

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CURSO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE
MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZES
CIMENTÍCIAS REFORÇADAS COM FIBRA DE
ARAMIDA KEVLAR**

Stefania Tesi Bernardi

Porto Alegre
outubro 2003

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE
MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZES
CIMENTÍCIAS REFORÇADAS COM FIBRA DE
ARAMIDA KEVLAR**

Stefania Tesi Bernardi

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

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Porto Alegre
outubro 2003

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelos orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Dr. University of Leeds

Orientador

Prof. Américo Campos Filho

Coordenador do PPGEC / UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Carlos Arthur Ferreira (PPGEM)

Dr. Univ. Paris 7 Denis / Dedirot

Prof. Hélio Adão Greven

Dr. Ing. Univ. Tec. Hannover / Alemanha

Prof^a. Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Dr^a. EPUSP / UFRGS

Prof. João Luiz Campagnolo

M.sc PPGEC / UFRGS

Dedico esse trabalho a minha família,
em especial ao meu marido e meus
avós.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho por toda a paciência e atenção. Agradeço especialmente aos Prof. Carlos Ferreira e Prof. Carla ten Caten pela colaboração indispensável.

Agradeço a empresa Du Pont pelo fornecimento da fibra de aramida Kevlar necessária ao desenvolvimento do trabalho.

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela oportunidade de aprendizado.

Agradeço aos bolsistas Maurício Freitas Fritzen, Carolina Vital Menegaz, Luciane Fonseca Caetano e Ângela Gaio Graeff, que fizeram parte dessa pesquisa e aos funcionários do LEME.

Agradeço a minha família, especialmente ao meu marido, pela compreensão.

E agradeço particularmente a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

SUMÁRIO

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

RESUMO.....xiv

ABSTRACT xv

1 INTRODUÇÃO..... 1

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 2

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA 3

1.3 DEFINIÇÃO DO TEMA..... 5

1.4 HIPÓTESES 6

1.5 OBJETIVOS 6

1.6 LIMITAÇÕES 7

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO..... 7

2 MATERIAIS COMPÓSITOS 9

2.1 CONCEITUAÇÃO BÁSICA 9

2.1.1 COMPONENTE MATRICIAL 11

2.1.2 ELEMENTOS DE REFORÇO 12

2.1.3 INTERFACE MATRIZ-ELEMENTO DE REFORÇO 14

2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS..... 15

2.2.1 TEOR DE FIBRA 16

2.2.2 VOLUME LIMITE E VOLUME CRÍTICO DE FIBRAS..... 17

2.2.3 ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS..... 18

2.3 DESEMPENHO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA REFORÇADOS COM FIBRAS	18
2.3.1. RESISTÊNCIA À RUPTURA.....	19
2.3.2 CAPACIDADE DE DEFORMAÇÃO OU ALONGAMENTO.....	20
2.3.3 TRABALHABILIDADE.....	21
2.3.4 TENACIDADE - IMPACTO	21
2.3.5 PROPAGAÇÃO DE FISSURAS.....	22
2.3.6 FADIGA E COMPORTAMENTO FRENTE A ESFORÇOS DINÂMICOS	22
2.3.7 RESISTÊNCIA AO FOGO	23
2.3.8 MECANISMOS DE FRATURA	23
2.4 COMPETITIVIDADE DOS MATERIAIS COMPÓSITOS.....	25
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	27
3 TIPOS E CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS MAIS UTILIZADAS PARA REFORÇO DE MATRIZES CIMENTÍCIAS	28
3.1 DEFINIÇÕES BÁSICAS	28
3.1.1 FIOS	29
3.1.2 TECIDOS	29
3.2 PROPRIEDADES E CLASSIFICAÇÃO DAS FIBRAS.....	30
3.2.1 DIÂMETRO DO FIO.....	31
3.2.2 GEOMETRIA DA FIBRA	32
3.2.3 FATOR DE FORMA	33
3.2.4 COMPRIMENTO DAS FIBRAS	34
3.2.5 ORIENTAÇÃO MOLECULAR.....	35
3.2.6 MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	37
3.2.7 PRESENÇA DE DEFEITOS.....	37
3.2.8 ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	38
3.2.9 NATUREZA DAS FIBRAS	38
3.3 CLASSIFICAÇÃO DAS FIBRAS	39
3.3.1 FIBRAS NATURAIS	40
3.3.2 FIBRAS SINTÉTICAS	42
3.4 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS UTILIZADAS NA PESQUISA PARA COMPARAÇÃO COM A FIBRA ARAMIDA	45

3.4.1 FIBRA DE SISAL.....	45
3.4.2 FIBRA DE AÇO	47
3.4.3 FIBRA DE POLIPROPILENO.....	48
3.4.4 FIBRA DE VIDRO	51
4 A FIBRA DE ARAMIDA.....	54
4.1 COMPOSIÇÃO E ESTRUTURA QUÍMICA.....	54
4.2 HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO	57
4.3 MARCAS COMERCIAIS DE FIBRA ARAMIDA	58
4.4 PROPRIEDADES E DESEMPENHO DAS FIBRAS ARAMIDA	62
4.4.1 ASPECTO MICROESTRUTURAL	62
4.4.2 GEOMETRIA E DENSIDADE.....	64
4.4.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS	65
4.4.4 MODO DE RUPTURA À TRAÇÃO	67
4.4.5 PROPRIEDADES TÉRMICAS.....	68
4.4.6 RESISTÊNCIA AO IMPACTO	68
4.4.7 DURABILIDADE.....	69
4.4.8 TINGIMENTO.....	70
4.4.9 RECOMENDAÇÕES EM RELAÇÃO AO MANUSEIO	70
4.5 APLICAÇÕES	71
4.5.1 EMPREGO NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	72
5 PROGRAMA EXPERIMENTAL	74
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	74
5.2 ESTRATÉGIA DE PESQUISA	75
5.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	76
5.4 MATERIAIS EMPREGADOS.....	79
5.4.1 FIBRAS	79
5.4.2 CIMENTO PORTLAND.....	81
5.4.3 AGREGADO MIÚDO (AREIA).....	81
5.4.4 AGREGADO GRAÚDO (BRITA)	82
5.4.5 ADITIVO.....	82
5.4.6 ÁGUA DE AMASSAMENTO.....	83

5.5	TRAÇOS DE CONCRETO UTILIZADOS	83
5.6	MOLDAGEM E CURA	83
5.7	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA DE ARAMIDA	85
5.7.1	CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA DAS AMOSTRAS DO FIO DE ARAMIDA KEVLAR ISOLADA E NO COMPÓSITO.....	85
5.7.2	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA E MÓDULO DE ARMAZENAMENTO	86
5.7.3	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS FIOS DE ARAMIDA	87
5.8	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO.....	88
5.8.1	ENSAIO DE ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE.....	88
5.8.2	MASSA ESPECÍFICA	90
5.8.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	90
5.8.4	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	91
5.8.5	ENSAIO DE RESISTÊNCIA A IMPACTOS.....	91
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	95
6.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA.....	95
6.1.1	MICROSCOPIA DO FIO	95
6.1.2	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)	97
6.1.3	MÓDULO DE ARMAZENAMENTO	98
6.1.4	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO FIO	98
6.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO.....	100
6.2.1	ENSAIO DE ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE.....	100
6.2.2	MASSA ESPECÍFICA	101
6.2.3	ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES – FASE PRELIMINAR	102
6.2.4	ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO – FASE PRELIMINAR	104
6.2.5	ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES – FASE DE AVALIAÇÃO	106
6.2.6	ANÁLISE DA DUTILIDADE – FASE DE AVALIAÇÃO	108
6.2.4	ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO – FASE DE AVALIAÇÃO	110
6.2.5	RESISTÊNCIA A IMPACTOS	111
6.2.6	MICROSCOPIA DO COMPÓSITO.....	119
7	CONCLUSÕES	124

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	124
7.2 CONCLUSÕES	125
7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	126
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
BIBLIOGRAFIA.....	133
ANEXO 1	137
ANEXO 2	146

Lista de Figuras

2.1 Esquema de formação de um material compósito	10
3.1 Padrões de orientação molecular da cadeia	36
3.2 Proposta de classificação das fibras	41
4.1 Representação química de uma amida	55
4.2 Representação química típica de um grupo aromático	55
4.3 Fórmula química de alguns polímeros	56
4.4 Apresentação da fibra de aramida como tecido	61
4.5 Aramida na forma de polpa, segmentos e flocos	61
4.6 Plano de ligação de pontes de hidrogênio	63
4.7 Microscopia da seção transversal de um filamento de aramida	64
4.8 Corte do tecido de aramida com disco de corte	71
5.1 Fluxograma de etapas	77
5.2 Adição da fibra a mistura de concreto	84
5.3 Fio de aramida sendo ensaiado à tração e rompido	88
5.4 Consistência da mistura de concreto após a adição da fibra Kevlar	89
5.5 Ensaio de abatimento de tronco de cone sem a presença de fibras e após a adição da fibra	89
5.6 Corpos de prova em forma de placa para ensaio de impacto	92
5.7 Equipamento de ensaio de impacto	93
5.8 Detalhe da placa de concreto no suporte de ensaio com deflectômetro	93
5.9 Posição dos deflectômetros em relação ao centro da placa	94
6.1 Fio de aramida composto por um conjunto de n filamentos de aramida, visto em MEV por elétrons secundários.....	96
6.2 Vista de um filamento individual do fio de fibra de aramida	96
6.3 Superfície de um filamento de aramida	96
6.4 TGA de uma amostra de fio de aramida	97
6.5 Ensaio DMA mostrando o módulo de armazenamento da amostra de um fio de aramida	98
6.6 Cargas de pico e de ruptura para as amostras do fio de aramida ensaiadas à tração	99
6.7 Ensaio de tronco de cone para concreto com fibra de aramida	100
6.8 Representação da massa específica dos espécimes avaliados	101
6.9 Resistência à compressão simples de misturas com fibras de comprimentos diferentes - Etapa Preliminar	103

6.10 Resistência à compressão simples para teores de adição até 0,9 kg/m ³ - Etapa Preliminar	103
6.11 Resistência à compressão simples para teores entre 1,8 kg/m ³ e 3,6kg/m ³	104
6.12 Ensaio de tração na flexão para diferentes comprimentos de fibra de aramida	105
6.13 Ensaio de tração na flexão para teores de fibra de aramida até 0,9 kg/m ³	105
6.14 Ensaio de tração na flexão para teores de fibra de aramida entre 1,8 kg/m ³ e 3,6 kg/m ³	106
6.15 Resistência à compressão simples com todos os teores	107
6.16 Modelo predito para compressão simples com diferentes teores de fibra incorporados	108
6.17 Resistência à compressão simples aos 3 dias	109
6.18 Resistência à compressão simples aos 7 dias	109
6.19 Resistência à compressão simples aos 21 dias	110
6.20 Tensão de tração na flexão dos teores ensaiados na etapa de avaliação	110
6.21 Ensaio de impacto de placas com fibras de aço incorporada	112
6.22 Ensaio de impacto de placas com incorporação de fibras de polipropileno	113
6.23 Ensaio de impacto de placas com fibras de sisal incorporada	114
6.24 Ensaio de impacto de placas com fibras de vidro incorporada	115
6.25 Ensaio de impacto para placas com fibras de aramida incorporada	116
6.26 Ensaio de impacto para placas sem adição de fibra	116
6.27 Comparativo entre os desempenhos de distintos tipos de fibras com diferentes teores incorporados	118
6.28 Compósito de matriz cimentícia com fibra de aramida incorporada com ampliação de 700x	119
6.29 Compósito de matriz cimentícia com fibra de aramida incorporada com ampliação de 500x	120
6.30 Aspecto da ancoragem de uma fibra de aramida no compósito com ampliação de 3.300x	120
6.31 Aspecto de uma superfície de ruptura do compósito de fibra de aramida com ampliação de 500x	121
6.32 Aspecto de uma superfície de ruptura do compósito de fibra de aramida com ampliação de 3.300x	121
6.33 Aspecto de uma superfície de ruptura do compósito de fibra de aramida com ampliação de 2.500x	122
6.34 Vista da fibra aramida no compósito ampliada a 1.300x	122
6.35 Vista da fibra aramida no compósito ampliada 3.700x	123
6.36 Vista da fibra aramida no compósito ampliada 4.000x	123

Lista de Tabelas

2.1 Características das fibras utilizadas em compósitos	23
3.1 Valores de resistência mecânica com adição de fibras	39
3.2 Valores indicativos das propriedades mecânicas de algumas fibras sintéticas ...	45
3.3 Comparação de algumas características entre a fibra acrílica e a fibra de polipropileno	49
4.1 Denominações dos tipos de Kevlar e suas características	60
4.2 Propriedades de alguns tipos de fibra de aramida utilizados na pesquisa	60
4.3 Propriedades físicas dos produtos de aramida Kevlar	64
4.4 Comparação das fibras de alto desempenho	66
4.5 Resultados de testes com cabos	67
5.1 Teores utilizados no ensaio de impacto	80
5.2 Propriedades físicas do cimento	81
5.3 Caracterização granulométrica do agregado miúdo	82
5.4 Caracterização do agregado graúdo	82
6.1 Análise de variância ANOVA	111
6.2 Ensaio de impacto para as diferentes alturas de queda da esfera.....	117

RESUMO

Esse trabalho aborda a questão de materiais compósitos reforçados com fibras (*fiber reinforced concrete*) com enfoque em matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida Kevlar. O objetivo é caracterizar o potencial da fibra de aramida Kevlar como elemento de reforço a ser adicionado ao concreto. O trabalho busca caracterizar o desempenho dos compósitos formados, identificando as alterações decorrentes da incorporação em função do comportamento mecânico e da resistência ao impacto. Os objetivos são verificar a potencialidade de utilização dessa fibra em termos de trabalhabilidade e resistência mecânica; definir como deve ser a forma de incorporação, verificar a aderência da fibra à matriz através de microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários e determinar a resistência ao impacto, comparando matrizes sem adição de fibra com corpos-de-prova moldados com vários tipos e teores de fibra (aço, sisal, vidro, polipropileno e aramida). Como vantagens da incorporação das fibras de aramida Kevlar, constata-se um incremento na resistência à compressão dos compósitos aos 28 dias em relação aos espécimes sem adição de fibra. Observam-se, também, reduções na massa específica e na trabalhabilidade dos espécimes com adição de fibra de aramida Kevlar em comparação aos sem adição. Em relação à resistência ao impacto, conclui-se que os compósitos com adição de fibra de aço e fibra de aramida são os que apresentaram melhor comportamento dinâmico em relação a energia de ruptura acumulada e à energia para aparecimento da primeira fissura, respectivamente.

Palavras-chave: materiais compósitos, concretos com fibra, aramida, kevlar, impacto.

ABSTRACT

This paper approaches the issue of composite materials reinforced with fibers having a focus on cementitious matrix reinforced with Kevlar aramid fiber. The objective is to characterize the potential of the Kevlar aramid fiber as a reinforcement element to be mixed to concrete. This paper aims at characterizing the performance of the formed composites identifying the changes resulting from the incorporation in face of the mechanical behavior and resistance to impact. The objectives are to verify the potentiality of the usage of this fiber in terms of workability and mechanical resistance; to define how the incorporation should be made, to verify the adherence of the fiber to the matrix through a scanning microscopy via secondary electrons as well as to determine the resistance to impact while comparing matrixes without the addition of fiber with samples molded with several types and rates of fiber (steel, sisal, glass, polypropylene and aramid). As an advantage of the incorporation of Kevlar aramid fibers, we find an enhancement of the resistance to the compression of the composites after 28 days compared to the samples with no addition of fiber. Reductions in the specific mass and in the workability of the samples with the Kevlar fiber were also observed. As to impact resistance, it is concluded that the composites with the addition of steel fiber and aramid fiber are the ones that present the best dynamic behavior related to the accumulated rupture energy and to the energy for the first fissure respectively.

Keywords: composite materials, concrete with fiber, aramid, Kevlar, impact.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Estruturalmente, pode-se dizer que o concreto simples, apesar de suas vantagens de fabricação e aplicação, é um material frágil, com baixa capacidade de suporte de cargas de tração e reduzida resistência a deformações. Por isso, ao longo de sua história, se buscaram formas de melhorar este comportamento. A partir da década de 1960, a adição de fibras ao concreto se tornou uma alternativa importante nesta busca, pois a incorporação de fibras à matriz cimentícia colabora para melhorar sua ductilidade e seu comportamento frente à fissuração.

A presente pesquisa tem por objetivo investigar o comportamento de uma fibra polimérica, a fibra de aramida, quando associada ao concreto simples. Como esta fibra ainda não foi empregada em larga escala para este fim, o presente trabalho foi concebido com o intuito de coletar dados preliminares sobre a viabilidade de sua utilização como alternativa para confecção de concretos especiais resistentes a impactos.

