilizado). Ela também institui diretrizes de como se destinar corretamente todo tipo de resíduos sólidos no Brasil, sendo citado na lei o resíduo eletroeletrônico.

Esta lei traz oportunidades para o negócio porque imputa sobre fabricantes, importadores e grandes e pequenas empresas, a responsabilidade de destinar corretamente os seus resíduos eletroeletrônicos. Este trabalho visa avaliar o comportamento físico e mecânico de compósitos cimentícios fabricados com a adição de fibras curtas originadas de resíduos sólidos produzidos pelo descarte de equipamentos eletroeletrônicos, em especial, placas de circuito impresso (PCI).

## **1.2 Relevância científica da pesquisa**

Encontrar novas fontes de energia e materiais está se tornando muito difícil. Concomitantemente, fica cada vez mais difícil encontrar locais para dispor resíduos sólidos, e o custo de disposição está aumentando exponencialmente. Como resultado, o interesse da sociedade em reuso, reciclagem e recuperação de materiais tem crescido nos últimos anos (PEIRCE, 1998).

- Reuso: é o uso de um produto para um objetivo ao qual ele pode não ter sido projetado (pote de café usado para guardar pregos), ou então o uso prolongado de um produto (como pneus automotivos recapados).
- Reciclagem: quando um produto é coletado pelo público e então retorna para a indústria do setor (jornais e latas de alumínio retornam para fábricas de papel ou metalurgias secundárias de alumínio).

- Recuperação: quando o resíduo coletado é uma mistura de materiais, e então os materiais tem que ser removidos e separados através de várias etapas de processamento.

A disposição de sucatas e resíduos em aterros implica na perda de materiais valiosos e no aumento de riscos de poluição por contaminação de áreas. A instalação de processos que reduzam e reutilizem em circuito fechado os resíduos gerados é interesse de todos. Assim, as bases de um processo orientado para a aceitação ambiental são:

- Medidas Primárias: diminuir ou evitar a geração de resíduos;
- Medidas Secundárias: reutilizar os resíduos;
- Medidas Terciárias: dispor de maneira compatível ao meio ambiente, ou seja, resíduos que não podem ser reutilizados devem estar de tal forma inertes que possam ser depositados sem impacto às zonas adjacentes.

Desta forma, permanecem duas alternativas para o futuro da indústria:

- A instalação de processos que reduzam e reutilizem em circuito fechado os resíduos gerados;
- A produção de um resíduo que possa ser facilmente vendido para reciclagem.

Pietrelli (1999) estudou as tecnologias de separação com o intuito de aumentar a reciclagem de materiais do ponto de vista econômico e ambiental, sempre buscando o desenvolvimento sustentável. O desenvolvimento de tecnologias de processos mais eficientes para o reuso interno dos resíduos (substituição de matéria prima) deve ser estimulado. Larrauri (1999) estudou técnicas para recolher, separar e reciclar resíduos, incluindo estudos de compatibilidade e processamento de plásticos e processos para tratar de resíduos sólidos municipais.

Visando ampliar o conhecimento sobre as possibilidades do uso de fibras curtas originadas de resíduos sólidos produzidos pelo descarte de equipamentos eletroeletrônicos, em especial placas de circuito impresso (PCI) em compósitos cimentícios, este trabalho se propõe a avaliar o comportamento mecânico deste compósito .

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo Geral**

Avaliar o comportamento mecânico de compósitos cimentícios fabricados com a adição de fibras curtas originadas de resíduos sólidos produzidos pelo descarte de equipamentos eletroeletrônicos, em especial, placas de circuito impresso (PCI).

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- a) Desenvolver uma metodologia de liberação da placa de plástico reforçado com fibras de vidro dos demais constituintes da placa de circuito impresso, como componentes eletrônicos e ligas metálicas;
- b) Desenvolver uma metodologia de processamento das placas de plástico reforçado com fibras de vidro com objetivo de produzir fibras curtas que possam ser adicionadas à compósitos cimentícios;
- c) Caracterizar as fibras curtas de placas de plástico reforçado com fibras de vidro;
- d) Caracterizar o compósito cimentício sem fibras (argamassa);
- e) Caracterizar o compósito cimentício com adição de fibras curtas de placas de plástico reforçado com fibras de vidro;
- f) Avaliar o desempenho do compósito cimentício com adição de fibras curtas de placas de plástico reforçado com fibras de vidro;
- g) Contribuir para o aperfeiçoamento de métodos de reaplicação de resíduos eletroeletrônicos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A indústria eletroeletrônica

Para Andrade (2002) e Tavares (2007) a indústria que mais cresce hoje em dia é a dos eletroeletrônicos. Acredita-se que o seu consumo juntamente com a variedade de produtos e os constantes lançamentos de novos modelos na última década têm aumentado a popularização dos eletroeletrônicos com previsões de crescimento cada vez maiores. Como consequência, o consumo e a troca desses equipamentos por aparelhos cada vez mais modernos e de última geração acaba reduzindo a vida útil dos eletroeletrônicos, tornando-os obsoletos e/ou defeituosos, aumentando assim os resíduos de equipamento eletroeletrônicos (REEE).

A Tabela II.1 expõe dados dos domicílios particulares com aparelhos eletroeletrônicos domésticos no período de 2007 a 2011, aos quais permitem a compreensão no que tange à importância e à representatividade das indústrias eletrônicas e elétricas que abrangem o contexto nacional, além disso é comprovado um aumento dos equipamentos eletroeletrônicos anualmente.

Tabela II.1 - Domicílios Particulares com Aparelhos Eletroeletrônicos Domésticos

	2007		2008		2009		2011	
	Milhões Unid	%	Milhões Unid	%	Milhões Unid	%	Milhões Unid	%
FOGÃO	55,3	98	56,5	98,2	57,6	98,4	60,4	98,6
TELEVISÃO	53,2	94	54,7	95,1	56	95,7	59,3	96,9
GELADEIRA	51,2	91	52,9	92,1	54,7	93,4	58,6	95,8
MAQUINA DE LAVAR ROUPA	22,3	40	23,9	41,5	25,9	44,3	31,2	51
COMPUTADOR	15,0	27	17,9	31,2	20,3	34,7	26,3	42,9
FREEZER	9,2	16	9,3	16	8,9	15,2	10	16,4
DVD	-	-	39,9	69,4	42,1	72	46,3	75,5
TOTAL DE DOMICÍLIOS	56,3	-	57,5	-	58,5	-	61,3	-

% em relação ao total de domicílios - Fonte: IBGE

Outro exemplo que comprova o que foi citado acima são os dados divulgados pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), informando que o Brasil fechou fevereiro de 2012 com quase 247,6 milhões de linhas ativas na telefonia móvel e teledensidade de 126,45 acessos por 100 habitantes. O número absoluto de novas habilitações (2,4 milhões) é o maior

registrado somente no mês de fevereiro nos últimos 13 anos e representa um crescimento de 0,99% em relação a janeiro de 2012. Como no país um aparelho celular possui uma vida útil entre 1,5 a 2 anos, pode-se imaginar a quantidade de aparelhos descartados.

## **2.2 Classificação dos eletroeletrônicos**

De acordo com a Abinee (2009) em virtude da grande diversidade de linhas de produtos, as indústrias elétricas e eletrônicas estão distribuídas em dez áreas diferentes:

1. Automação Industrial;
2. Componentes Elétricos e Eletrônicos;
3. Equipamentos Industriais;
4. Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica;
5. Informática;
6. Material Elétrico de Instalação;
7. Serviço de Manufatura em Eletrônica;
8. Sistemas Eletroeletrônicos Prediais;
9. Telecomunicações;
10. Utilidades Domésticas.

Conforme a Associação Nacional de Fabricantes de Produtos Eletrônicos – ELETROS, o setor de bens eletrônicos de consumo é uma outra categoria da indústria eletrônica e esse setor classifica os equipamentos de uso doméstico em três grandes grupos:

- Linha branca – equipamentos de grande porte, que inclui os eletrodomésticos como geladeira, fogões, máquinas de lavar, micro-ondas, condicionadores de ar.
- Linha marrom – equipamentos de áudio e vídeo como televisores, videocassetes, DVD's, os radio gravadores, equipamentos de som, e outros.
- Portáteis – eletrodomésticos de pequeno porte como aspiradores de pó, batedeiras de bolo, cafeteiras, ferro de passar roupa, liquidificadores, secadores e outros, (ELETROS, 2009).

Tal classificação da indústria não inclui todos os dispositivos eletroeletrônicos de uso doméstico. A Tabela II.2 classifica os equipamentos eletroeletrônicos de acordo com a União

Europeia em dez categorias estabelecidas pela Diretiva 2002/96/CE, de janeiro de 2003, na qual promove a gestão dos resíduos eletroeletrônicos.

Tabela II.2 - Classificação dos eletroeletrônicos pela Diretiva 2002/96/CE – WEEE

<b>Categoria</b>	<b>Exemplos</b>
Grandes eletrodomésticos	Geladeiras, freezer, máquinas de lavar, fogões, ar condicionado, micro-ondas.
Pequenos eletrodomésticos	Aspiradores, ferros elétricos, torradeiras, secadores.
Equipamentos informáticos e de telecomunicações	Computadores, impressoras, telefones fixos e móveis, telefax.
Equipamentos de som e imagem	TV, vídeos, DVD, rádios, instrumentos musicais.
Equipamentos de iluminação	Lâmpadas fluorescentes e respectivos equipamentos
Ferramentas elétricas e eletrônicas	Furadeiras, serras, máquinas de costura.
Brinquedos e equipamentos de esporte e lazer	Jogos de vídeo, caça-níqueis, equipamentos esportivos.
Aparelhos médicos	Radioterapia, ventiladores, diálise, cardiologia.
Instrumentos de monitoramento e controle	Detectores, reguladores, termostatos.
Distribuidores automáticos	Máquinas automáticas de dinheiro, de bebidas, de bilhetes.

Fonte: Adaptado do Anexo I A, Parlamento Europeu (2003b).

Com base nos dados apresentados na Tabela II.1, concomitante com a diversidade da indústria eletroeletrônica, segundo a Abinee (2009) e, ainda se referindo à classificação dos eletrônicos mostrados na Tabela II.2, observamos que a indústria eletroeletrônica cresce tanto em números quanto em diversas áreas de aplicações; fator esse que é alimentado pela velocidade das inovações tecnológicas.

### **2.3 Resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos – REEE**

De acordo com Veit (2009) é considerada sucata eletrônica todo resíduo gerado a partir de aparelhos eletrodomésticos ou eletroeletrônicos e seus componentes, incluindo os acumuladores de energia (pilhas e baterias), de uso doméstico, comercial, industrial e de serviços, que estejam em desuso e sujeitos a disposição final.

Já Nogueira (2007) busca na Diretiva da União Européia 2002/96/CE, a definição de resíduos de equipamento elétrico e eletrônico – REEE, como sendo todo resíduo de equipamentos, incluindo todos os componentes, subconjuntos e materiais que fazem parte do produto no momento em que este é descartado, os quais necessitam de energia elétrica ou de campos eletromagnéticos para o seu funcionamento, incluindo os meios de geração, transferência e

medição de corrente e campos, pertencentes às categorias definidas na tabela II.2 de classificação dos eletroeletrônicos.

De acordo com Rodrigues (2007), no Brasil não existe um termo específico para designar os produtos eletroeletrônicos descartados pós-consumo. Poderia se usar o termo “Resíduos Tecnológicos”, encontrado em alguns projetos de Lei de Resíduos no Brasil, ou mesmo e-Lixo, ou ainda como “sucata eletrônica”, segundo Veit (2009). Por não haver uma nomenclatura padrão, neste trabalho será adotado o termo “Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos” – REEE.

Quando se trata de REEE, nota-se que há um aumento diário espantoso no mundo. O grupo ambientalista Greenpeace estima que ultrapassou 50 milhões de toneladas em todo o planeta em 2009. De acordo com a ERP – European Recycling Platform – Portugal, 2009, a geração deste tipo de resíduo na União Europeia, é de seis milhões de toneladas anualmente e já representa 4% do lixo municipal.

Segundo o banco de dados de informações sobre recursos (GRID - Global Resource Information Database), uma porção cada vez maior dos resíduos sólidos urbanos é formada por produtos eletroeletrônicos e este é o tipo de resíduo que mais cresce em todo o mundo. A Figura 2.1 mostra a distribuição da porcentagem representada por cada tipo de equipamento descartado como resíduo dentro da composição do lixo eletrônico (dados de 2006).

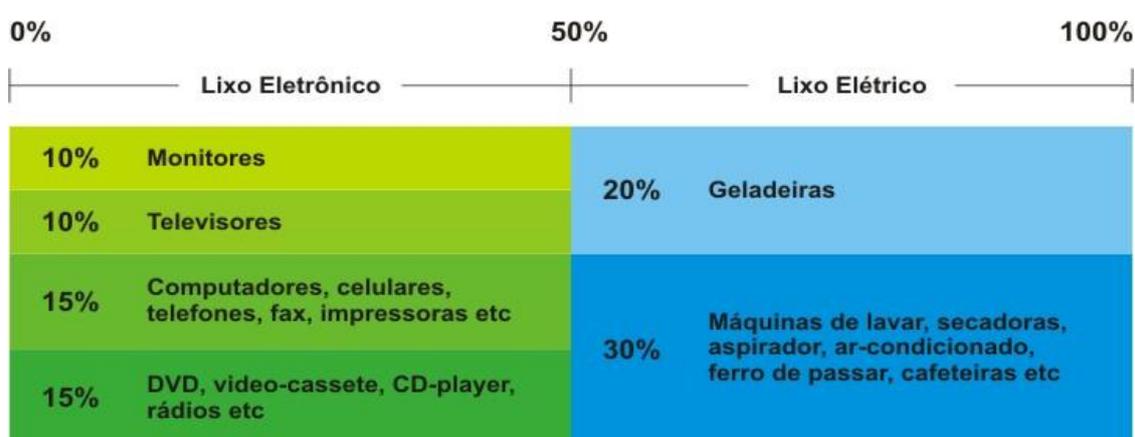


Figura 2.1 - Composição dos equipamentos nos REEE ( EMPA - De acordo com Diretiva 2002/96/CE – WEEE )

Segundo Rodrigues (2007), no Brasil se produz cerca de 2,6kg por ano de REEE por habitante. A Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM – MG) realizou no Estado de

Minas Gerais um estudo nomeado “Diagnóstico dos Resíduos Eletroeletrônicos”, com o objetivo de conseguir informações a respeito da geração e destinação dos REEE e presumir a geração atual e futura destes resíduos. A Tabela II.3 mostra dados analisados comparativamente a nível de Brasil, Minas Gerais e a Região Metropolitana de Belo Horizonte para os equipamentos de tecnologia da informática de comunicação e de consumo – TICC (que considera apenas telefones celulares e fixos, televisores e computadores) e para todos os outros pesquisados, considerando os já citados e incluindo ainda rádio, máquina de lavar roupa, geladeira e freezer, fazendo uma estimativa de geração até o ano de 2030. De acordo com a FEAM - MG, 2009, existem naturalmente outros eletroeletrônicos e como para esse trabalho foi considerado que cada domicílio possui apenas um dispositivo de cada tipo de eletroeletrônico, os números tendem a ser maiores que os relatados.

Tabela II.3 - Diagnóstico dos REEE no Estado de MG

Local	Todos os REEE pesquisados			TICC		
	Geração Atual (t/ano)	Per capita média (kg/hab)	Acumulado de 2001 a 2030 (Milhões de toneladas)	Geração atual (t/ano)	Per capita média (kg/hab)	Acumulado de 2001 a 2030 (Milhões de toneladas)
Brasil	678.960	3,4	22,4	202.450	1,0	6,6
Minas Gerais	68.633	3,3	2,2	21.240	1,0	0,677
RM BH	19.700	3,7	0,625	6.230	1,1	0,194

Fonte: FEAM – MG – 2009

## 2.4 A composição física e química dos – REEE

O tipo de equipamento e da tecnologia empregada na época em que foram produzidos define a composição dos REEE. Como exemplo, existem equipamentos eletrônicos utilizados em circuitos de telecomunicações e de tecnologia da informação que exigem tecnologias mais sofisticadas e que por isso, envolvem projetos que necessitam maior eficiência em termos de velocidade de processamento e menores possibilidades de falhas. Os resíduos oriundos dessa linha de equipamento eletrônico possuem em sua composição uma maior quantidade de metais nobres. Já nos resíduos dos eletrodomésticos comuns, a presença de metais nobres em suas composições é algo mais raro. Entretanto, os equipamentos mais antigos possuem um teor de metais preciosos significativo, porém, a presença de substâncias tóxicas é maior em relação aos de última geração.

Nas peças e componentes que compõem os equipamentos eletroeletrônicos uma grande quantidade de materiais está presente. Podem ser encontrados nos resíduos os três grupos básicos de materiais: metais, polímeros e cerâmicas, e ainda os compósitos destes. Encontrase também, materiais avançados como os semicondutores, que dadas as suas características elétricas, são os principais responsáveis pela revolução tecnológica da indústria eletroeletrônica nas últimas décadas.

De acordo com Tenório (1996), os eletroeletrônicos têm uma composição bastante heterogênea, de maneira geral são formados de plásticos, metais base, metais preciosos e cerâmicos. Comumente os seus resíduos apresentam em sua composição cerca de 30% de plásticos, 30% de óxidos refratários e em torno de 40% de metais.

Segundo Veit (2009) os equipamentos eletroeletrônicos possuem em sua composição, metais perigosos (Cádmio, Mercúrio, Chumbo, Bromo), metais interessantes (Cobre, Ferro, Níquel, Alumínio), metais preciosos (Ouro, Paládio), polímeros (PC, ABS, PVC), e vidro. A Tabela II.4 apresenta a composição básica dos materiais mais frequentemente utilizados na manufatura de alguns equipamentos eletroeletrônicos, para os grandes eletroeletrônicos (EEE) da linha branca, equipamentos de tecnologia da informática e comunicação e equipamentos de consumo (TICC), de acordo com (FEAM, 2009).

Tabela II.4 - Composição dos materiais presentes em REEE

<b>Material</b>	<b>Grandes EEE (%)</b>	<b>EEE TICC (%)</b>
Ferro	43	36
Alumínio	14	5
Cobre	12	4
Chumbo	1,6	0,29
Cádmio	0,0014	0,018
Mercúrio	0,000038	0,00007
Ouro	0,00000067	0,0024
Prata	0,0000077	0,0012
Paládio	0,0000003	0,00006
Índio	0	0,0005
Plásticos bromurados	0,29	18
Plásticos (outros)	19	12
Vidro de chumbo	0	19
Vidros (outros)	0,017	0,3
Outros	10	5,7

Fonte: FEAM - MG - Adaptado de EMPA - 2009

Em razão da variedade de equipamentos e a grande quantidade de substâncias incorporadas aos produtos eletroeletrônicos, os seus descartes possuem uma série de outras substâncias que

fazem com que o crescimento em volume destes se torne um problema de ordem ambiental, com efeitos nocivos à saúde dos seres vivos em geral. Os danos ambientais podem ocorrer desde a ação de extrair os recursos naturais não renováveis, como metais e derivados de petróleo, aos grandes gastos de energia desde a extração, beneficiamento e transporte até o consumo final e, por fim, o descarte desses materiais. Os metais pesados utilizados como matéria-prima são as substâncias tóxicas que necessitam de maiores cuidados e preocupação, pois estão presentes em pequenas quantidades e, dispostos de maneira inadequada com os resíduos sólidos urbanos, causam contaminação do solo e chegam aos lençóis freáticos. Qualquer ser vivo em contato direto ou indireto com esses produtos tóxicos pode ter sua saúde comprometida. Algumas das substâncias tóxicas utilizadas e encontradas na composição dos eletroeletrônicos, bem como sua utilização e efeitos nocivos a saúde humana estão expostos na Tabela II.5.

Tabela II.5 - Substâncias tóxicas contidas nos REEE, efeitos a saúde humana

<b>Substância</b>	<b>Utilização</b>	<b>Efeito à saúde</b>
Arsênio	Fabricação de semicondutores – transistores, circuitos integrados	Pode ser acumulado no fígado, rins, trato gastrointestinal, baço, pulmões, ossos, unhas; dentre os efeitos crônicos: câncer de pele e dos pulmões, em níveis elevados, o arsênio pode causar a morte.
Bário	Tubos CRT, lâmpadas fluorescentes	Elevação da pressão arterial, danos no coração e efeitos no sistema nervoso, edema cerebral, fraqueza muscular, danos no fígado e baço.
Berílio	As ligas de berílio são usadas para fazer componentes elétricos e eletrônicos – relés, conectores	Enfisema pulmonar, agente cancerígeno.
Bromo	Retardador de chamas em placas de circuito impresso	Desregulador endócrino, provoca problemas hormonais, no sistema nervoso e reprodutivo.
Cádmio	Baterias, CRT, interruptores	Agente cancerígeno, acumula-se nos rins, fígado, pulmões, pâncreas, testículos e coração, afeta o sistema nervoso, provoca dores reumáticas, distúrbios metabólicos, problemas pulmonares e deformação fetal.
Chumbo	Soldas dos componentes, CRT, lâmpadas fluorescentes	Danos nos sistemas nervoso central e periférico e no sistema endócrino, irritabilidade, tremores musculares, lentidão de raciocínio, alucinação, insônia e hiperatividade. É o mais tóxico dos elementos; acumula-se nos ossos, cabelos, unhas, cérebro, fígado e rins, podendo levar à morte.
Cobre	Diversos componentes, condutor elétrico	Intoxicações como lesões no fígado, cirrose.
Cromo	Superfícies decorativas, pigmentos e coberturas	Armazena-se nos pulmões, pele, músculos e tecido adiposo, pode provocar anemia, alterações hepáticas e renais, além de câncer do pulmão.
Mercurio	Termostatos, sensores, relés, lâmpadas, interruptores elétricos, termômetros, baterias	Problemas de estômago, distúrbios renais e neurológicos, alterações genéticas e no metabolismo. É altamente tóxico, sendo que doses de 3g a 30g são fatais.

Fonte: (FEAM-MG -2009)

Desde agosto de 2010, a nova Política Nacional de Resíduos Sólidos, na lei federal nº 12.305/2010, institui normas e procedimentos para a reciclagem, gerenciamento e destinação final do REEE. Entre outros aspectos, a lei determina que os produtos e os componentes eletroeletrônicos considerados REEE devem receber destinação final adequada que não provoquem danos ou impactos negativos ao meio ambiente e à sociedade, e que a responsabilidade pela destinação final é solidária entre as empresas que produzem, comercializam ou importem produtos e componentes eletroeletrônicos. Esta lei considera REEE, os aparelhos eletrodomésticos e os equipamentos e componentes eletroeletrônicos de uso doméstico, industrial, comercial ou do setor de serviços que estejam em desuso e sujeitos à destinação final. A destinação final do REEE, ambientalmente adequada, deve ser feita por meio de processos de reciclagem e aproveitamento do produto ou componentes para a finalidade original ou diversa; práticas de reutilização total ou parcial de produtos e componentes tecnológicos; neutralização; e disposição final apropriada dos componentes tecnológicos equiparados ao lixo químico.

## **2.5 Placas de circuito impresso – PCI**

Todos os dispositivos fabricados pelas indústrias de eletroeletrônicos, nas áreas de telecomunicações, informática, consumo ou automação possuem placas de circuito impresso. A PCI tem uma dupla função. Primeiro, ser o substrato que prove a sustentação mecânica dos componentes eletrônicos que formam o circuito, tais como resistores, capacitores, indutores, circuitos integrados, diodos, transistores e outros mais e, segundo, viabilizar as conexões que estabelecem o contato elétrico desses mesmos componentes, pelas trilhas de cobre.

As PCI's podem ser classificadas quanto ao número de camadas de trilhas de cobre impressas na placa isolante, podendo ser de simples face, dupla face e de multicamadas. Exemplos são mostrados na Figura 2.2.

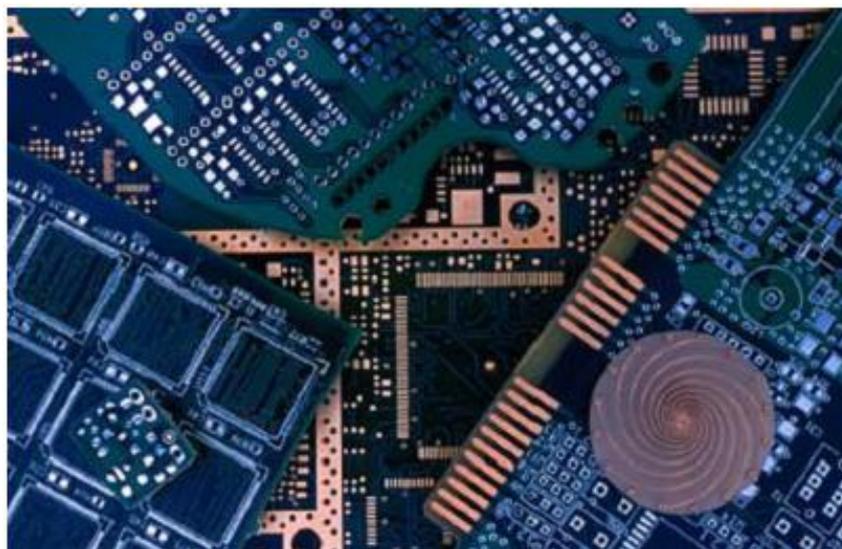


Figura 2.2 - Placas de circuito impresso ( ABRACI – 2006)

Outra classificação as distingue quanto ao tipo de material em seu substrato, conhecido por laminado. Recebe o nome de FR-2, quando seu laminado é composto de um aglomerado de papel e resina fenólica, conhecida como placa de fenolite, e FR-4 para aquela cujo laminado é formado de fibra de vidro.

Segundo Bernardes (1997), sua utilização também cresce, à medida que novos produtos são desenvolvidos a partir das novas tecnologias do mundo da eletrônica, sendo que, na área de equipamentos de tecnologia da informação, em particular os computadores e também, em equipamentos de áudio e vídeo, estas placas podem representar cerca de 30% do peso. O volume de placas dos equipamentos obsoletos que são descartados soma em torno de 3% do peso, da quantidade total dos REEE.

O crescimento do número de placas de circuito impresso a nível mundial é da ordem de 9% ao ano. Apenas os países como China e Taiwan são responsáveis pela produção de mais de 200 milhões metros quadrados de PCI's por ano. De acordo com a Associação Brasileira de Circuitos Impressos - ABRACI, os principais mercados são automotivo, linha branca, linha marrom, telecomunicações, informática, automação e entretenimento representando uma demanda de 3.216.000 m<sup>2</sup>. A Tabela II.6 mostra no mercado nacional, a situação da produção de placas de circuito impresso.

Tabela II.6 - Distribuição da Demanda de PCI's

PCI's	m <sup>2</sup>
Simple Face	1.860.000
Dupla Face	490.000
Multicamada	710.000
Microvia	156.000
TOTAL	3.216.000

Fonte: (ABRACI – 2006)

## 2.6 Laminado FR-4

Os componentes típicos que compõem a placa de circuito impresso formada pelo laminado FR-4 e a função destes componentes são listados abaixo, sendo o laminado FR-4, a matéria prima usada para a produção das fibras utilizadas neste trabalho .

- Tecido de fibra de vidro, usado como reforço para o laminado, que proporciona resistência mecânica e propriedades elétricas. Os componentes típicos da fibra de vidro utilizado nos laminados FR-4 são apresentados na Tabela II.7.

Tabela II.7 - Os componentes típicos do tecido de fibra de vidro

Composição	Constituinte (%)
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	52-56
Óxido de cálcio (CaO <sub>2</sub> )	16-25
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	12-16
Óxido de boro (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5-10
Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O) + óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	0-2
Óxido de magnésio (MgO)	0-5
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.05-0.4
Óxido de titânio (TiO <sub>2</sub> )	0-0.8
Fluoretos	0-1

Fonte: Adaptado (COOMBS C, 2001 apud SANAPALA ,2008)

- Resina é constituída principalmente por bi, tetra ou multi-grupos funcionais epóxi. A resina é produzida a partir da reação de Bisfenol-A com Epicloridrina, que cria um "éter diglicídílico de bisfenol A" chamada DGEBA, também referida como Oxirano. Na Figura 2.3, é mostrada a reação citada.



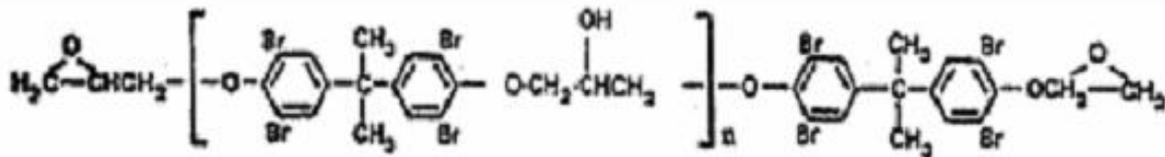


Figura 2.4 - Estrutura química do Tetrabromobisfenol A (TBBPA) (SANAPALA, 2008)

Outros retardadores de chama estão ganhando importância por causa da mudança nas tendências de mercado para produtos livres de halogênio, devido ao perigo de produtos halogenados, ao usuário final dos produtos e também a questões ambientais. Compostos de fósforo (tais como ésteres organofosforados) e hidróxidos metálicos (tais como o hidróxido de alumínio e Hidróxido de magnésio) são alguns dos retardadores de chamas sem halogênio.

- As cargas são adicionadas ao sistema de resina para os requisitos específicos de desempenho, como redução do coeficiente de expansão térmica (CTE) e aumentar o retardamento de chama. Cargas típicas usadas em laminado FR-4 são sílica e silicato de alumínio.
- Os aceleradores são adicionados ao sistema de resina para aumentar a taxa de cura, controle de temperatura e densidade de reticulação. O Imidazol é um dos aceleradores mais comum, usado em laminados FR-4. A estrutura química do Imidazol é mostrada na Figura 2.7.

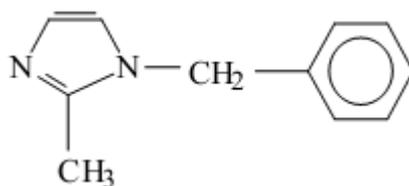


Figura 2.5 - Estrutura química de Imidazole (SANAPALA, 2008)

## 2.7 Reciclagem de placas de circuito impresso

Com o crescimento contínuo da produção e do consumo dos equipamentos de tecnologia eletroeletrônica, ocorre uma proporcional geração de lixo através do desuso desses equipamentos, tornando um grande problema ambiental. O problema ocorre porque os resíduos possuem diversas substâncias tóxicas que contaminam o ambiente, portanto não

podem ser descartados no lixo comum. Outro fato importante é o desperdício de diversos materiais que poderiam ser reaproveitados por processos de reciclagem e inseridos novamente ao ciclo de produção da matéria prima, economizando as reservas naturais. O interesse pela reciclagem de REEE ficou mais evidente nos últimos anos, fazendo surgir na comunidade científica estudos que buscam meios e alternativas para se ter conhecimentos quanto à correta gestão não só do ponto de vista dos impactos ambientais, como também das possibilidades econômicas de reciclagem ou de sua recuperação.

Segundo Tavares (2007), historicamente em termos internacionais, o interesse na recuperação de metais preciosos a partir de equipamentos eletrônicos data de 1969, quando o U.S. Bureau of Mines iniciou pesquisa para a recuperação destes metais a partir de sucatas eletrônicas militares que já naquela época atingiam 9.100t por ano.

Menetti e Tenório, (1996), verificaram em seus estudos que a partir da reciclagem de REEE, pode-se obter um concentrado metálico não ferroso contendo metais preciosos como ouro e prata. Os componentes dos circuitos eletrônicos possuem vários materiais em sua composição, entre os quais os metais, que por suas excelentes propriedades como condutores elétricos, com destaque para o Cu, Ag, Au, Fe, Al, Sn, Pb e Zn, formam boa parte desses resíduos, juntamente com os cerâmicos e plásticos. Entretanto, a reciclagem da mistura de todos esses materiais torna-se difícil, porém a presença de metais base como cobre, ouro e prata acaba tornando a reciclagem interessante.

Normalmente os REEE são compostos de 40% de metais, 30% de polímeros, e 30% de cerâmicos e vítreos. A figura 2.6 mostra a composição mais comumente encontrada nos REEE, sendo que metais típicos são cobre 20%, ferro 8%, estanho 4%, níquel 2%, chumbo 2%, alumínio 2%, zinco 1%, prata 0,02%, ouro 0,1% e paládio 0,005%. Entre os polímeros encontram-se o polietileno, o polipropileno, os poliésteres e os policarbonatos. Nos materiais cerâmicos encontram-se a sílica, a alumina, os óxidos alcalinos e alcalinos terrosos e outros (Gramatyka, 2007).

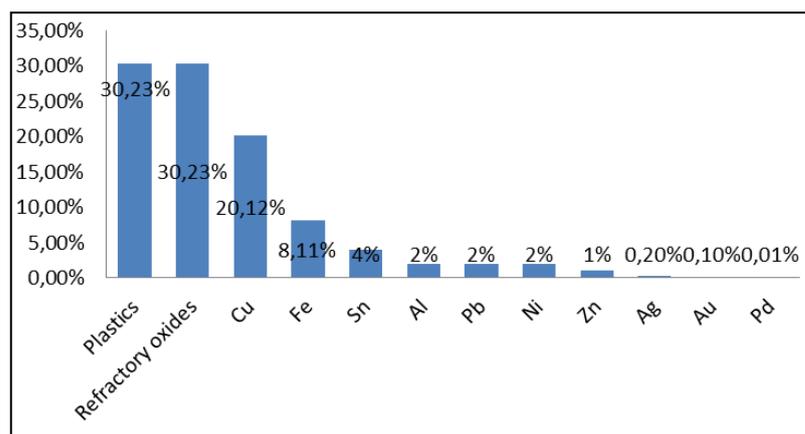


Figura 2.6 - Composição típica dos REEE.

As placas de circuito impresso possuem composição heterogênea, por esse motivo a reciclagem das mesmas pode necessitar processos complexos. A reciclagem pode ser justificada não somente por minimizar a poluição do meio ambiente, como também por ser uma fonte de matéria prima interessante economicamente, já que possui em sua composição materiais como o cobre, que por ser um dos principais condutores elétricos utilizados na produção das PCI's, é normalmente encontrado nas placas em concentrações muito maiores do que em suas fontes naturais. De acordo com Legarth, (1997), um processo de reciclagem de REEE, já se justifica a partir da grande concentração de cobre encontrado neste tipo de resíduo se comparado ao minério de cobre.

Hoje somente uma pequena quantidade das PCI's é reciclada. Geralmente, essa fração reciclada é normalmente inserida em fundições de cobre. A maior parte das placas é simplesmente incinerada, podendo liberar fumaças tóxicas, ou jogada em meio aos demais resíduos sólidos nos aterros sanitários (SIMONITE, 2007).

## 2.8 Compósito cimentício

Compósitos consistem de combinações de dois ou mais diferentes materiais (CALLISTER Jr., 1991). Concreto é um compósito cimentício normalmente produzido com a mistura de cimento Portland, areia, pedra e água, sendo o mesmo utilizado em larga escala a nível mundial. O concreto é sem duvida o material mais usado em construção civil, são muitas as experiências e pesquisas realizadas para seu aperfeiçoamento (SARZALEJO *et al.* 2009).

Para se ter uma noção da quantidade de concreto consumido, no ano de 1993 foi feita uma estimativa de 3 bilhões de toneladas. Hoje a proporção em que o concreto é usado é muito diferente de vinte anos atrás. Já no ano de 2008 o consumo mundial de concreto atingiu a ordem de 20 bilhões de toneladas por ano (MEHTA, 2008). O homem não consome nenhum outro material em tal quantidade, a não ser a água (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Uma das primeiras aplicações conhecidas do concreto consistiu em aquedutos e muros de contenção de água, construídos pelos romanos. Sua alta resistência à água faz dele um material ideal para estruturas destinadas a controlar, estocar e transportar água. O uso do concreto em barragens, canais, canalizações para conduzir água em tanques para estocagem é visto atualmente em quase todo o mundo (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Enquanto no estado fresco este composto pode tomar a forma do molde onde ele é aplicado e suas principais propriedades são a trabalhabilidade e a homogeneidade. No estado endurecido pode resistir a tensões de compressão e a outros efeitos como a corrosão e a abrasão se comparado com o aço, por exemplo.

As razões pelas quais, o uso do concreto ser tão difundido é a facilidade com que elementos estruturais de concreto podem ser executados, numa variedade de formas e tamanhos e ao fato do concreto ser o material mais barato e mais facilmente disponível no canteiro de obras. Os principais ingredientes para a produção do concreto tais como cimento Portland e agregados são relativamente baratos e normalmente disponíveis na maior parte do mundo.

Segundo Figueiredo (2000) compósitos, como já diz o nome, são materiais compostos basicamente por duas fases: a matriz e as fibras. As fibras podem atuar como um reforço da matriz em função das propriedades desta e das próprias fibras.

O uso de fibras no compósito cimentício, que é um material resistente embora frágil, é um método já utilizado há vários anos e ainda pode ser amplamente explorado para adicionar benefícios a estruturas do mesmo. Existem, inclusive, relatos de uso no Egito, quando o povo utilizava palha (fibras), com argila na produção de tijolos conseguindo assim maior resistência a flexão.

Normalmente, o concreto é avaliado pela sua resistência à compressão, mas ele possui outras propriedades importantes a serem avaliadas para sua aplicação, como módulo de Young e resistência à tração que é bem inferior à resistência à compressão.

## 2.9 Componentes do concreto

O concreto é um material composto por uma fase agregado e outra fase pasta, que é a matriz, cujo comportamento consiste na combinação das propriedades dos materiais que o compõem. No concreto de cimento hidráulico o meio aglomerante é formado por uma mistura de cimento hidráulico e água. O agregado é o material granular, tal como a areia, o pedregulho, a pedra britada ou escória de alto forno, usado com um meio cimentante, para formar um concreto ou uma argamassa de cimento hidráulico (MEHTA e MONTEIRO, 2008). O termo agregado graúdo se refere às partículas de agregados maiores do que 4,8 mm (peneira n° 4) e o termo agregado miúdo se refere a partículas de agregado menores que 4,8mm, porém maiores que 75µm (peneira n° 200). Pedregulho é o agregado graúdo resultante da desintegração natural e abrasão da rocha ou do processamento mecânico (britagem) de conglomerados fracamente cimentados (MEHTA e MONTEIRO, 2008). O termo areia é normalmente usado para o agregado miúdo resultante da desintegração natural e da abrasão de rochas ou processamento de rochas arenosas fiáveis (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Pedra britada é o produto resultante da britagem industrial de rochas, seixos rolados ou pedras arredondadas graúdas (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Escória de alto forno, um subproduto da indústria do aço, é o material obtido pela britagem da escória que solidificou sob condições atmosféricas.

Segundo Mehta e Monteiro (2008) argamassa é uma mistura de areia, cimento e água. É essencialmente um concreto sem agregado graúdo. Cimento é um material finamente pulverizado, que sozinho não é aglomerante, mas desenvolve propriedades ligantes, como resultado da hidratação (isto é, de reações químicas entre os minerais do cimento e água). Um cimento é chamado hidráulico quando os subprodutos de hidratação são estáveis em meio aquoso. Ainda de acordo com Mehta e Monteiro (2008), cimento hidráulico mais utilizado para fazer concreto é o cimento Portland, que consiste essencialmente de silicatos de cálcio hidratados. Os silicatos de cálcio hidratados, formados pela hidratação do cimento Portland, são os principais responsáveis por sua característica adesiva e são estáveis em meios aquosos.

Às vezes o concreto recebe incorporações de materiais que tenham função de agregado ou ligante e também aditivos plastificantes, super plastificantes, retardador, acelerador, plastificante retardador e plastificante acelerador.

Os agregados a serem empregados na elaboração do concreto devem atender ao estabelecido na NBR 7211 Agregado para concreto – Especificação.

## **2.10 Reforço de concreto com fibras**

Uma das formas de garantir um bom desempenho do concreto em situação de esforço de tração, como acontece na superfície inferior de uma viga bi-apoiada, é o reforço com fibras longas e ou curtas (BEZERRA, 2012). A utilização de fibras com o objetivo de reforçar materiais é uma prática que se realiza já há muitos anos conforme já citado no item 2.8. É conhecido que a principal função das fibras no concreto é evitar o desenvolvimento de rachaduras e aumentar a ductilidade de elementos de concreto (MOHAMMADI *et al.*, 2008). Geralmente a ductilidade de concretos pode ser melhorada através da introdução de vários tipos de fibras no mesmo.

As fibras aumentam a tensão na carga de pico, fornecem capacidade de absorção adicional de energia, melhoram consideravelmente a resistência à flexão do concreto, bem como a sua resistência ao impacto, resistência à tração e ductilidade (MOHAMMADI *et al.*, 2008).

As fibras utilizadas como reforço em concreto, normalmente são distribuídas aleatoriamente em todo o elemento, mas podem ser também usadas em uma parte da seção do elemento, por exemplo, em elementos compostos como duas camadas de feixes ou em pilares de concreto de alta resistência recoberta por concreto reforçado com fibra (ISKHAKOV e RIBAKOV, 2007; MOHAMMADI *et al.*, 2008).

De acordo com Sarzalejo *et al* (2009), fibras com adequada resistência mecânica à tração, distribuídas homogeneamente dentro do concreto, constituem uma micro armadura que mostra-se extremamente eficaz para combater o fenômeno da fissuração por retração, além de conferir considerável ductilidade a medida em que se elevam a quantidade e resistência das mesmas. Em tais circunstâncias, proporciona-se grande tenacidade ao concreto.

## 2.11 Fibras

Atualmente existem vários tipos de fibras específicas para reforço de concreto, classificadas em função da matéria prima com a qual são produzidas:

- Metálicas: aços carbono, suas ligas e alumínio;
- Naturais: amianto (asbesto), celulose e carbono;
- Sintéticas: nylon, polipropileno e outras.

A fibra de aço é um produto caracterizado geometricamente por uma das dimensões (comprimento) que prevalece sobre as outras (diâmetro), podendo apresentar superfície lisa ou corrugada, formas retilíneas ou com ancoragem nas extremidades. Seu uso como reforço no concreto considera a dispersão homogênea das fibras na massa do concreto, sem alterar as características geométricas da mesma (UNI 11037).

As fibras de aço possuem elevada resistência mecânica à tração; a distribuição homogênea de fibras curtas dentro do concreto é eficaz para combater o fenômeno da fissuração, além de conferir considerável ductilidade à medida que se elevam a quantidade e resistência das mesmas. Em tais circunstâncias, proporciona-se grande tenacidade ao concreto (SARZALEJO *et al.*, 2009).

As fibras naturais que podem ser vegetal, mineral ou animal, possuem muitas vantagens em comparação as fibras sintéticas e metálicas, como conservação de energia, são encontradas em abundância, possuem baixo custo, não são prejudiciais a saúde, possuem baixa densidade, são biodegradáveis e existe a possibilidade de ganhos econômicos.

Em contrapartida, para o seu uso em matrizes cimentícias, elas apresentam baixa durabilidade, variabilidade de propriedades e fraca adesão em seu estado natural a inúmeras matrizes.

Para o reforço de materiais de construção civil, podem ser empregadas fibras vegetais de menor comprimento, normalmente rejeitadas pelas indústrias de amarra, estofados e tecelagem, tradicionais consumidoras dessas fibras.

As características macroscópicas de maior interesse dessas fibras são aquelas relacionadas ao comportamento dos compósitos resultantes. Assim, normalmente são de interesse as propriedades físicas e mecânicas das fibras vegetais tais como: dimensões, volume de vazios e absorção de água, resistência à tração e modulo de elasticidade.

As fibras sintéticas para o concreto mais comuns são classificadas segundo as características geométricas, físicas, químicas, mecânicas e o processo de produção e foram agrupadas na Tabela II.9.

Tabela II.9 - Classificação das fibras sintéticas segundo BISFA.

<p>Polipropileno</p>	<p>Fibras compostas por macromoléculas de hidrocarboneto alifático saturado</p>	<p>Polipropileno</p> $\left[ \text{CH}_2 - \underset{\text{CH}_3}{\overset{\text{H}}{\text{C}}} \right]_n$
<p>Vinil</p>	<p>Fibras compostas por macromoléculas polivinil álcool com diferentes níveis de acetato</p>	<p>Polivinil álcool</p> $\left[ \left( \text{CH}_2 - \underset{\text{CH}}{\overset{\text{H}}{\text{C}}} \right)_n \left( \text{CH}_2 - \underset{\text{O}-R-\text{O}}{\overset{\text{H}}{\text{C}}} \right)_p \right]$ <p>Onde <math>n &gt; 0</math></p>
<p>Acrílico modificado</p>	<p>Fibras compostas por macromoléculas lineares que possuem na sua cadeia entre 50 a 80% em peso de acrilonitrilo</p>	<p>Copolímero acrílico</p> $\left[ \left( \text{CH}_2 - \underset{\text{CN}}{\overset{\text{H}}{\text{C}}} \right)_m \left( \text{CH}_2 - \underset{\text{Y}}{\overset{\text{X}}{\text{C}}} \right)_n \right]_p$ <p>Se <math>X = \text{H}</math> e <math>Y = \text{Cl}</math> Se <math>X = Y = \text{Cl}</math></p>
<p>Poliamida ou nylon</p>	<p>Fibras compostas por macromoléculas lineares que possuem na sua cadeia elementos ligantes de amido em serie, dos quais ao menos 85% são ligados a uma unidade de cicloalifático.</p>	<p>Poliamida 6,6</p> $\left[ \underset{\text{H}}{\overset{\text{H}}{\text{C}}} \left( \text{CH}_2 \right)_6 \underset{\text{H}}{\overset{\text{H}}{\text{C}}} - \text{C}(=\text{O}) - \left( \text{CH}_2 \right)_4 - \text{C}(=\text{O}) \right]_n$ <p>Poliamida 6,0</p> $\left[ \underset{\text{H}}{\overset{\text{H}}{\text{C}}} \left( \text{CH}_2 \right)_6 \underset{\text{H}}{\overset{\text{H}}{\text{C}}} - \text{C}(=\text{O}) \right]_n$
<p>Aramida</p>	<p>Fibras compostas por macromoléculas lineares formadas por um grupo aromático de elementos ligantes de amido ou amida, unidos diretamente a dois anéis aromáticos, onde o numero de ligantes de amida, se presente, não seja excedente ao numero de ligantes de amido.</p>	<p>Exemplo 1:</p> $\left[ \underset{\text{H}}{\overset{\text{H}}{\text{C}}} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{C}(=\text{O}) - \text{N}(\text{H}) - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{N}(\text{H}) \right]_n$ <p>Exemplo 2:</p> $\left[ \text{C}(=\text{O}) - \text{C}_6\text{H}_3(\text{C}(=\text{O}))_2 - \text{N}(\text{H}) - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{N}(\text{H}) \right]_p$ <p>Nota: No exemplo 1, os grupos aromáticos podem ser regulares ou irregulares.</p>

Fonte: SARZALEJO *et al.* (2009)

Na Tabela II.10 são apresentas algumas propriedades de alguns tipos de fibras. Dentre elas pode-se destacar a resistência à tração e o alongamento percentual. A primeira é definida pela

carga máxima suportada pela fibra durante o ensaio dividida pela área inicial da seção da fibra. O alongamento percentual é a diferença entre o comprimento útil até a fratura e o comprimento útil inicial dividida pelo comprimento útil inicial multiplicada por 100. Acredita-se que quanto maior a deformação percentual da fibra maior seria a pseudo-ductibilidade apresentada pelo concreto (BEZERRA, 2012).

Tabela II.10 - Tipos de fibras

Fibra	Diâmetro (µm)	Massa específica (kg/m³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência a tração (GPa)	Deformação percentual (%)
Aço	5 a 500	7840	200	0,5 a 2,5	0,5 a 3,5
Vidro	9 a 15	2600	70 a 80	2,0 a 4,0	2,0 a 3,5
Crosidolite (amianto)	0,02 a 0,40	3400	196	3,5	2,0 a 3,0
Crisólito (Amianto)	0,02 a 0,40	2600	164	3,1	2,0 a 3,0
Polipropileno	20 a 200	900	5 a 77	0,5 a 0,75	8,0
Carbono	9	1900	200 a 600	2,0 a 4,0	1,0
Nylon	-	1100	4	0,9	13,0 a 15,0
Celulose	-	1200	10	0,3 a 0,5	-
Acrílico	18	1180	14 a 19,5	0,4 a 1,0	3,0
Madeira	-	1500	71	0,9	-
Sisal	10 a 50	1500	-	0,8	3,0

Fonte: (BENTUR, 1995)

## 2.12 Desempenho de concretos reforçados com fibras curtas

Adicionando fibras de diferentes tipos ao concreto, sejam estas micro ou macro, obtém-se um novo material de características mecânicas distintas das conhecidas para o concreto convencional.

A avaliação das diferentes propriedades dos concretos reforçado com fibras e efetuada através de ensaios normatizados, alguns dos quais típicos para o concreto simples, outros desenvolvidos especialmente para os materiais reforçados com fibras.

Em função das aplicações usuais dos concretos reforçados com fibras curtas o desempenho desses compostos no estado endurecido é comumente avaliado pelos ensaios de resistência à compressão, à tração, à flexão, de fadiga e de impacto. As propriedades no estado fresco são avaliadas por ensaios de retração. A durabilidade é avaliada de forma indireta através de ensaios mecânicos (BEZERRA, 2012).

## 2.13 Resistência à compressão

O objetivo da adição de fibras ao concreto não é alterar a resistência à compressão do mesmo já que na maioria das vezes essa resistência não é muito alterada com a adição de fibras, podendo haver casos em que há um decréscimo no valor da resistência (LOBÃO, 2005).

Na Figura 2.7 pode-se observar a influência do teor de fibras nas curvas tensão x deformação de argamassa com fibras de aço. Nestas curvas, nota-se um aumento significativo na deformação no pico da tensão de compressão, e menor declive da parte descendente da curva que nos corpos-de-prova de concreto simples, ou seja, uma maior capacidade de absorver energia.

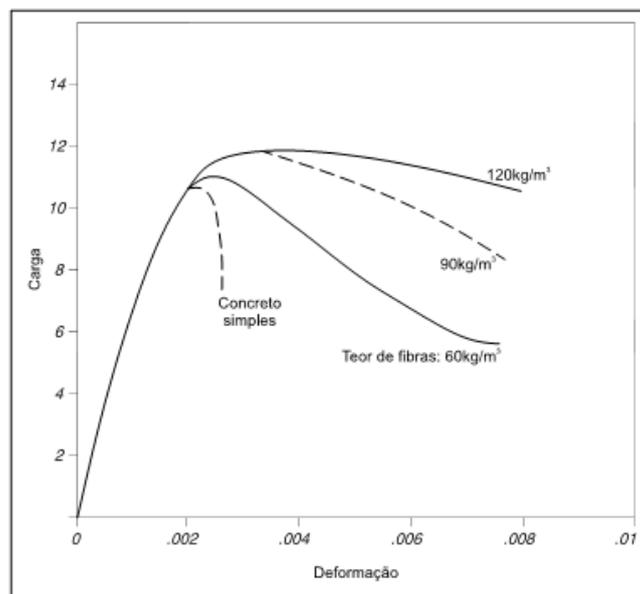


Figura 2.7 - Influência no teor de fibras na curva tensão x deformação na compressão (SARZALEJO *et al.*, 2009).

Segundo Sarzalejo *et al* (2009), os ensaios de resistência a compressão são realizados em corpos de prova cilíndricos (diâmetro 150mm, altura 300mm) ou cúbicos (100mm ou 150mm) e as normas de referência são as mesmas que se aplicam ao concreto convencional (ASTMC39, EN 12390-3, etc.).

## 2.14 Resistência à tração

De acordo com Sarzalejo *et al* (2009), o comportamento à tração uniaxial do concreto reforçado com fibras é fortemente influenciado pela presença das mesmas, especialmente na fase de pós fissuração.

A adição de fibras em matrizes à base de cimento produz uma melhora significativa de sua resistência à tração, que depende principalmente do volume de fibras utilizado (LOBÃO, 2005).

Além do tipo e teor das fibras, existem outros parâmetros que influem na resistência à tração do compósito, como o arranjo das fibras e o processo de mistura adotado. Fibras alinhadas na direção das tensões de tração produzem maiores incrementos na resistência à tração direta. Um volume de 5% de fibras lisas e retas de aço orientadas na direção da tração pode acarretar um aumento nessa resistência de até 133%. Quando as fibras são colocadas aleatoriamente, este aumento chega ao máximo a 60% (BENTUR e MINDESS, 1990; BEZERRA, 2012).

Existem basicamente três métodos de determinação da resistência à tração do concreto. O ensaio de tração direta consiste em um mecanismo de fixação que traciona uma peça padrão de concreto, semelhante aos ensaios de tração de aço destinado a construção (MAGALHÃES, 2009). Os ensaios de tração direta do concreto são raramente utilizados, principalmente porque os dispositivos de fixação do corpo de prova introduzem tensões secundárias difíceis de mensurar e que não podem ser ignoradas (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Outra forma de medir a resistência à tração é através de compressão diametral. Este método consiste em comprimir um corpo de prova cilíndrico de medidas 15 x 30 cm, ao longo de duas linhas axiais diametralmente opostas. Este ensaio é amplamente utilizado, visto que não necessita de grandes adaptações na prensa, e por utilizar as mesmas formas de corpos de prova de ensaios à compressão. O ensaio de tração por compressão diametral é conhecido mundialmente como o ensaio brasileiro, uma vez que o mesmo foi desenvolvido no Brasil, em 1943, por Lobo Carneiro.

O terceiro método de ensaio da resistência à tração do concreto é a chamada determinação da resistência à tração na flexão. Segundo Sarzalejo *et al* (2009) esse ensaio é certamente o mais difundido devido a sua relativa facilidade de execução e também porque representa muitas das

situações práticas. Outro motivo do sucesso deste ensaio deve-se ao maior grau de hiperelasticidade do mesmo, que coloca em evidência a ductilidade fornecida pelo reforço fibroso maior e mais representativo do que nos ensaios anteriormente mencionados.

## 2.15 Resistência à flexão

A resistência à flexão de compósitos cimentícios tem um aumento significativo quando se adiciona fibras ao mesmo.

Segundo Bentur e Mindess (1990), A influência da adição de fibras de aço em concretos e argamassas na resistência à flexão é muito maior que nas resistências à tração direta e à compressão. Geralmente são considerados dois valores de resistência à tração na flexão, a relativa à carga de fissuração (ponto A na Figura 2.8) e a relativa à carga máxima alcançada (ponto C na Figura 2.8) (ACI 544.4R-88, 2004; apud BEZERRA, 2012).

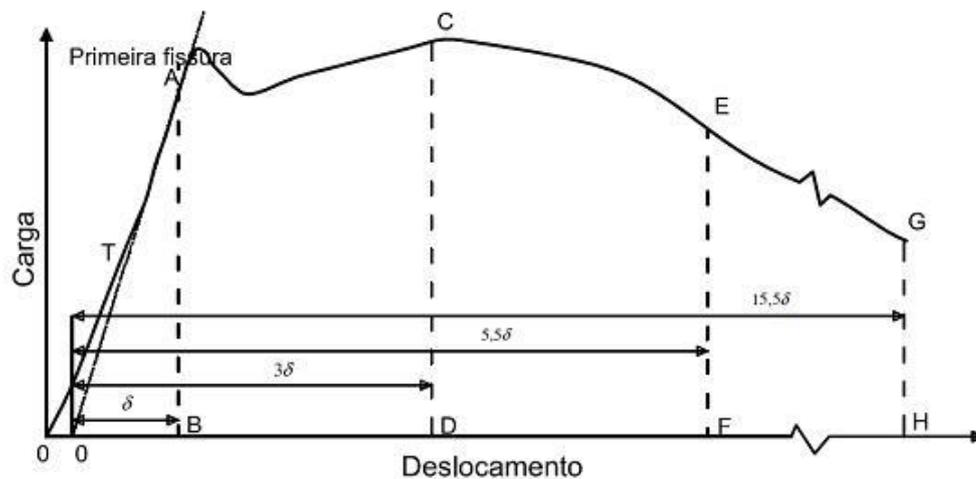


Figura 2.8 - Características da curva carga x deslocamento (ASTM C 1018; ACI544.4R-88, 2004 apud BEZERRA, 2012).

A diferença entre resistência e tenacidade é de grande importância, pois dois materiais podem ter resistências idênticas, porém diferentes valores de tenacidade. Entretanto, normalmente, quando a resistência de um material cresce, a ductilidade (quantidade de deformação permanente que pode ocorrer antes do rompimento) e a tenacidade diminuem. A tenacidade é a medida da energia requerida para provocar a completa ruptura de um material (MOGUEL, 1999; apud GUIMARÃES, 2003). De acordo com Mehta e Monteiro (2008), normalmente,

materiais com alta resistência rompem de forma brusca, na maioria das vezes, sem que ocorra uma deformação significativa, seja ela não elástica ou permanente.

A tenacidade à flexão de um modo geral é definida como a área abaixo da curva da carga de flexão medida no ensaio de flexão. Estas curvas podem variar muito de acordo com o volume e as características das fibras. Aquelas com melhores características de ancoragem, como por exemplo, as fibras com ancoragem mecânica ou com relações de aspecto altas, fornecem maiores valores de tenacidade do que fibras lisas e retas, com a mesma concentração de volume. Ainda segundo Bentur e Mindess (1990), melhorar a tenacidade à flexão de uma peça também significa melhorar o desempenho do material à fadiga e resistência ao impacto e impulsos.