O interesse pela aramida decorre do fato dessa fibra ser uma fibra sintética de alto desempenho, com um custo competitivo e durabilidade superior em relação a outras fibras com características semelhantes, como a fibra de carbono. Embora dotada de características bastante interessantes sob o ponto de vista do comportamento mecânico, e largamente utilizada em outras indústrias, a mesma ainda é pouco empregada na construção civil, o que justifica o interesse em seu estudo.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos últimos anos, vem se observando grandes mudanças na tecnologia de produção de concretos. Na realidade, o que se procura obter são concretos com características adequadas para atender às novas exigências que se impõem ao mesmo, ou seja, um concreto mais durável, mais eficiente e ecologicamente mais correto. Segundo MEHTA (1994), estas são, na realidade, as razões que justificam os esforços no sentido de melhorar características como o módulo de elasticidade, a resistência à flexão, à tração ou ao impacto e a impermeabilidade.

Concomitantemente a esta evolução das demandas sobre o concreto, uma miríade de novos materiais vem sendo desenvolvida pela engenharia química e de materiais, disponibilizando alternativas inovadoras que também começam a encontrar usos na área da engenharia civil. O problema é que esses materiais têm especificações variadas e, freqüentemente, seus comportamentos, especialmente quando os mesmos são incorporados às nossas construções, ainda são pouco conhecidos.

Dentre as várias opções de materiais “engenheirados”, um dos grupos mais estudados é o das fibras sintéticas, que vem sendo aplicadas nas nossas estruturas, na forma de concreto com fibras (*fibre reinforced concrete-FRC*). De acordo com MINDESS et al. (2002), o concreto reforçado com fibra pode ser definido como um concreto que incorpora fibras relativamente pequenas, discretas e descontínuas, com o objetivo de melhorar o controle da fissuração. Assim, se obtém um material compósito com características superiores a de seus constituintes isolados. A vantagem desta combinação de materiais é que a capacidade de absorção de energia, a ductilidade, o comportamento sob cisalhamento e a resistência às ações dinâmicas e estáticas da matriz cimentícia são melhoradas pela adição de fibras. O melhor desempenho do conjunto também pode ser relacionado a uma maior resistência ao escoamento do componente de reforço.

Os materiais compósitos se constituem em aplicações de alto valor agregado, de acordo com BAZIN (2002). Em termos comparativos, pode-se estimar¹ que a madeira custe 1 € / kg, o concreto 2 € / kg e o aço 3 € / kg, enquanto os compósitos atingem 5 € / kg. No

¹ Cotação 1€ = R\$ 3,50 em outubro/2003.

entanto, seu desempenho muitas vezes justifica o investimento adicional.

Atualmente, segundo MINDESS et al. (2002), a indústria automobilística utiliza cerca de 36% do total de materiais compósitos fabricados com fibras, enquanto a construção civil absorve 20% dos mesmos na França e 23% no Brasil. No caso específico do concreto com fibras, os autores estimam que mais de 76 milhões de m³ foram produzidos em 2001 ao redor do mundo, sendo os mesmos aplicados principalmente na fabricação de placas (60%), concreto projetado (25%) e peças pré-moldadas (5%).

Embora os materiais compósitos à base de fibras sejam bastante promissores, teoricamente, se observa ainda uma certa resistência ao seu uso. Esta resistência pode ser atribuída a vários fatores, dentre os quais destacam-se: a falta de familiaridade com o material, a oferta limitada, a resistência cultural típica do mercado da construção, a ausência de normalização adequada e a divulgação deficiente. Cabe à área de pesquisa colaborar para esclarecer as dúvidas quanto ao comportamento destes materiais e incentivar sua divulgação, nos casos apropriados. Esta pesquisa se insere neste esforço.

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Pode-se estimar que a utilização de fibras como reforço de materiais na construção já tenha ocorrido nos anos de 1200 a.C., através da civilização egípcia (TANESI e AGOPYAN, 1997). Entretanto, a comercialização das fibras como material de reforço para estruturas só se estruturou no início do século XX, sendo a fibra de amianto (asbestos) a primeira a ser empregada em larga escala.

Desde então, segundo SANTOS (2002), as fibras se tornaram um material com tanta importância e relevância que estão sendo estudadas inclusive na restauração ou substituição de partes danificadas do tecido ósseo humano.

Pode-se pensar em fibras associadas a concretos, não somente como solução para um dano causado por uma patologia, mas também como uma maneira de melhorar o comportamento da estrutura quando em serviço, obtendo-se novas características e melhorando algumas propriedades intrínsecas da mistura. Em particular, as fibras colaboram para aumentar a ductilidade e controlar a fissuração destas estruturas.

Observa-se que a fissuração é um dos maiores problemas para as estruturas de concreto armado, visto que a mesma tende a criar um caminho preferencial para a entrada de

agentes agressivos. A adição de fibras ao concreto torna-se um elemento de reforço da matriz cimentícia, colaborando para a diminuição da abertura das fissuras e o controle de sua velocidade de propagação.

Por estas razões, de acordo com GREGORY (2002), o concreto reforçado com fibras está sendo cada vez mais utilizado em estruturas de engenharia civil como pontes, pavimentos, tubulações, paredes, telhados, plataformas “offshore” e tanques de armazenamento submersos. Essas estruturas estão sujeitas a solicitações variadas, decorrentes de carregamentos uniaxiais, biaxiais, de fadiga, de compressão ou causados pelo vento, pelas ondas, pelas vibrações de máquinas e terremotos.

Para o reforço de matrizes cimentícias, existem inúmeras fibras viáveis. Além das fibras naturais, de origem vegetal ou mineral, numerosos materiais fibrosos foram criados nos últimos anos a partir da cadeia do petróleo. Estas fibras têm características individuais muito interessantes e já são largamente exploradas na indústria química, naval e aeroespacial. Combinadas a outros materiais fabricados pelo homem, elas formam o grupo mais importante das fibras, o das fibras sintéticas. Como exemplo de fibras sintéticas podem ser citadas as fibras de aço, de polipropileno, de nylon, de poliéster, de vidro, de carbono e de aramida. Já dentre as fibras naturais se destacam as de algodão, de sisal, de bananeira e de coco. A fibra mineral mais conhecida é o asbesto.

Como será discutido em maior detalhe no capítulo 3, as fibras naturais contribuem para a diminuição das fissuras na matriz do concreto, porém a alcalinidade do concreto interfere na integridade das mesmas, comprometendo seu desempenho ao longo do tempo. Já a adição de fibras de aço na massa do concreto diminui a abertura de fissuras no concreto endurecido, pois funciona como ponte de aderência entre as zonas não fissuradas, mas não é eficiente antes da fissuração e tem um efeito mais pontual que outras fibras de menor dimensão. A adição de fibras de polipropileno na massa do concreto, por exemplo, atua de outra forma, distribuindo as tensões de forma mais homogênea. Isto acaba por aumentar o número de fissuras, mas diminui sua abertura, o que pode ser positivo sob o ponto de vista da durabilidade. Além disso, colabora para reduzir as fissuras por retração e assentamento plástico e para moderar a velocidade de propagação das fissuras existentes, pois cria uma malha tridimensional de reforço à tração. As fibras de vidro são normalmente adicionadas ao concreto durante sua mistura, para diminuição das fissuras oriundas da cura do concreto, funcionando como reforço interno.

Ou seja, o efeito de cada tipo de fibra introduzida no concreto depende de suas características, isto é, de sua forma, resistência, durabilidade e, principalmente, do módulo de elasticidade. Cada fibra, portanto, contribui diferentemente com a melhoria das propriedades dos compósitos. Isto justifica estudar cada uma delas em separado, procurando entender como se poderiam maximizar os benefícios da utilização da mesma.

Como já foi enfatizado, o interesse deste trabalho recai sobre a fibra aramida. Esta fibra sintética apresenta inúmeras propriedades interessantes que podem, teoricamente, contribuir para melhorar a qualidade do compósito gerado pela sua incorporação ao concreto. Isto orientou a definição do tema, como descrito a seguir.

1.3 DEFINIÇÃO DO TEMA

A fibra aramida se destaca por sua resistência a altas temperaturas, seu elevado módulo de elasticidade, sua grande resistência à tração e ao corte. Por causa destas características, a mesma é utilizada em situações de solicitação bastante intensa como, por exemplo, no revestimento de aeronaves, em roupas de bombeiros e em coletes à prova de balas.

Considera-se, baseado nesta análise das características e exemplos de utilização das fibras aramida, que o concreto com adição deste tipo de fibra poderia, potencialmente, apresentar excelentes qualidades em situações específicas, particularmente quanto à ação do fogo e de impactos.

Tendo verificado que o emprego desta fibra na engenharia civil ainda é muito limitado e considerando que o potencial da mesma parece ser promissor, esta dissertação buscou iniciar o estudo da incorporação dessa fibra ao concreto. Considera-se que um estudo estruturado do comportamento de estruturas de concreto com a adição de fibras de aramida, antes de sua utilização prática, é imprescindível.

Em particular, a resistência ao impacto é uma das características que atraíram a atenção na formulação deste trabalho. Dadas as características do nosso momento histórico, e consideradas as crescentes demandas sobre nossas construções, a resistência a impactos está começando a se constituir num importante critério de projeto para algumas estruturas.

Diante desta consideração, o tema dessa dissertação foi estabelecido tendo como enfoque principal o estudo do potencial de utilização da fibra de aramida associada ao concreto simples, atuando no sentido de gerar um material compósito com alta ductilidade e resistente a impactos.

Como o ensaio de impacto não é costumeiramente realizado, o desenvolvimento e teste de uma metodologia para comparação do desempenho de concretos ao impacto foi estabelecido como um tema secundário para o trabalho.

1.4 HIPÓTESES

A premissa principal desse trabalho é que, com a adição de fibras de aramida dispersas na massa de concreto, o comportamento do compósito formado seja alterado. A partir da mesma foram formuladas as seguintes hipóteses:

- *as fibras aumentam a resistência à tração do compósito, com reflexo na resistência à flexão;*
- *a adição de fibras não provoca acréscimos significativos na resistência à compressão simples;*
- *compósitos com adição de fibra aramida têm comportamento superior, em termos da resistência ao impacto, que compósitos com outras fibras (aço, sisal, polipropileno, vidro), em mesma proporção volumétrica;*
- *a adição da fibra de aramida afeta a trabalhabilidade da mistura e o peso específico do compósito gerado.*

1.5 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho é avaliar o comportamento mecânico básico e a resistência ao impacto de concretos com incorporação de uma fibra de aramida comercial tipo Kevlar 49, analisando se a incorporação deste tipo de fibra se mostra

potencialmente viável.

Os objetivos específicos do trabalho foram formulados da seguinte forma:

- caracterizar o comportamento dos compósitos de matrizes cimentícias reforçados com fibra aramida em relação à resistência à compressão simples e a resistência à tração na flexão, traçando um comparativo com diferentes teores de adição e corpos-de-prova sem adição;
- determinar a alteração na trabalhabilidade e no peso específico das peças devido à adição de diferentes teores de fibra de aramida;
- elaborar e testar um dispositivo para ensaios de impacto em concretos com fibras;
- investigar o desempenho comparativo frente ao impacto de concretos reforçados com diversos tipos de fibra, como a fibra de aço, de sisal, de polipropileno e de vidro, além da fibra de aramida e exemplares sem adição e traçar um comparativo entre os resultados obtidos em relação à resistência a impactos.

1.6 LIMITAÇÕES

Essa pesquisa se propõe a realizar um estudo com corpos-de-prova de concreto simples, utilizando apenas uma relação água-cimento, uma única forma de carregamento e uma vinculação padrão para cada ensaio. Não haverá a consideração dos efeitos da temperatura e da umidade. Como a fibra aramida ainda não é comercializada no Brasil na forma de segmentos curtos para adição ao concreto, os estudos serão efetuados com a incorporação de segmentos obtidos do corte de fios, dispersos aleatoriamente, com comprimento relativamente pequeno, compatível com outras fibras, como a fibra de polipropileno.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Essa dissertação contempla sete capítulos, sendo o Capítulo 1 relativo à introdução do assunto, apresentação dos objetivos e da estrutura do trabalho.

No Capítulo 2 aborda-se o tema dos materiais compósitos, inicialmente com a

conceituação e caracterização de seus constituintes, e prosseguindo com a análise de propriedades, características e formas de utilização dos mesmos. São ainda apresentadas as vantagens e desvantagens desses materiais, sendo enfatizado o tema dos compósitos de matrizes cimentícias reforçados com fibras.

No capítulo 3 apresentam-se as definições básicas das fibras, com ênfase em suas propriedades e classificação. Esse capítulo tem por finalidade revisar como se dá a incorporação de fibras ao concreto, discutindo as características das fibras mais utilizadas.

Ao longo do capítulo 4 é apresentada a fibra de aramida, foco da presente pesquisa, com discussão de sua composição química e sua morfologia, seu desempenho mecânico e suas aplicações.

No capítulo 5 é apresentado o programa experimental, com os ensaios propostos e os materiais utilizados para analisar o comportamento das fibras de aramida dispersas na massa de concreto.

No capítulo 6 são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados e as microscopias da fibra e do compósito.

O capítulo 7 contém a apresentação das conclusões dessa dissertação, e no mesmo são também apontadas sugestões para estudos posteriores sobre o tema abordado.

CAPÍTULO 2 – MATERIAIS COMPÓSITOS

Um concreto com fibras, um botão de camisa, a carroceria de um carro de Fórmula 1 e uma bola de boliche tem algo em comum. Todos são elaborados a partir de materiais compósitos. O conceito de material compósito é fundamental para que se entenda o concreto com fibras. Portanto, este capítulo inicia a discussão sobre a incorporação de fibra aramida ao concreto a partir da apresentação e definição deste conceito. No mesmo são definidas e analisadas, sucintamente, as fases básicas de um material compósito, ou seja, o componente matricial, o componente de reforço e a interface entre eles. Em seguida são abordadas as características dos materiais compósitos, suas vantagens e desvantagens, com especial atenção sendo dirigida à questão das matrizes cimentícias reforçadas com fibras.

2.1 CONCEITUAÇÃO BÁSICA

De forma simplificada, pode-se dizer que materiais compósitos são aqueles constituídos pela combinação de pelo menos 2 materiais, que após a mistura ainda podem ser perfeitamente identificados em sua massa, sendo as propriedades do compósito superiores a de seus constituintes em separado (SANTIAGO, 2002).

A palavra “compósito” tem sua origem na língua inglesa, sendo o termo *composite* definido, em português, pela Prof. Eloísa Mano (MANO, 1991 apud FÉLIX, 2002) como:

“Compósito é uma classe de materiais heterogêneos, tanto em escala macroscópica quanto microscópica; multifásicos, resultantes de uma combinação racional, em que um dos componentes, descontínuo, dá a principal resistência ao esforço (componente estrutural ou reforço) e o outro, contínuo, o meio de transferência deste esforço (componente matricial ou matriz)”.

SCHWARTZ (1984) acrescenta que compósito é um sistema composto pela mistura ou combinação de dois ou mais macroconstituintes, que se diferenciam em forma e/ou constituição, sendo absolutamente insolúveis um no outro, conceito ilustrado na figura 2.1.

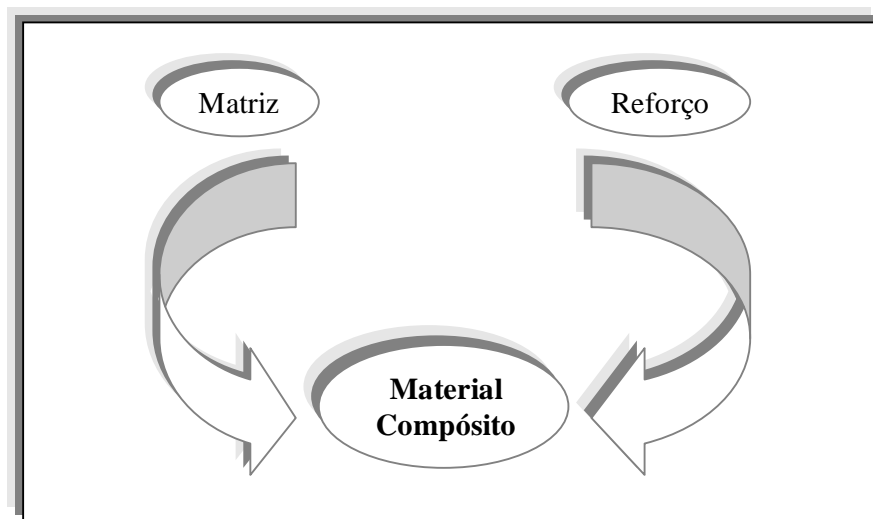


Figura 2.1 -Esquema de formação de um material compósito.