## **2.16 Resistência ao impacto e à fadiga**

A resistência à fadiga pode ser definida como o máximo nível de esforço ao qual o concreto reforçado com fibras pode resistir para um determinado número de ciclos de carga antes da ruptura, (ACI Committee: Report 544.1R - Fiber Reinforced Concrete; Report 544.2R - Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete, apud SARZALEJO *et al* 2009). Segundo Figueiredo (2000), adição de fibras aumenta o número de ciclos até ocorrer à fissuração e à fratura, com significativa tensão pós-fissuração, principalmente nos concretos com fibras deformadas. Ainda de acordo com Figueiredo (2000), como aponta o ACI (1988) e baseado numa série de pesquisas, a resistência aos esforços dinâmicos como cargas explosivas, queda de massas, e cargas dinâmicas de compressão, flexão e tração é de 3 a 10 vezes maior do que os valores obtidos para o concreto sem reforço. Isto é devido ao fato de ser grande a quantidade de energia dissipada no concreto com fibra.

Concretos reforçados com fibras se comportam melhor do que os concretos comuns quando submetidos a carregamentos de impacto, tanto em termos de resistência, quanto em energia de fratura, sendo as fibras com ganchos nas pontas mais efetivas que as fibras lisas. O papel das fibras é essencialmente o controle de fissuras através da ponte de ligação que faz entre as partes não fissuradas da matriz (LOPES, 2005).

## **2.17 Durabilidade**

De acordo com Tanesi e Figueiredo (2000), a durabilidade dos concretos com fibras depende da durabilidade das fibras no meio onde foram dispersas, da durabilidade do próprio compósito e dos agentes agressivos externos. Se bem compactados e curados, concretos com fibras apresentam excelente durabilidade, enquanto as fibras permanecerem protegidas pela pasta. No entanto, deve-se ressaltar o fato de que as fibras restringem a propagação das fissuras no concreto. Como consequência direta da restrição a propagação das fissuras proporcionada pelas fibras tem-se um aumento da resistência a entrada de agentes agressivos com consequente aumento da durabilidade da estrutura (CHANVTLLARD, AITCIN e LUPIEN, 1989 apud FIGUEIREDO, 2000).

Na maioria das condições ambientais, é inevitável alguma degradação das fibras mais superficiais; contudo, as fibras no interior do concreto normalmente permanecem sem nenhum tipo de decomposição, que pode ser evitada se forem utilizadas fibras adequadas ao ambiente.

## **2.18 Retração e fluência**

A retração e fluência são pouco afetadas pela adição de fibras e os fatores que as influenciam são os mesmos que afetam o concreto convencional, ou seja, temperatura, umidade relativa, propriedades do material, duração da cura e dimensão da estrutura (LOBÃO, 2005). A retração e fluência, por serem fenômenos associados ao movimento de fluidos dentro do concreto, são pouco influenciadas pelas fibras quando o concreto permanece não fissurado. No entanto, quando a retração é restringida, as fibras podem proporcionar um benefício no que se refere ao controle da fissuração (FIGUEIREDO, 2000). E ainda de acordo com Lobão (2005), a principal vantagem da adição de fibras é o retardamento da fissuração, a distribuição e a redução da abertura das fissuras causadas pela retração.

## 2.19 Interação matriz-fibra

O concreto não apresenta um bom desempenho de resistência à tração quando comparado com sua resistência à compressão, o que está associado diretamente ao comportamento das fissuras no interior da matriz. No momento da sollicitação do concreto às forças de tração, fissuras já presentes ou novas formações de fissuras prejudicam seu desempenho (FIGUEIREDO, 2000). O comportamento diferenciado do concreto com fibras curtas se deve à interação matriz cimentícia-fibras. A compreensão dos mecanismos que regem essa interação poderia servir de base para o desenvolvimento de compósitos mais eficientes, através de alterações no formato da fibra ou no tratamento de sua superfície (HOLANDA, 2002; BEZERRA, 2012).

No caso do concreto simples, uma fissura irá representar uma barreira à propagação de tensões, como mostrado na Figura 2.9, isso implica numa concentração de tensões na extremidade da fissura e, no caso desta tensão superar a resistência da matriz, ocorrerá a ruptura do material. Quando se adicionam fibras ao concreto, este deixa de ter um caráter frágil. Isto ocorre pelo fato da fibra servir como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, minimizando a concentração de tensões nas extremidades das mesmas. Há assim uma redução da velocidade de propagação das fissuras no concreto, que passa a ter um comportamento pseudo-dúctil (FIGUEIREDO, 2000; BEZERRA, 2012).

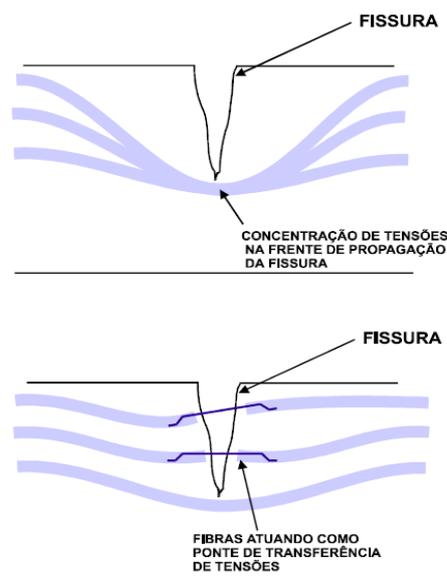


Figura 2.9 - Mecanismo de controle da propagação das fissuras (NUNES, TANESI e FIGUEIREDO, 1997; BEZERRA, 2012).

A transferência de tensão ocorre antes e após a fissuração do compósito. Antes da fissuração, a transferência de tensão por aderência é o mecanismo dominante. Os deslocamentos longitudinais da fibra e da matriz na interface são geometricamente compatíveis. A tensão de aderência desenvolvida na interface é necessária para distribuir o carregamento externo entre as fibras e a matriz, já que possuem diferentes módulos de elasticidade. Desta forma, os dois componentes apresentarão a mesma deformação na interface, conforme representado na Figura 2.10 (HOLANDA, 2002; BEZERRA, 2012).

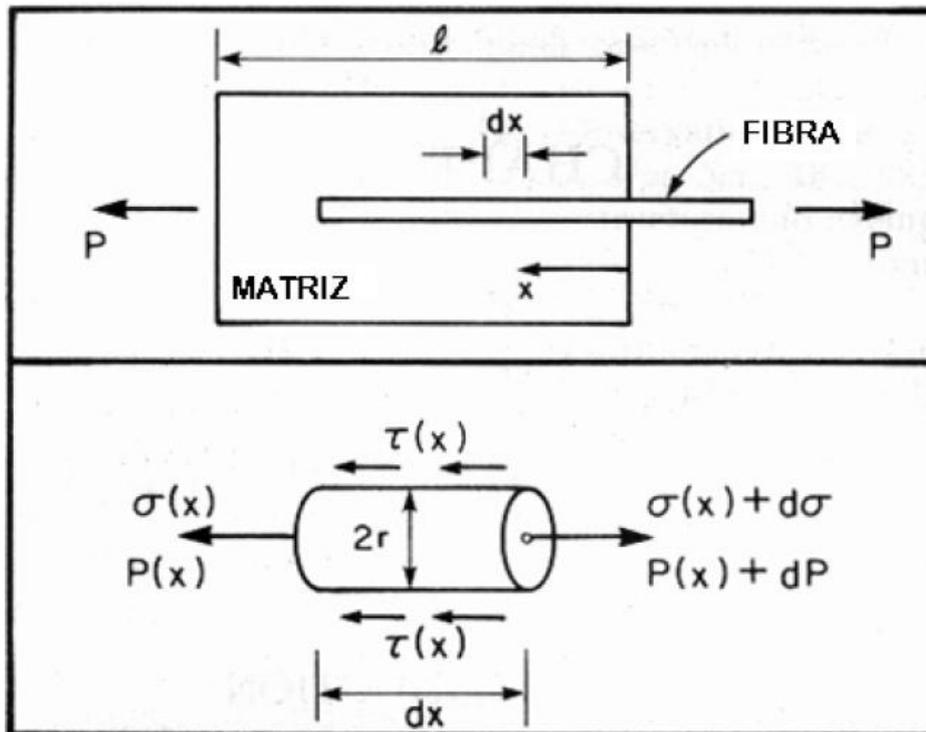


Figura 2.10 - Representação do arrancamento da fibra da matriz (BENTUR e MINDESS, 1990; BEZERRA, 2012).

De acordo com Balaguru e Shah (1992), quando uma força de tração é aplicada à matriz, parte dela é transferida para as superfícies das fibras. Devido à diferença de rigidez entre as fibras e a matriz, aparecem tensões tangenciais ao longo da superfície da fibra, as quais auxiliam nas transferências ao longo da interface fibra-matriz não uniformes.

A transição da transferência de tensão por aderência para transferência de tensão por atrito ocorre quando as tensões tangenciais na interface, devidas ao carregamento, excedem a resistência de aderência entre a fibra e a matriz ( $\tau_{au}$ ). Quando esta tensão é superada, inicia-se o desligamento da fibra da matriz e o aparecimento de tensões de atrito na interface da zona

de desligamento. A resistência da interface ao atrito denomina-se  $\tau_{fu}$ , representadas na Figura 2.11 (HOLANDA, 2002; BEZERRA, 2012).

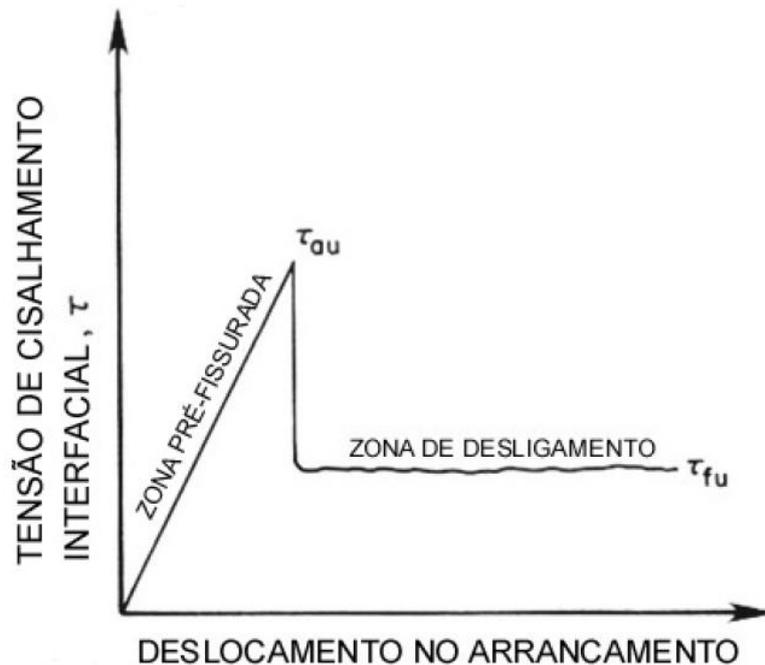


Figura 2.11 - Representação das tensões de cisalhamento na interface (BENTUR e MINDESS, 1990; BEZERRA, 2012)

Após a fissuração, o mecanismo dominante de transferência de tensão da matriz para as fibras é o atrito. Neste caso, ocorrem deslocamentos relativos entre a fibra e a matriz. A tensão de atrito desenvolvida é uma tensão tangencial, considerada como sendo uniforme distribuída ao longo da fibra-matriz (HOLANDA, 2002; BEZERRA, 2012).

Além das tensões tangenciais que ocorrem paralelas à interface fibra-matriz, também devem ser consideradas as tensões normais que surgem na interface, resultantes de alterações de volume, de carregamentos biaxiais, tri axiais, e do efeito de Poisson. A deformação da fibra à tração, na região onde ela entra na matriz, na vizinhança da fissura, é muito maior que a deformação da matriz. Isto resulta em uma contração lateral na fibra, devida ao coeficiente de Poisson, que é maior que a da matriz, gerando tensões normais de tração na interface, conforme Figura 2.12 (HOLANDA, 2002; BEZERRA, 2012). As tensões normais podem causar um enfraquecimento da interface e um desligamento prematuro das fibras, podendo reduzir ou eliminar a resistência ao atrito.

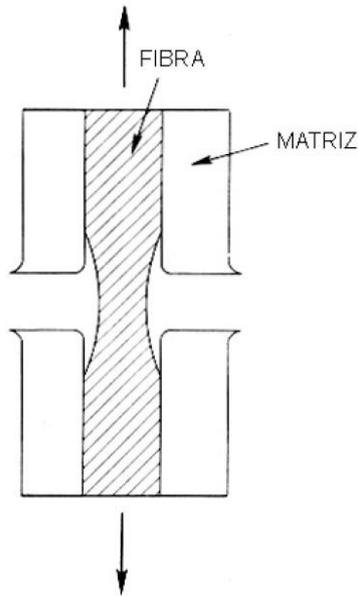


Figura 2.12 - Representação da fibra e da matriz na vizinhança da fissura (BENTUR e MINDESS, 1990; BEZERRA, 2012).

Na consideração de efeito de Poisson é importante observar a natureza da fibra: se ela sofre deformação plástica e escoamento antes da ruptura. Quando o comprimento da fibra embutido na matriz excede o comprimento ( $\ell_c$ ), ocorre a ruptura da fibra. Se, no entanto, a fibra é dúctil o suficiente, ela irá suportar o arrancamento da matriz, mesmo sendo grande o comprimento embutido (BEZERRA, 2012).

O comprimento crítico é definido por Bentur e Mindess (1990), como sendo o menor comprimento necessário para o desenvolvimento de tensões de tração iguais à sua resistência. Quando o comprimento da fibra embutido na matriz ( $\ell$ ) é menor do que o crítico ( $\ell_c$ ), ele não é suficiente para gerar tensão de escoamento ou de ruptura nas fibras, e elas não são utilizadas de forma eficiente. Para fibras retas e lisas, ele pode ser definido conforme a Equação 2.1.

$$\ell_c = \frac{\sigma_{fu} D}{2\tau_{fu}} \quad (2.1)$$

onde:

$\sigma_{fu}$  → resistência última da fibra à tração;

$\tau_{fu}$  → resistência média de aderência na interface fibra-matriz;

$D$  → diâmetro da seção transversal da fibra.

Segundo Balaguru e Shah (1992), o comprimento crítico é o comprimento embutido que fornece a maior resistência ao arrancamento, sem ocasionar a ruptura da fibra. Quando  $\ell \ll \ell_c$ , as fibras são tão curtas que são arrancadas antes que seja desenvolvida uma tensão suficiente para rompê-las. Quando  $\ell \gg \ell_c$ , o comprimento da fibra embutido na matriz é suficiente para desenvolver uma tensão de tração na fibra igual à sua resistência, e a ruptura do compósito será predominante por ruptura da fibra. Para Figueiredo (2000) o comprimento crítico de uma fibra pode ser definido como aquele que, quando da ocorrência de uma fissuração perpendicular à fibra e posicionada na região média do seu comprimento proporciona uma tensão no seu centro igual a sua tensão de ruptura. A alteração do modo de ruptura de arrancamento para ruptura da fibra resulta na redução da energia envolvida na ruptura do compósito, uma vez que a energia consumida na ruptura da fibra é bem menor que a consumida no seu arrancamento (HOLANDA, 2002; BEZERRA, 2012).

Quando a fibra tem um comprimento menor que o crítico, a carga de arrancamento proporcionada pelo comprimento embutido na matriz não é suficiente para produzir uma tensão que supere a resistência da fibra. Nesta situação, com o aumento da deformação e conseqüentemente da abertura da fissura, a fibra que está atuando como ponte de transferência de tensões pela fissura será arrancada do lado que possuir menor comprimento embutido.

A máxima tenacidade do compósito é obtida quando  $\ell = \ell_c$ . Quando o comprimento aumenta, mais fibras se rompem antes de serem arrancadas, e a energia consumida na ruptura do compósito é reduzida. No entanto, o aumento do comprimento é acompanhado pelo aumento da resistência das fibras e, conseqüentemente, da resistência do compósito. Portanto, para  $\ell > \ell_c$ , há uma contradição entre os requisitos de resistência e de tenacidade do elemento.

A forma das fibras irá influenciar significativamente na resistência à tração das mesmas, as fibras de forma irregular irão proporcionar condições de ancoragem e atrito, entre o concreto e a fibra, melhor que as fibras lisas.

Obviamente, as características mecânicas das fibras, especialmente sua resistência à tração, possuem um papel fundamental no comportamento do concreto reforçado com fibras, pois, ao não ocorrer o arrancamento da fibra (pullout) conforme Figura 2.13, impedido pela aderência imposta entre a interface fibra e concreto, pode ocorrer a ruptura da fibra devido a sua insuficiente resistência à tração, este fato pode ser verificado através da Figura 2.14.

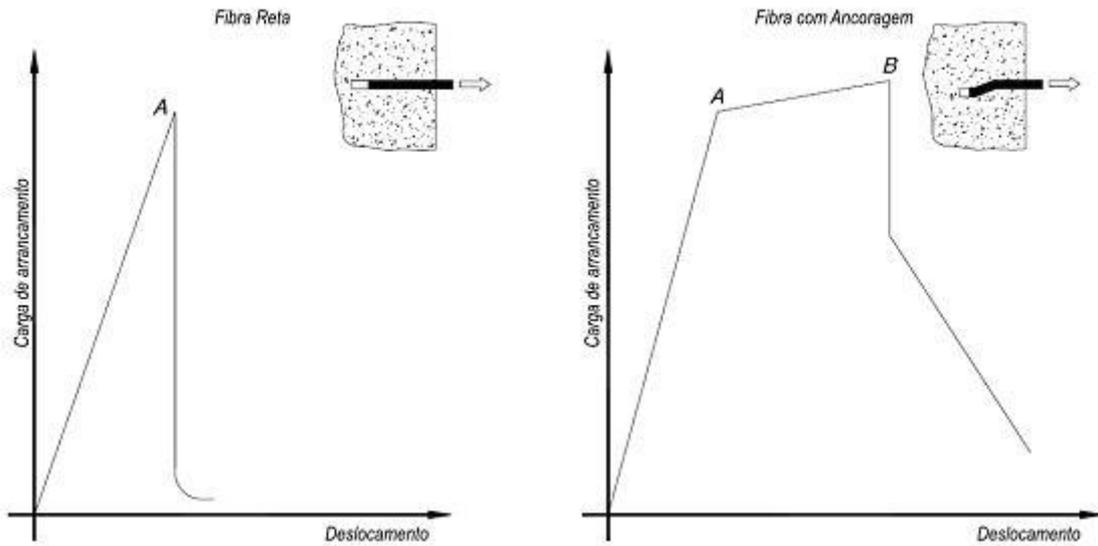


Figura 2.13 - Exemplo da variação da eficiência entre a interface fibra e o concreto com a forma da fibra (SARZALEJO *et al*, 2009; BEZERRA, 2012).

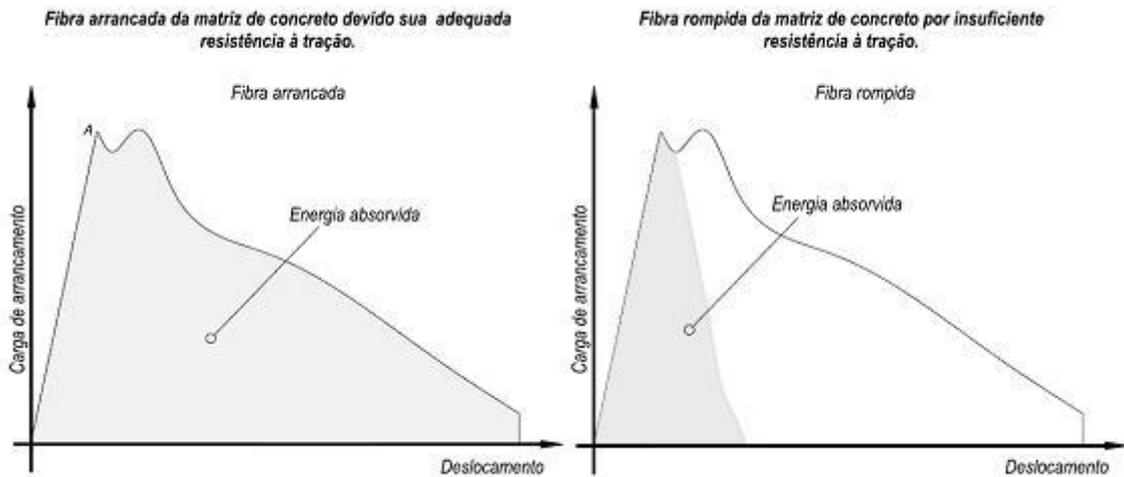


Figura 2.14 - A importância da resistência à tração da fibra (SARZALEJO *et al.*, 2009; BEZERRA, 2012).

É interessante observar que com o incremento do fator de forma ( $L/D$ ) diminui-se, dentro de certos limites, a quantidade de fibras (dosagem) necessária para alcançar um determinado resultado. Tal fato ocorre devido ao incremento na resistência à tração ( $f_s$ ), observado estatisticamente quando são ensaiadas fibras de maior comprimento, conforme pode ser visto na Figura 2.15 (SARZALEJO *et al.*, 2009).

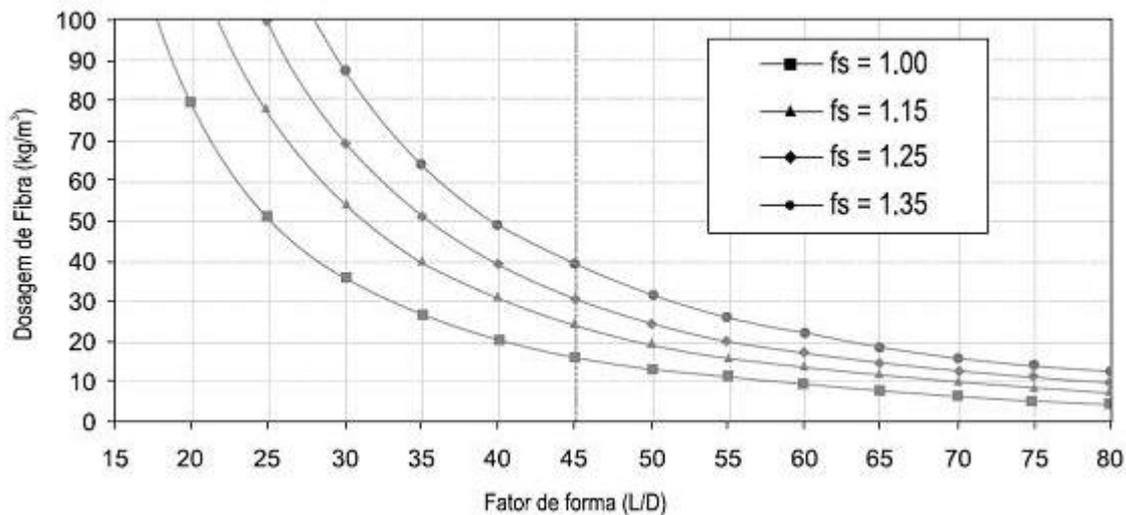


Figura 2.15 - Dosagem X Fator de forma (L/D) (SARZALEJO *et al.*, 2009)

O comportamento do concreto sob cargas moderadas, inferiores à de ruptura, é sempre elástico e não se produz nenhuma fissuração no corpo de prova durante o ensaio de flexão, independentemente da presença ou da qualidade e quantidade de fibras. Porém, comportamentos distintos podem ser verificados continuando o ensaio, ou seja, aumentando a carga a partir do ponto de carga máxima, denominado “ponto de primeira fissuração” (SARZALEJO *et al* 2009). As curvas apresentadas na Figura 2.16 representam esse comportamento.

De acordo com os autores a curva I esquematiza o comportamento de um concreto simples sem reforço: uma vez alcançada a carga de primeira fissuração, há imediato colapso do material, caracterizando o comportamento típico de um material frágil. A curva II mostra a capacidade de um concreto reforçado com fibras para absorver, após o ponto de primeira fissuração, certa carga, ainda que baixa (A-B), para depois colapsar mais lentamente (comportamento suavizado). A curva III é típica de um material dúctil e demonstra um concreto capaz de suportar, a partir do ponto de primeira fissuração, um deslocamento (A-B) sob carga constante, muito antes do colapso que é verificado de uma maneira mais lenta (comportamento plástico). A curva IV finalmente evidencia um concreto reforçado com fibras, com um certo incremento de carga portante sob um amplo deslocamento (A-B), após o ponto de primeira fissuração (comportamento enrijecido).

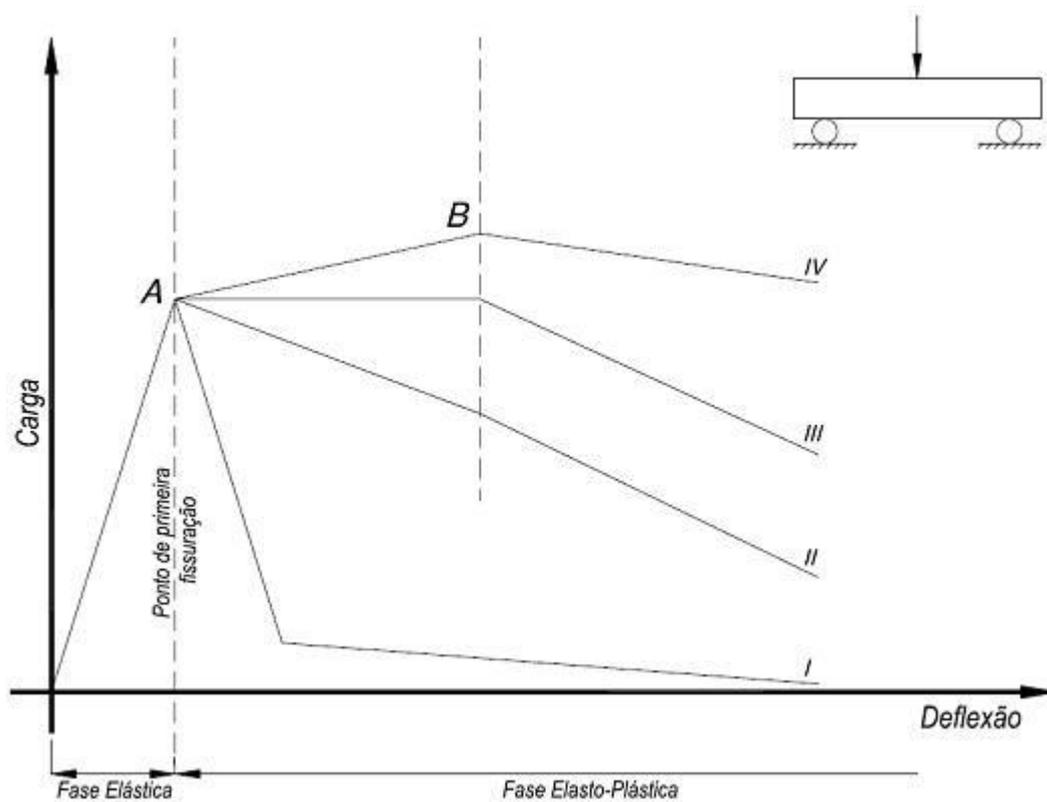


Figura 2.16 - Esquema de um ensaio de flexão (SARZALEJO *et al.*, 2009)

No que se refere à influência da geometria das fibras, ou seja, a forma e as dimensões longitudinais e transversais, sobre o comportamento do concreto reforçado com elas, a relação de aspecto, conhecida também como relação de forma ou esbelteza (razão entre o comprimento e o diâmetro da fibra), mostrada na Figura 2.17 é considerada o elemento mais importante, pois do seu valor dependem a ductilidade e a tenacidade do concreto reforçado com fibras (SARZALEJO *et al.*, 2009).

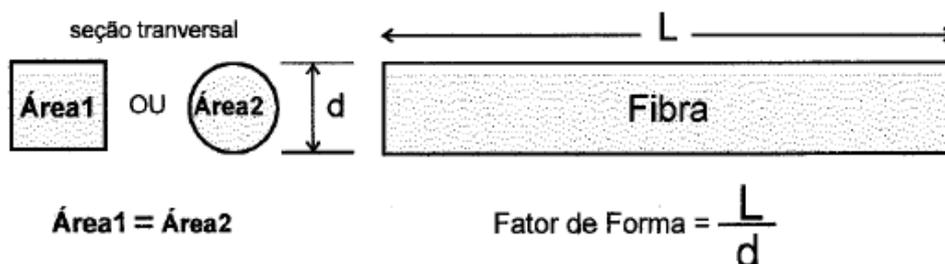


Figura 2.17 - Fator de forma da fibra (NUNES e AGOPYAN, 1998 apud BEZERRA, 2012).

A relação de forma tem sido usualmente empregada como fator determinante na escolha de determinada fibra, pois esta relação tem grande influência na condição do concreto ser manuseado em seu estado fresco sem perder sua consistência (trabalhabilidade) (HARTMANN, 1999; VIDAL, 1999; FIGUEIREDO, 2000; BRANDÃO, 2005; BEZERRA, 2012).

Um esquema da energia absorvida pelo concreto em relação ao fator de forma das fibras adicionadas ao mesmo é mostrado na Figura 2.18. Observa-se que a fibra com fator de forma igual a 30 absorve somente 80% da energia total absorvida da fibra com fator de forma igual a 100.

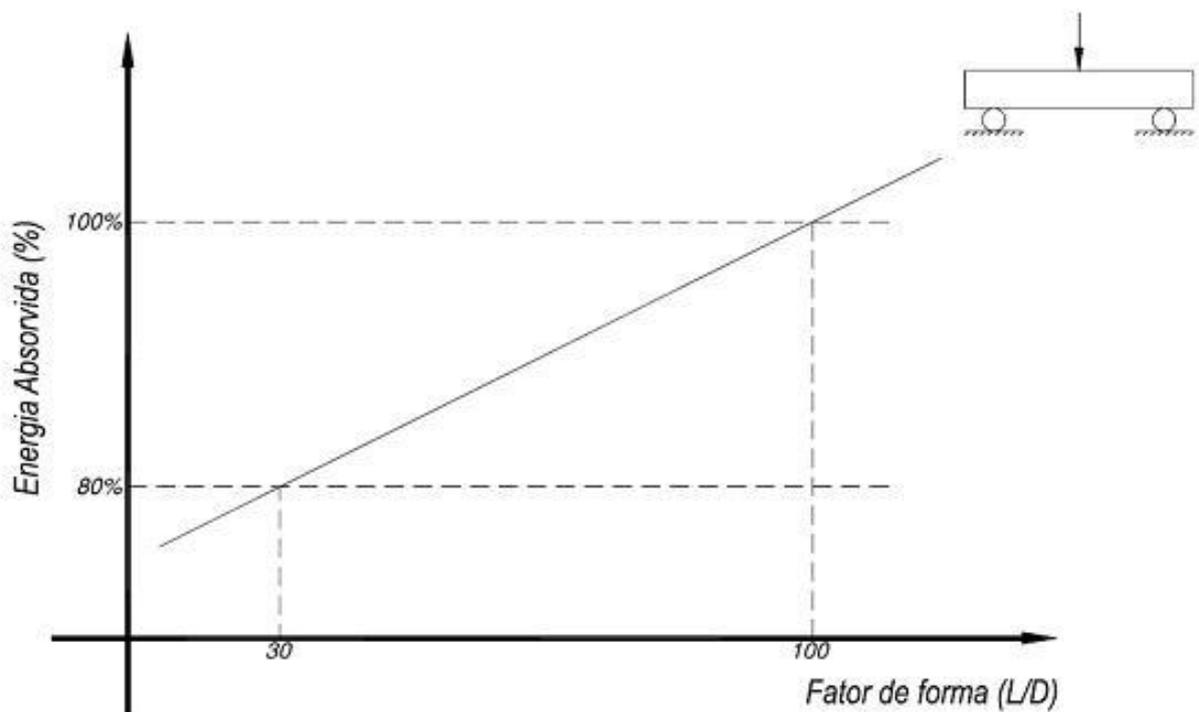


Figura 2.18 - Energia absorvida (%) versus fator de forma (L/D) (SARZALEJO *et al.*, 2009; BEZERRA, 2012).

Um aspecto importante é o comprimento das fibras em relação à dimensão do agregado gráudo do concreto. O concreto é constituído da pasta cimentícia (cimento + água), agregado miúdo e gráudo. A ligação entre a pasta cimentícia e o agregado é chamada de zona de transição agregado e pasta (ZTA). Esta região do concreto é geralmente menos resistente

propiciando a propagação de trincas. No caso do comprimento da fibra, este deverá ser compatível com o agregado graúdo, conforme Figura 2.19. Nesta situação, com o tamanho da fibra compatível com a dimensão máxima do agregado graúdo, as fibras funcionam como um tipo de costura evitando a propagação da trinca (BEZERRA, 2012).

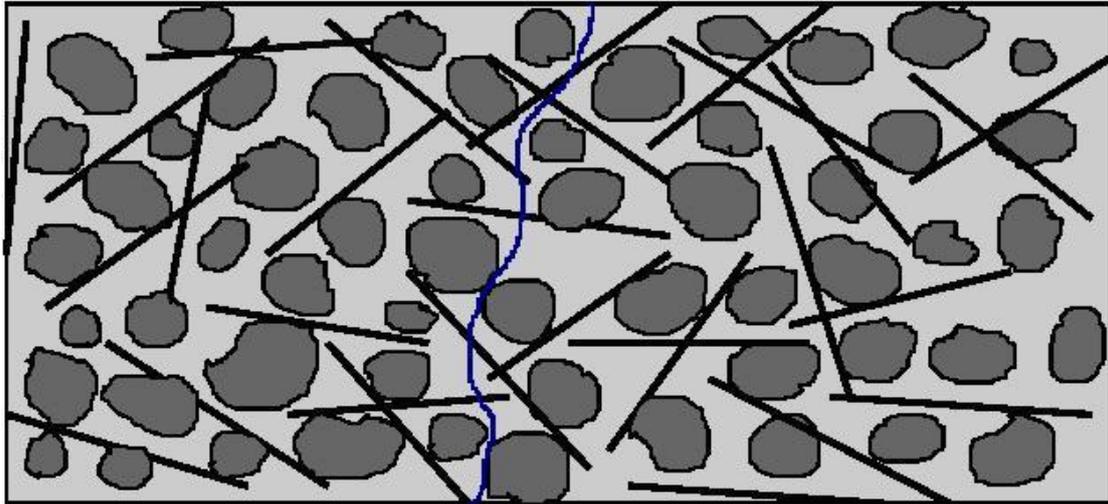


Figura 2.19 - Concreto reforçado com fibras onde há compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo (FIGUEIREDO, 2000; BEZERRA, 2012).

Pela análise dos fatores de eficiência pode-se concluir que, quanto mais direcionadas as fibras estiverem em relação ao sentido da tensão principal de tração, melhor será o desempenho do compósito. Como consequência prática, recomenda-se a utilização de fibras cujo comprimento seja igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado utilizado no concreto. Em outras palavras, deve haver uma compatibilidade dimensional entre agregados e fibras de modo que estas interceptem com maior frequência a fissura que ocorre no compósito (MAIDL, 1991 apud FIGUEIREDO 2000).

Ainda segundo Figueiredo (2000), esta compatibilidade dimensional possibilita a atuação da fibra como reforço do concreto e não como mero reforço da argamassa do concreto. Isto é importante pelo fato da fratura se propagar preferencialmente na região de interface entre o agregado graúdo e a pasta para concretos de baixa e moderada resistência mecânica. Assim, a fibra que deve atuar como ponte de transferência de tensões nas fissuras deve ter um comprimento tal que facilite o seu correto posicionamento em relação à fissura, ou seja, superior a duas vezes a dimensão máxima do agregado. Na Figura 2.20 se encontra representado um concreto sem compatibilidade dimensional entre agregado e fibra.

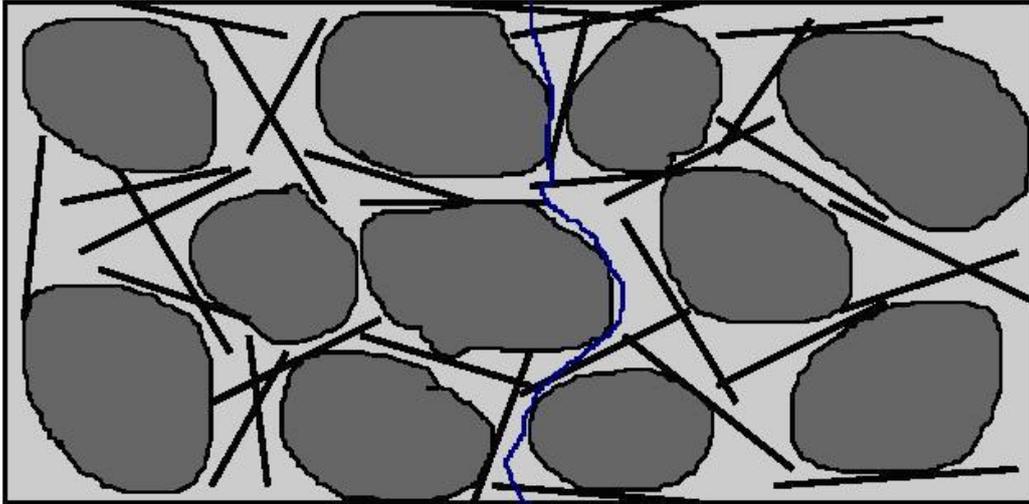


Figura 2.20 - Concreto reforçado com fibras onde não há compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo (FIGUEIREDO, 2000; BEZERRA, 2012).

As trincas crescem preferencialmente na ZTA e quando a fibra é de tamanho igual ou menor que o agregado graúdo, as ZTA's encontram-se com maior facilidade. Na Figura 2.20, as fibras estão com tamanho incompatível em relação à dimensão máxima do agregado graúdo. Pode-se perceber que uma trinca durante o crescimento encontraria menos fibras como obstáculo à propagação.

Percebe-se que, quando não há esta compatibilidade, poucas fibras trabalham como ponte de transferência de tensões na fissura. Duas alternativas são normalmente empregadas de maneira a otimizar a mistura de concreto com fibras: ou se reduz a dimensão máxima característica do agregado, ou se aumenta o comprimento da fibra (FIGUEIREDO, 2000).

## 2.20 Considerações

Muitos estudos referentes à adição de fibra de vidro em matriz de concreto foram realizados, mas até o momento não foi verificado nenhum estudo quanto à utilização de fibras curtas, originadas de placas de circuito impresso de plástico reforçado com fibra de vidro em compósito cimentício. Um resumo das principais publicações é relacionado na Tabela II.11.

Tabela II.11 - Evolução dos estudos – Zona de transição fibra de vidro-matriz.

KRENCHEL (1964) apud AGOPYAN (1961)	Estudo considerado como o início da pesquisa sobre matrizes frágeis reforçadas com fibras, inclusive com resultados experimentais, no emprego de fibras de vidro comum.
AVESTON et al. AVESTON: KELLY (1973)	Apresentaram teoria de funcionamento dos compósitos com matrizes frágeis (conhecida como teoria ACK; Aveston, Cooper e Kelly), na qual o fundamento é a transferência de tensões entre matriz e fibras, por meio da interface.
MAJUMDAR; RYDER (1970) e MAJUMDAR (1974)	Apresentaram importantes pesquisas sobre pastas de cimento reforçadas com fibras de vidro com dióxido de zircônio (cem-FIL), mais resistentes aos álcalis do cimento que as fibras do tipo E. Foram realizadas análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por espectroscopia de raios X por energia dispersiva (EDS), registrando a evolução dos produtos hidratados ao longo do tempo e o acúmulo de portlandita na superfície das fibras.
MAJUMDAR (final dos anos 70)	As fibras de vidro tiveram novo aprimoramento, além do uso de zircônio, por meio de recobrimento à base de inibidores químicos da família dos fenóis.
COHEN; DIAMOND (1975)	Notaram a presença de filme duplo, constituído de portlandita, seguido de C-S-H, em compósitos de pasta de cimento reforçada com fibras de vidro comum e vidro resistente a álcalis.
JARAS; LITHERLAND (1975)	Também sobre pasta de cimento reforçada com fibras de vidro comum e de vidro resistente a álcalis, com a constatação de que o acúmulo de portlandita ocorre logo no início da hidratação e que os cristais formados são tanto maiores quanto o espaço disponível para seu crescimento.
HANNANT (1978)	Autor do primeiro livro publicado sobre compósitos fibrosos. Apresentou a abordagem sobre a morfologia da interface entre matriz de cimento e fibras de vidro, aço e polipropileno e observou a sua importância sobre o comportamento da aderência.
LAWS (1982) e LAWS et al. (1986)	Contribuíram para o avanço do modelo ACK, ao apresentarem teorias sobre a evolução da aderência fibra-matriz durante a solitação mecânica. Afirmaram ser grande importância a modificação da zona de transição para melhoria do compósito.
BENTUR; DIAMOND (1984)	Apresentaram estudo sobre fibras de vidro resistente a álcalis em feixes de filamentos e constataram o acúmulo de vazios ou de portlandita, com prejuízo para a aderência.
MAJUMDAR; LAWS (1991)	Reportaram que o recobrimento se dissolve lentamente, em contato com o meio alcalino, e isso faz reduzir a interação vidro-matriz. Como resultado, obtém-se sensível aumento da durabilidade dessas fibras, comercialmente denominadas Cem-FIL 2.
PERUZZI (2002)	Apresentou estudo sobre o comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento Portland modificada com látex e adição de sílica ativa.
BORGES (2007)	Apresentou estudo sobre a utilização de resíduo de lã de vidro em fabricação de concreto.
Lee (2008)	Apresentou estudo sobre desempenho mecânico e retardo de trincas de concreto asfáltico reforçado com grade de fibra de vidro.
COPPOLA et al (2011)	Apresentou estudo sobre caracterização mecânica de compósitos cimentício reforçado com fibra de vidro, nano tubos de carbono ou plástico reforçado (GRP) em altas taxas de deformação.
DUBEY et al (2012)	Patentaram um sistema de placas de cimento reforçadas com tela de fibra de vidro.

## **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1 Materiais**

#### **3.1.1 Fibras**

Para reforço do compósito cimentício avaliado nesta pesquisa foram utilizadas fibras curtas originadas de placas de circuito impresso com seção transversal retangular de dimensões distintas, com aproximadamente 1,5mm X 2,5mm de aresta por 60mm e 120mm de comprimento respectivamente. É mostrado na Figura 3.1 à esquerda imagem de fibras com comprimento de 120mm e à direita imagem de fibras de comprimento igual a 60mm.

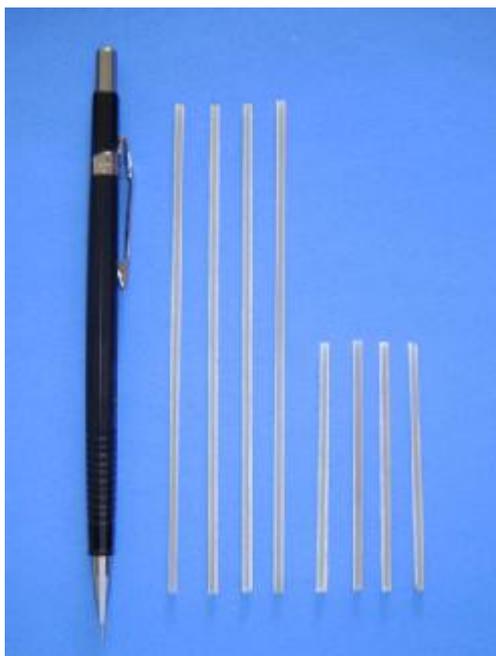


Figura 3.1 - Fibras obtidas após o corte das placas de circuito impresso.

#### **3.1.2 Agregado miúdo**

Como agregado miúdo foi utilizado na composição do compósito cimentício, areia lavada de rio quartzosa, adquirida em depósito de materiais de construção civil local. A areia natural apresentou composição granulométrica conforme exibida na Tabela III.1.

Tabela III.1 - Composição granulométrica do agregado miúdo utilizado

Abertura da peneira (mm)	Material retido (g)		Material retido (%)			Material Passante (%)	
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Média	Acumulado	Acumulado
	1	2	1	2			
4,75	0	0	0	0	0	0	100,0%
2,36	13,24	12,84	2,64%	2,56%	2,60%	2,60%	97,39%
1,18	66,18	64,89	13,23%	12,97%	13,10%	15,71%	84,28%
0,60	189,43	187,71	37,88%	37,54%	37,71%	53,42%	46,57%
0,30	149,42	150,63	29,88%	30,12%	30,00%	83,43%	16,56%
0,15	58,54	59,78	11,70%	11,95%	11,83%	95,26%	4,73%
Fundo	23,19	24,15	4,63%	4,83%	4,73%	100%	0,0%
Amostra Seca (g):	500,00	500,00					

A dimensão máxima característica foi igual a 2,36mm. O módulo de finura calculado é igual 2,364 e de acordo com módulo de finura agregados miúdos NBR 7211 (ABNT, 2009), esta areia está na zona ótima ou seja,  $2,20 < MF < 2,90$ . O módulo de finura foi calculado através da equação 3.1:

$$MF = \frac{\sum \%A_c}{100} \quad (3.1)$$

Onde:

MF= módulo de finura

$\sum \%A_c$  = soma das porcentagens acumuladas na série.

Na Figura 3.2 é mostrada a curva granulométrica da areia utilizada na composição do compósito cimentício, como agregado miúdo.

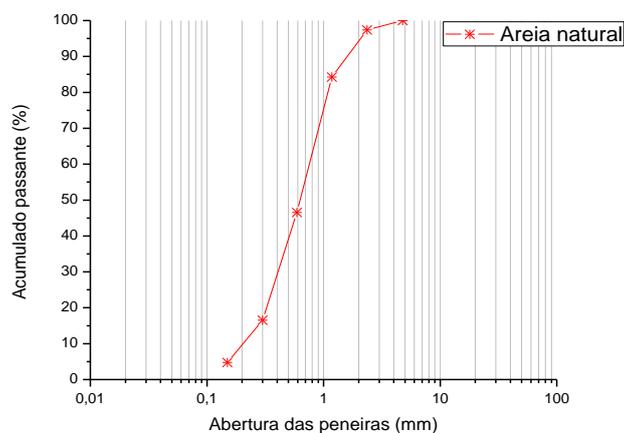


Figura 3.2 - Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado.

### 3.1.3 Aglomerante

Como aglomerante do compósito cimentício, foi utilizado cimento Portland composto com escória de alto forno classe 32MPa (CP II-E-32). A escolha deste cimento deve-se ao fato ser o tipo mais comumente encontrado no comércio local na região de Araxá (MG), onde foi realizada esta pesquisa. Na Tabela III.2 são apresentadas as características do cimento Portland CP II-E-32 utilizado, conforme especificações de fabricantes de cimento.

Tabela III.2 - Características do cimento Portland CP II-E-32.

CP II-E-32		Especificações ABNT
<b>ENSAIOS FÍSICOS</b>		
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	≥2600	NBR NM 76
Tempo de início de pega (h:min)	≥1	NBR NM 65
Tempo de fim de pega (h:min)	≤10	NBR NM 65
Finura na peneira # 200 (%)	≤12,0	NBR 11579
Finura na peneira # 325 (%)	-	NBR 9202
Expansibilidade a quente (mm)	≤5,0	NBR 11582
Consistência normal (%)	-	NBR NM 43
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	-	NBR 7215
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	≥10,0	NBR 7215
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	≥20,0	NBR 7215
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	≥32,0	NBR 7215
<b>ENSAIOS QUÍMICOS</b>		
Perda ao fogo (%)	≤6,5	NBR 5743
Resíduo insolúvel (%)	≤2,5	NBR 5744
Trióxido de enxofre - SO <sub>3</sub> (%)	≤4,0	NBR 5745
Óxido de cálcio livre - CaO Livre (%)	-	NBR 7227
Óxido de magnésio - MgO (%)	≤6,5	NBR 9203
Óxido de alumínio - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	-	NBR 9203
Óxido de silício - SiO <sub>2</sub> (%)	-	NBR 9203
Óxido de ferro - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	-	NBR 9203
Óxido de cálcio - CaO (%)	-	NBR 9203
Equivalente alcalino (%)	-	-

Fonte: Cimento. Org

### **3.1.4 Água**

A água utilizada para produção da argamassa foi fornecida pela concessionária da rede de abastecimento de água potável local (COPASA).

## **3.2 Métodos**

### **3.2.1 Produção das Fibras**

Para a confecção das fibras curtas foram utilizadas placas de circuito impresso retiradas de sucatas coletadas nas oficinas de manutenção de equipamentos eletroeletrônicos no município de Araxá (MG). Foram selecionadas placas de plástico reforçado com fibra de vidro do tipo dupla face e simples face de laminado tipo FR-4 e de maior área útil ou seja, sem defeitos superficiais, para serem utilizadas como matéria prima na produção das fibras curtas.

Após a remoção manual dos componentes eletrônicos das placas de circuito impresso, estas foram colocadas em solução de hidróxido de sódio para remoção de resíduos como óleo, graxa, etc. Em seguida foram imersas em solução de cloreto de ferro (III), de tal forma que ocorresse ataque químico nas trilhas de cobre e pontos de solda para a remoção dos mesmos. Dando sequência ao processo, as placas foram lavadas e cortadas com guilhotina mecânica para a obtenção das fibras. As fibras foram produzidas com seção transversal retangular em dimensões distintas, aproximadamente 1,5mm X 2,5mm de aresta da seção por 60mm e 120mm de comprimento, com desvio padrão de dimensões igual a 0,0147. As figuras 3.3 e 3.4 mostram a sequência dos procedimentos citados.

Na Figura 3.3 é mostrada a imagem das placas de circuito impresso, selecionadas como fonte de matéria prima utilizada para a produção das fibras. São placas mãe de Pc's, mini centrais telefônicas e fontes de alimentação.



Figura 3.3 - Placas de circuito impresso (sucatas de equipamentos eletrônicos).

Na Figura 3.4 é mostrada a imagem obtida durante o processo de remoção manual dos componentes eletrônicos das placas de circuito impresso com auxílio de alicate e estação de solda do tipo ar quente.

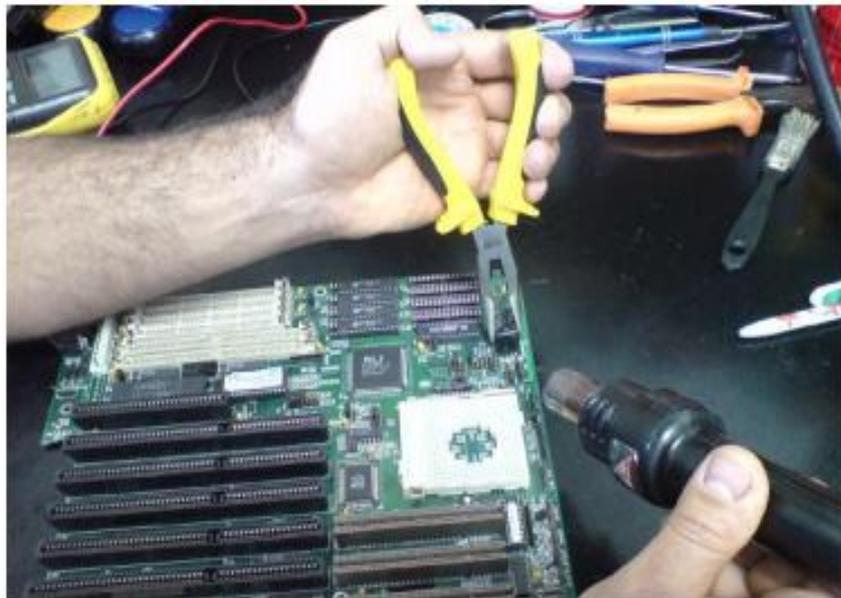


Figura 3.4 - Remoção dos componentes eletrônicos.

Na Figura 3.5 é apresentada na imagem o banho de solução de hidróxido de sódio para remoção de resíduos e o banho de cloreto de ferro (III) para remoção dos metais.

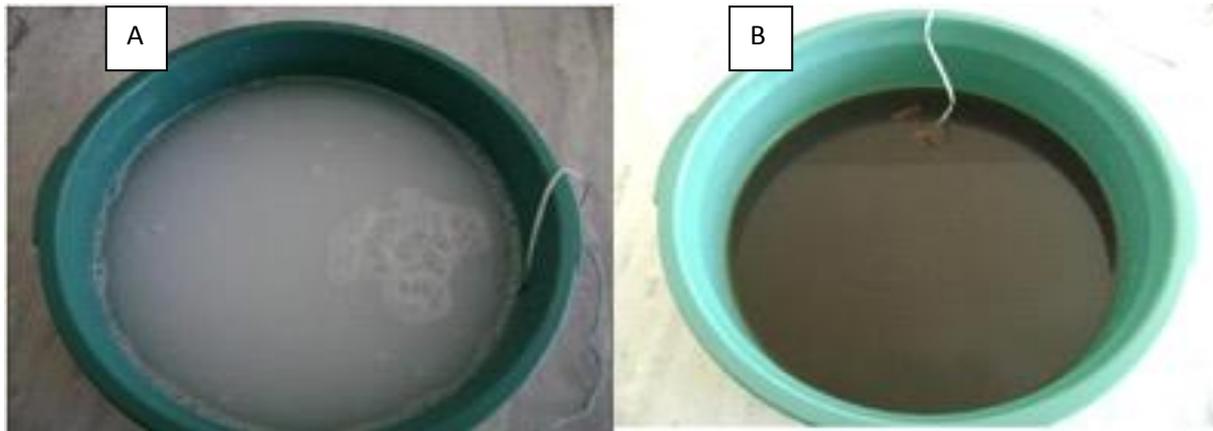


Figura 3.5 - Banho com solução de hidróxido de sódio (A) e cloreto de ferro (III) (B).

As placas ficaram imersas na solução de hidróxido de sódio por 5 minutos e por 1 hora na solução de cloreto de ferro (III). Na Figura 3.6 é mostrada a imagem de partes cortadas das placas após o tratamento realizado para a remoção dos materiais metálicos que formavam as trilhas e ilhas condutoras.



Figura 3.6 - Placas após remoção das trilhas.

Na Figura 3.7 é mostrada a imagem das fibras obtidas após o corte das placas de circuito impresso, realizado através de uma guilhotina mecânica.



Figura 3.7 - Fibras obtidas após o corte das placas de circuito impresso.

A Figura 3.8 mostra a imagem do equipamento utilizado para o corte das placas de circuito impresso para obtenção das fibras.



Figura 3.8 - Guilhotina Mecânica Industrial.

### **3.2.2 Produção de Pó de Fibras**

Para a produção de amostras de material, utilizado nas análises químicas por difração de raio X (DRX) e espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), as fibras foram reduzidas a pó por abrasão através de uma lima. Após o término do processo de abrasão o pó obtido foi submetido a um campo magnético utilizando um ímã para remoção de possíveis fragmentos metálicos deixados pela lima durante o processo. Na Figura 3.9 é mostrada a imagem do pó de fibras, obtida após o processo de abrasão das mesmas.



Figura 3.9 - Pó de fibras.

### **3.2.3 Confeção de Corpos de Prova**

Na produção do compósito cimentício, foram utilizadas 624g de cimento Portland CP II-E-32,1872g de areia lavada de rio quartzosa peneirada e 300g de água da concessionária pública para cada batelada de argamassa.

A argamassa foi preparada por meio de um misturador mecânico e compactada manualmente nos moldes. A moldagem dos corpos-de-prova foi feita imediatamente após o amassamento e com a maior rapidez possível. Para tanto, foi necessário que a cuba de amassamento estivesse junto aos moldes durante o adensamento. A colocação do compósito cimentício nas formas

foi feita com o auxílio da espátula, em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 golpes uniformes, homoganeamente distribuídos, com o soquete manual. Esta operação foi terminada com a raspagem do topo dos corpos-de-prova, por meio da espátula que foi deslizada sobre as bordas, dando-lhe também um ligeiro movimento de vaivém na sua direção e uniformidade na face. Quantidade de materiais, processamento da argamassa e confecção de corpos de prova foram feitos de acordo com a norma NBR 5738 (ABNT, 2003).

O compósito cimentício foi produzido com e sem fibras, sem a utilização de agregados graúdos, com o objetivo de uma análise da interação das fibras de comprimentos distintos com a argamassa. A dimensão máxima dos moldes utilizados impossibilitou o uso de agregados graúdos, pois o tamanho destes ultrapassam as dimensões dos moldes utilizados.

Foram moldados trinta corpos-de-prova prismáticos de 40x40x160mm de compósito cimentício com e sem fibras, conforme mostrado na Tabela III.3.

Tabela III.3 - Quantidade de corpo de prova prismático.

Formato do corpo de prova	Comprimento da fibra/Quantidade de corpo de prova		
	Sem fibras	60mm	120mm
Prismático inteiro	6	6	6
Prismático particionado	-	6	6
Quantidade total		30	

Os corpos de prova particionados foram divididos simetricamente na transversal por uma película polimérica com espessura de 0,3mm, usualmente utilizada para preparação de material didático (transparência) e três fibras curtas originadas de placas de circuito foram distribuídas paralelas entre si e alinhadas em sentido longitudinal ao prisma. Na Figura 3.10 é possível observar o modelo simplificado onde foi posicionado um conjunto de três fibras curtas de aço equidistantes, paralelas entre si e alinhadas em sentido longitudinal ao prisma.