O componente estrutural pode ser um material orgânico ou inorgânico (metálico ou cerâmico), ter forma regular ou irregular, ser fibroso (tecido ou não-tecido) ou pulverulento (esférico ou cristalino), com fragmentos achatados (como flocos) ou como fibras muito curtas, de dimensões quase moleculares, de material cristalino (MANO, 2000). Os materiais estruturais devem ter resistência, rigidez e maleabilidade, o que normalmente se encontra nas fibras. MARTINEAU et. al (2002) ressaltam que, de fato, os materiais compósitos freqüentemente são formados a partir da adição de fibras a uma matriz. As fibras desempenham o papel de suportar as cargas máximas e impedir que as deformações ultrapassem os limites aceitáveis.

Neste trabalho, a atenção será voltada para a utilização de elementos de reforço na

forma de fibras. Neste caso, os fatores principais de controle do desempenho teórico dos materiais compósitos são as propriedades físicas das fibras e da matriz e a resistência da aderência entre ambas, conforme cita HANNANT (1978). Portanto, considera-se necessário discutir brevemente cada um deles, como segue.

2.1.1 COMPONENTE MATRICIAL

Em essência, o componente matricial se constitui no meio de transferência e homogeneização dos esforços suportados pelos componentes de reforço. Este componente pode ser formado a partir de diferentes tipos de materiais de engenharia, desde que estes sejam capazes de cumprir as seguintes funções, segundo MANO (2000):

- manter a orientação das fibras e seu espaçamento;
- transmitir as forças de cisalhamento entre as camadas de fibras;
- fornecer proteção ao elemento de reforço contra danos superficiais.

A matriz de um material compósito pode ser dúctil (tipo orgânica ou polimérica) ou frágil (tais como as cimentícias e as matrizes de vidro). As resinas termofixas ou termoplásticas ocupam papel especial nas pesquisas sobre materiais compósitos. Dentre as resinas disponíveis para este fim se destaca a resina epóxi, que permite a criação de uma matriz com excelente desempenho mecânico, estabilidade e elevada resistência química. Segundo MANO (2000), as resinas epoxídicas são compatíveis com todas as fibras e são as mais utilizadas em compósitos que exigem alto desempenho mecânico. No entanto, a variedade de resinas de base epóxi, juntamente com os diferentes tipos de agentes de cura, podem fornecer, ao compósito, comportamentos distintos, o que pode tornar difícil a especificação desses produtos.

Outro tipo de matriz bastante utilizado na formação de materiais compósitos, e que se constitui no interesse do presente trabalho, é a matriz de base cimentícia. Na indústria da construção civil, a maior razão para o interesse nas fibras é o desejo de aumentar a tenacidade ou melhorar as propriedades de matrizes à base de cimento ou gesso. Segundo HANNANT (1978), os objetivos principais do engenheiro de materiais, na tentativa de modificar as propriedades do cimento ou do concreto, são os que seguem:

- melhorar a resistência à flexão e à tração;

- melhorar a resistência ao impacto;
- controlar a fissuração e o modo de falha por meios de ductilidade pós-fissuração;
- mudar a reologia ou as características de fluxo do material no estado fresco.

O reforço de matrizes cimentícias também é utilizado em outras áreas de aplicação como, por exemplo, na área médico-odontológica. O objetivo da adição é sempre o mesmo, ou seja, a busca de uma melhoria nas propriedades mecânicas do cimento e o aumento da tenacidade à fratura frágil (SANTOS, 2002). Não existe dúvida de que estes objetivos podem ser alcançados, porém um determinado grau de cautela é necessário quanto à questão da compatibilidade matriz-fibra e quanto à questão da durabilidade.

2.1.2 ELEMENTOS DE REFORÇO

O elemento de reforço em materiais compósitos normalmente é formado por fibras, as quais podem ser de vidro, carbono, aramida, polipropileno, aço, crina de cavalo, celulose, entre outras (MARTINEAU et. al, 2002 e SANTIAGO, 2002).

O uso das fibras como material de reforço de matrizes frágeis e as principais características dos materiais fibrosos são assuntos de grande interesse. A idéia de adicionar materiais fibrosos para reforçar materiais frágeis é um exemplo que vem da própria natureza. O João de Barro, por exemplo, usa, de forma bastante eficiente, galhos e folhas de árvores para reforçar a estrutura de barro de seu ninho.

Observando a natureza, o homem aprendeu que fios extremamente finos, independentes do material, alcançam resistências altas, e que o aumento de resistência, nestes casos, passa a ser não-linear, com a resistência aumentando proporcionalmente muito mais quando se reduz muito a área (VASCONCELOS, 1994). Este comportamento encontra base de explicação na teoria de defeitos. Fios finos apresentam uma percentagem de defeitos muito pequena, o que colabora para evitar as reduções na resistência causadas pela presença dos mesmos, ocorrência natural em seções maiores. No exemplo da aranha, observa-se que a mesma produz numerosas feiras simultaneamente, com diversos fios de diâmetros muito pequenos, os quais juntos constituem um cordão de resistência muito elevada. Se a mesma produzisse um só cordão, com diâmetro final igual à soma dos demais, a resistência não seria tão elevada, pela maior possibilidade de defeitos na seção transversal do fio. Usando a estratégia de associar filamentos muito

finos, a aranha consegue produzir um fio com resistência superior à do aço comum de construção.

Segundo comenta o CEPED (1982), a incorporação de fibras em materiais pouco resistentes à tração já vem sendo usada pela humanidade há milênios. No Antigo Testamento se encontram referências sobre a necessidade de se adicionar palha aos tijolos, para evitar a retração do material. ACCETTI et. al (2000) também citam como exemplo desta arte a produção de adobe, outra prática bastante antiga.

Como seria de se esperar, o uso das fibras como material de engenharia foi iniciado com o emprego das fibras naturais. A descoberta de fibras minerais ou artificiais, entretanto, provocou um enorme impacto em vários hábitos de nosso cotidiano e nas diferentes atividades do homem, gerando mudanças profundas na humanidade (AGUIAR NETO, 1996). Dentre as fibras minerais destacou-se o uso das fibras de asbestos, que tiveram grande impacto na área da construção sob a forma de cimento amianto. A utilização desse material, porém, foi posta em dúvida pelos problemas cancerígenos associados à extração e manipulação da fibra.

De acordo com NAAMAN (1985, apud ACCETTI et al. 2000), a primeira patente de materiais compósitos de base cimentícia reforçados com fibras data de 1874, quando foi proposta a adição de sucata de ferro ao concreto, uma idéia precursora do concreto armado.

Embora usados nas construções há milênios, os materiais fibrosos tiveram seu grande desenvolvimento na área das Engenharias mecânica, aeroespacial, aeronáutica e bélica, a partir da Segunda Guerra Mundial. Por isso, a maior parte das pesquisas foi realizada com base em matrizes metálicas e poliméricas (KERN, 1999).

Segundo ACCETTI et. al (2000), a data que pode ser tomada como base para o surgimento do conceito de materiais compósitos, nos moldes atuais, é 1960. Antes dessa data, observa-se uma fase com poucas aplicações práticas. Após esse marco, constata-se um número muito superior de aplicações, devido ao maior desenvolvimento industrial.

A função principal das fibras é a de reforçar mecanicamente matrizes frágeis, como as matrizes de cimento, cal ou gesso, por exemplo. MARTINEAU et al. (2002) acrescentam que a ação das fibras nos materiais compósitos é impor um obstáculo à propagação de fissuras. Segundo TANESI e AGOPYAN (1997) e MATSUMOTO e LI (1998, 1999), as fibras funcionam como uma ponte de transferência dos esforços através da fissura, garantindo assim uma capacidade resistente após a abertura da mesma.

Quando surge a primeira fissura em um compósito sem adição de fibras, a abertura progressiva dessa fissura dá origem ao colapso da peça. Todavia, nos materiais com a presença de fibras em sua mistura, a fratura é retardada. A ruptura torna-se um processo progressivo, pois as pontes de transferência formadas pelas fibras absorvem parte das solicitações e originam uma fissuração mais distribuída. O que se verifica em materiais reforçados com fibras é que o número de fissuras aumenta, contudo a abertura dessas fissuras torna-se menor, reduzindo a área total de fissuração. Observa-se também que o aparecimento das primeiras fissuras devido à retração é retardado (SWAMY e STRAVIRDES, 1979 e KOVLER et al., 1992 apud TANESI, 1997).

2.1.3 INTERFACE MATRIZ-ELEMENTO DE REFORÇO

Sendo os compósitos materiais multifásicos, a questão da aderência entre o reforço e a matriz é crucial. De acordo com MANO (2000), a interface entre os elementos apresenta influência dominante sobre as características do conjunto, sendo tão importante quanto as propriedades e características dos materiais empregados. HANNANT (1978) enfatiza que os fatores principais de controle do comportamento teórico de um compósito são as propriedades físicas das fibras e da matriz e a força de aderência entre ambas.

A principal função da interface é permitir que ocorra uma adequada transferência dos esforços entre o reforço e a matriz. Conseqüentemente, ela é a principal responsável pela existência de um trabalho conjunto.

Na teoria, geralmente se aceita a premissa de que fibras de maior desempenho tendem a fornecer compósitos de maior desempenho. Porém, isso não ocorre, necessariamente, desta forma. De acordo com HANNANT (1978), a maioria das fibras é arrancada, demonstrando assim que o fator crítico não é a resistência da fibra e sim a eficiência da aderência desta à matriz. BANTHIA e TROTTIER (1994, apud BINDIGANAVILE e BANTHIA, 2001) demonstraram que a geometria e orientação da fibra, e a resistência da matriz, influem diretamente no comportamento de aderência (*bond-slip strength*) e que uma abordagem conjunta é essencial na estimação da resposta de aderência fibra-matriz.

A aderência entre os elementos pode ser mecânica ou físico-química e está centrada nas

características da interface entre eles. Um fator que contribui para uma maior adesão na interface é a atração física entre os átomos polares da matriz e da superfície inorgânica de algumas fibras (FÉLIX, 2002). Essas forças de baixa energia ocorrem somente quando ambos os componentes apresentam similaridade química. Outro fator importante é a possibilidade de existência de ligação química entre os componentes, quando um dos grupos presentes na matriz é capaz de reagir com os grupos polares existentes nas fibras.

PLUEDDEMAN (1982, apud FÉLIX 2002) explica que a interação química entre as superfícies permite que as tensões mecânicas sofridas pelo material sejam transferidas com mais eficiência da matriz para o reforço, fazendo com que melhorem as propriedades mecânicas do material.

Essa idéia vem alimentando o desenvolvimento de tecnologias para incrementar a adesão ou aderência da fibra à matriz. Já se encontram disponíveis comercialmente várias fibras pré-tratadas superficialmente com agentes de adesão específicos, com o intuito de melhorar a aderência do reforço com a matriz e garantir uma melhor transferência dos esforços.

De acordo com SANTOS (2002), problemas associados com o descolamento na interface matriz-fibra também podem ser prevenidos pela utilização de materiais com baixos valores de coeficiente de Poisson. Isto significa que, quando solicitadas, elas não vão variar intensamente sua seção transversal, prevenindo problemas de aderência.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Muitas variáveis necessitam ser consideradas quando se busca caracterizar o desempenho potencial de um material compósito. FÉLIX (2002) considera que a caracterização das propriedades mecânicas e reológicas de um compósito é função da fração volumétrica, da distribuição e da orientação das fibras, as quais são definidas durante o processo de fabricação. Como explicam TANESI e AGOPYAN (1997) as etapas de fabricação e a natureza do processo são críticas, porque as propriedades e o comportamento do compósito dependem não só das características da matriz, mas também da orientação e dispersão das fibras. De forma geral, pode-se dizer que, dentre as variáveis que devem ser analisadas para a caracterização de um compósito, além do

tipo de matriz, do tipo de reforço e da interface entre eles, discutidos no item 2.2, destacam-se o teor de fibra, seu volume relativo e a sua distribuição dentro da matriz. Cada uma destas é discutida brevemente a seguir.

2.2.1 TEOR DE FIBRA

Por definição, as propriedades mecânicas dos compósitos são dependentes do teor de fibras presente no material, visto que estas formam o componente estrutural. Em princípio, quanto maior o teor de fibras, melhor será o desempenho, pois maior será o número de fibras que intercepta cada microfissura, evitando a propagação das mesmas. É dessa maneira que as fibras melhoram a eficiência no controle da fissuração da matriz. Como o carregamento imposto à matriz é parcialmente transferido para as fibras, que passam a absorver parte das tensões internas, o aumento do teor de fibra resulta ainda, na maioria dos casos, no aumento do módulo de elasticidade e da tensão máxima do compósito, devido ao aumento da contribuição de resistência mecânica da fibra nas propriedades mecânicas do material compósito (FU, 2000 apud FÉLIX, 2002).

Um fator que pode ser importante na definição do comportamento que será obtido, entretanto, é o processo de fabricação. Em compósitos laminados com fibra de vidro, as propriedades mecânicas seguem linearmente a regra da mistura, para proporções entre 20 a 30% em volume de fibra. Entretanto, VU-KHANH e RAMSTEINER (1991 e 1981, apud FÉLIX, 2002) observaram que, para compósitos extrudados ou injetados, se constata uma redução das propriedades mecânicas com o aumento do teor de fibras. Esta diferença de comportamento, segundo FU et. al (2000, apud FÉLIX, 2002), pode estar associada a variações no comprimento da fibra. Como será discutido no capítulo 3, o comprimento da fibra é um dos fatores mais importantes para seu desempenho. A utilização de fibras muito curtas pode diminuir a eficiência do reforço, pois as mesmas não conseguem boa ancoragem nas bordas das fissuras. O problema é que o aumento do teor de fibra, em alguns casos, está associado a uma diminuição do comprimento médio das mesmas, o que propicia uma concentração das mesmas. Com o aumento da concentração de fibras, a resistência do compósito tende a sofrer incrementos cada vez menores. Isto introduz o conceito de um volume máximo de fibras, ou seja, da máxima quantidade de fibras que pode ser adequadamente incorporada à matriz, como discutido

a seguir.

2.2.2 VOLUME LIMITE E VOLUME CRÍTICO DE FIBRAS

Segundo o CEPED (1982), a resistência dos compósitos aos esforços de tração cresce linearmente com o volume de fibras adicionado, até atingir um valor limite. Esse limite é determinado pela quantidade de fibras que pode ser adicionada de modo a se obter uma dispersão uniforme das mesmas na matriz.

Outro conceito importante é o de volume crítico de fibras, isto é, o volume mínimo para que seu efeito seja significativo. Como explicam BALAGURU e SHAH (1992, apud TANESI et. al, 1997), a influência das fibras na resistência à compressão e à tração de um compósito é pequena quando o volume de adição está abaixo do volume crítico. O volume crítico varia com o comprimento, o diâmetro e o tipo de fibra e com o método de fabricação utilizado.

Desta forma, as porcentagens viáveis, em volume, de incorporação de fibras (isto é, que efetivamente contribuem no acréscimo da resistência à tração da matriz) estão compreendidas numa faixa de valores entre o volume crítico e o volume limite de fibras. O valor mínimo necessário da fração volumétrica de fibras (V_{cr}), para o compósito suportar a carga após a fratura da matriz, é dado pela seguinte expressão adaptada de BEAUDOIN (1990):

$$V_{cr} = \frac{\sigma_{mu}}{\sigma_{mu} + (\sigma_{fu} - \sigma'_f)} \times 100 \quad (\text{equação 2.1})$$

onde:

σ'_f = tensão nas fibras quando a matriz fissa; σ_{mu} = tensão última da matriz;

σ_{fu} = tensão última da fibra.

Utilizando esta equação, BEAUDOIN (1990) estima volumes críticos de 0,31% para as fibras de aço, 0,40% para as fibras de vidro e 0,75% para as fibras de polipropileno, para os valores de resistência à tração das matrizes com que trabalhou.

Por outro lado, cabe lembrar que a adição de fibras a matrizes cimentícias reduz a trabalhabilidade, independentemente do tipo de fibra. Segundo METHA et. al (1994),

essa redução é proporcional à concentração volumétrica de fibras no concreto. Ou seja, volumes elevados de fibras devem ser usados com cautela, pois podem causar problemas de homogeneidade. Além do volume de fibra no compósito, é necessário ainda verificar qual a orientação das fibras na matriz.

2.2.3 ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS

Além do percentual de fibra existente em uma determinada seção transversal do compósito, a orientação das mesmas é determinante na resistência à flexão, à compressão, à tração e ao cisalhamento do mesmo. De acordo com FÉLIX, (2002), os compósitos com fibras apresentam alto caráter anisotrópico, sendo suas propriedades mecânicas e reológicas diretamente influenciadas pela orientação das fibras.