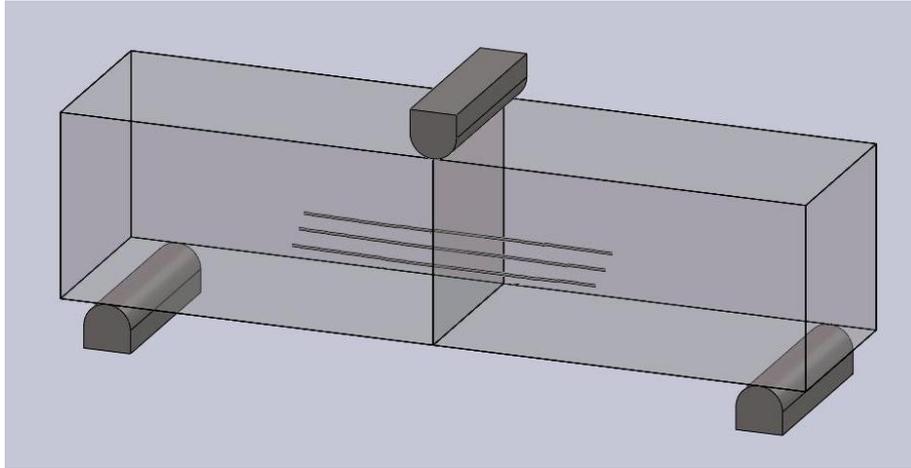


Figura 3.10 - Desenho do corpo-de-prova e apoios.

Nos corpos de prova inteiros as três fibras curtas originadas de placas de circuito, também foram posicionadas paralelas entre si e alinhadas em sentido longitudinal ao prisma.

Também foram moldados trinta corpos-de-prova cilíndricos de 50mm de diâmetro e 100mm de altura, sendo seis para ensaios de compressão e vinte e quatro para ensaios de pullout. Nos corpos de prova, confeccionados para o ensaio pullout, foram introduzidas fibras de comprimentos distintos, conforme apresentado na Tabela III.4. Estas fibras foram posicionadas no centro de cada corpo de prova, ficando parte desta exposta possibilitando assim a fixação do equipamento de ensaios.

Tabela III.4 - Quantidade de corpo de prova cilíndrico.

Comprimento da fibra/Quantidade de corpo de prova									Quantidade total
Sem fibra	10mm	15mm	20mm	25mm	30mm	35mm	40mm	45mm	
6	3	3	3	3	3	3	3	3	30

A argamassa, mistura de cimento, areia e água, foi feita em argamassadeira com cuba em aço inox com capacidade de 5 litros e batedor tipo raquete com motor de 2 velocidades que atende as NBR NM52 e NBR 7215. Os corpos de prova foram desenhados após 24 horas e imersos em água durante 28 dias para cura e posterior realização dos ensaios.

Na Figura 3.11 é mostrada imagem da argamassadeira com cuba em aço inox com capacidade de 5 litros e batedor tipo raquete com motor de 2 velocidades utilizada para misturar a argamassa.



Figura 3.11 - Argamassadeira utilizada na produção de corpos de prova.

Na Figura 3.12 é mostrada a imagem do molde utilizado na confecção dos corpos de prova prismático, o posicionamento das três fibras e a película polimérica no interior do mesmo, imagem esta obtida durante a confecção de corpos prismáticos particionados.



Figura 3.12 - Molde para corpos de prova prismático.

Na Figura 3.13 são mostrados os corpos de provas prismáticos após a cura, antes do rompimento dos mesmos.



Figura 3.13 - Corpos de prova prismático.

Na Figura 3.14 são mostrados os corpos de prova cilíndricos enformados (A) e os corpos de prova cilíndricos curados (B), que foram utilizados no ensaio de compressão axial.

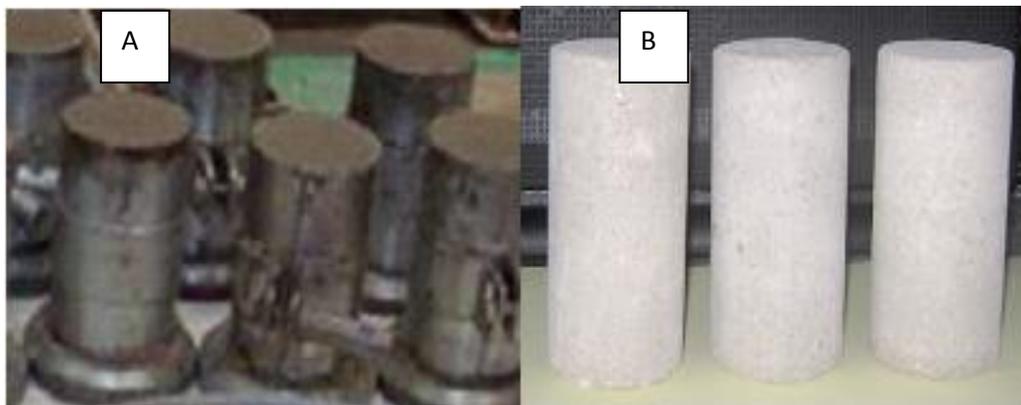


Figura 3.14 - Corpos de prova e moldes cilíndricos

Para determinar o comprimento crítico da fibra usada nesta pesquisa foram moldados corpos de prova com parte de fibras embutidas nos mesmos. Na Figura 3.15 é possível verificar na imagem, corpos de prova cilíndricos com fibra exposta na parte superior.



Figura 3.15 - Corpos de prova cilíndricos com fibra embutida.

Visando maior precisão de resultados os corpos de prova foram cortados através de uma serra mármore de forma a garantir o comprimento da fibra embutida conforme citado na Tabela III.4. Na Figura 3.16 é possível verificar na imagem, corpos de prova cilíndricos cortados e fibra exposta na parte superior.



Figura 3.16 - Corpos de prova cilíndricos cortados com fibra embutida.

### **3.2.4 Análise térmica**

Os materiais fibras, argamassa curada e o compósito foram caracterizados por calorimetria diferencial de varredura (DSC) e termogravimetria (TGA), utilizando equipamentos da TA Instruments, modelos DSC2960 e SDT2010 respectivamente, a 20°C/min, estes ensaios foram realizados no laboratório de análises térmicas DEQUI/ICEB/UFOP.

As análises térmicas das fibras foram realizadas em atmosfera de Ar sintético e atmosfera de N<sub>2</sub> na faixa de temperatura de 25°C a 800°C e as análises da argamassa curada e o compósito foram realizadas em atmosfera de N<sub>2</sub> na faixa de temperatura de 25°C a 700°C.

### **3.2.5 Análise química da fibra**

Visando identificar a composição das fibras as amostras foram caracterizadas por Difração de raios X (DRX), para detectar a presença de estruturas cristalinas das fibras utilizando um difratômetro de raios X, marca Rigaku, modelo e sistema D\MAX ULTIMA automático, com goniômetro  $\theta$ - $\theta$ , varredura  $2\theta/\theta$  e tubo de raios-X com anodo de cobre e foco normal e por Espectroscopia na região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) para comprovar a composição das fibras. Para a análise por FTIR confeccionada pastilha de KBr (1 parte do material de análise misturada com 10 partes de KBr). Após a mistura, esta foi prensada numa prensa manual com carga de 5 Ton. O modo de aquisição: conforme manual do equipamento utilizado ABB Bomem, faixa do espectro: 400 a 4000 cm<sup>-1</sup>, resolução: 4cm<sup>-1</sup>, número de varreduras: 32. Estes ensaios foram realizados nos laboratórios da área de nanotecnologia do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN). Já os ensaios EDS foram realizadas via MEV através de um equipamento marca FEI, modelo Quanta 450, equipado com sonda EDS e EBDS. Este ensaio foi realizado no laboratório de tecnologia da empresa CBMM.

### **3.2.6 Absorção de água**

O ensaio de absorção de água foi realizado em corpos de prova prismático sem fibras (argamassa) e com fibras (compósito) e em fibras. Para realização deste ensaio, os corpos de prova primeiramente passaram por um processo de secagem por 72 horas em uma estufa a

uma temperatura de 60°C. Após este tempo foram pesados em uma balança de precisão e imersos em água e pesados novamente após 24 horas, 48 horas e 72 horas.

### 3.2.7 Ensaio mecânico

O ensaio de compressão axial foi realizado em máquina universal de ensaios mecânicos eletromecânica micro processada de duplo fuso com duas colunas guias cilíndricas paralelas, Emic DL30000N, com velocidade de aplicação de carga de 0,5MPa/s. Os corpos-de-prova tiveram suas bases regularizadas com capeador de neoprene com base metálica. Foram ensaiados a compressão de 6 corpos-de-prova de argamassa sem fibras. NBR 5739 (ABNT, 2007). Na Figura 3.17 é possível ver a imagem do equipamento que realizou o rompimento dos corpos de prova.



Figura 3.17 - Equipamento de ensaios de compressão.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina universal de ensaios INSTRON modelo 5582 com sistema de controle e aquisição de dados de deslocamento. O equipamento foi calibrado com velocidade de deslocamento do cabeçote de 1mm/min e fim de teste quando carga cair abaixo de 20% . NBR 12142 (ABNT, 2010).

Na Figura 3.18 é mostrada a imagem do equipamento universal de ensaios obtida durante a realização do ensaio de tração na flexão.



Figura 3.18 - Equipamento de ensaio universal durante o experimento

Para a realização do ensaio pullout foi necessário desenvolver um suporte que se adaptasse ao equipamento de ensaio universal, possibilitando assim a sua realização. Na Figura 3.19 é possível observar o desenho técnico das peças do suporte desenvolvido com as respectivas dimensões em (mm).

O corpo de prova foi inserido no interior do suporte e a ponta externa da fibra ficou exposta possibilitando a fixação da mesma no equipamento universal de ensaios. Na Figura 3.20 (A) é mostrado o desenho técnico do suporte e em (B) a imagem do suporte fixado no equipamento, obtida durante o ensaio pullout.

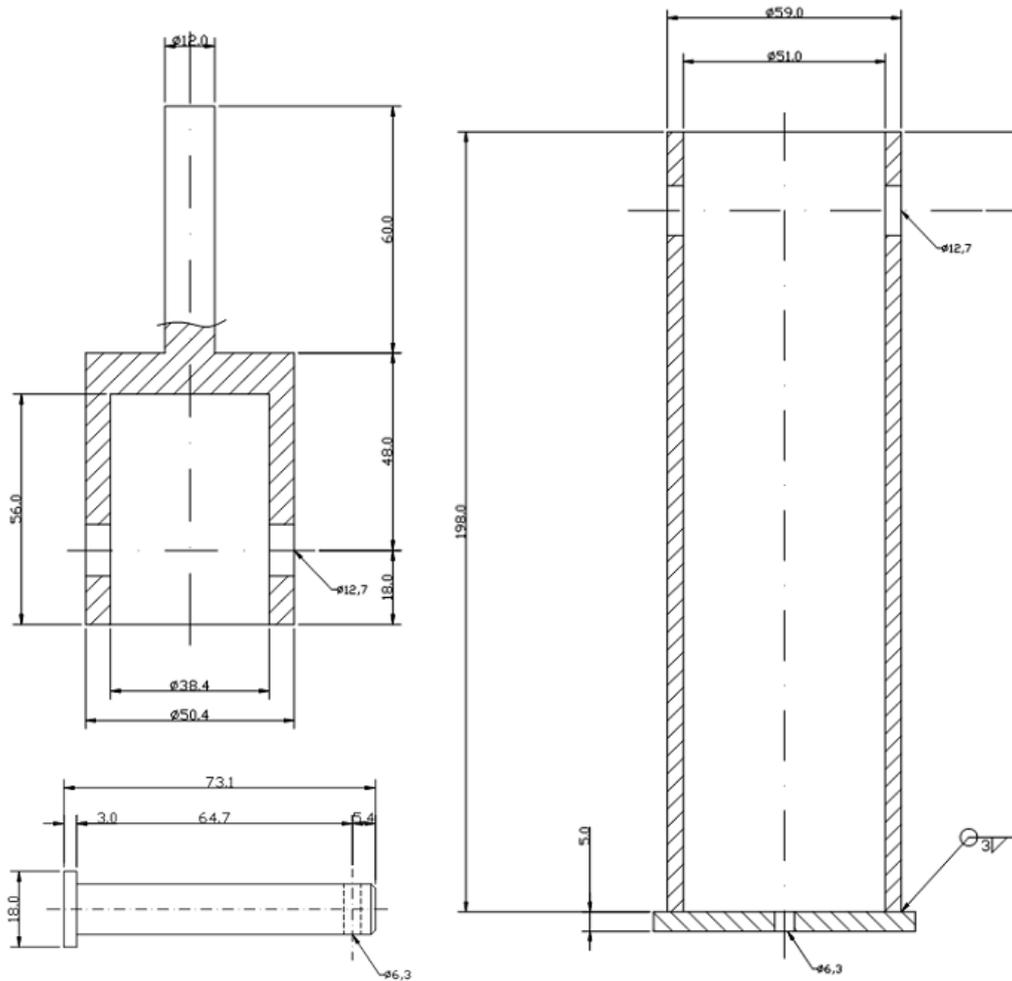


Figura 3.19 - Desenho técnico das peças do suporte.

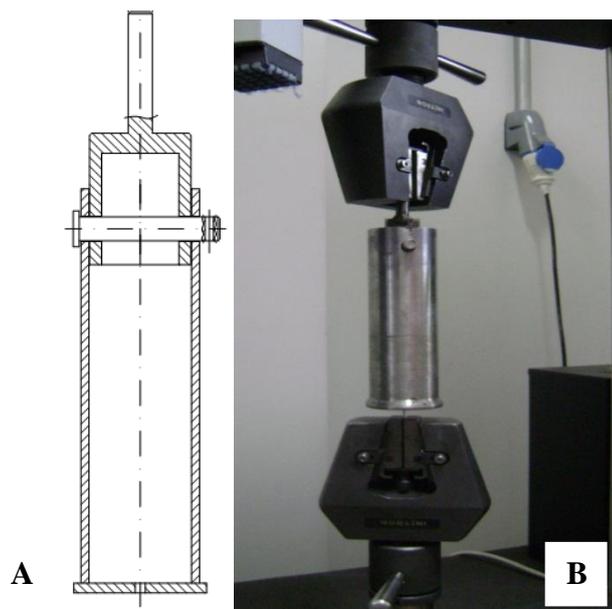


Figura 3.20 - Desenho técnico do suporte (A), equipamento de ensaio universal durante o experimento (B).

### **3.2.8 Análise ótica**

As análises macroscópicas das fibras e do compósito cimentício foram realizadas por análise visual de imagens obtidas através de um estereoscópio binocular com câmera acoplada marca Laborana, instalado no laboratório de mineração do CEFET-MG Campus Araxá. Já as análises microscópicas da interface fibra matriz foram realizadas a partir de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) marca FEI, modelo Quanta 450, equipado com sonda EDS e EBDS. Este ensaio foi realizado no laboratório de tecnologia da empresa CBMM.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Análise térmica

Na Figura 4.1 são apresentadas as curvas de DSC da amostra de fibras curtas de placas de circuito impresso, em atmosfera de Ar sintético e atmosfera de N<sub>2</sub>, e na Figura 4.2 são apresentadas as curvas de TGA da amostra de fibra curta de placas de circuito impresso em atmosfera de Ar sintético e atmosfera de N<sub>2</sub>.

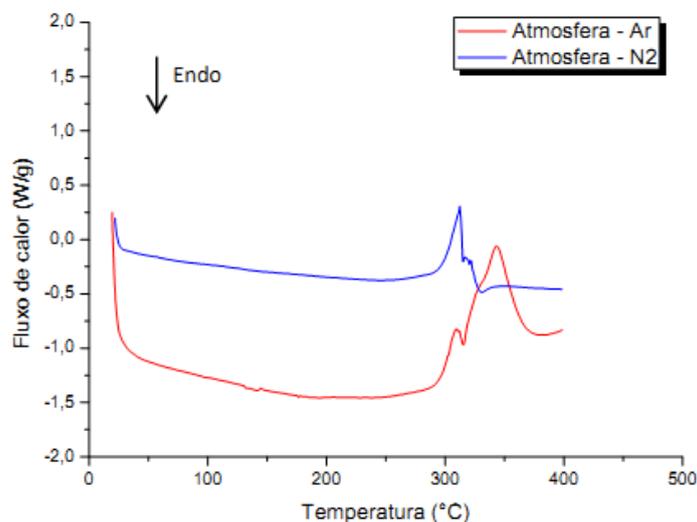


Figura 4.1 - Curvas de DSC da amostra de fibra curta de placas de circuito impresso.

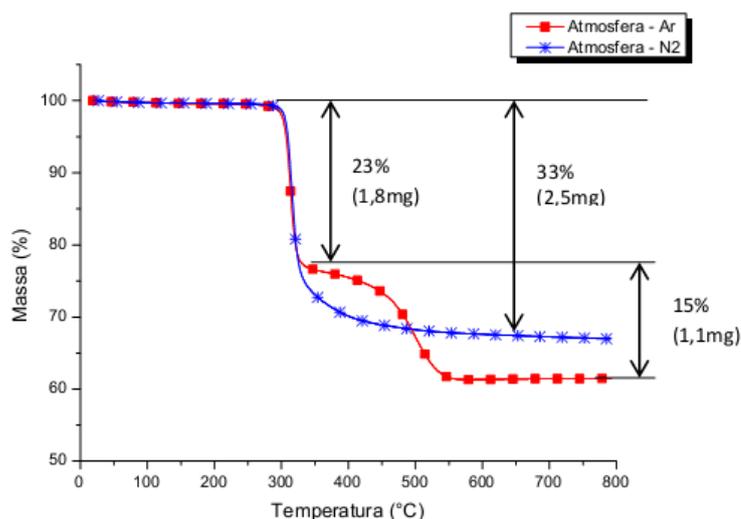


Figura 4.2 - Curvas de TGA da amostra de fibra curta de placas de circuito impresso.

Podemos notar que as curvas de DSC mostram picos exotérmicos que podem estar relacionados aos processos de cristalização da amostra que são acompanhados de liberação de

calor. Foi observado que a atmosfera oxidante deslocou as transições térmicas para temperaturas mais altas, coincidindo com o processo de degradação da amostra, confirmado nas curvas de TGA. Foi verificado também que a temperatura inicial de degradação se manteve inalterada, não sofrendo influência da atmosfera utilizada durante a análise, indicando estabilidade da resistência térmica da fibra.

Na Figura 4.3 são apresentadas as curvas de DSC das amostras de argamassa e de compósito, resultantes do ensaio realizado em atmosfera de N<sub>2</sub>.

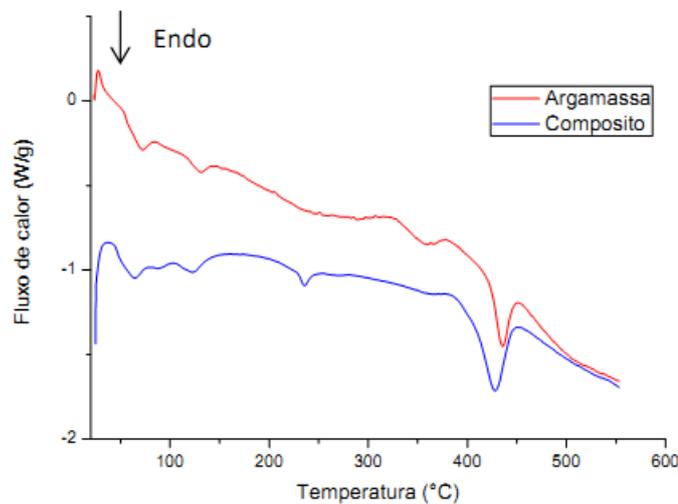


Figura 4.3 - Curvas de DSC das amostras argamassa e compósito.

Podemos notar que as curvas de DSC mostram picos endotérmicos a partir de temperaturas relativamente baixas, próximas a 70°C até temperaturas próximas a 350°C que podem estar relacionados aos processos de perdas de água superficial, capilar e adsorvida e que normalmente ocorre neste tipo de material, nesta faixa de temperatura analisada. Na curva do compósito observa-se também um pico endotérmico, próximo a temperatura de 250°C que pode estar relacionado à decomposição do reforço (fibras). Já os picos endotérmicos observados em ambas as curvas, próximos a temperatura 430°C, podem estar relacionado ao processo de desidroxilação do silicato hidratado de cálcio (C-S-H) que também é um fenômeno que ocorre nos materiais que contém cimento Portland, caso desta amostra, nesta temperatura. Isto leva a crer que os fenômenos ocorridos na faixa de temperatura analisada são referentes à perda de água do material em estudo.

Na Figura 4.4 são apresentadas as curvas de TGA das amostras de compósito em azul e argamassa em vermelho, resultantes do ensaio realizado em atmosfera de N<sub>2</sub>.

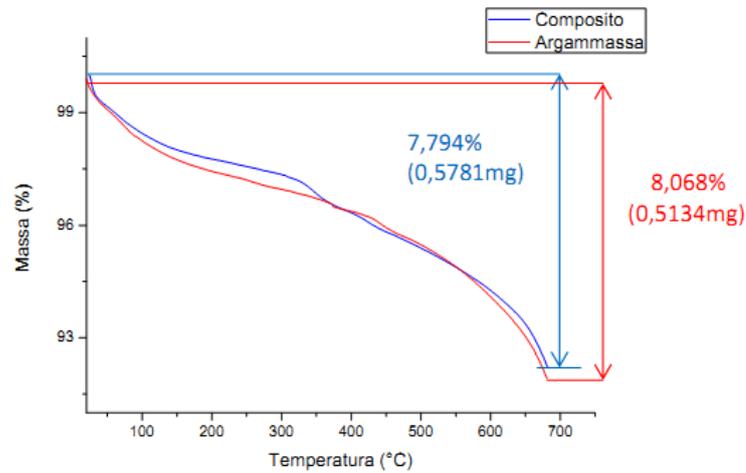


Figura 4.4 - Curvas de TGA das amostras de argamassa e compósito cimentício.

Podemos notar uma similaridade das curvas e também da perda de massa em ambas as amostras, confirmando assim o que foi verificado nos resultados da análise DSC, e que provavelmente a massa perdida foi de água.

## 4.2 Difração de Raios X

O resultado da análise de DRX, realizado em amostra de pó de fibras de placas de circuito impresso de laminado FR-4 é mostrado na Figura 4.5, verifica-se na imagem a ausência de picos e formato característico, indicando se tratar de material amorfo, sendo assim não há presença de estruturas organizadas e formação de cristais.

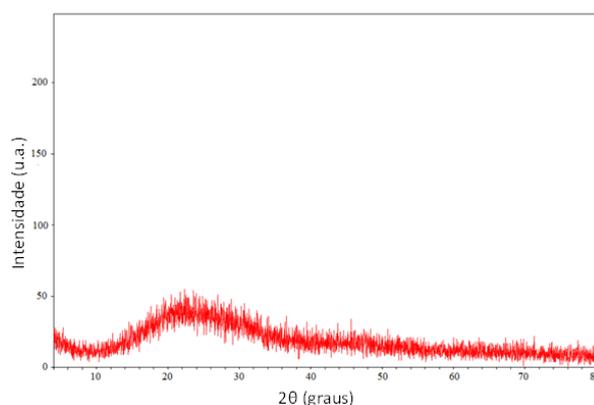


Figura 4.5 - Difratograma de XRD da fibra de placa de circuito impresso.

### 4.3 Análise de FTIR

Na Figura 4.6 é mostrado o espectro de FTIR e também é indicado no mesmo os grupos funcionais, correspondentes a cada banda detectada.

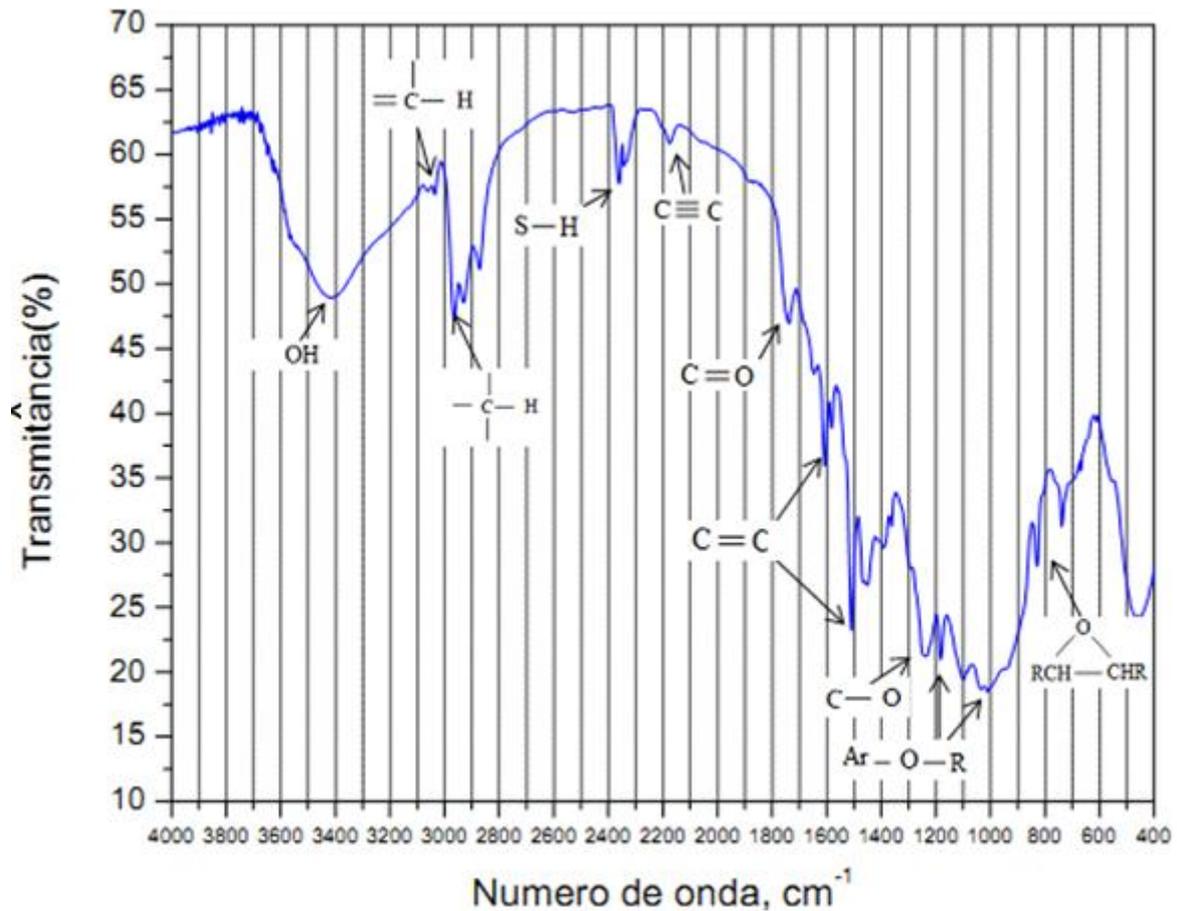


Figura 4.6 - Curva FTIR da amostra do pó de fibras.

Foram detectadas as bandas em 2190 a 2260cm<sup>-1</sup>, referentes a ligações C≡C e a banda 2350cm<sup>-1</sup>, referente ao estiramento S – H, provavelmente provenientes de aditivos.

Na Tabela IV.1 é possível verificar as bandas presentes na resina epóxi DGEBA e descritas na literatura (LAU *et al.*, 2005 apud HERTER, 2010) e que também foram detectadas no material das fibras em estudo.

Tabela IV.1 - Bandas de absorção características da resina epóxi DGEBA.

Banda (cm <sup>-1</sup> )	Atribuição
3481	Estiramento da ligação O-H
3055,2965,2931,2872	Estiramento da ligação C-H de alifáticos
1725	Estiramento da ligação C=O
1608, 1582 e 1510	Estiramento da ligação C=C de anéis aromáticos
1461	Deformação angular assimétrica do grupo CH <sub>3</sub>
1360	Deformação simétrica do grupo CH <sub>3</sub>
1290	Estiramento em fase das ligações C-C, C-O e C-O de anéis epoxídicos
1246 e 1182	Deformação assimétrica da ligação Ar-O-R
1035	Deformação simétrica da ligação Ar-O-R
915	Ligações C-C contraem enquanto ambas as ligações C-O estiram, em anéis epoxídicos.
858	Ligações C-C não mudam o comprimento enquanto uma ligação C-O estira e a outra contrai, em anéis epoxídicos.
829	Deformação de anéis aromáticos fora do plano
768 e 748	Estiramento de anéis aromáticos monosubstituídos

Fonte: LAU *et al.*, 2005 apud HERTER, 2010.

Comparando as bandas de absorção no infravermelho da resina epóxi (DGEBA) com as bandas de absorção do pó de fibra, detectadas através do ensaio FTIR, podemos afirmar que parte da composição do material das fibras obtidas de placa de circuito impresso de laminado FR-4, utilizadas neste trabalho é a resina epóxi (DGEBA).

#### 4.4 Análise EDS

A Microscopia eletrônica de varredura foi realizada juntamente com o Espectrômetro de raios X dispersivo em energia (EDS) para determinação da composição química semi-quantitativa. Na análise da argamassa utilizada no compósito cimentício foi detectada a presença de Na, Mg, Al, Si, S, K, Ca e Fe, conforme apresentado na Tabela IV.2. Vale ressaltar que a metodologia não quantifica carbono e oxigênio.

Tabela IV. 2 - Resultados semiquantitativos obtidos via MEV para a amostra de argamassa do compósito cimentício.

Elemento / Teor	
%	
Na	0.51
Mg	0.56
Al	7.17
Si	57.23
S	0.76
K	4.96
Ca	25.57
Fe	3.23

A maioria dos elementos químicos encontrados é constituinte do cimento, ou estava presente no agregado miúdo utilizado. Na Figura 4.7 pode ser visto a espectrometria de raios-X dispersivo em energia (EDS) da amostra de argamassa.

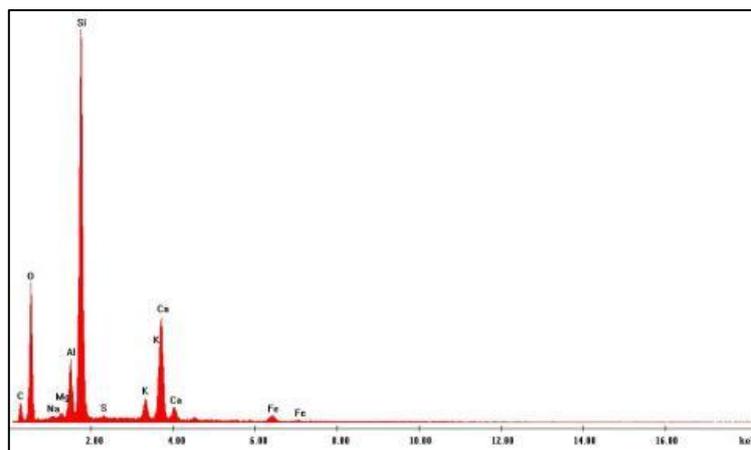


Figura 4.7 - Espectro representando a amostra do compósito cimentício. Análise de área-argamassa.

Na EDS via microscopia eletrônica por varredura das fibras de placas de circuito impresso foi detectada a presença de Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti e Br, conforme apresentado na Tabela IV.3.

Tabela IV.3 - Resultados semiquantitativos obtidos via MEV para a amostra de fibra de placa de circuito impresso.

Elemento / Teor %	
Na	0.56
Mg	0.53
Al	17.60
Si	42.44
Ca	21.20
Ti	0.69
Br	16.98

A maioria dos elementos químicos encontrados é constituinte das fibras de vidro das placas de circuito impresso de laminado FR-4. Na Figura 4.8 pode ser visto a espectrometria de raios-X dispersivo em energia (EDS) da amostra de fibras de placas de circuito impresso.

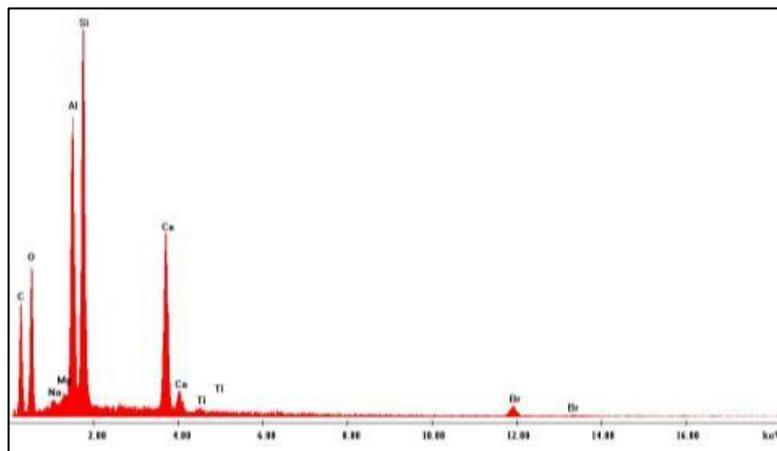


Figura 4.8 - Espectro representando a amostra de fibras de placa de circuito impresso. Análise de área – Placa de Circuito.

## 4.5 Absorção de água

A Figura 4.9 mostra a imagem das fibras, dos corpos de prova de argamassa e corpos de prova de compósito cimentício, imersos durante o ensaio de absorção de água.

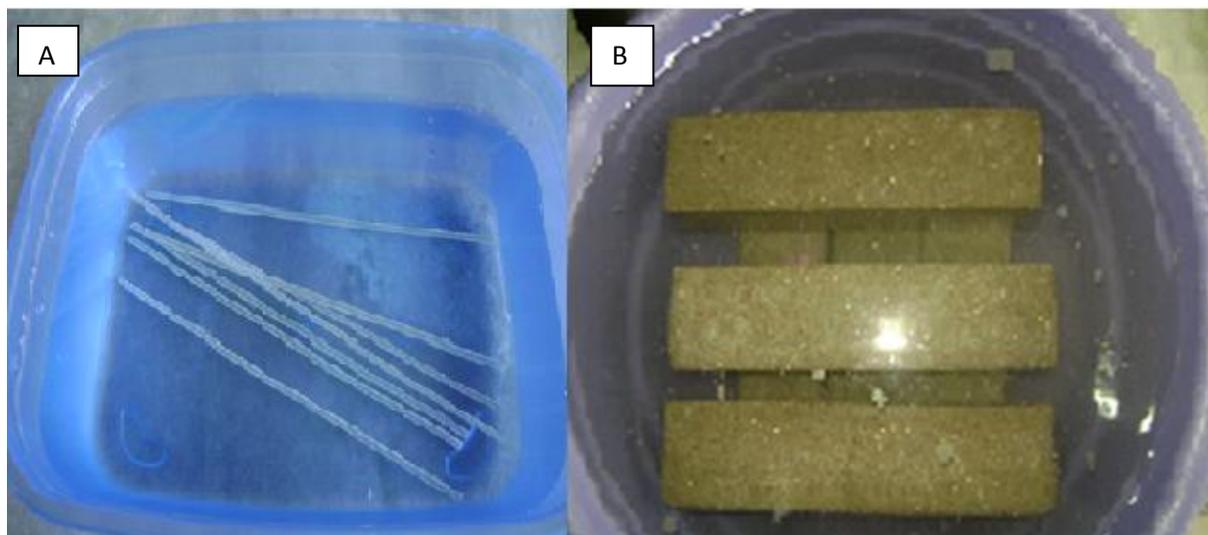


Figura 4.9 - Imagens de fibras (A) e corpos de prova (B) imersos em água.

Nas tabelas a seguir é possível verificar os dados levantados durante o ensaio de absorção de água.

Tabela IV.4 - Dados do ensaio absorção de água dos corpos de prova referência

Referência	Peso do corpo de prova (em gramas)				Absorção(%)		
	seco	24 horas	48 horas	72 horas	24 horas	48 horas	72 horas
Cp1	532,460	558,800	559,040	559,210	4,714	4,755	4,784
Cp2	532,400	558,130	558,080	558,340	4,610	4,601	4,646
Cp3	529,990	555,170	555,250	555,320	4,536	4,549	4,561
Media	531,617	557,367	557,457	557,623	4,620	4,635	4,664

Tabela IV.5 - Dados do ensaio absorção de água das fibras

Fibras	Peso do corpo de prova (em gramas)				Absorção(%)		
	seco	24 horas	48 horas	72 horas	24 horas	48 horas	72 horas
Fb1	0,9259	0,9297	0,9368	0,9366	0,4087	0,9366	1,1556
Fb2	0,9173	0,9220	0,9295	0,9294	0,5098	0,9294	1,3191
Fb3	0,9283	0,9294	0,9337	0,9338	0,1184	0,9338	0,5925
Media	0,9238	0,9270	0,9333	0,9333	0,3456	0,9333	1,0224

Tabela IV.6 - Dados do ensaio absorção de água dos corpos de prova de compósito cimentício.

Compósito	Peso do corpo de prova (em gramas)				Absorção(%)		
	seco	24 horas	48 horas	72 horas	24 horas	48 horas	72 horas
1	529,120	555,420	556,140	556,210	4,735	4,858	4,870
2	528,950	554,750	555,080	555,210	4,651	4,707	4,730
3	527,360	553,960	554,950	555,060	4,802	4,972	4,990
Media	528,477	554,710	555,390	555,493	4,729	4,846	4,864

Vários fatores podem influenciar na absorção de água de uma matriz cimentícia, dentre eles a composição e granulometria dos agregados, o tipo de cimento, o adensamento dos materiais e outros. Quando existe a necessidade de maior impermeabilidade, aditivos podem ser adicionados na composição de forma a agregar ao compósito cimentício esta propriedade. Entretanto, os resultados obtidos neste ensaio apresentam valores de absorção de água abaixo de 5%. No caso da absorção de água, verificada nos corpos de prova referência e compósito cimentício, esta ocorreu principalmente devido à porosidade característica do material, que proporcionou maior penetração de água no interior do corpo de prova. Já nas fibras, devido às características do material, provavelmente ocorreu absorção a um nível mais superficial, uma vez que a água pode ter se acumulado no interior das lacunas superficiais das faces das fibras, lacunas estas provocadas pelo processo de corte utilizado na produção das fibras. Pode-se verificar também um ligeiro aumento na absorção de água dos corpos de prova de compósito cimentício, provavelmente devido ao aumento de porosidade dos mesmos na interface

matriz/fibra. Na Figura 4.10 é possível observar a porcentagem média de absorção de água nas fibras, corpos de prova referência e compósito cimentício, verificada após 72 horas.

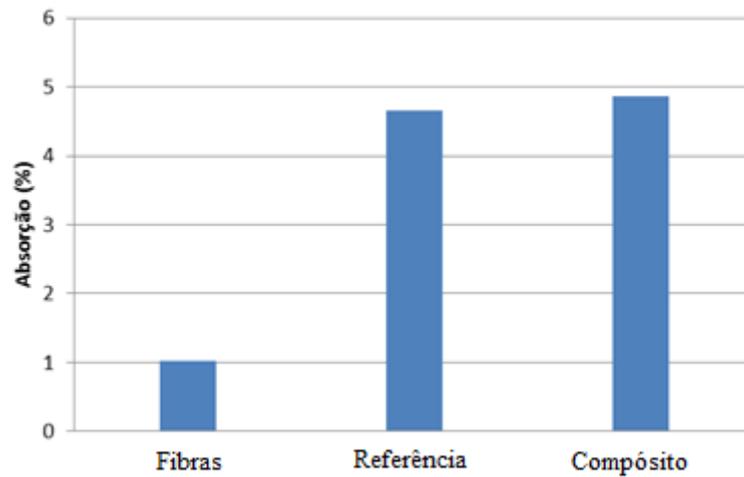


Figura 4.10 - % de absorção de água.

Os valores de absorção de água por imersão foram calculados pela equação 4.1:

$$A = \frac{(m_{sat} - m_s)}{m_s} \times 100 \quad (4.1)$$

Onde:

A: Absorção de água;

msat: Massa da amostra saturada em água;

ms: Massa da amostra seca em estufa.

## 4.6 Compressão axial da argamassa referência

A resistência à tração de compósito cimentício sem reforço é muito pequena quando comparada com a resistência à compressão axial. A literatura cita que projetistas de estruturas de concreto consideram valores da ordem de 10% a 12%, ou seja, a resistência à flexão de compósito cimentício sem reforço é aproximadamente 10 vezes menor do que a da resistência à compressão axial. Na Tabela IV.7, são apresentados os dados obtidos no ensaio compressão axial de corpos de prova referência.

Tabela IV.7 - Resultados do ensaio de compressão axial

<b>Corpo de Prova</b>	<b>Força (kN)</b>	<b>Tensão (MPa)</b>
<b>Cp 1</b>	64,15	32,67
<b>Cp 2</b>	68,86	35,07
<b>Cp 3</b>	68,17	34,72
<b>Cp 4</b>	66,08	33,65
<b>Cp 5</b>	64,09	32,64
<b>Número CPs</b>	5	5
<b>Média</b>	66,27	33,75
<b>Mediana</b>	66,08	33,65
<b>Desv.Padrão</b>	2,214	1,128
<b>Coef.Var.(%)</b>	3,341	3,342
<b>Mínimo</b>	64,09	32,64
<b>Máximo</b>	68,86	35,07

Estes resultados conduzem à determinação do valor médio da resistência a compressão axial de 33,75MPa, mostrando assim coerência com o valor de referência fornecido pelo fabricante de cimento CP II E 32, que é igual ou maior que 32MPa para cura de 28 dias do compósito cimentício, estando este resultado de acordo com as especificações.

O valor da resistência a compressão foi calculado pela equação 4.2 de acordo com a (NBR 5739, 2007):

$$f_c = \frac{4XF}{\pi XD^2} MPa \quad (4.2)$$

Onde:

$f_c$  = Resistência à compressão (MPa);

F = força máxima, (N);

D = diâmetro do corpo-de-prova( mm).

## 4.7 Resistência à tração das fibras

Foram selecionadas três fibras 120mm de comprimento para serem ensaiadas. Na Figura 4.11 são apresentadas as curvas de tensão versus deformação de três corpos-de-prova de fibras. É possível observar que os três corpos-de-prova apresentaram comportamento similares e com aspecto tipicamente frágil.

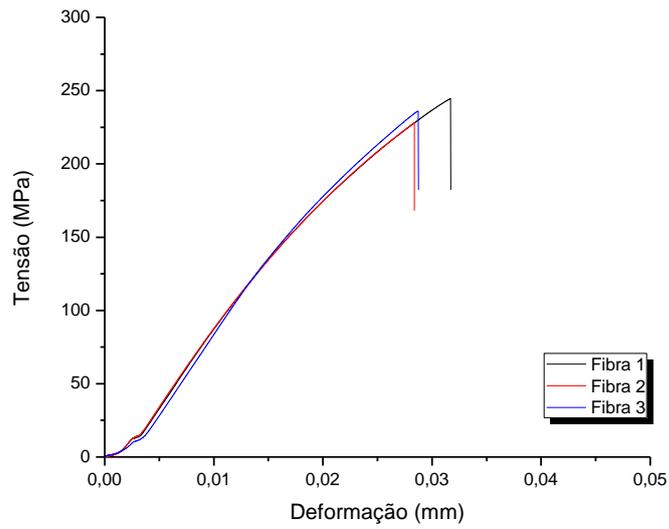


Figura 4.11 - Curvas de carga versus deformação de corpos de prova de fibras.

A carga media suportada pelas fibras, obtida através do ensaio de tração foi 886,175N e resistência à tração igual a 225,089MPa.

## 4.8 Tração na flexão da argamassa referência

Na Figura 4.12 são apresentadas as curvas de carga versus extensão na flexão em cinco corpos-de-prova prismáticos de argamassas sem fibras, utilizados como referencia. É possível observar que os cinco corpos-de-prova apresentaram comportamento similares e com aspecto tipicamente frágil.

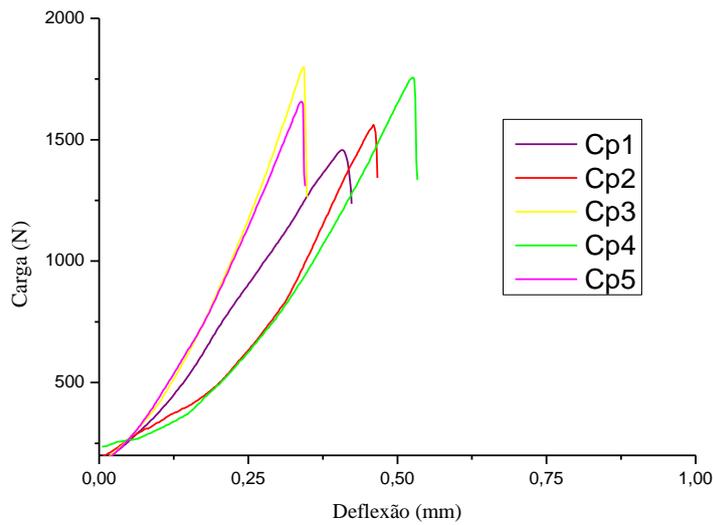


Figura 4.12 - Curvas de carga versus deflexão de corpos de prova de fibras.

Os resultados do ensaio tração na flexão de cinco corpos de prova de argamassa sem fibras são mostrados na Figura 4.13.

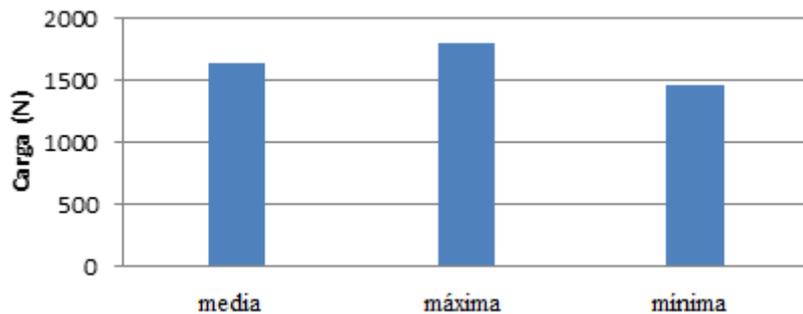


Figura 4.13 - Carga suportada pelo corpo de prova prismático referência.

A carga média suportada pelos corpos de prova durante o ensaio foi igual a 1685,98N e uma resistência média à flexão igual a 5,53MPa foi encontrada. Este valor correspondente a 16,38% da resistência à compressão axial obtida nesta pesquisa, comprovando assim que a resistência de tração na flexão é bem inferior à resistência à compressão axial e também demonstrando a necessidade do uso de reforço em compósitos cimentícios com objetivo do melhoramento de resistência mecânica, dentre elas a resistência à flexão. O cálculo da resistência na flexão foi realizado através da equação 4.3.

$$\sigma = \frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times d^2} \quad (4.3)$$

Onde:

P = carga máxima (N)

L = distancia entre os pontos de apoio do corpo de prova (mm)

b = comprimento do corpo de prova (mm)

d = largura do corpo de prova (mm)

#### **4.9 Tração na flexão do compósito**

Foi observada durante o ensaio de resistência à flexão a ocorrência de deslizamento das fibras no interior dos corpos de prova seccionados, e também nos corpos de prova inteiros. O deslizamento ocorreu nos corpos de prova cujas fibras utilizadas tinham 60 mm de comprimento e após o deslizamento ocorreu rompimento de algumas fibras, enquanto que nos corpos de prova onde foram utilizadas fibras de 120 mm de comprimento tal fato não foi verificado, mostrando assim a influência do comprimento das fibras quanto ao deslizamento das mesmas no interior do compósito.

Na Figura 4.14 são apresentadas as curvas obtidas no ensaio de flexão nos corpos-de-prova com fibras de 60mm. É possível observar a ocorrência de deslizamento das fibras. Após o rompimento dos corpos de prova, estes continuaram a receber carga sem que ocorresse o rompimento das fibras e o fim do teste, uma vez que o equipamento estava calibrado para encerrar o teste quando detectado queda de 20% da carga, sendo assim, neste caso o teste foi interrompido manualmente.

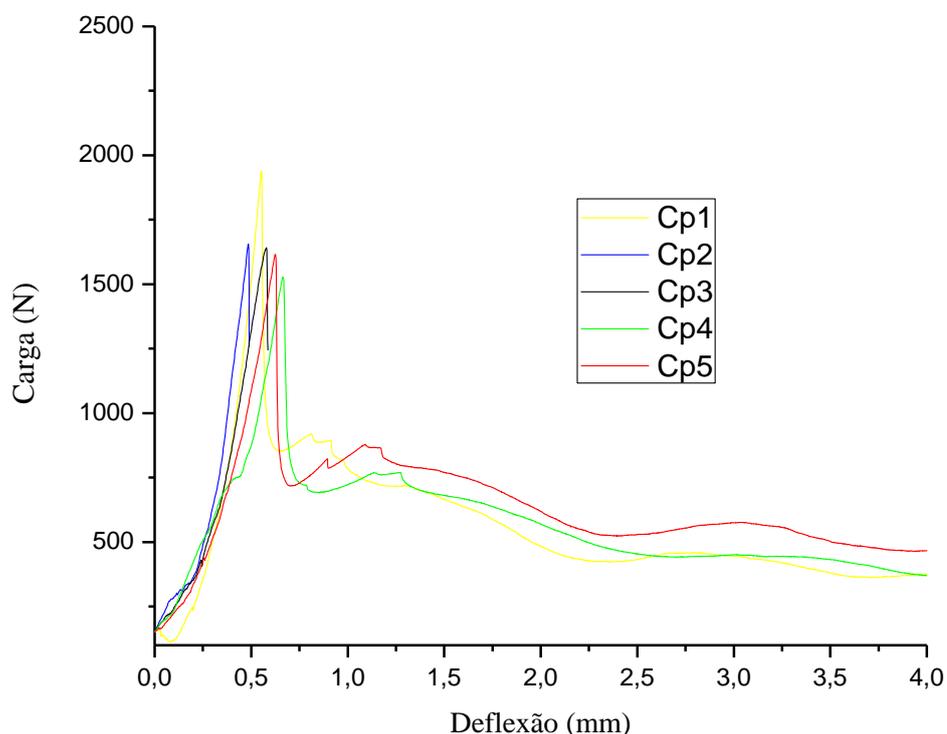


Figura 4.14 - Curvas de carga versus deflexão na flexão de corpos de com fibras de 60mm.

Analisando o gráfico percebe-se que ocorreu rompimento total (argamassa e fibras) em dois corpos de prova. Neste caso não ocorreu deslizamento das fibras e a carga aplicada ultrapassou o limite de carga suportado pelas fibras, levando assim o rompimento das mesmas.

Na Figura 4.15 são apresentadas as curvas obtidas no ensaio de flexão nos corpos-de-prova com fibras de 120mm. Verifica-se que ocorre o rompimento dos corpos de prova e que estes ainda continuam a suportar carga até o rompimento das fibras e não é observado ocorrência de deslizamento das fibras.

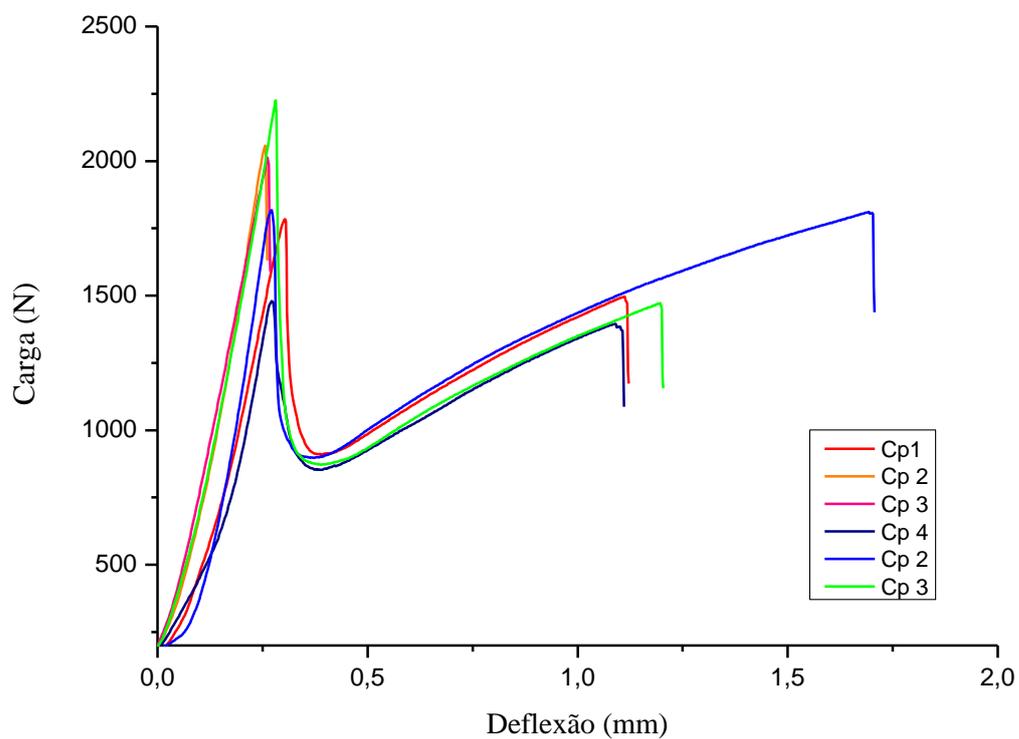


Figura 4.15 - Curvas de carga versus deflexão na flexão de corpos-de-prova com fibras de 120mm

Na Figura 4.16 são apresentadas as curvas obtidas no ensaio de flexão nos corpos-de-prova particionados utilizando as fibras de 60mm, onde observa-se a ocorrência de deslizamento das fibras para uma carga inferior a aplicada nos ensaios já citados.

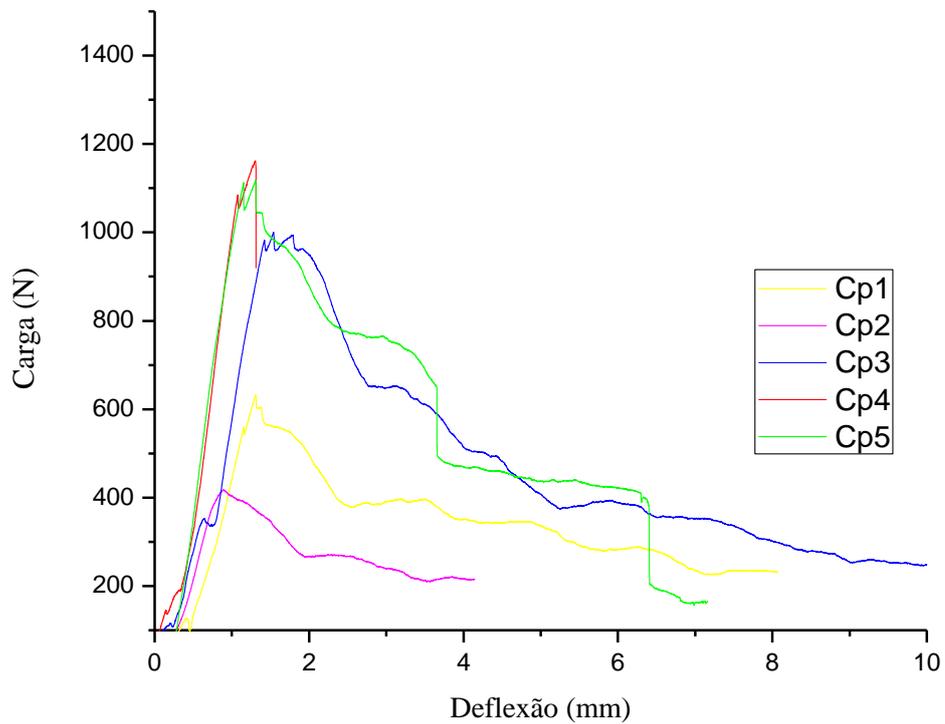


Figura 4.16 - Curvas de carga versus deflexão na flexão dos corpos-de-prova particionados com fibras de 60mm

Na Figura 4.17 são apresentadas as curvas obtidas ensaio de flexão nos corpos-de-prova particionados utilizando as fibras de 120mm, verifica-se o rompimento das fibras sem ocorrência de deslizamento das mesmas.