Os compósitos formados por fibras longas normalmente se apresentam com um grande grau de orientação, porque as fibras tendem a se alinhar na direção maior. Já os compósitos de fibras curtas apresentam fibras orientadas em diversas direções, podendo, entretanto, estas apresentarem uma orientação predominante, em função dos processos de mistura e adensamento.

TUCKER (1994, apud FÉLIX, 2002) destaca que o máximo desempenho, em termos de resistência, de um compósito de fibras curtas, é obtido quando as fibras estão orientadas completamente.

2.3 DESEMPENHO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA REFORÇADOS COM FIBRAS

Como já discutido, o uso de fibras em estruturas de concreto armado tem se mostrado um mercado bastante atraente. O emprego das mesmas permite alterar as características dos compósitos formados e, segundo KERN (1999), possibilita a melhoria de várias propriedades mecânicas das matrizes frágeis, potencializando um aumento das resistências à tração, à flexão e ao impacto, uma melhora na ductilidade e um controle no surgimento de fissuras.

No caso específico das matrizes cimentícias, as fibras colaboram para diminuir a

fissuração por retração e, conseqüentemente, aumentar a durabilidade do compósito. Além disso, aumentam a resistência ao impacto e ao fogo e incrementam a resiliência. A influência da adição de fibras em algumas dessas propriedades será discutido nesse item.

2.3.1. RESISTÊNCIA À RUPTURA

Segundo NARAYANAN (1986, apud BARROS 1996b), a resistência à tração de um compósito aumenta com a percentagem, esbeltez e capacidade de fixação da fibra à matriz. Além disso, a resistência depende consideravelmente do método de fabricação do compósito, como já discutido. Quanto mais eficaz for o método, em termos de dispor a maior percentagem possível de fibras segundo a direção das tensões de tração, maior será o aumento da resistência.

METHA et. al (1994) acrescentam que não se observa um aumento significativo nas resistências últimas com a adição de fibras, embora as deformações de tração na ruptura aumentem. Para BENTUR e MINDESS (1990, apud TANESI e AGOPYAN, 1997), o aumento da resistência é notado apenas com a adição de teores elevados de fibras com elevada resistência à tração. Isso se deve à capacidade desses compósitos de manter uma parcela de sua capacidade resistente mesmo após o aparecimento da primeira fissura e devido à redução da fissuração. Entretanto, existem limitações no volume de fibras que pode ser incorporada devido a questões de trabalhabilidade e custo, como já enfatizado. Em geral, a literatura indica que o aumento da resistência à tração normalmente não supera 20% quando são adicionados teores menores que 2%, os quais são os teores usualmente praticados. Segundo KERN (1999), o comportamento à tração na flexão é bastante modificado com a adição de fibras, sendo que o compósito resultante apresenta comportamento semelhante aos materiais fibrosos, apresentando deformação plástica considerável após o início da fissuração da matriz, ao invés de apresentar ruptura brusca. TANESI e AGOPYAN (1997) citam os resultados obtidos por BENTUR e MINDESS (1990), onde adições de fibras em teores superiores a 1% causam aumentos significativos da capacidade de absorção de energia na tração por flexão.

Na maior parte dos casos, a resistência à compressão aumenta ligeiramente com a percentagem e esbeltez das fibras, sendo mais significativo o aumento registrado com a

percentagem do que com a esbeltez (BARROS, 1996b). Verifica-se também que as fibras com melhores propriedades de fixação à matriz conduzem a maiores aumentos da resistência à compressão (NARAYANAN, 1986 e OTTER, 1986 apud BARROS, 1996b).

2.3.2 CAPACIDADE DE DEFORMAÇÃO OU ALONGAMENTO

Segundo SANTOS (2002), quanto maior a razão entre o módulo de elasticidade da matriz e da fibra, maior será a transferência de tração da matriz para as fibras. Por isso, fibras com altos valores de deformação na ruptura resultam em uma elevada capacidade de deformação do compósito. BATSON (2002) acrescenta que, quando uma peça de concreto reforçada com fibra está sob carregamento de flexão, dois estágios de comportamento podem ser observados na curva carga-deformação. A curva apresenta um comportamento aproximadamente linear até um ponto específico e não-linear a partir desse ponto, até atingir o ponto máximo de deformação. O ponto de transição indica a “resistência à primeira fissura” ou “limite elástico” ou “limite proporcional”.

De acordo com HANNANT (1978), é necessário enfatizar o comportamento pós-fissuração no tratamento teórico, pois o efeito das fibras é percebido mais claramente após o pico de carga. Os alongamentos na ruptura de todas as fibras são duas ou três vezes maiores do que a capacidade de deformação na ruptura da matriz. Portanto, a matriz irá fissurar muito antes da resistência final da fibra ser alcançada. Esta é uma característica importante para a estabilidade da estrutura. METHA et. al (1994) comentam que os concretos reforçados com fibras continuam a resistir a cargas consideráveis, mesmo com deformações bastante superiores à deformação de fratura do concreto convencional.

O alongamento e a elasticidade das fibras devem ser considerados em conjunto nessa avaliação de sua capacidade de proporcionar um bom comportamento frente à deformação do compósito. Algumas fibras com baixo alongamento apresentam uma excelente elasticidade. Uma fibra com alongamento elevado, porém com potencial de recuperação elástica baixo, pode tornar-se indesejável, pois o material pode não retornar à sua dimensão original após a deformação (AGUIAR NETO, 1996).

2.3.3 TRABALHABILIDADE

Segundo TANESI et. al (1997), uma das propriedades que é alterada nas misturas de concreto com fibras é a trabalhabilidade. Ela não é influenciada apenas pelo teor de adição, mas também pelo formato da fibra, seu diâmetro e seu comprimento.

O ACI (1986b) salienta que, para que a adição das fibras seja eficiente como reforço da matriz, é necessário que a aglomeração das mesmas seja impedida durante o processo de mistura. SWAMY (1974) afirma que o aumento da esbeltez e da percentagem de fibras e o tamanho e quantidade de inertes graúdos intensificam a tendência para a aglomeração das fibras, diminuindo, conseqüentemente, a trabalhabilidade da mistura.

No caso específico do concreto projetado com fibra, as principais dificuldades estão relacionadas com o empelotamento das fibras e a redosagem do aditivo (ARAÚJO DA SILVA, 2002). O empelotamento pode ser amenizado com o volume de fibras, a qualidade da mistura e os valores do fator de forma, que é dado pelo quociente do comprimento da fibra pelo diâmetro da mesma.

2.3.4 TENACIDADE - IMPACTO

Segundo AMAT et. al (1997, apud PUERTAS, 2000), a tenacidade é uma propriedade do compósito e seu valor depende não somente do volume, comprimento e tipo de fibra, mas também das características da matriz. BEAUDOIN (1990) comenta que a incorporação de fibras em matrizes cimentícias frágeis tem a função de aumentar a tenacidade do compósito através do processo de controle da propagação das fissuras resultantes e do aumento das resistências à tração e flexão. KELLY (1970, apud SANTOS, 2002) confirma que a incorporação de fibras em matrizes frágeis de cimento serve para aumentar a tenacidade à fratura do compósito pelo processo de freagem da fissura. Uma conseqüência direta do aumento da tenacidade, portanto, é a diminuição da fissuração.

A resistência ao impacto também é afetada pela adição de fibras, mesmo em baixos teores, sendo possível notar um incremento no número de impactos até a ruptura. A presença de altos teores de fibra, além de aumentar a capacidade portante após a fissuração, como salientam BENTUR e MINDESS (1990), colabora para que o

compósito seja capaz de absorver uma quantidade maior de energia, que é utilizada para a deformação, arrancamento e ruptura das fibras (VONDRAN et. al, 1989 apud TANESI et. al, 1997).

2.3.5 PROPAGAÇÃO DE FISSURAS

O concreto, após seu lançamento e adensamento, começa a sofrer as reações de hidratação, que são exotérmicas, liberando calor. Esse fenômeno pode causar o aparecimento de microfissuras (GREGORY, 2002). A propagação rápida dessas fissuras é responsável pela diminuição da resistência à tração do material. É razoável supor que a resistência do concreto a este tipo de degradação possa aumentar substancialmente com a introdução de fibras, pois as mesmas podem impedir a propagação das microfissuras, retardando o início das fissuras por tração.

As matrizes de cimento sem reforço apresentam um comportamento mecânico frágil, com baixa resistência e reduzida capacidade de deformação plástica quando submetidas à tração (TANESI et. al, 1997). O reforço com fibras descontínuas e aleatoriamente distribuídas desempenha um papel importante no controle de propagação de fissuras, alterando assim o comportamento mecânico do compósito após a ruptura da matriz, aumentando a sua tenacidade, ou seja, a sua capacidade de absorver energia (BENTUR e MINDESS, 1990 apud TANESI, et. al, 1997 e METHA et. al, 1994). Tal efeito ocorre porque as fibras atuam como ponte de transferência de esforços através da fissura, garantindo assim a capacidade resistente da seção.

De acordo com SARIGAPHUTI et. al (1993, apud TANESI et. al, 1997), o controle da fissuração por retração plástica talvez seja o aspecto mais significativo dos compósitos reforçados com fibras. Nesse controle está implícita a habilidade de causar uma melhor distribuição das fissuras, provocando em certos casos o aumento na quantidade de fissuras, mas diminuindo a área de abertura total delas.

2.3.6 FADIGA E COMPORTAMENTO FRENTE A ESFORÇOS DINÂMICOS

Observa-se também um aumento da resistência à fadiga dos compósitos com a adição de fibras, sendo registrados incrementos da ordem de 30% (VONDRAN et. al, 1989

apud TANESI et. al, 1997). O aumento da capacidade de deformação dos compósitos com adição de fibras se reflete na melhoria de seu comportamento frente a carregamentos dinâmicos.

2.3.7 RESISTÊNCIA AO FOGO

A resistência ao fogo dos compósitos reforçados com fibras não é diferente dos compósitos sem a presença delas. A vantagem da presença de fibras de baixa resistência térmica, como as de polipropileno é que, para temperaturas médias em torno de 150°C, elas se volatilizam, deixando vazios finos e abrindo uma porosidade adicional para alívio das tensões causadas pela evaporação da água e pelas deformações térmicas.

Como demonstrado por LIMA (2003), estes espaços gerados são fundamentais para permitir a migração da água aprisionada, especialmente em concretos de maior densidade, diminuindo as tensões geradas pela passagem da água do estado líquido para o gasoso e evitando o *spalling*.

Como ilustração, na tabela 2.1 apresentam-se as características das fibras de maior importância industrial para uso na fabricação de compósitos, contendo suas densidades, resistências à tração, módulo de elasticidade e temperatura de fusão.

Tabela 2.1 – Características das fibras utilizadas em compósitos
(extraído de MANO, 2000)

Fibra	Densidade (g/cm³)	Resistência à tração (GPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Temperatura de fusão (°C)
Vidro	2,5-2,6	3,5-4,5	73-87	> 700
Cerâmica	2,5-4,0	2,4-20,0	430-450	Infusível
Carbono	1,7-1,9	2,1-2,8	230-400	Infusível
Poliamida Aromática	1,4-1,5	2,7-3,5	60-130	Infusível
Aço	7,7	4,4	2.000	1.400-1.500
Boro	2,6	3,9	410	2.300

2.3.8 MECANISMOS DE FRATURA

Uma fibra, quando incorporada em uma matriz qualquer, contribui para aumentar a

capacidade de suportar esforços, pois parte da carga é transferida pela matriz para a fibra por deformação de cisalhamento na interface matriz/fibra. A transferência de carga se origina normalmente de diferenças nas propriedades físicas da fibra e da matriz e se intensifica após a fissuração da matriz.

De acordo com SANTOS (2002), diferentes mecanismos de fratura do compósito podem ocorrer, dependendo das diferenças de propriedades mecânicas e geometria entre a matriz e a fibra. Ele afirma que existem várias formas possíveis de fratura em compósitos, desde a ruptura da matriz ou da fibra por tração, passando pelo arrancamento (*pull-out*) ou escorregamento de fibras e pela ruptura devido a defeitos significativos nas mesmas.

Cabe salientar que normalmente o comprimento das fibras é pequeno e sua aderência à matriz não é perfeita, o que não garante um engastamento eficaz da mesma. Desta forma, o colapso dos compósitos usualmente ocorre pelo arrancamento das fibras e não pela sua ruptura (TANESI et. al, 1997). Não se pode, portanto, em um projeto, considerar que a fibra será solicitada até o limite de sua capacidade.

SANTOS (2002) ressalta que teorias para a previsão do comportamento mecânico de compósitos cimentícios foram modificadas para considerar problemas de interação fibra-fibra, orientação, comprimento das fibras e defeitos superficiais existentes nelas. Para ele, diferentes mecanismos podem operar durante a fratura do compósito, dependendo das variações nas propriedades mecânicas e geométricas da matriz e da fibra.

Basicamente, para THOMASON (1997, apud FÉLIX 2002) e BARROS (1996b), existem dois tipos de comportamento dos compósitos na ruptura. O primeiro é a ruptura, quando o processo de fratura do material provoca fratura na seção transversal da fibra. O segundo é o arrancamento (*pull-out*), quando o processo da fratura arranca a fibra da matriz, resultando em espaços vazios na matriz. Esses processos contribuem na absorção de energia de impacto do compósito. Para aumentar a resistência do compósito devem-se empregar fibras de elevada resistência e de esbeltez suficientemente elevada para induzir a ruptura do compósito por escoamento das fibras. O modo de ruptura dos compósitos por arrancamento ou escorregamento das fibras impede que se atinja o principal benefício do reforço das fibras, que é o considerável aumento da capacidade de absorção de energia do material.

De acordo com REDON et al. (1999), para a compreensão da evolução da fratura é

necessário focar os micromecanismos que ocorrem na interface, junto à superfície da fibra. Modelos teóricos do reforço com fibras em matrizes de cimento geralmente assumem que são usadas fibras descontínuas, que se encontram alinhadas e uniformemente distribuídas na matriz. Segundo SANTOS (2002), também é considerado que fibra e matriz se comportam elasticamente até a ruptura. Por isso, a interface fibra-matriz é modelada como uniforme e contínua. Esses conceitos não podem ser estritamente aplicáveis em matrizes de cimento hidratado que contenham microporosidade.

De acordo com SANTOS (2002), no caso de ocorrência do mecanismo de arrancamento, é necessário que as fibras sejam menores que um certo tamanho crítico. Aumentando-se o coeficiente de aspecto (relação entre o comprimento e o diâmetro das fibras), o comprimento e a fração volumétrica das fibras, observa-se um aumento da resistência a tensões de tração e flexão do compósito.

BINDIGANAVILE e BANTHIA (2001b) afirmam que o comportamento da fibra depende enormemente do seu mecanismo de fratura. Em alguns casos, sob impacto, uma alteração no modo de arrancamento da fibra ocorre, mudando de um arrancamento completo para uma fratura frágil da fibra. FÉLIX (2002) também alerta para problemas de fratura da fibra durante o processo mecânico de mistura, devido à interação da fibra com as superfícies do equipamento ou com os agregados graúdos do concreto.

2.4 COMPETITIVIDADE DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

Segundo MARTINEAU et al. (2002), as vantagens do uso dos compósitos incluem o fato de que os mesmos apresentam excelente desempenho mecânico e boa durabilidade, são adequados para as técnicas de construção moderna, apresentam fácil manutenção e são fáceis de montar e manipular, por serem leves. Além disso, a possibilidade de fabricação para atender requisitos específicos de desempenho se constitui em uma das características mais atraentes destes materiais. Segundo AL-QURESHI (2002), é possível projetar um compósito combinando materiais metálicos, cerâmicos ou polímeros, podendo ser obtidos produtos extraordinários.

Os compósitos têm mais de 40 mil aplicações diferentes, em setores diversos como agricultura, saneamento, transportes, indústria aeronáutica, automobilística e construção

civil. De acordo com MANO (1999), atualmente são comercializadas aproximadamente 18 milhões de toneladas de fibras naturais e 16 milhões de toneladas de fibras sintéticas por ano no mundo.

Para AL-QURESHI (2002), a grande vantagem dos materiais compósitos é que eles agregam as melhores propriedades de seus constituintes. Podem ser translúcidos, apresentam isolamento térmica, possuem baixa densidade, características mecânicas elevadas, excelente comportamento contra corrosão, podem ser utilizados em meios agressivos, podem ser isolantes térmicos e elétricos, são transparentes às ondas eletromagnéticas, apresentam boa durabilidade e apresentam liberdade de projeto, podendo assumir formas complexas e receber acabamentos diversos e variados. Acrescenta ainda que o sucesso dos materiais compósitos pode ser atribuído às seguintes características: baixa massa específica, alta resistência específica, alta rigidez específica, grande resistência à fadiga, possibilidade de escolha da orientação da fibra, versatilidade de projeto, larga variedade de combinações de fibras e matrizes, grande resistência à corrosão, estabilidade dimensional, baixa transmissão de ruídos, pequena quantidade de energia requerida no processo de fabricação e durabilidade elevada.

Para concretos projetados, segundo ARAÚJO DA SILVA (2002), cada tipo de fibra tem uma utilização específica e determinada. Além da redução da largura da fissura, o emprego das fibras objetiva a redução do tempo de execução, do custo da mão-de-obra e no tempo de uso dos equipamentos. Com sua utilização se obtém um aumento na tenacidade do concreto (ductilidade), redução da fissuração devido à retração plástica (para fibras plásticas) e à retração por secagem (para fibras de aço) e aumento da resistência a impacto. Salienta, entretanto, que as fibras não devem ser empregadas com a finalidade de aumento de resistência, porque a relação custo-benefício é muito alta para essa finalidade.

Apesar deste grande potencial, a falta de informação técnica e de estudos específicos sobre as características dos diferentes compósitos ainda é grande. Segundo MARTINEAU et. al (2002), por serem os compósitos materiais relativamente novos, observa-se uma falta de cultura quanto ao seu uso.

SANTIAGO (2002) acrescenta que os principais inconvenientes dos compósitos são o custo elevado, a inexistência de normas, a dificuldade de reciclagem e a falta de informações sobre sua durabilidade, além do fato de que não são cobertos por alguns agentes seguradores e que apresentam baixa resistência ao calor e um comportamento

inadequado aos raios UV.

BAZIN (2002) afirma que é difícil prever o comportamento e desempenho dos materiais compósitos para a obtenção de uma caracterização confiável do material. Destaca ainda que outro ponto que demanda atenção especial é a proteção ao fogo.

Por fim, KASWELL (1953) salienta que quase todas as fibras absorvem água, o que pode afetar sua durabilidade ou estabilidade volumétrica. No entanto, estas tendências devem ser analisadas caso a caso. A fibra de celulose nativa, por exemplo, assim como o algodão, aumenta sua resistência com o aumento da umidade relativa, enquanto que as fibras artificiais diminuem.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As linhas de pesquisa sobre compósitos atualmente buscam tentar prever o comportamento mecânico e físico-químico destes materiais. Há um número significativamente grande de matrizes e reforços de diferentes tipos de fibras, desde as sintéticas até as naturais, que podem ser aplicadas para a obtenção de um compósito. Entretanto, segundo FÉLIX (2002), as características finais do produto dependem das propriedades e da geometria das fibras, das características da matriz utilizada, assim como da proporção dos materiais. Isto justifica analisar os vários tipos de fibra disponíveis. No próximo capítulo, serão abordadas as fibras comercialmente utilizadas em estruturas de concreto, com o objetivo de estabelecer uma comparação entre as mesmas e a fibra de aramida, devido à falta de dados na bibliografia em relação à fibra de aramida.

CAPÍTULO 3 – TIPOS E CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS MAIS UTILIZADAS PARA REFORÇO DE MATRIZES CIMENTÍCIAS

Este capítulo apresenta uma revisão sumária das fibras disponíveis mais utilizadas para fabricação de concretos com fibras. O capítulo se inicia com a apresentação dos conceitos básicos que definem o conceito do que é uma fibra, prossegue com a análise das principais propriedades das fibras e com a apresentação de um esquema de classificação das mesmas. São depois discutidos os tipos de fibra mais utilizados, com destaque para os selecionados para o programa experimental. Considera-se que esta revisão sobre fibras em geral é importante para estabelecer comparações com o desempenho da fibra aramida.

3.1 DEFINIÇÕES BÁSICAS

Segundo MANO (1999), fibra é um termo geral que designa um corpo flexível, cilíndrico, pequeno, com seção transversal reduzida e elevado fator de forma (relação entre o comprimento e o diâmetro). De acordo com SANTOS (2002), uma das condições necessárias para que um material seja considerado como fibra é que seu comprimento seja pelo menos 100 vezes maior do que seu diâmetro médio.

A fibra pode ser apresentada na forma de fio e tecido. Para que se possa entender melhor as diferenças entre essas duas formas, a seguir será abordada cada uma delas. Em relação aos fios será focado o seu diâmetro e para os tecidos, o poder de

cobertura, urdume e gramatura.

3.1.1 FIOS

Uma confusão constante ocorre entre os termos fio, filamento e fibra. Segundo FERREIRA (198-), as melhores definições para cada um deles são:

- fio: fibra que se extraiu de plantas têxteis. Linha fiada e torcida. Fieira, enfiada, fiada. Porção de metal, muito flexível, de seção circular de diâmetro muito reduzido em relação ao comprimento. Eixo, alinhamento. Denominação comumente usada para indicar os fios de aranha utilizados no micrômetro; fios do micrômetro.

- filamento: fio de pequeníssimo diâmetro.

- fibra: cada uma das estruturas alongadas que, dispostas em feixes, constituem tecidos animais e vegetais ou certas substâncias minerais. Qualquer filamento ou fio. Célula muito mais comprida do que larga, comuníssima como constituinte normal do corpo vegetal.

De acordo com AGUIAR NETO (1996), fios podem ser considerados como conjuntos de fibras entrelaçadas que formam cilindros com diâmetros irregulares ao longo de seu comprimento. Foi em 1665, que o inglês Robert Hooke estudou a possibilidade de tecer um fio por meios artificiais, do mesmo modo que o bicho da seda faz por meios naturais ERHADT (1975). Neste trabalho será adotada esta terminologia.

3.1.2 TECIDOS

Os tecidos são outra forma de apresentação de fios. A preparação e o comportamento de uma estrutura têxtil é dependente da combinação das propriedades da fibra e dos arranjos geométricos das mesmas no fio e dos fios no tecido. De acordo com KASWELL (1953), a característica mais significativa das fibras é a habilidade delas de serem convertidas em fios, podendo estes ser convertidos em tecidos.

A indústria têxtil emprega fibras para a produção de dois tipos de tecidos (*fabrics*): de textura regular e de textura irregular. No primeiro caso, as fibras cortadas são torcidas, formando fios contínuos, os chamados multifilamentos, os quais podem ser submetidos a entrelaçamento ortogonal, com fios longitudinais compondo a trama (*woof*) e fios

transversais que formam a urdidura ou urdume (*warp*), resultando o tecido conhecido por pano ou fazenda (MANO et. al, 1999). Pode ainda um único multifilamento ser submetido a enlaçamento, dando origem às malhas (*knitting*). No segundo caso, as fibras cortadas são distribuídas irregularmente sobre telas, formando mantas, feltros (*felt*) ou, genericamente, os tecidos não-tecidos (*non-woven fabric*).

A forma física da fibra, sua seção transversal, seu contorno e irregularidades superficiais são responsáveis pelas diferenças no fio. As propriedades inerentes dos fios afetam a fabricação e as propriedades últimas da estrutura têxtil. SCHWARTZ (195-, apud KASWELL, 1953) explica que os fios constituem as unidades básicas que transmitem as propriedades das fibras para os tecidos. Suas geometrias e estruturas podem ser manipuladas de forma a modificar o comportamento dos tecidos pela redução ou exaltação das propriedades das fibras usadas. Além do mais, a forma assumida pelo fio tem efeito considerável sobre a textura e a estrutura do tecido. AGUIAR NETO (1996) afirma que, tecidos elaborados com mesmo número de fios de trama e urdume, e mesma massa em área, podem apresentar diferenças na aparência, flexibilidade e permeabilidade, dependendo do tipo de fibra.

De acordo com CASATI (2002), a forma de tecelagem também afeta as características do tecido. A gramatura de um tecido define sua resistência à tração e ao impacto. O tipo de acabamento fornece a firmeza do tecido, a resistência química e a resistência à alcalinidade.

3.2 PROPRIEDADES E CLASSIFICAÇÃO DAS FIBRAS

De acordo com BARROS (1996b), o comportamento dos materiais compósitos de matrizes cimentícias depende dos elementos constituintes da matriz, das propriedades mecânicas e características geométricas das fibras e da composição e processo de fabricação desses compósitos. Dentre as propriedades mecânicas das fibras, são de especial relevância a resistência e rigidez. A esbeltez, o fator de forma, o volume e as características de superfície são os parâmetros geométricos de maior importância.

Como visto no item anterior, as propriedades de um fio são determinadas pelas propriedades da fibra. Já as propriedades de uma fibra são determinadas pelas propriedades do material constituinte.

Sob o ponto de vista têxtil, uma fibra, seja ela natural ou sintética, deve apresentar certas propriedades consideradas essenciais. Essas propriedades podem ser divididas em dois grupos: propriedades primárias e secundárias. As propriedades primárias englobam a relação comprimento-largura (fator de forma), a tenacidade, a flexibilidade, a coesão, a fiabilidade e a uniformidade. As propriedades secundárias visam à elevação do conforto e à melhoria da manutenção, e incluem a forma, a densidade, o lustro, a capacidade de absorção de água, o alongamento, a elasticidade, a resiliência, o comportamento térmico, a resistência a microorganismos, a resistência a produtos químicos, a resistência ao meio ambiente e à exposição à luz, dentre outras (AGUIAR NETO, 1996). As propriedades secundárias variam de fibra para fibra e, em alguns casos, nem todas as possuem.

É óbvio que nem todas essas características das fibras são relevantes na área da engenharia civil, quando se lida com fibras dispersas na massa do concreto ou mesmo com tecidos para reforço estrutural. Por isso, serão abordadas neste item somente algumas propriedades específicas das fibras que são fundamentais para a avaliação de seu comportamento sob o ponto de vista da presente pesquisa.

3.2.1 DIÂMETRO DO FIO

Conforme AGUIAR NETO (1996), o diâmetro de um fio é dado em função de sua massa específica, densidade e comprimento. A **titulação dos fios** ou **numeração de produtos para a fiação** é uma maneira de expressar o diâmetro do fio para fins têxteis.

O título de um fio é a representação, através de um número, da relação entre um determinado comprimento e a massa correspondente. Os fios são numerados segundo dois grandes esquemas de titulação, o grupo direto e o grupo indireto.

O grupo direto é formado pelas fibras com comprimento constante e massa variável. Pertencem a esse grupo os sistemas **denier**, **tex** e **decitex**, usados para as fibras artificiais e para a seda. O título Denier é a massa expressa em gramas correspondente a 9.000 metros de fibra. O título Decitex é a massa expressa em gramas correspondente a 10.000 metros de fibra. O título Tex é a representação recomendada pelo Sistema Internacional de Unidades (S.I.U.), e expressa a massa, em gramas, para um comprimento de 1.000 m.

O grupo indireto se caracteriza por apresentar massa constante e comprimento variável. O título, neste caso, será obtido pela determinação do comprimento de fio necessário para se obter uma massa definida. Nesse grupo, o título é inversamente proporcional ao diâmetro (AGUIAR NETO, 1996).

A expressão “tow” é um termo em inglês que significa a reunião de “n” filamentos, estirados ou não, formando um cordão. Sua designação é dada pelo título individual de cada filamento, seguida pela designação “tow”. De acordo com AGUIAR NETO (1996), a fibra cortada (ou staple fiber) é proveniente do “tow”, sendo o corte realizado conforme padrões estabelecidos. Este tipo de material é classificado pelo título da fibra seguido pela dimensão do corte, em milímetros.

AGUIAR NETO (1996) explica que o filamento contínuo é um conjunto limitado de filamentos que são embalados em “cops”. Neste caso, o material é representado pelo título total estirado ou texturizado, seguido pelo número de filamentos existentes.

Sob o ponto de vista estrutural, a definição do diâmetro é extremamente necessária. O problema é que um fio é normalmente formado por um conjunto de filamentos, que nem sempre atuam de forma conjunta. Desta forma, o diâmetro nominal do fio pode não expressar a área que estará sendo efetivamente solicitada.

3.2.2 GEOMETRIA DA FIBRA

A geometria das fibras influencia diretamente na aderência dos compósitos e implica diretamente na forma de ruptura dos mesmos, além de afetar de forma significativa a sua ductilidade.

As fibras podem apresentar seções transversais variadas e serem produzidas por processos diferentes. SCHWARTZ (1984) acrescenta que as fibras usuais normalmente possuem seção transversal circular, porém elas podem apresentar formas hexagonais, retangulares, poligonais e irregulares.

Algumas diferenças são impostas durante o processo de fabricação. Essas diferenças são observadas nas fibras de aço, que assumem formas com seção transversal variável, aparência lisa ou ondulada e que podem ser retas, torcidas ou deformadas nas extremidades. Também nas fibras de polipropileno se observam variações geométricas. Elas podem ser retas, onduladas, fibriladas, com extremidades lisas ou em forma de

botão. Segundo ACCETTI et. al (2000), o objetivo dessa diversificação é melhorar a resistência do compósito através de uma ancoragem mais efetiva, aumentando, conseqüentemente, a tenacidade. Estudos realizados comprovam que as fibras com ancoragens em ganchos nas extremidades proporcionam aos compósitos maiores níveis de ductilidade à flexão.

3.2.3 FATOR DE FORMA

Fator de forma, taxa de aspecto ou coeficiente de aspecto pode ser definido como a razão entre o comprimento da fibra e seu diâmetro (ARAÚJO DA SILVA, 2002). Essa variável é importante porque, segundo BATSON (1974), é um parâmetro numérico muito utilizado para descrever e diferenciar as fibras. A MASTER CHEMICALS (2002) acrescenta que, quanto maior for o fator de forma, maior será a quantidade de fibras presentes em 1kg de material, garantindo um melhor reforço da matriz.

Segundo MEHTA et al. (1994), a taxa de aspecto da fibra, além da forma e da textura superficial, influencia a resistência das fibras ao arrancamento. Espera-se que uma taxa de aspecto maior seja melhor para a resistência e para a tenacidade.

Para as fibras naturais, a taxa de aspecto normalmente se situa entre 1.000 e 3.000 vezes enquanto que, para as fibras sintéticas, a definição desta relação é controlada pelo fabricante e variada conforme o destino de aplicação da fibra. Taxas de aspectos típicas de fibras sintéticas variam de 30 a 150, para comprimentos de fibra entre 1 e 76 mm. AGUIAR NETO (1996) recomenda uma razão mínima em torno de 100. A maioria das fibras utilizadas para reforço de matrizes cimentícias apresenta um fator de forma bem maior.

Para o cálculo do fator de forma, se a fibra não possui seção transversal circular, BARROS (1996b) recomenda que se determine o diâmetro de uma seção circular de área igual à área da seção real da fibra. De acordo com ERHARDT et. al (1975), numa fibra ovalada, a largura pode estar entre um valor mínimo e um máximo. Para esses casos, ele recomenda que se tome o maior valor.

Cabe salientar que, além da taxa de aspecto, as demais características das fibras, tais como a resistência à tração, a absorção de água, o alongamento, a elasticidade e a resistência à abrasão, também são importantes para que se possa definir seu

aproveitamento.

3.2.4 COMPRIMENTO DAS FIBRAS

O comprimento médio das fibras é um parâmetro muito importante para a avaliação das propriedades mecânicas do compósito. O comprimento das fibras varia, na maioria dos casos, entre 10 mm e 50 mm. Porém, segundo ACCETTI et. al (2000), fibras mais longas ou até contínuas, como fios de lã ou algodão, também podem ser empregadas.

Nas fibras curtas ou **fibras cortadas** (“staple fibers”) a unidade adotada é o centímetro. As fibras longas são chamadas de **filamentos contínuos** e utilizam a unidade em quilômetros (AGUIAR NETO, 1996). Este trabalho se foca no estudo de fibras curtas e utiliza a denominação genérica de fibra ou segmento de fibra para designar as mesmas.

O efeito do comprimento da fibra foi constatado por BERKE e DALLAIRE (1994, apud TANESI e AGOPYAN, 1997). Em ensaios realizados, os mesmos observaram reduções de até 80% na área de fissuras para comprimentos de fibra de 50 mm e de 39% para comprimentos de fibra de 13 mm, para o mesmo teor de adição de fibras. Isto indica claramente que o comprimento da fibra tem relação direta com a abertura das fissuras.

Caso a aderência da fibra com a matriz seja eficiente, LAWS (1979, apud FÉLIX 2002) salienta que, com o aumento do comprimento da fibra, a tensão de ruptura e o módulo dos compósitos aumentam com o aumento do comprimento da fibra. METHA et. al (1994) comentam que o aumento do comprimento das fibras aumenta, de forma singela, a resistência e, de forma significativa, a tenacidade do compósito. Adicionalmente, a literatura indica que o comprimento da fibra dispersa na massa de concreto influi diretamente na trabalhabilidade da mistura, independentemente do tipo de fibra.