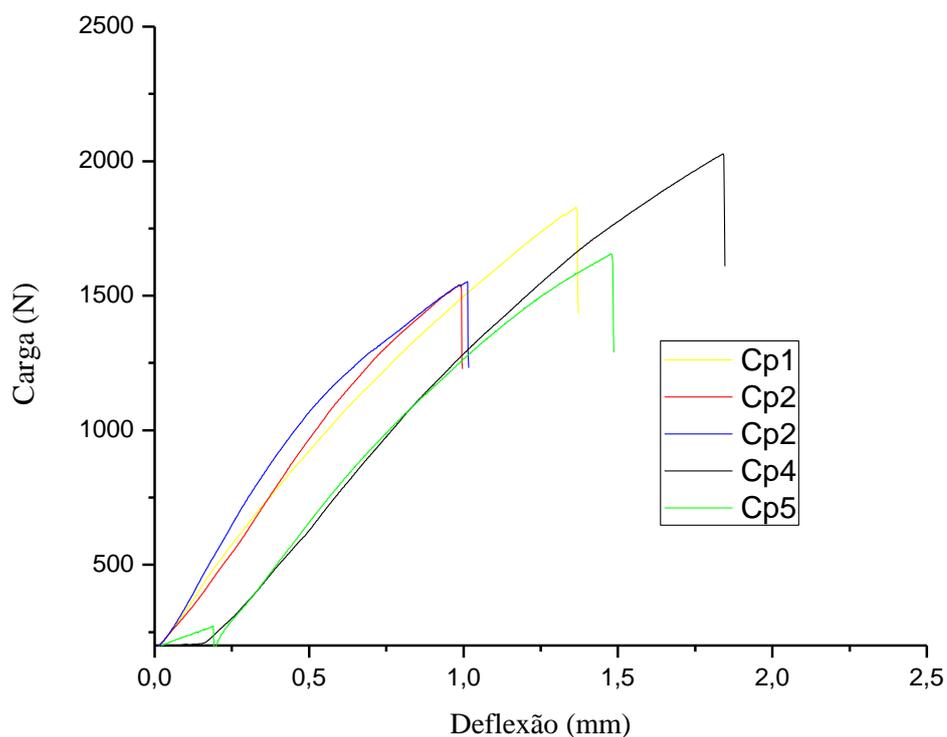


Figura 4.17 - Curvas de carga versus deflexão na flexão dos corpos-de-prova particionados com fibras de 120mm

Na figura 4.18 são apresentadas as médias das cargas máximas dos corpos-de-prova de argamassa no ensaio de resistência à flexão, representadas pelos retângulos azuis, os resultados dos corpos-de-prova que apresentaram os maiores e menores valores de carga são representados por traços que limitam os dados superior e inferiormente, e as medianas são representadas pelos pequenos quadrados preenchidos.

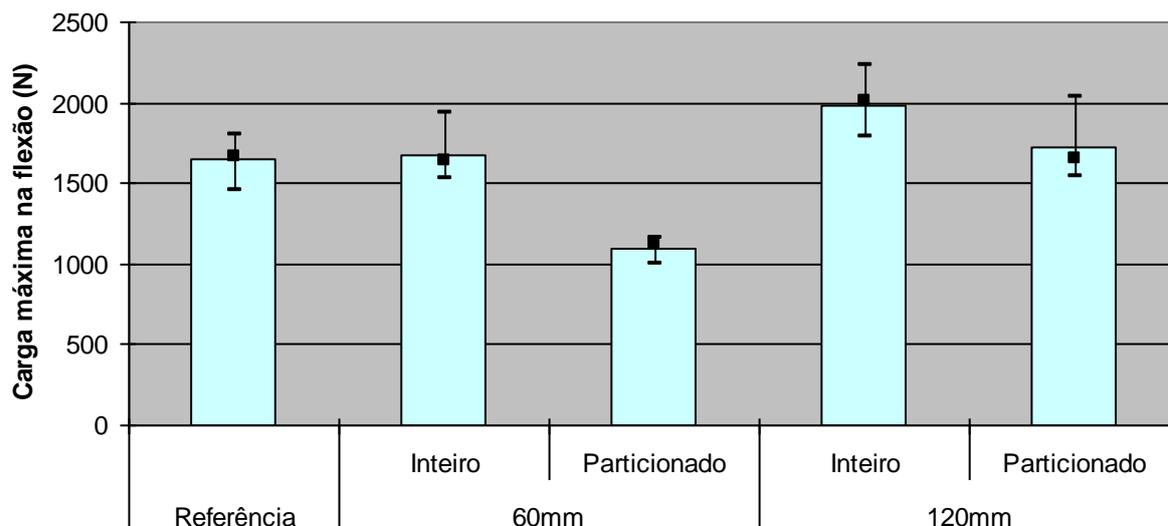


Figura 4.18 - Carga máxima dos corpos-de-prova no ensaio de flexão.

Observa-se que os corpos-de-prova inteiros de argamassa reforçados com fibras de 60mm de comprimento apresentaram capacidade de resistirem à carga na flexão superiores aos corpos de prova de referência. Os corpos-de-prova particionados reforçados com as fibras de 60mm, apesar de particionados, apresentaram capacidade de suportar carga na flexão superior a 60% dos corpos-de-prova de referência. Isto pode indicar que os corpos-de-prova de compósitos cimentícios, argamassas ou concretos, reforçados com as fibras do material em estudo podem vir a apresentar capacidade de resistir a esforços mecânicos mesmo após a propagação de trincas na matriz cimentícia. Quanto aos corpos-de-prova inteiros e particionados com reforço de fibra de 120mm de comprimentos, ambos apresentaram capacidade de suportar carregamento superior aos corpos-de-prova de referência.

Na figura 4.19 são apresentadas as curvas de carregamento por deflexão dos corpos-de-prova que apresentaram comportamento intermediário (mediano) no ensaio de flexão.

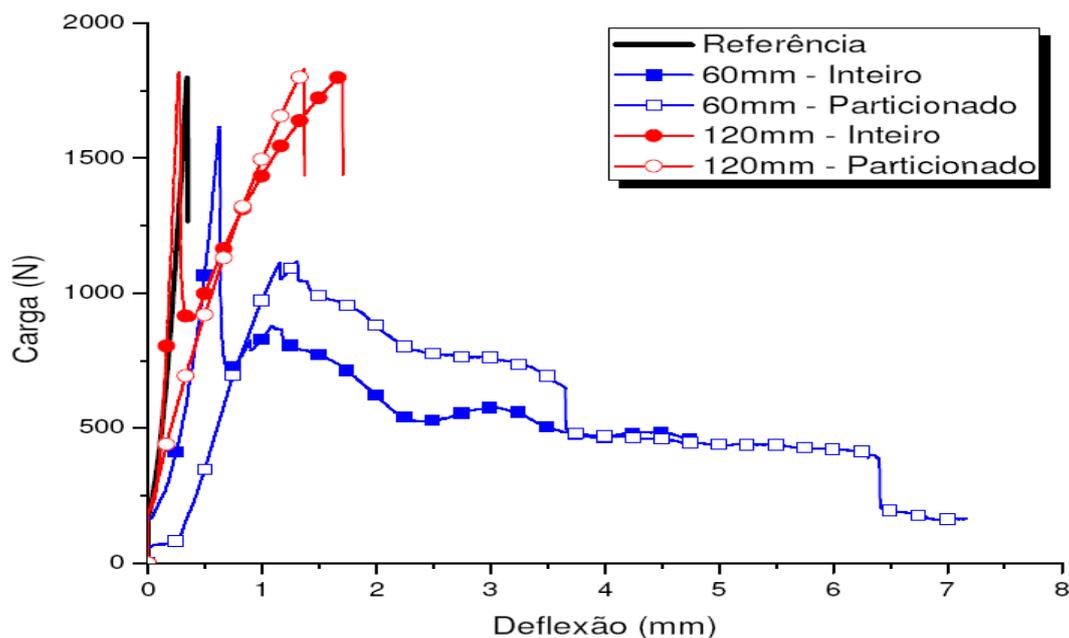


Figura 4.19 - Curvas carregamento versus deflexão dos corpos-de-prova no ensaio de flexão.

Observando as curvas percebe-se que os corpos-de-prova com reforço das fibras, independente de estarem inteiros ou particionados, apresentaram capacidade de suportar cargas após o carregamento máximo, de forma similar aos materiais dúcteis.

#### 4.10 Ensaio Pullout

Foram ensaiados dois corpos de prova para cada comprimento de fibra embutida no corpo de prova (10mm, 15mm, 20mm, 25mm, 30mm, 35mm e 40mm). O arrancamento ocorreu para fibras de 10mm a 25mm de comprimento, para os comprimentos superiores a fibra rompeu antes da ocorrência de deslizamento. Estes resultados levam a crer que o comprimento crítico da fibra está entre 25mm e 30mm. Uma vez que as fibras foram produzidas de maneira artesanal, e isto acarretou algumas irregularidades superficiais e dimensionais que influenciam diretamente na aderência das mesmas na interface fibra-matriz, podemos considerar esta aproximação razoável. As curvas carregamento versus extensão obtidas no ensaio Pullout são mostradas na Figura 4.20.

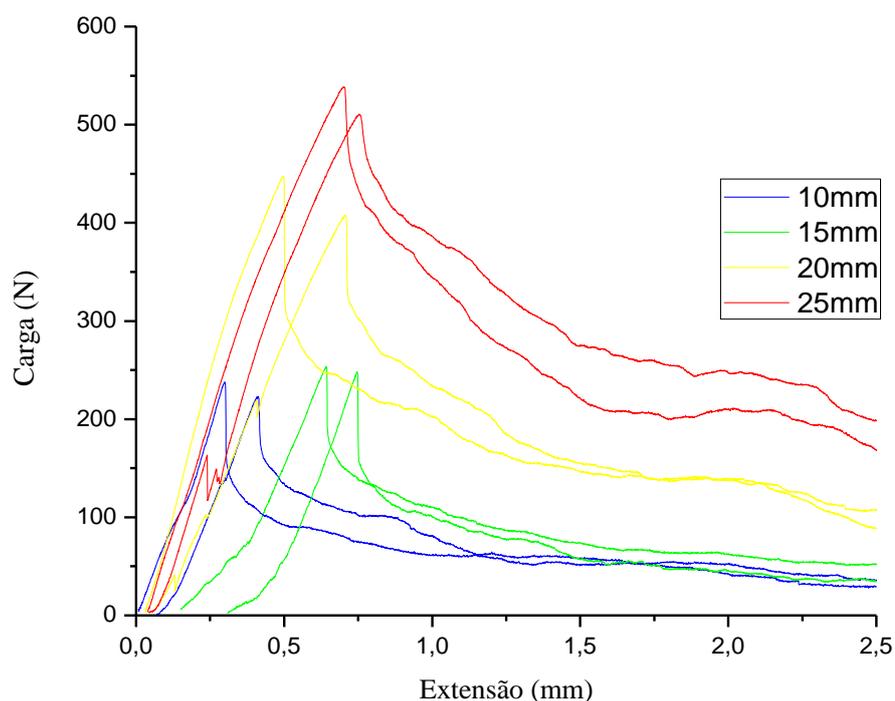


Figura 4.20 - Curvas de carga versus extensão deslocamento de fibras.

Após analisar os cinco corpos de prova prismáticos de compósito cimentício rompidos, nos quais foram utilizadas fibras de 60mm de comprimento, verificamos que ocorreu o rompimento das fibras em dois corpos de prova e deslizamento de fibras em três corpos de prova. Isto também leva a crer que o comprimento crítico da fibra é bem próximo de 30mm e que, provavelmente, ocorreu o rompimento das fibras nas amostras onde estas foram colocadas de forma simétrica, exatamente no meio do corpo de prova. Nos corpos de prova onde ocorreu deslizamento esta divisão simétrica e centralizada não ocorreu, podendo confirmar então os resultados obtidos no ensaio pullout.

#### 4.11 Análises óticas

As Figuras 4.21 a 4.26 mostram as imagens obtidas através de estereoscópio binocular com ampliação de aproximadamente 40X, onde é possível verificar irregularidades na fibra. Estas irregularidades são oriundas do processo de corte utilizado e podem ser úteis quanto à aderência das fibras na argamassa, reduzindo assim o deslizamento das mesmas no

compósito. O material destas fibras tem como característica elevada impermeabilidade, mas podemos verificar na imagem da face cortada, a presença de sulcos onde poderá ocorrer acúmulo de água na superfície da fibra (Figura 4.21).

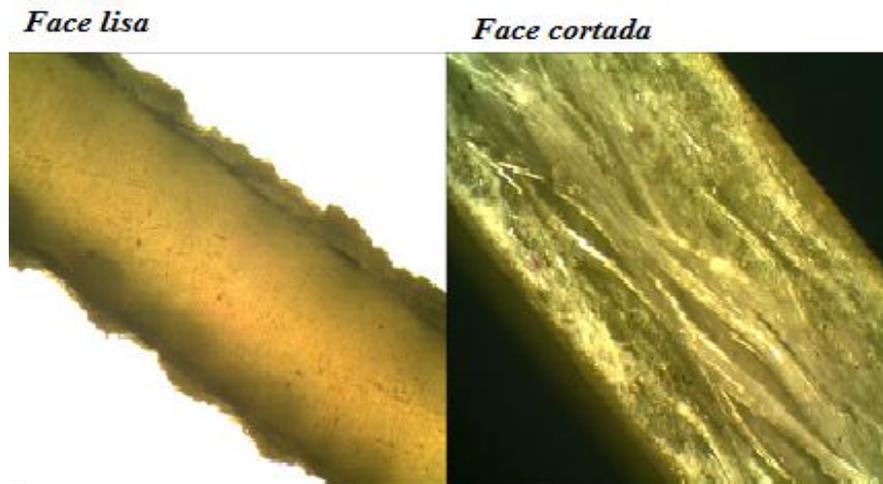


Figura 4.21 - Imagens ampliadas das fibras originadas de placas de circuito impresso.

Na Figura 4.22 verifica-se a ocorrência de ranhuras na fibra e a remoção de partículas da mesma.

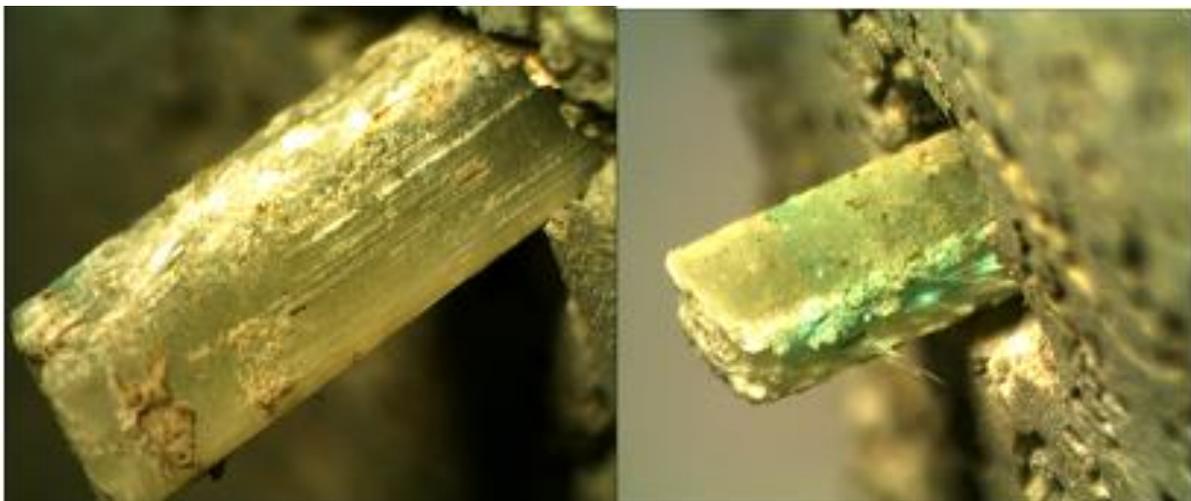


Figura 4.22 - Fibras de 60mm rompidas

Tais lesões detectadas, ocorreram nos corpos de prova com fibras de 60mm de comprimento seccionados e foram causadas pelo atrito da fibra com os materiais componentes da argamassa, comprovando assim a ocorrência de deslizamento das fibras durante o ensaio de tração na flexão.

É mostrado na Figura 4.23 a imagem de um corpo de prova com fibras de 60 mm de comprimento rompido ao meio, porém as duas partes permaneceram conectadas através das fibras. O corpo de prova suportou carga mesmo após seu rompimento parcial, neste caso também foi verificado deslizamento das fibras.



Figura 4.23 - Corpo de prova com fibras de 60mm rompido.

Na Figura 4.24 é possível observar fibras rompidas sem ocorrência de deslizamento e pode-se verificar também que o rompimento das fibras ocorreu próximo à superfície da interface do corpo de prova seccionado, composto de fibras de 120mm de comprimento. Confirma-se através da imagem a presença de poros na região da interface fibra matriz.

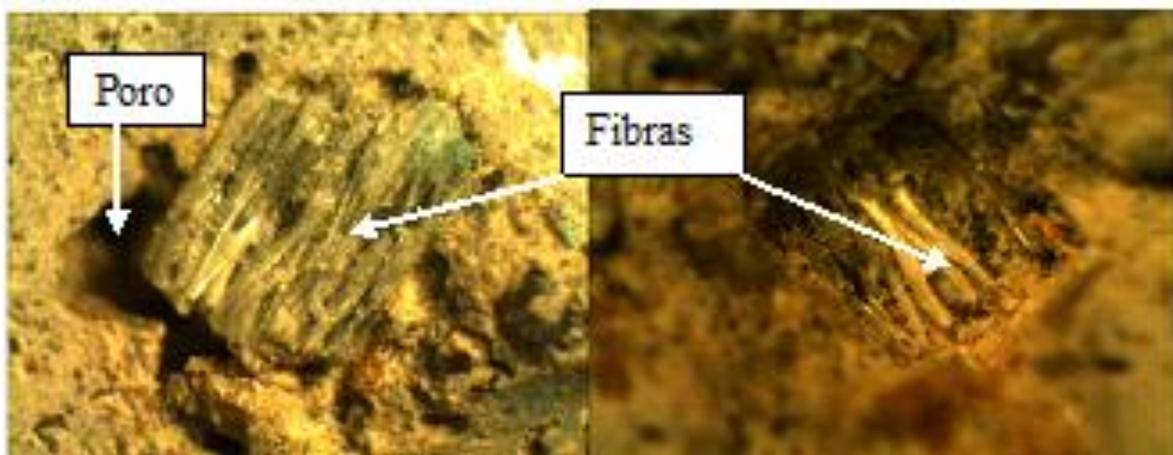


Figura 4.24 - Fibras de 120mm rompidas

Na imagem da Figura 4.25, obtida após o ensaio de tração na flexão, é possível observar a presença de uma trinca no corpo de prova. Verifica-se também que não ocorreu afastamento das partes do mesmo, mostrando assim ausência de deslizamento das fibras.

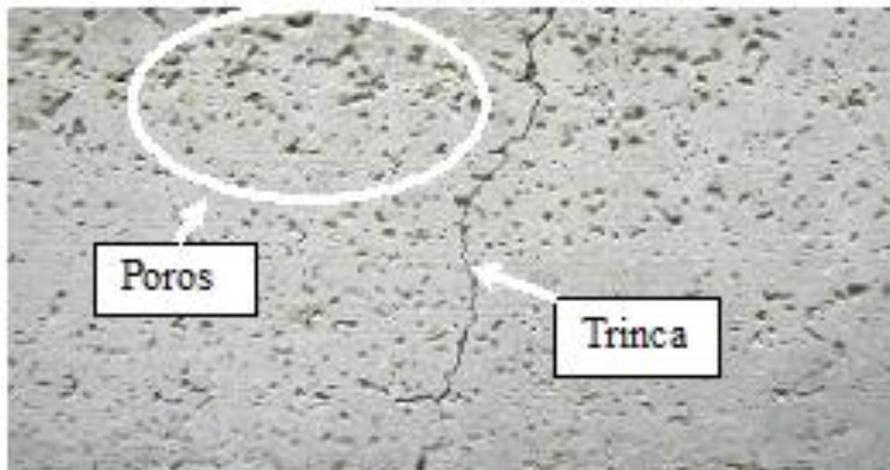


Figura 4.25 - Trinca (corpo de prova com fibras de 120mm).

Esta imagem é de um corpo de prova em que o ensaio foi interrompido antes do rompimento das fibras, sendo possível também observar a porosidade do corpo de prova.

Na Figura 4.26 é mostrada a imagem de parte de um corpo de prova rompido. Verifica-se a ocorrência de uma trinca e também a presença de poros. Estes poros estão presentes nos compósitos cimentícios e são responsáveis pela absorção de água dos mesmos.

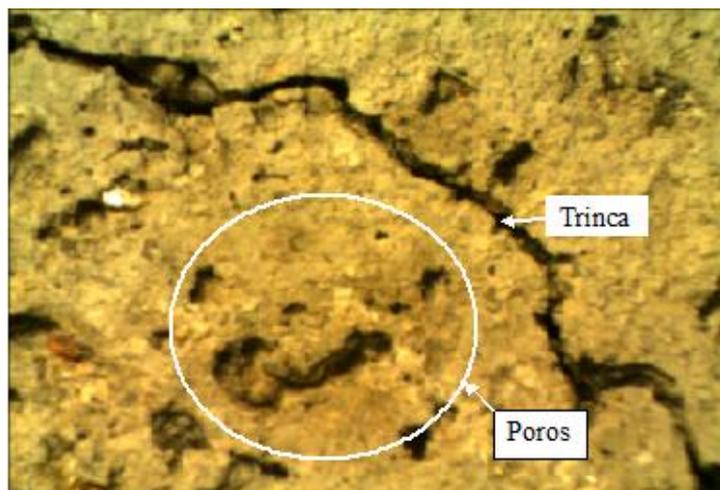


Figura 4.26 - Trinca e poros no fragmento de corpo de prova.

## 4.12 Análise microscópica

As imagens observadas na análise microscópica foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A Figura 4.27 mostra a imagem do compósito cimentício puro, sem a adição de fibras, sendo possível observar a presença de poros no interior do compósito.

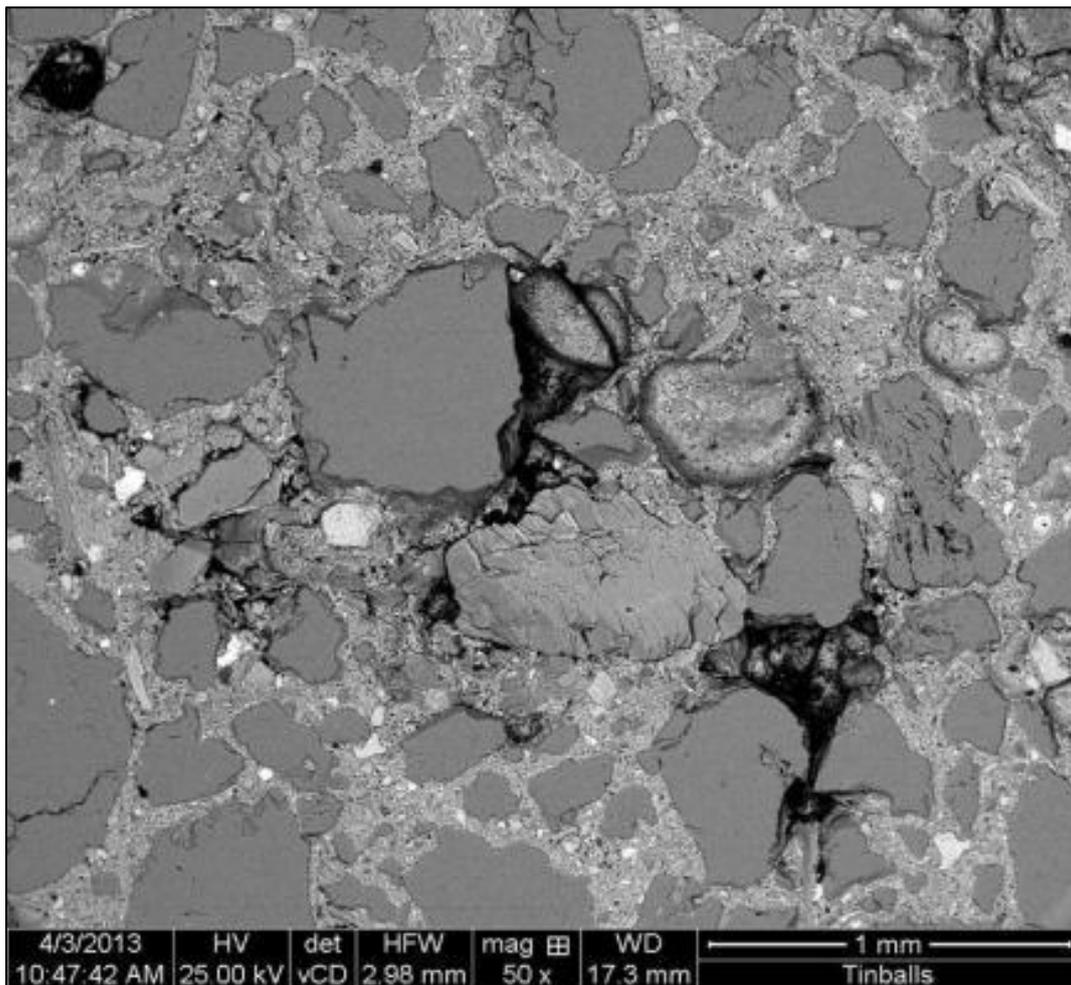


Figura 4.27 - Micrografia representando amostra de compósito cimentício. Aumento 50X.

Nas Figuras 4.28 a 4.30 são mostradas imagens de amostras de fibras de placas de circuito impresso, mostrando o posicionamento das mechas de fibra de vidro e também a trama de fibra de vidro envolvida pela resina epóxi.

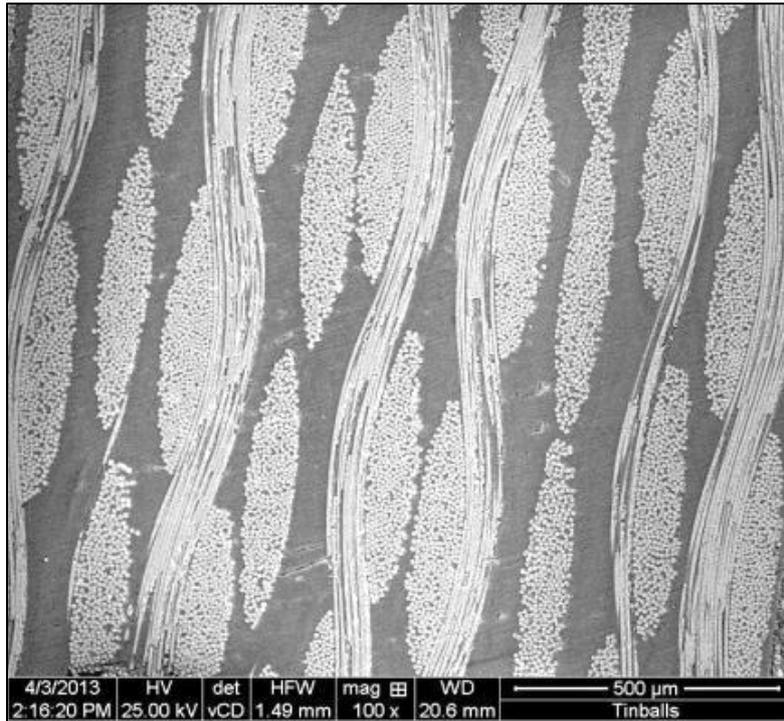


Figura 4.28 - Micrografia representando amostra de fibras de placa de circuito impresso. Aumento 100X.

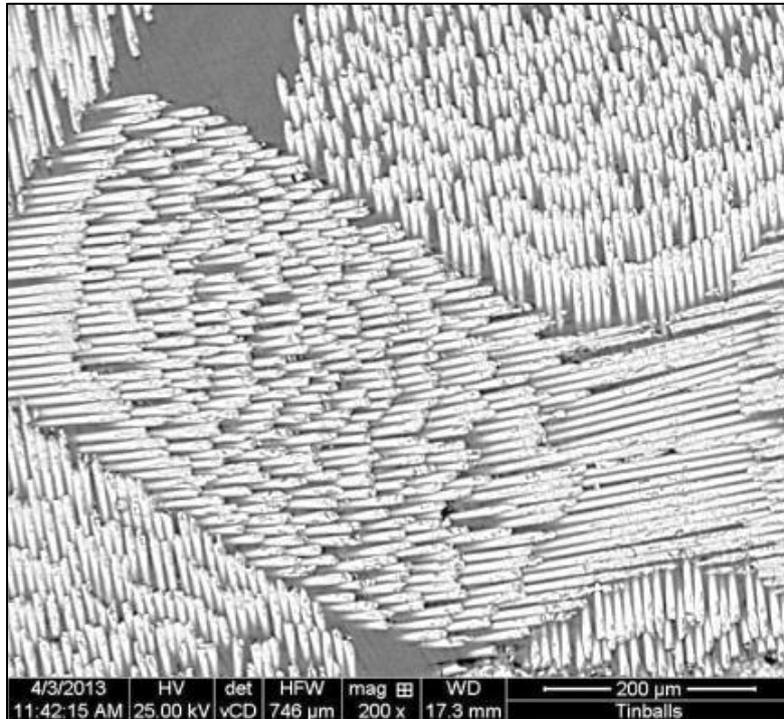


Figura 4.29 - Micrografia representando amostra de fibras de placa de circuito impresso. Aumento 200X.