HARRIES e YOUNG (2003) acrescentam que, com a variação do comprimento da fibra, observa-se uma mudança predominante no modo de ruptura do compósito, passando da ruptura por arrancamento para ruptura da fibra. Por isso, o comprimento da fibra afeta as características de absorção de energia do material.

Para os casos de fibras contínuas, dependendo do tipo de matriz utilizada no reforço, se pode verificar uma redução drástica da fadiga, melhoria da resistência ao impacto e ao fogo e diminuição da absorção de umidade pelo compósito. De acordo com FÉLIX (2002), quanto maior a concentração de fibras no compósito, menor é o comprimento

médio resultante, devido ao aumento da interação entre as fibras.

SWAMY e STAVRIDES (1979, apud TANESI et. al, 1997) estudaram a influência da adição de fibra em longas idades. Com a adição de fibras, nota-se uma idade superior para o aparecimento da primeira fissura visível, um aumento do número de fissuras, diminuição da abertura máxima da fissura e um incremento de dias antes do colapso do compósito.

3.2.5 ORIENTAÇÃO MOLECULAR

Segundo AGUIAR NETO (1996), as propriedades das fibras são explicadas pela suas estruturas atômicas. A matéria é composta de átomos que permanecem unidos por pontes de resistência variadas. A distribuição desses átomos e a força das ligações entre eles determinam as propriedades físicas dos materiais. É possível notar que as características da matéria são determinadas por seu arranjo molecular e se pode considerar que esse arranjo ou distribuição molecular é necessário para que os materiais possam formar fibras.

A orientação das cadeias moleculares nas fibras é tão importante quanto a orientação das fibras no compósito. A orientação das fibras e o percentual de fibra existente em uma determinada seção transversal do compósito são determinantes nas suas resistências à flexão, à compressão, à tração e ao cisalhamento. Já a orientação molecular e a cristalinidade do polímero constituinte da fibra são aspectos que influenciam diretamente nas características das fibras. A boa orientação e a organização da estrutura cristalina estão normalmente associadas a uma elevada resistência e a um baixo alongamento da fibra.

Segundo AGUIAR NETO (1996), as fibras de polímeros têxteis apresentam elevada relação comprimento-diâmetro e seu padrão de arranjo molecular é muito variável. As moléculas podem ser mais ou menos orientadas e podem se apresentar com diferentes angulações em relação ao eixo da fibra. Quando mais orientadas, as moléculas tendem a ficar paralelas entre si e em relação ao eixo longitudinal, enquanto nos demais casos as moléculas podem estar cruzadas e distribuídas aleatoriamente.

As propriedades mecânicas dos fios dependem, segundo AGUIAR NETO (1996), da sua orientação molecular, a qual está relacionada ao grau de cristalização. Todas as

fibras artificiais recebem um grau de orientação determinado durante o processo de fabricação. Essa orientação é obtida quando os filamentos são submetidos a uma deformação longitudinal, durante a qual o atrito molecular força as moléculas a se orientarem predominantemente na direção do eixo da fibra. Se o fio está deformado e ainda apresenta temperatura elevada, a orientação produzida será pequena. Isso ocorre porque a agitação térmica das moléculas faz com que as mesmas adotem posições arbitrárias. Nas fibras de natureza cristalina, o incremento na orientação aumenta as chances de cristalizar, de modo que ambos os fenômenos ocorram paralelamente. O incremento de cristalização, em contra partida, aumenta a resistência da fibra, até que a formação de vínculos cristalinos seja suficiente e impeça qualquer deslizamento das moléculas. Nesse momento, o fio atinge sua resistência máxima com uma deformação adicional.

A figura 3.1 mostra alguns padrões de orientação molecular: (a) uma cadeia molecular com orientação zero e ordem mínima; (b) molécula com orientação elevada, porém com ordem baixa; (c), cadeia de moléculas com orientação zero e ordem elevada e (d) ordem e orientação perfeitas.

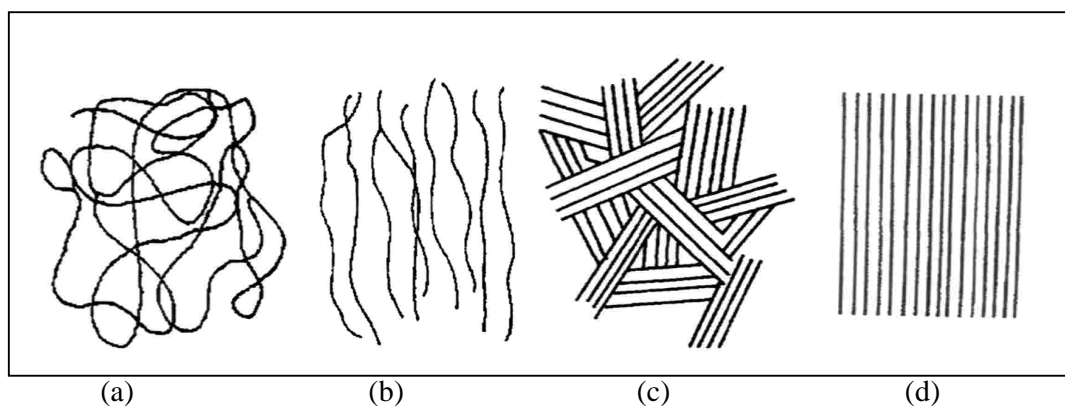


Figura 3.1 - Padrões de orientação molecular da cadeia (AGUIAR NETO, 1996).

Para que a fibra seja resistente na direção de seu comprimento e flexível na direção de sua largura, as cadeias moleculares necessitam ter orientação na direção do comprimento. A orientação das fibras pode ser forçada através de uma operação de estiragem. Nesse processo, os filamentos passam em volta de dois cilindros que giram com velocidades diferentes. Com a estiragem, o filamento sob extensão diminui a sua seção transversal e conseqüentemente aumenta seu comprimento.

3.2.6 MÓDULO DE ELASTICIDADE

De acordo com TANESI e AGOPYAN (1997), o módulo de elasticidade, a resistência à tração e as dimensões de cada fibra são determinantes para inferir sua contribuição ao compósito. HANNANT (2002), entretanto, acredita que o efeito das fibras não é dependente do seu módulo de elasticidade, embora a largura da fissura formada seja afetada pelo mesmo.

Genericamente, as fibras podem ser divididas em dois grandes grupos. As que possuem módulo mais baixo que o da matriz cimentícia, tais como a celulose, o nylon e o polipropileno e as com módulo maior que o da matriz cimentícia, como o asbesto, o vidro, o aço, o carbono e a aramida. Fibras com alto módulo de elasticidade e resistência à tração alta, como o asbesto e a fibra de vidro, garantem um acréscimo de resistência à tração da matriz (HANNANT, 1978). Já os compósitos fabricados com fibras de módulo de elasticidade baixo, como, por exemplo, as fibras orgânicas, têm sua resistência ao impacto aumentada, devido ao fato de que a fibra resiste a grandes deformações (WALTON & MAJUNDAR, 1975 apud CEPED, 1982). Contudo, não é aconselhável o seu uso em situações onde a matriz seja submetida a solicitações permanentes, sendo recomendável que esta permaneça no estado não-fissurado. A questão é que as fibras orgânicas de baixo módulo estão geralmente sujeitas a uma alta fluência. Se elas são usadas para suportar tensões permanentes altas, em um compósito fissurado, alongamentos consideráveis ou deflexões podem ocorrer. O fato é que, no estado pós-fissuração, as altas deformações locais, no entorno das microfissuras ou microfissuras, são suficientes para tensionar qualquer tipo de fibra. Todas as fibras, portanto, se tornam efetivas na limitação da largura da fissura ou na absorção de parte da carga pós-fissuração. A eficácia das fibras depende, então, apenas das forças desenvolvidas nelas e de sua concentração volumétrica.

3.2.7 PRESENÇA DE DEFEITOS

A existência de falhas nas fibras, fato comum, se constitui em outro fator importante que afeta o comportamento e a resistência mecânica dos compósitos produzidos. As falhas são oriundas do manuseio ou processamento inadequado da fibra ou de seu

envelhecimento. A redução da resistência devido a essas falhas varia com o comprimento e o diâmetro da fibra (RILEY & REDDAWAY, 1968; PARATT, 1960 apud SANTOS, 2002). Nota-se ainda que existe uma diminuição da tensão de tração nas fibras quando ocorre um aumento de comprimento.

3.2.8 ABSORÇÃO DE ÁGUA

A maioria das fibras apresenta uma certa porosidade e é suscetível a variações volumétricas ou químicas induzidas pela exposição à água. Por isso, a absorção de água (ou “regain”) é uma propriedade da fibra que deve ser considerada.

Segundo AGUIAR NETO (1996), a ASTM define o “regain” como a umidade em um determinado material, sob condições pré-estabelecidas ($65 \pm 2\%$ U.R. e $21 \pm 1^\circ\text{C}$), expressa como porcentagem, em peso, em relação à amostra sem água.

3.2.9 NATUREZA DAS FIBRAS

Outro fator que afeta diretamente o desempenho do compósito é a natureza ou tipo da fibra empregada. O sucesso do cimento-amianto, uma combinação de fibras minerais de asbestos em uma matriz cimentícia, levou a várias pesquisas sobre maneiras de reforçar matrizes com materiais fibrosos (LEGGATT, 1979). Foram investigadas fibras de natureza variada, indo desde o aço até às fibras poliméricas, de polipropileno ou de carbono, por exemplo. Cada uma delas tem suas características próprias. A tabela 3.1 mostra o ganho de resistência mecânica com a adição de diferentes tipos de fibra em matrizes cimentícias de cimento Portland, comprovando que as diferentes fibras tem efeito diferenciado.

Tabela 3.1 – Valores de resistência mecânica com adição de fibras (SANTOS, 2002)

Tipo de Fibra Adicionada	Resistência Mecânica (MPa)	% de Aumento de Resistência
Referência (sem fibra)	2,5 (tração) 6 (flexão)	
Carbono (4%)	8,0 (tração)	+320
Vidro (1%)	3,9 (tração)	+156
Aço (1%)	3,8 (tração)	+152
Vinylon (1%)	3,7 (tração)	+148
Kevlar (3%)	17,0 (tração)	+680
Polipropileno (1,5%)	18 (flexão)	+720

3.3 CLASSIFICAÇÃO DAS FIBRAS

De acordo com BATSON (1974), as fibras podem ser produzidas a partir de vários materiais, como o aço, o plástico ou o vidro. Podem também ser materiais naturais, que existem em várias formas e tamanhos. Segundo MANO (1999), muitas são originárias de materiais poliméricos, que tem uma tendência natural a formar estruturas encadeadas. Apesar de cada fibra ter propriedades específicas, as mesmas podem ser enquadradas dentro de grandes grupos.

GRISON et. al (1985) propuseram a classificação mostrada na figura 3.2. Esse esquema considera que as fibras podem ser classificadas basicamente em naturais ou artificiais e agrega uma terceira classe criada para abrigar as fibras que não se enquadram em nenhum destes grupos, como a fibra de carbono. Cabe salientar que as fibras de carbono são também de polímeros sintéticos de acrilonitrila.

Este trabalho adota a visão de que, de forma simplista, se pode dividir as fibras em dois grandes grupos. O primeiro grupo seria o das fibras naturais, que inclui as fibras de sisal, coco, bananeira e palha de arroz, por exemplo. Num segundo grupo se encontram as fibras sintéticas, ou fabricadas pelo homem, que englobariam tanto as fibras artificiais como as outras, incluindo, por exemplo, fibras de aço, polipropileno, nylon, carbono, poliéster, vidro, aramida, celulose, PVA, borracha, polietileno e acrílico. Cada grupo é discutido a seguir.

Cabe salientar que a classificação de GRISON et al. (1985) foi utilizada como subsídio para a escolha das fibras a serem utilizadas para os ensaios comparativos de impacto. Do sub-grupo das fibras vegetais, as mais importantes dentre as fibras naturais para fins

de incorporação ao concreto, selecionou-se o sisal, devido ao seu baixo custo e ampla disponibilidade. Do grupo das fibras artificiais foi selecionada a fibra de polipropileno, bastante utilizada para adição em argamassas, com o intuito de controlar a fissuração por retração. Foram escolhidas dentre as demais as fibras de aço (metálicas) e de vidro, dois tipos muito tradicionais e amplamente empregados para confecção de concretos com fibras. O item 3.5 contém uma revisão mais detalhada das características destas fibras.

3.3.1 FIBRAS NATURAIS

Como se pode ver na figura 3.2, as fibras naturais se dividem em minerais, vegetais e animais. As fibras naturais mais importantes são aquelas de origem vegetal ou animal. Segundo MANO (1999), todas as fibras vegetais tem natureza celulósica. Já as fibras de origem animal são protéicas e as fibras minerais têm aplicação industrial bastante limitada.

As fibras vegetais são formadas por micro fibras unidas por uma substância cimentante conhecida por lignina (CEPED,1982). A micro fibra é constituída por uma única célula e apresenta uma estrutura oca, sendo a cavidade interna denominada lúmen. A relação comprimento/espessura destas fibras é normalmente elevada. Quanto maior esse índice, melhor é a aderência fibra-matriz, menor a abertura e o espaçamento entre fissuras. TEZUKA (1989, apud ACCETTI et al. 2000) acrescenta que o volume ótimo e o comprimento apropriado para a maioria das fibras naturais gira em torno de 3% e 25 mm respectivamente.

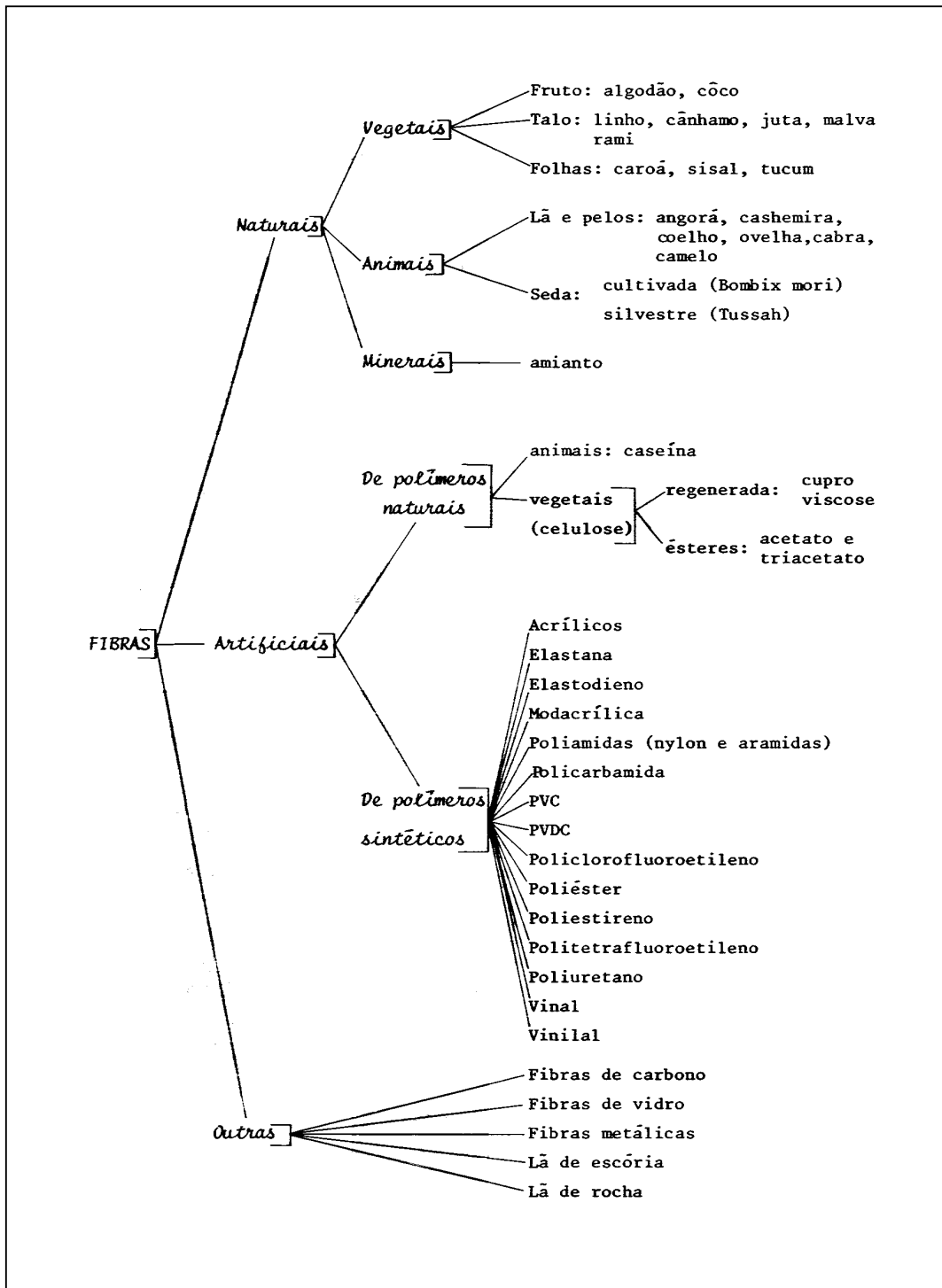


Figura 3.2 – Proposta de classificação das fibras (GRISON et. al, 1985).

De acordo com o CEPED (1982), vários fatores justificam o desenvolvimento da pesquisa de aplicação de fibras vegetais para fabricação de fibro-cimento ou de concreto-fibra. O baixo consumo de energia necessário para produzir as fibras vegetais,

quando comparado ao necessário para produção de fibras de aço ou de plásticos, aliado ao fato das fibras vegetais serem recursos naturais renováveis, torna os composto fibras vegetais-cimento bastante adequados para a realidade atual de escassez de energia e valorização da sustentabilidade. Ainda segundo o CEPED, o eventual aproveitamento das fibras vegetais traria um grande incentivo às culturas do sisal, piaçava, coco e bambu, incrementando a agricultura do nordeste do Brasil.

Na fabricação de um determinado produto envolvendo fibras naturais é fundamental o conhecimento das características da fibra constituinte do processo. No caso das fibras vegetais, suas características são afetadas por diversas variáveis, como a irrigação, seleção de sementes, hibridação e melhoria dos métodos de cultivo.

Para as fibras animais, a melhoria da vacinação e cuidados na criação são algumas das variáveis que controlam a melhoria na obtenção das melhores fibras. A variação dessas características influencia na qualidade da fibra e, conseqüentemente, no seu valor de comercialização.

De acordo com AGOPYAN et al. (1990), as fibras naturais representam uma alternativa atraente para utilização na construção civil. O principal inconveniente é a sua durabilidade em matrizes cimentícias. A alcalinidade danifica a maioria das fibras, principalmente as de origem vegetal.

3.3.2 FIBRAS SINTÉTICAS

De forma genérica, toda fibra fabricada pelo homem é considerada, para fins deste trabalho, como uma fibra sintética. Em alguns casos, como no caso do vidro e do aço, as fibras são geradas por um processo de fabricação específico, que molda o material na forma filamentar. Entretanto, o grupo mais interessante das fibras sintéticas, da qual a aramida faz parte, é o das fibras poliméricas, que constituem o grupo das fibras artificiais da figura 3.2.

Segundo FACÓ (1983), polímero significa um elemento composto de muitas partes, ou seja, um elemento composto pela repetição de uma unidade molecular pequena, chamada de monômero. AGUIAR NETO (1996) explica que os polímeros podem se formar pela repetição de monômeros iguais ou pela combinação de dois ou mais monômeros diferentes entre si.

Na natureza, encontram-se polímeros naturais como os hidrocarbonetos, a proteína e os ácidos nucleicos. Em nosso século, os químicos conseguiram fabricar polímeros sintéticos que atualmente são extensamente usados na fabricação de objetos plásticos, fibras sintéticas, borrachas sintéticas, tintas, vernizes e adesivos.

A utilização de substâncias macromoleculares sintéticas para a produção de fibras químicas só se tornou possível através de estudos realizados com fibras naturais. Segundo ERHARDT et. al (1975), foi através dessas pesquisas que se obteve a descoberta que as moléculas celulósicas e protéicas também são macromolécula constituída por vários monômeros.

Para que uma substância possa ser utilizada na fabricação de fibras poliméricas, ela deve ser constituída de macromoléculas naturais com estrutura de cadeia ou por moléculas produzidas sinteticamente e deve ser passível de transformação em líquido viscoso ou massa fundida fiável (ERHARDT et. al, 1975). Para utilização na produção de fibras só interessam os polímeros lineares. A indústria química conseguiu, nas últimas décadas, produzir substâncias cujas moléculas possuem cadeias entre 10.000 a 100.000 átomos de carbonos.

A pergunta de como podem ser produzidas as fibras sintéticas é fundamentalmente respondida pela análise da forma como o bicho da seda produz a seda, uma das fibras naturais mais resistentes. Ele acumula, nas suas glândulas, um líquido que é expulso através de finos orifícios. Os jatos do líquido que saem dos orifícios endurecem no ar transformando-se em fios de seda. Esse processo é o modelo para produção de qualquer fibra sintética.

AGUIAR NETO (1996) explica que quatro fases diferentes são observadas no decorrer do desenvolvimento das fibras artificiais. No início do século passado, ocorreu a descoberta das fibras artificiais celulósicas, pontuando a viscose como marco. Numa segunda etapa, na década de 20, as análises de raios X desvendaram o conceito de cadeia molecular da estrutura das fibras. Foi nessa fase que a ciência das fibras passou a fazer parte dos polímeros. Pesquisas foram então iniciadas e a seguir obteve-se o sucesso espetacular, a síntese das poliamidas, sendo possível desenvolver fibras completamente sintéticas. Na década de 40, ocorreu o início da terceira fase, onde muitos outros polímeros capazes de formar fibras foram desenvolvidos, a partir do conhecimento do nylon. Na quarta etapa, foram realizados esforços enormes no aperfeiçoamento dos estágios de formação das fibras, conseqüentemente, foram

descobertas novas técnicas e novas aplicações.

De acordo com SANTOS (2002), devido ao estiramento que sofrem as fibras sintéticas durante o seu processo de fabricação, a tensão limite de ruptura se torna superior àquela do polímero bruto, enquanto que a elongação máxima é reduzida. Essa melhora nas propriedades mecânicas devido ao estiramento realizado entre temperaturas de transição vítrea e fusão (polímeros cristalinos) resulta na orientação das cadeias poliméricas com possível formação de cristalitos orientados e redução da fase amorfa. AGUIAR NETO (1996) acrescenta que as propriedades de tensão das fibras desse grupo dependem do aumento considerável do peso molecular do polímero que as compõem e das condições de fiação e estiragem.

Em particular, os polímeros lineares capazes de se cristalizar podem formar fibras de resistência muito elevada. Poliamidas, poliésteres e poliolefinas podem alcançar resistência superior a 900 MPa, ultrapassando todas as fibras naturais e atingindo o dobro da resistência do aço usado na construção civil, enquanto apresentam uma massa 6 a 7 vezes menor (AGUIAR NETO, 1996). A denominação de polímeros de alto desempenho ou alta performance vem justamente de encontro ao conceito de um material de alta resistência com peso extremamente baixo.

Como já discutido, para as fibras apresentarem essa resistência tão elevada, as moléculas devem estar orientadas na direção do eixo. Essa orientação é inerente ao processo de fabricação das fibras sintéticas e o próprio fato das moléculas estarem aproximadamente paralelas aumenta em grande proporção a probabilidade de cristalização. As moléculas orientadas e fortemente ligadas entre si por vínculos cristalinos oferecem uma resistência muito grande, pois já não é possível a separação delas ou deslizamento entre elas. Para que ocorra a ruptura, é necessário que sejam quebradas as uniões moleculares primárias em grande número.

Para fins de comparação, a tabela 3.2 apresenta as propriedades mecânicas de algumas fibras sintéticas, com seus respectivos módulos elásticos, resistências à tração e densidades.

Tabela 3.2 – Valores indicativos das propriedades mecânicas de algumas fibras sintéticas (BEAUDOIN, 1990 apud SANTOS, 2002)

Material	Módulo Elástico (GPa)	Resistência à Tração (GPa)	Densidade (g/cm³)
Aço	210	1,0 – 3,0	7,8
Vidro E	72,4	3,5	2,54
Vidro S	85,5	4,6	2,48
Carbono (alto módulo)	390	2,1	1,90
Carbono (alta resistência)	240	2,5	1,90
Boro	400	3,54	2,61
Kevlar 29	65	2,8	1,44
Kevlar 49	125	2,8	1,44
Alumina	379	1,38	3,95
Polipropileno	5,0	0,5	0,9
Nylon	4,0	0,9	1,1
Polietileno	0,1 – 0,4	0,7	0,9
Sisal	26,5	0,8	1,5
Cânhamo	34,0	0,8	1,5
Poliéster	8,2	0,7 – 0,9	1,4

3.4 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS UTILIZADAS NA PESQUISA PARA COMPARAÇÃO COM A FIBRA ARAMIDA

Neste item são revisadas as características das fibras selecionadas para compor o programa experimental conjuntamente com a fibra aramida. As razões para a seleção de cada uma delas já foram discutidas. Deve-se considerar que as mesmas produzem efeitos diferentes nos concretos reforçados.

3.4.1 FIBRA DE SISAL

A fibra de sisal, *Agave Sisalana Perrine*, é extraída de uma planta perene típica do nordeste brasileiro, pertencente à família das Amarilidáceas e é uma das preferidas, dentre as fibras naturais, devido à sua elevada tenacidade e resistência (A FIBRA, 2002). De acordo com o CEPED (1982), a mesma é bastante usada na confecção de peças de gesso na construção civil e seu processo de desfibramento já é conhecido.

A fibra do sisal é composta por microfibras, tem coloração quase branca, apresenta excelente resistência à ruptura e ao alongamento e, normalmente, é bastante longa. De

acordo com AGUIAR NETO (1996), o comprimento da fibra de sisal pode variar entre 60 e 160 cm. Já ERHARDT et. al (1975), comenta que a fibra de sisal apresenta comprimento variando entre 60 e 120 cm.

Essa fibra apresenta seção transversal poligonal e, longitudinalmente, é aproximadamente cilíndrica, com alargamento característico na sua parte central. Segundo KELBERT (2002), é preciso especificar a procedência do sisal, pois o sisal produzido no Brasil apresenta baixa qualidade, enquanto que o sisal produzido na África do Sul é de alta qualidade.

Em relação à durabilidade dos compósitos com fibra de sisal, SAVASTANO et al. (1992) afirmam que as fibras vegetais apresentam durabilidade pequena, especialmente em meio alcalino e são afetadas pela umidade ambiental. Em geral, o principal inconveniente no uso das fibras naturais é a durabilidade dessas fibras em matrizes cimentícias, pois as fibras vegetais absorvem água. AGOPYAN et al.(1990) ainda acrescenta que a durabilidade da fibra de coco (coir) é superior a fibra de sisal e, de acordo com SAVASTANO et al. (1992), o efeito da idade nos compósitos com fibras vegetais é notado, pois se observa redução da ductilidade com o aumento da idade devido à deterioração das fibras em meio alcalino.

A fibra de sisal possui resistência; porém, segundo AGOPYAN et al.(1990), para associação de fibras vegetais a matrizes cimentícias, deve ser sugerida a proteção dessas fibras com uma camada de cobertura ou um compósito de selante seco para evitar o efeito da água ou a redução da alcalinidade livre na matriz.

A fibra de sisal produzida no Brasil tem diâmetro médio de 0,3 mm, tenacidade de 414 mM/tex e resistência à tração média de cerca de 366 MPa. O alongamento na ruptura é de 5,2% e o módulo de Young está acima de 15 GPa (AGOPYAN, 1990).

Em relação à energia específica absorvida pelos compósitos de fibra de sisal, observa-se que ela é inferior, por exemplo, a dos compósitos com fibra de polipropileno. Isso se explica porque a zona de transição dos compósitos de fibra vegetal é porosa, grossa e rica em cristais de portlandita aleatórios. A variação de volume dessas fibras é a razão da falta de aderência. Ainda, a alta absorção de água das fibras vegetais colabora para que ocorra a fissuração da zona de transição devido à retração diferencial.

A abundância das fibras naturais no Brasil, por si só, já é uma justificativa para estudos na sua utilização. A existência de componentes livres de asbestos poderia ser considerada a segunda, devido a suas características nocivas a saúde. Assim, mesmo

com os problemas de alcalinidade, a fibra de sisal não precisa ser descartada, porque o controle do ataque alcalino das matrizes cimentícias pode ocorrer pela mudança da matriz, por carbonatação ou pela proteção da fibra.

3.4.2 FIBRA DE AÇO

As fibras de aço, produzidas a partir da trefilação a frio de fios de aço, são formadas por multifilamentos de aço, compostos de segmentos pequenos, com comprimentos e diâmetros variados. O processo de fabricação resulta em diferentes fatores de forma e em elevados níveis de resistência à tração (acima de 1.000 MPa). Este tipo de fibra está disponível comercialmente em vários tamanhos e diâmetros. Uma vantagem adicional é que, para aumentar sua aderência à matriz, as fibras de aço podem ser fabricadas com extremidades dobradas ou alargadas.

A adição de fibras de aço ao concreto produz, segundo diversos autores, alguns efeitos muito interessantes, como aumento da resistência à fissuração e da tenacidade e incremento da resistência à compressão e ao cisalhamento.

A capacidade de absorção de energia é a propriedade mais beneficiada pelo reforço das fibras (ACI 506, 1984; BALAGURU E SHAH, 1992; BARROS, 1995 apud BARROS et. al, 2000). A geometria das fibras de aço vendidas comercialmente aumenta a eficácia do reforço devido a sua maior ancoragem ao concreto. BARROS et. al, (2000) salienta que a capacidade de absorção de energia aumenta com a quantidade de fibra existente na mistura. Entretanto, o aumento dessa propriedade do material com relação à esbeltez da fibra não é significativo. FALCÃO BAUER (2001) ainda acrescenta que o compósito com maior taxa de fibra de aço distribui melhor a tensão de impacto.

Outro benefício da adição de fibra de aço ao concreto está associado ao efeito das fibras na resistência a fissuração. Segundo BRANDT, BENTUR et. al, ZOLLO e LI (1995, 1990, 1997, 1990, apud REDON et. al, 1999), as fibras de aço são usadas para reforçar matrizes cimentícias frágeis, prevenindo a abertura de fissuras através do arrancamento das fibras e dos mecanismos de aderência delas. De acordo com HANNANT (1978), observa-se um aumento de carga, na qual fissuras visíveis são formadas sob um carregamento de flexão e a prevenção à fissuração de lajes sujeitas a condições de retração. A limitação de fissuras em pavimentação de auto-estradas, o aumento da

tensão da armadura para uma abertura específica de fissura, quando fibras são utilizadas em conjunto com a armadura de aço também são observadas, além do aumento da resistência à propagação das fissuras sob carregamento de fadiga e da resistência à fissuração para cargas de impacto.

HANNANT (1978) ainda salienta que não há dúvidas de que as fibras de aço podem retardar o aparecimento das fissuras no nível de até 0,05 mm. Contudo, as fibras mostram ter pouco efeito no ponto inicial da fissura a nível microscópico.

Em relação à resistência ao cisalhamento, segundo LORENTSEN (1985), observa-se que, a adição de fibras de aço, induz a um incremento de resistência para estruturas carregadas, entretanto, deve-se avaliar a dificuldade de moldagem e adensamento a que a mistura está sujeita.

3.4.3 FIBRA DE POLIPROPILENO

O polipropileno é um plástico abundante e de baixo custo, possuindo grande e significativa importância industrial, devido a sua alta resistência a produtos químicos e umidade, bem como boas propriedades mecânicas. O tipo de configuração das cadeias do polipropileno afeta extremamente suas propriedades mecânicas.

FÉLIX (2002) explica que o polipropileno é um plástico incolor, inodoro, atóxico e com densidade de $0,9 \text{ g/cm}^3$ aproximadamente. Por isso, é um dos plásticos mais leves. Apresenta uma estrutura apolar, sendo inerte quimicamente, pois só é suscetível a solventes polares.

A fibra de polipropileno apresenta resistência aos álcalis, temperatura de fusão alta, na ordem de 165°C , baixo custo e sensibilidade à luz e ao fogo. Sua resistência à tração é maior do que a do amianto SANTIAGO (2002).

A tenacidade e o alongamento das fibras de polipropileno variam de acordo com as condições de produção. De acordo com AGUIAR NETO (1996), a resistência à abrasão é obtida utilizando-se materiais de peso molecular elevado, baixa tenacidade e elevado alongamento, o que significa dizer que as fibras apresentam pequena orientação. As fibras de polipropileno apresentam excelente propriedade de isolamento térmica devida à baixa condutividade. Em relação a flamabilidade, o polipropileno queima na ausência de retardantes a chama, porém não apresenta ignição imediata. Entretanto, em

exposições diretas ao fogo, ele arde e a chama não se extingue por si própria.