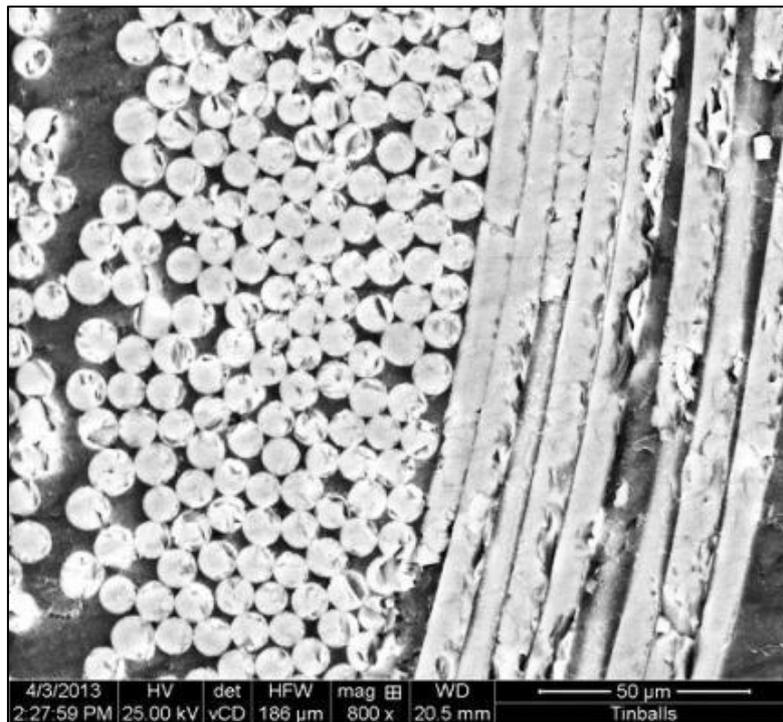


Figura 4.30 - Micrografia representando amostra de fibras de placa de circuito impresso.

Aumento 800X.

Na Figura 4.31 é possível observar a imagem de amostra de corpo de prova de compósito cimentício com fibras de 60mm de comprimento, rompido no ensaio de tração na flexão. São evidentes os indícios da ocorrência de deslizamento das fibras, pois podemos verificar a ocorrência de arrancamento de material das fibras e da argamassa nos pontos em destaque, devido ao atrito das fibras na interface fibra matriz, ocorrido durante a realização do ensaio.

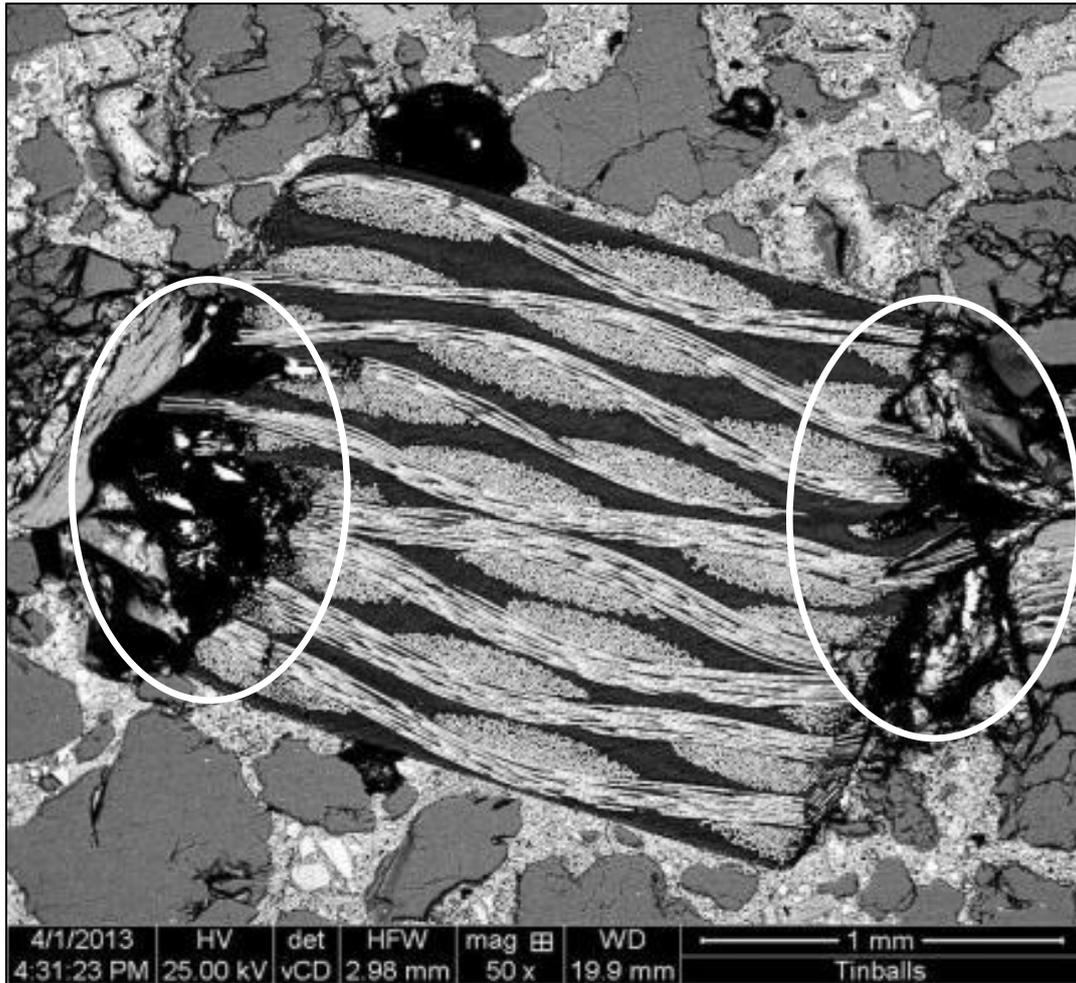


Figura 4.31- Micrografia de uma amostra de compósito cimentício com indícios de deslizamento das fibras. Aumento 50X.

Na Figura 4.32 é mostrada a imagem de amostra de corpo de prova de compósito cimentício com fibras de 120mm de comprimento rompido no ensaio de tração na flexão. Não existem indícios de ocorrência de deslizamento da fibra, pois não é observado arrancamento de material das fibras e argamassa na interface fibra matriz. Nesta imagem podemos observar também que a pasta de cimento preencheu todas as lacunas das faces cortadas da fibra.

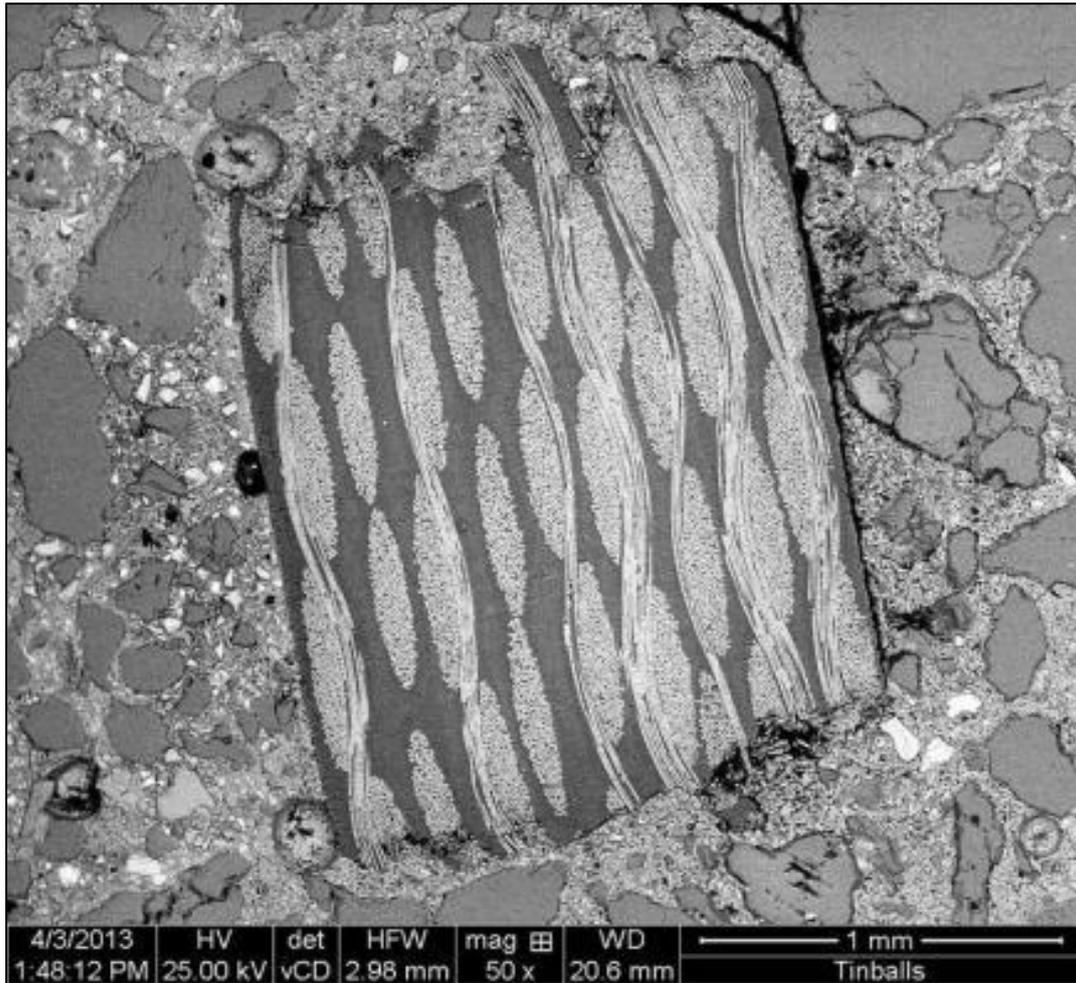


Figura 4. 32 - Micrografia de uma amostra de compósito cimentício sem indícios de deslizamento das fibras. Aumento 50X.

Na Figura 4.33 imagem de uma amostra de corpo de prova de compósito cimentício com fibras de 120mm de comprimento rompido no ensaio de tração na flexão, vista lateral da fibra obtida através de (MEV). Também não existem indícios de ocorrência de deslizamento da fibra, pois não é observado arrancamento de material das fibras e argamassa na interface fibra matriz. Podemos observar também que a pasta de cimento preencheu todas as lacunas das faces cortadas da fibra.

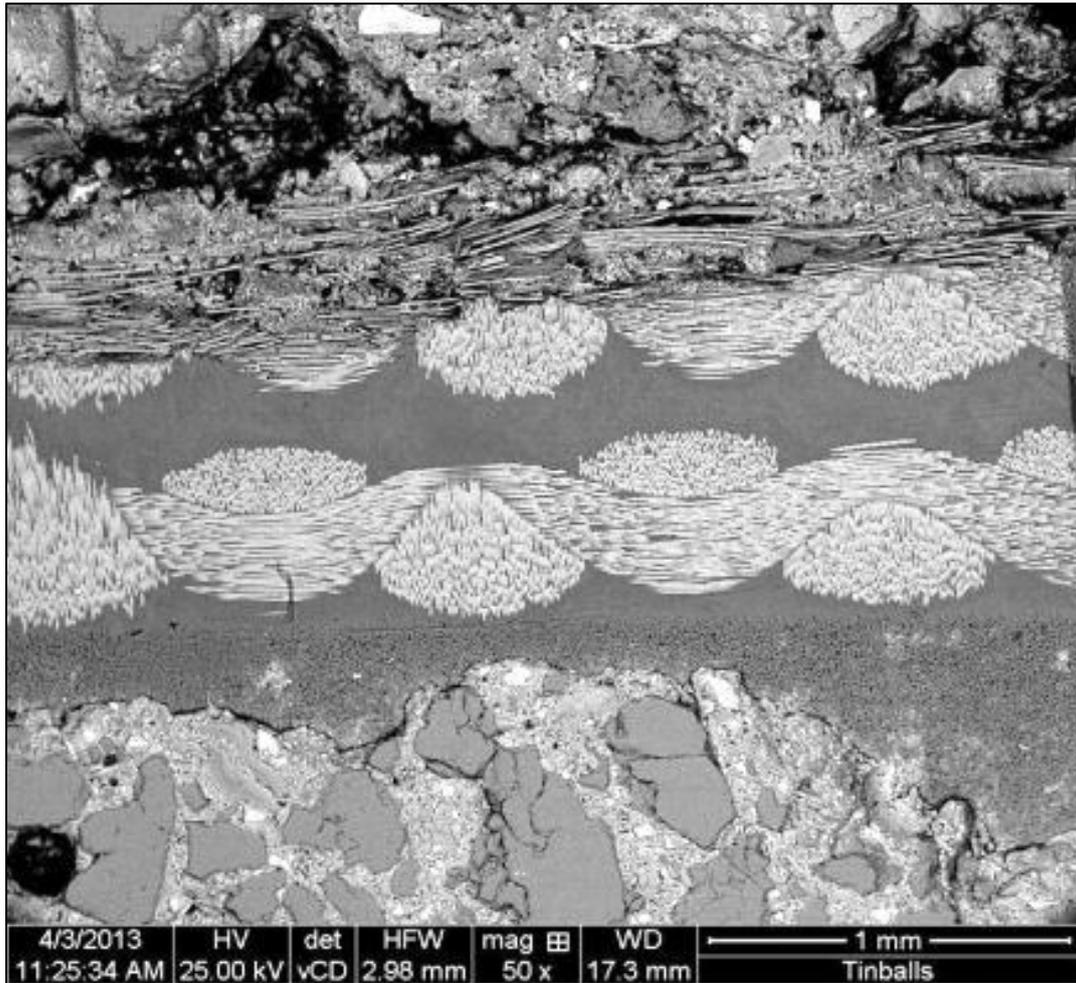


Figura 4.33 - Micrografia de uma amostra de compósito cimentício, vista lateral.  
Aumento 50X.

Na parte superior da imagem é possível observar a presença de poros. Já na parte inferior é possível observar que a pasta de cimento penetrou nas irregularidades da fibra, garantindo assim maior aderência das fibras na interface fibra-matriz.

## 5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados neste trabalho conclui-se que:

- É possível retirar os componentes eletrônicos e metálicos das placas de circuito impresso de laminado FR-4 e produzir fibras curtas compatíveis com a utilização em compósitos cimentícios;
- Através de análises térmicas verificou-se que ocorre processo de degradação das fibras curtas originadas de placa de circuito impresso em temperaturas próximas de 300°C. Sendo assim, estas fibras não podem ser utilizadas como reforço em compósitos cimentícios para ambientes com temperatura superior a 300°C;
- O resultado da análise de DRX mostrou que as fibras utilizadas neste trabalho apresentam características de material amorfo. Já na análise de FTIR comprovou-se que parte da composição do material destas fibras é resina epóxi (DGBA) com aditivos. Na análise de EDS foi detectada a presença de Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti e Br;
- Os dados obtidos nos ensaios de absorção de água demonstraram que a adição de fibras curtas, originadas de placas de circuito impresso, no compósito cimentício em estudo pouco alterou a absorção de água do mesmo;
- Através de ensaios de tração das fibras foi possível determinar a resistência à tração média igual a 225,098MPa e também observar o comportamento frágil das mesmas;
- Os resultados obtidos através dos ensaios mecânicos demonstraram que os corpos-de-prova particionados reforçados com as fibras de 60mm, apesar de particionados, apresentaram capacidade de suportar carga na flexão superior a 60% dos corpos-de-prova de referência e quanto aos corpos-de-prova inteiros e particionados com reforço de fibra de 120mm de comprimentos, ambos apresentaram capacidade de suportar carregamento superior aos corpos-de-prova de referência;
- Os corpos-de-prova com reforço das fibras, independente de estarem inteiros ou particionados, apresentaram capacidade de suportar cargas após o carregamento máximo, de forma similar aos materiais dúcteis;
- Através do ensaio *Pullout*, foi possível determinar o valor aproximado do comprimento crítico das fibras usadas no compósito cimentício. Este comprimento crítico obtido foi de 30mm para fibras com seção transversal de 1,5mm por 2,5mm;

- Foi possível comprovar através das análises de imagens micro e macroscópicas a existência de poros na matriz cimentícia, assim como a interação entre a matriz e a fibra. Foi verificado também a presença de deformações superficiais nas fibras provocadas pelo processo de produção e também devido ao deslizamento das mesmas, ocorrido durante os ensaios mecânicos;
- A utilização de fibras recicladas de placas de circuito impresso como reforço em compósitos cimentícios apresentou-se viável como reforço mecânico. Conclui-se, portanto, que também é viável a imobilização do resíduo constituído de placas de circuito impresso em compósitos cimentícios, gerando como consequência a possibilidade de redução de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos depositados no meio ambiente.

## **6 TRABALHOS FUTUROS**

Para trabalhos futuros relacionados a este estudo são sugeridos os seguintes procedimentos:

- Avaliar o comportamento do compósito cimentício com adição de pó de placas de circuito impresso.
- Avaliar o comportamento do compósito cimentício com adição de fibras curtas obtidas de placas de circuito impresso em situações de incêndio.

## 7 PUBLICAÇÃO

Os resultados obtidos nessa dissertação foram apresentados e publicados como trabalho completo nos Anais do 20º. CBECiMat:

- *“Avaliação do comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas originadas de placas de circuito impresso”*, apresentado no 20º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais (ISSN 1519-4787), 04 a 08 de novembro de 2012, Joinvile, SC, Brasil.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). Disponível em: <http://www.anatel.gov.br>. Acesso em 17 de março de 2012.

ANDRADE, R.. Caracterização e Classificação de Placas de Circuito Impresso de Computadores como Resíduos Sólidos. Dissertação de Mestrado- Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2002.

Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica – ABINEE. Panorama Econômico e Desempenho por Setorial – 2009. Disponível em: <http://www.abinee.org.br>. Acesso em 03 de outubro de 2009.

Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica – ABINEE. Propostas para uma nova Política Industrial, Tecnológica e de Comércio Exterior (PITCE). A Importância do Setor Elétrico e Eletrônico Fevereiro/2008. Disponível em: <http://www.abinee.org.br>. Acesso em 03 de outubro de 2009.

Associação Brasileira de Circuitos Impressos – ABRACI. Placas de Circuito Impresso. Disponível em: <http://www.abraci.org.br>. Acesso em 20 de março de 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: concreto: moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto: Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12142: concreto: determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos: Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: agregados para concreto: especificação: Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: NBR 5739: concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos: Rio de Janeiro, 2007.

Associação Nacional de Fabricantes de Produtos Eletroeletrônicos – ELETROS. Os três segmentos de atuação setoriais. Disponível em: <http://www.eletros.org.br>. Acesso em 26 de setembro de 2009.

BALAGURU, P. N., SHAH, S. P., Fiber-Reinforced Cement Composites. McGraw-Hill International Editions, 1992.

BARAKAT, M. A. 1998. Recovery of lead, tin and indium from alloy wire scrap. *Hydrometallurgy*, 49:63-73.

BARAKAT, M. A. 1999. Recovery of metal values from zinc solder dross. *Waste Management*, 19:503-507.

BENTUR, A. Fiber reinforced cementitious composites, Elsevier Applied Science, London, 1995.

BENTUR, A., MINDESS, S., Fiber Reinforced Cementitious Composites. Elsevier Science publishers LTD, 1990.

BENTUR, A., MINDESS, S., Fiber Reinforced Cementitious Composites. Elsevier Science publishers LTD, 1990.

BERNARDES, A., WUTH Wolfgang et al. Recycling of printed circuit boards by melting with oxidising/reducing top blowing process. In: TMS Anual Meeting, Orlando, EUA, p.363-375, 1997.

BEZERRA, A.C.S. Concreto com fibras curtas de aço submetido à alta temperatura. Tese de Doutorado de Engenharia Metalúrgica e de Minas Universidade Federal de Minas Gerais, 153p. 2012.

BORGES, P. R.. Utilização de resíduo de lã de vidro em fabricação de concreto. Dissertação de Mestrado. 129p - Universidade Federal de Ouro Preto. Rede Temática em Engenharia de Materiais, 2007.

BRANDÃO, J. H. Análise experimental e numérica de cascas de concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 128 p. 2005.

CALLISTER Jr., William D. - MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING An Introduction John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 1991.

Composição do lixo eletro-eletrônico. Disponível em: <http://www.lixoeletronico.org>. Acesso em 06 de outubro de 2009.

CUI, J. e FORSSBERG, E. 2007. Characterization of shredded television scrap and implications for materials recovery. *Waste Management*, 27, 415–424.

European Union, Directive 2002/96/CE of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on Waste Electrical and Electronic Equipment. Official Journal L037: 0024-39, 13 February 2003.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras de aço. São Paulo. 68 p. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, EPUSP, 2000.

Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM / MG. Diagnóstico da Geração de Resíduos Eletroeletrônicos no Estado de Minas Gerais: Belo Horizonte, Junho / 2009.

GUIMARÃES, M.C.N; FIGUEIREDO, A.D. Fatores Intervenientes na Tenacidade à Flexão dos Concretos Reforçados com Fibras de Aço. 28p . Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. 2003.

GRAMATYKA, P., NOWOSIELSKI, R., SAHIEWICZ, P. Recycling of waste electrical and electronic equipment. In: *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering – JAMME*. Poland, v.20, p.535-538, January-February, 2007.

HARTMANN, T. Steel fiber reinforced concrete. PhD Thesis, Royal Institute of Technology (KTH). Stockholm, 1999.

HERTER, F.F. Desempenho de Compósitos Tri-Componentes Epóxi/Fibra de Vidro/Hidróxidos Duplos Lamelares. Trabalho de Diplomação. Escola de Engenharia. Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

HOLANDA, K. M. A. Análise dos mecanismos resistentes e das similaridades de efeitos da adição de fibras de aço na resistência e na ductilidade à punção de lajes-cogumelo e ao cisalhamento de vigas de concreto. 278 p. Tese de Doutorado.- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.

ISKHAKOV, I and RIBAKOV, Y. A design method for two-layer beams consisting of normal fibered high strength concrete, *Mater Des* 28 (5) (2007), pp. 1672–1677.

LARRAURI, E., MIGUEL, R., SUÑEZ, M.J.. Recovery, recycling and reuse of packaging materials from post consumer wastes. In: *Rewas*, San Sebastian, Espanha, p. 75-85. Sep. 1999.

LEE, K. N. 1999. Appraising adaptive management. *Conservation Ecology* 3(2): 3. [online] URL: <http://www.consecol.org/vol3/iss2/art3/>

LEE, M.S.; AHN, J.G. e AHN, J.W.. Recovery of copper, tin and lead from the spent nitric etching solutions of printed circuit board and regeneration of the etching solution. *Hydrometallurgy*, 70:23-29, 2003.

LEGARTH, J. B. Environmental decision making for recycling options. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 19, p.109-135, 1997.

LOBÃO, L. M. M. Taxa de armadura longitudinal mínima em vigas de concreto de resistência normal com fibras de aço. 109 p. Dissertação de Mestrado – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

LOPES, M. M. Substituição parcial de armaduras de flexão em vigas de concreto, 130 p. Dissertação de Mestrado - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

MAGALHÃES, F. C. Estudo Probabilístico da Resistência à Compressão e da Resistência à Tração na Flexão dos Concretos Utilizados na Construção do Dique Seco do Estaleiro Rio Grande, no Superporto, Rio Grande-RS. 181p. Dissertação de Mestrado. Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio Grande, 2009.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo. 667p. IBRACON, 2008.

MEHTA, P.K.. A Glimpse Into Sustainable Ternary-Blended Cements of The Future. 50<sup>th</sup> Brazilian Concrete Congress. Salvador, Bahia, 2008.

MENETTI, R. P., TENÓRIO, J. A. S., CHAVES, A. P. Production of non-ferrous metallic concentrates from electronic scrap. In: TMS Annual Meeting Proceedings of the EPD Congress, Orlando: n.125, p.505-509, 1996.

MENETTI, R. P., TENÓRIO, J. A. S., CHAVES, A. P. Recuperação de Au e Ag de concentrados obtidos a partir de sucata eletrônica. In: 51º Congresso Anual da ABM, Porto Alegre, v.4, p.17-18, 1996.

MENETTI, R.P.; CHAVES, A.P. e TENÓRIO, J.A.S. 1995. Reciclagem de metais a partir de sucata eletrônica. In: 50º Congresso Anual da ABM, São Pedro, SP, 1995. Anais. São Pedro. 4:625-635.

MENETTI, R.P.; CHAVES, A.P. e TENÓRIO, J.A.S. 1996a. Obtenção de concentrados metálicos não ferrosos a partir de sucata eletrônica. In: 51º Congresso Anual da ABM. Porto Alegre, RS, 1996. Anais. 4:205-216.

MENETTI, R.P.; CHAVES, A.P. e TENÓRIO, J.A.S. 1996b. Recuperação de Au e Ag de concentrados obtidos a partir de sucata eletrônica. In: 51º Congresso Anual da ABM. Porto Alegre, RS, 1996. Anais... Porto Alegre. 4:217-224.

MENETTI, R.P.; CHAVES, A.P. e TENÓRIO, J.A.S. 1996c. Reciclagem de metais preciosos a partir de sucata eletrônica. *Metalurgia & Materiais*, 52(457):531-534.

MOHAMMADI, Y.; SINGH, S. P. and KAUSHIK, S.K. Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state, *Constr Build Mater* 22 (2008), pp. 956–965.

NOGUEIRA, C.A. G. Caracterização e Processamento de Placas de Circuito Impresso de Resíduos Eletrônicos. Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação INETI, Portugal. Departamento de Materiais e Tecnologias de Produção. Universidade Lusófona do Porto, 2007.

NUNES, N. L. AGOPYAN, V. A Influência do Fator de Forma da Fibra na Tenacidade à Flexão do Concreto Reforçado com Fibras de Aço. *Boletim Técnico, EPUSP*, 18 p., 1998.

NUNES, N. L.; TANESI, J., FIGUEIREDO, A.D. Aplicação do concreto reforçado com fibras de aço na recuperação de estruturas e pavimentos. In: IV Congresso Ibero-Americano

de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle de Qualidade. CON PAT 97, Porto Alegre, RS, 21 a 24 de outubro de 1997. Anais, v.2, p. 41-48.

PEIRCE, J.J., WEINER, R.F., VESILIND, A.P.. Environmental Pollution and the., Butterworth-Heinmann. p. 177-191, USA, 1998. control. 4

PERUZZI, A.P.. Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento portland modificada com látex e adição de sílica ativa. Dissertação (Mestrado). 96p. Curso de Arquitetura, Departamento de Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

PIETRELLI, L.. Separation technologies: tools to improve the sustainable development. In: Rewas, San Sebastian, Espanha, p. 223-229. Sep. 1999.

RODRIGUES, A.C.. Impactos Sócio-Ambientais dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos: Estudo da Cadeia Pós-Consumo no Brasil. Dissertação de Mestrado. Universidade Metodista de Piracicaba. Santa Bárbara D'Oeste, 2007.

SAITO, I.. Recovery of valuable metals from printed wiring board wastes. Trans. Mat. Res. Soc., Japão v. 18A, p. 207-214. 1994.

SANAPALA, R.. Characterization Of FR-4 Printed Circuit Board Laminates Before And After Exposure To Lead-Free Soldering Conditions. Dissertação de Mestrado. 75p - Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park, 2008.

SARZALEJO, A. G.; ROSSI, B.; PERRI, G.; WINTERBERG, R.; ARISTEGUIETA, R. E. P. Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto. (Manual Técnico). Maccaferri do Brasil Ltda., 2009.

SIMONITE, T.. Reciclagem de placas de circuito impresso. Técnica permite reciclagem de placas de circuito impresso e recuperação de metais. Disponível em <http://www.blig.ig.com.br/sustentablog> – NewScientist. Acesso em 16 de outubro de 2009.

TANESI, J., FIGUEIREDO, A. D., Eficiência do Reforço de fibras de Polipropileno em Concretos. In: IV Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto. São Paulo, 2000.

TAVARES, V.. Recuperação de Cobre a partir de Placas de Circuito Impressos Obsoletos de Aparelhos de Telefonia Celular. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

TENÓRIO, J. A. S., MENETTI, R. P. Reciclagem de metais preciosos a partir de sucata eletrônica. *Metalurgia & Materiais*, v.52, n.457, p.531- 534, setembro 1996.

UNI 11037. Fibre di acciaio da impiegare nel confezionamento di conglomerato cementizio rinforzato, UNICEMENTO, UNSIDER, 2003.

VEIT, H. M.. Emprego de Processamento Mecânico na Reciclagem de Sucatas de Placas de Circuito Impresso. Dissertação de Mestrado de Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

VEIT, H.M.. Reciclagem de Cobre de Sucatas de Placas de Circuito Impresso. Tese de Doutorado de Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

VEIT, H. M.. Sucatas Eletrônicas ou Lixo Tecnológico. Seminário Internacional de resíduos Eletroeletrônicos: Belo Horizonte, 14 de agosto de 2009.

VIDAL FILHO, L. S. Influência da adição de fibras curtas de aço no comportamento e resistência ao esforço cortante em vigas de concreto armado. Dissertação de Mestrado. 130p. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 1999.