De acordo com FÉLIX (2002) as propriedades mecânicas da fibra de polipropileno são excelentes quando comparadas com as de outros polímeros similares. Ela apresenta boa resistência à tração e baixo módulo de elasticidade.

Comercialmente, podem-se encontrar diversos e diferentes tipos de polipropileno e, conseqüentemente, com propriedades mecânicas diversas devido a diferenças estruturais, como o peso molecular. As propriedades típicas da fibra de polipropileno incluem uma densidade de $0,90 \text{ g/cm}^3$, resistência a tração entre 550 a 690 MPa, módulo de elasticidade de 3400 GPa e alongamento de 15%. Na tabela 3.3 são apresentadas algumas características das fibras de polipropileno comparativamente com a fibra acrílica.

Tabela 3.3 – Comparação de algumas características entre a fibra acrílica e a fibra de polipropileno (PUERTAS et. al, 2000)

	Acrílica	Polipropileno
Densidade (g/cm^3)	1,18	0,9
Diâmetro (μm)	80	18
Comprimento (mm)	15	12

Segundo GREGORY (2002) explica a fibra de polipropileno surgiu como alternativa para a fibra de vidro, porém essa fibra provou ser de difícil utilização e apresentou módulo de elasticidade baixo, conseqüentemente, originando resistências à flexão e à tração mais baixas quando utilizadas em aplicações similares. De acordo com TANESI et. al (1997), as fibras de polipropileno exercem um reforço na matriz mais eficiente nas primeiras horas após o lançamento, pois é nesse momento que o concreto está no estado fresco, com baixas resistências e módulo de elasticidade e BAYASI et. al (2002) ainda acrescenta que a fibra de polipropileno é geralmente utilizada como armadura para a temperatura e para a retração. As fibras de polipropileno reduzem a retração do concreto e, de acordo com HANNANT (2002), essas fibras fornecem um benefício a mais, o aumento da resistência ao fogo, através da formação de canais pelos quais o vapor de água pode passar, reduzindo as tensões internas.

Entretanto, com os recentes desenvolvimentos, a fibra de polipropileno é uma das fibras mais utilizadas, visto a eficácia apresentada pela adição da fibra de polipropileno aos

compósitos cimentícios, pois a mesma fornece um meio eficaz, econômico e simples de combater o problema de fissuração do concreto, principalmente em peças com grandes áreas de exposição de secagem.

A água de exsudação que migra para a superfície de concreto fresco é reduzida devido a presença das fibras de polipropileno, conforme BAYASI et. al (2002). A causa da redução é que a fibra bloqueia as capilaridades do concreto usadas para a água sair. Além disso, a fibra reduz a consolidação do concreto, resultando em uma maior retenção no concreto fresco. MONTARDO (2001) acrescenta que a adição de fibras de polipropileno controla a exsudação no concreto, aumentando a eficiência de hidratação do cimento e, conseqüentemente, aumenta a resistência a compressão na idade de 1 dia. Observa-se a melhora da capacidade de deformação por tração nas primeiras idades do concreto no período crítico de 2 a 6 horas após seu lançamento. Assim, constata-se a redução do tamanho das fissuras e suas freqüências, possibilitando ao concreto conservar maior resistência interna.

A fibra de polipropileno apresenta vantagens quando comparadas as fibras vegetais. Essas fibras são inertes quimicamente em meios alcalinos, o que as torna compatíveis com matrizes cimentícias. Segundo TANESI e AGOPYAN (1997), podem apresentar geometrias diversas e são hidrófugas, não absorvendo água da mistura do concreto ou argamassa. Os formatos existentes das fibras de polipropileno são o monofilamento, em feixes ou filmes fibrilados.

De acordo MONTARDO (2001), como as fibras de polipropileno apresentam uma área superficial elevada, elas são mais eficientes que a armadura secundária de retração.

Essas fibras apresentam maior durabilidade em ambientes alcalinos e preços mais competitivos do que as fibras de vidro. TANESI e AGOPYAN (1997) acrescenta que a massa específica da fibra de polipropileno é em torno de oito vezes menor do que a da fibra de aço; elas não são passíveis de corrosão, são mais flexíveis e apresentam preço menor por volume. BAYASI et. al (2002) afirmam que as fibras de polipropileno aumentam a resistência à tração e a capacidade de deformação a tração do concreto fresco, resultando em melhorar a resistência a fissuração por retração plástica, sendo que alguns autores ainda acreditam que a presença das fibras de polipropileno reduzem a fissuração por retração plástica em aproximadamente 90% e retardam o tempo de início da fissuração (AL-KHAJA et. al e SOROUSHIAN et. al (1994, 1993, apud BAYASI, 2002). Segundo MOHAMMED, ZOLLO et. al e GRZYBOWSKI et. al

(1992, 1986, 1990, apud BAYASI, 2002), a retração por secagem do concreto devido a utilização das fibras de polipropileno diminui entre 3 a 15%, dependendo do volume de fibra e do procedimento de teste.

BAYASI (2002) acrescenta que as fibras de polipropileno reduzem a retração por secagem livre do concreto e reduzem a fissuração devida à retração por secagem pela redução da água de evaporação, além de melhorar a resistência a tração nos níveis das microfissuras. PUERTAS et. al (2000) explica que a retração por secagem, se altera em função do tipo de matriz e fibra. Segundo SCHAPERKLAUS (1979, apud BAYASI 2002a), a utilização das fibras de polipropileno em fração de volume de aproximadamente 0,2% reporta a redução significativa do processo de lascas e fissuração em concretos de alto desempenho.

De acordo com BAYASI (2002), a fibra de polipropileno é dimensionalmente estável por pequenos períodos de tempo sob temperaturas de 140°C e apresenta uma longa resistência até 100°C de temperatura. MONTARDO (2001) acrescenta que a adição de fibra de polipropileno melhora as características de resistência ao fogo do concreto a altas temperaturas. Elas não sofrem alteração em meios alcalinos, ainda que o aumento da temperatura produza modificações na superfície da mesma (PUERTAS et. al,2000).

O concreto apresenta coesão maior quando as fibras de polipropileno são adicionadas à mistura. Nesse sentido, torna-se um benefício para as situações de concreto bombeado a grandes alturas. MONTARDO (2001) também salienta que o concreto com fibras de polipropileno apresenta características de resistência melhores ao congelamento e pode ser considerado, em termos de durabilidade, equivalente ao concreto com ar incorporado.

3.4.4 FIBRA DE VIDRO

A fibra de vidro é um material que surgiu como alternativa atraente para reforçar o concreto, de forma a produzir um compósito que poderia substituir o cimento amianto. Segundo WINGATE (1964), o nome genérico “vidro” é definido como a produção de uma fibra na qual a substância formadora é o vidro. O uso do vidro como fios têxteis começou nos anos de 1930, e, de acordo com WILLOUGHBY (2003) e SP SYSTEMS (2002), o diâmetro dos filamentos produzidos varia entre 5 e 24 µm.

CASATI (2002) explica que a fibra de vidro é apresentada na forma de fio têxtil ou manta e GREGORY (2002) acrescenta que essa fibra pode ser fornecida em “roving” contínuo ou em segmentos com o comprimento de 12 a 25 milímetros. Ela pode ser produzida por diversas técnicas, variando de processos manuais simples a sistemas sofisticados. As propriedades dessa fibra são influenciadas por fatores como a sua composição química e o método de manufatura.

Observa-se sua utilização entre os teores de 3% e 6% de fibra em massa, resultando compósitos que possuem boas propriedades acústicas e térmicas. As formulações de cimento com fibra de vidro são utilizadas para salientar essas propriedades térmicas, sendo algumas particularmente apropriadas a aplicações de proteção ao fogo. Entretanto, deve-se salientar que muitas dessas propriedades são controladas pelos componentes da matriz, ou seja, o cimento e os agregados.

CASATI (2002) também acrescenta que a fibra de vidro não é inflamável, não absorve umidade, não varia em termos dimensionais com a temperatura, apresenta boa durabilidade, sem alterar a sua resistência mecânica.

A fibra de vidro apresenta alta resistência mecânica, observando-se um baixo alongamento e compatibilidade de suas propriedades com as propriedades do concreto. Constata-se uma deformação inicial elástica sobre carregamento, a qual é seguida por uma deformação adicional por fluência. A fluência por tração é pequena e a taxa fluência/tração diminuiu ao longo do tempo.

De acordo com FYLES (1986, apud BARROS, 1996a), nos últimos anos, tem se observado uma melhoria das propriedades das fibras de vidro em relação a sua resistência aos meios alcalinos, seja através de tratamentos da superfície da fibra, seja devido a sua constituição química. Assim, uma maior durabilidade é apontada para os compósitos reforçados com esse tipo de fibra. Um aumento considerável da durabilidade dos compósitos é observado quando se substitui 35% da massa do cimento por cinzas volantes (LEONARD, 1984; BENTUR, 1986 apud BARROS, 1996a). Como razão principal para esse comportamento foi indicado o fato da diminuição de produtos hidratados ao redor dos filamentos que formam a fibra de vidro, sendo esses espaços ocupados por partículas finas das cinzas volantes. Vários materiais inorgânicos foram adicionados na tentativa de aumentar a durabilidade, visto que esses materiais reagem com os produtos hidratados do cimento, reduzindo a percentagem de hidróxidos de cálcio, o qual é o produto responsável pela progressiva fragilização dos compósitos

(BARROS, 1996a).

As fibras de vidro adicionadas a matrizes cimentícias aumentam a energia de impacto absorvida pelo compósito. LAWS (1979, apud FÉLIX, 2002) cita que a tensão de ruptura e o módulo de elasticidade desses compósitos aumentam com o comprimento da fibra se a adesão na interface entre o polímero e a matriz for forte, sendo esse efeito beneficiado pelo uso de agentes para incrementar a aderência na interface. Isso se deve ao tipo de comportamento das fibras de vidro e da interface fibra/matriz durante o desenvolvimento da fratura.

LEGGATT (1979) comenta que o compósito formado por uma matriz cimentícia e fibra de vidro é resistente e pode ser produzido através de moldes com quase qualquer geometria razoável sem custos excessivos ou formas pesadas ou equipamentos auxiliares. CASATI (2002) acrescenta que a fibra de vidro apresenta resistência mecânica maior do que a do aço, segundo VASCONCELOS (1994), no livro *The New Science of Strong Materials*, GORDON demonstra a variação da resistência de fibras de vidro finas em função do diâmetro. Abaixo de 1 micrometro de diâmetro a resistência aproxima-se de valores superiores a 1400 MPa.

CAPÍTULO 4 – A FIBRA DE ARAMIDA

Como explicado no capítulo 1, o presente trabalho tem por foco investigar o potencial de utilização da fibra de aramida na produção de concretos resistentes a impactos. Este capítulo se detém na análise das características desta fibra de alto desempenho, já bastante utilizada em certas áreas, porém ainda pouco estudada na engenharia civil.

A fibra de aramida é uma fibra sintética, encontrada sob diversas formas e com diferentes seções transversais. Sua designação decorre da junção dos termos poliamida aromática (*aromatic poliamid*), que expressam sua composição química.

De acordo com a U.S. Federal Trade Commission, a palavra aramida é utilizada como um termo genérico para designar um conjunto de fibras manufaturadas formadas por longas cadeias sintéticas de poliamidas, na qual pelo menos 85% das ligações de amidas são formadas pela união direta de dois anéis aromáticos (YANG, 1993). Esta característica as diferencia das poliamidas convencionais, como o nylon. Considerando esta definição, a família aramida inclui diversas fibras comerciais fabricadas por diferentes empresas. Neste capítulo se fará uma análise das características deste grupo de fibras de alto desempenho, que apresentam certas propriedades que as tornam atraentes para utilização conjunta com o concreto. Atenção especial será dada às fibras de aramida tipo KEVLAR, fabricadas pela DU PONT, pois estas serão utilizadas na parte experimental da pesquisa.

4.1 COMPOSIÇÃO E ESTRUTURA QUÍMICA

As aramidas são polímeros, ou seja, compostos orgânicos formados pela ligação em

cadeia de uma série de monômeros, como ocorre com a maioria das fibras sintéticas discutidas no capítulo 2. Estes polímeros têm normalmente entre um e cinco milhões de segmentos. Cada segmento (ou monômero) de aramida é uma unidade química que contém quatorze átomos de carbono, dois átomos de nitrogênio, dois átomos de oxigênio e dez átomos de hidrogênio.

Dada sua natureza, as fibras de aramida são classificadas como fibras orgânicas da família das poliamidas aromáticas. Isto significa que as mesmas contêm grupos amida e grupos aromáticos. As amidas são grupos de átomos de carbono, nitrogênio, oxigênio e hidrogênio, arrumados como mostra a figura 4.1.

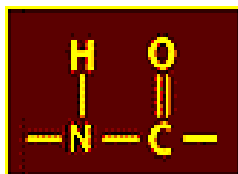


Figura 4.1 - Representação química de uma amida (LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, 2001).

Já os aromáticos compreendem hidrocarbonetos com o chamado anel benzênico. Esse é constituído por uma cadeia fechada de 6 átomos de carbono com 3 duplas ligações alternadas (ABADIE, 1989). A designação grupo aromático refere-se aos átomos de carbono ligados em anéis, similares à configuração mostrada na figura 4.2.

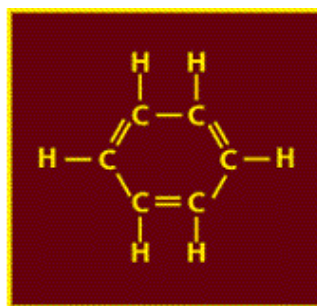


Figura 4.2 - Representação química típica de um grupo aromático. (LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, 2001).

Os polímeros aromáticos são reconhecidos pela sua estabilidade térmica em altas temperaturas. Devido à estabilidade molecular conferida pelo núcleo benzênico, os aromáticos são os hidrocarbonetos que apresentam a maior resistência à auto-ignição, ou seja, tem alto poder antidetonante. Por essa razão, muitas das fibras deste grupo

foram desenvolvidas, nos anos 50, para aplicações relacionadas com a proteção ao fogo. Os polímeros com alta resistência à ruptura frequentemente contêm um ou ambos desses grupos moleculares, como mostra a figura 4.3 abaixo. Observa-se, analisando os dados contidos na figura, que diferentes estruturas conduzem a variações marcantes nas resistências mecânicas. A simples mudança na conexão do anel aromático com o restante do polímero causa uma significativa redução na resistência à tração entre o *Nomex* (meta-orientado) e o *Kevlar* (para-orientado), de mesma composição química.

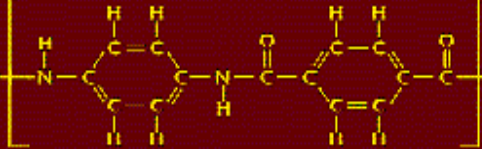
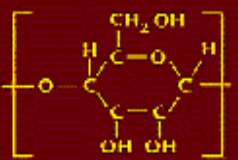

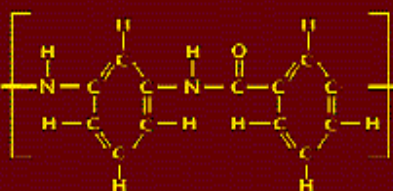
Nome Comum	Fórmula Química do Monômero	Resistência a ruptura (gramas/denier)
Kevlar		20-30
Rayon		1-2
Nylon-66		3-10
Nomex		4-5.5

Figura 4.3 - Fórmula química de alguns polímeros (LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, 2001).

Ou seja, apesar das similaridades entre o grupo de polímeros da figura, as diferenças em sua estrutura afetam significativamente a sua resistência. Isto explica porque uma poliamida aromática, para ser considerada uma aramida, deve apresentar pelo menos 85% das ligações de amidas anexadas diretamente em dois anéis aromáticos (YANG, 1993).

4.2 HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO

Na década de 60, o nylon e o poliéster representavam a tecnologia de ponta das fibras sintéticas. Entretanto, para alcançar uma grande tenacidade (resistência à ruptura) e um módulo de elasticidade elevado, as moléculas do polímero necessitam estar numa configuração de corrente estendida e com um empacotamento cristalino quase perfeito. Com polímeros de corrente flexível, tais como o nylon e poliéster, isso somente podia ser feito mecanicamente, arranjando as fibras depois de fundir e tecer o polímero base. Esta operação requeria que as cadeias fossem desembaraçadas e orientadas no estado semi-sólido, o que é muito mais difícil. Em consequência, os níveis de tenacidade e o módulo de elasticidade do material ficavam longe dos valores teoricamente possíveis. Em 1965, cientistas descobriram um novo método de produção de uma cadeia polimérica quase perfeita. O polímero poli-p-benzamina foi desenvolvido para formar soluções cristalinas líquidas devido à simples repetição de sua espinha molecular. A necessidade estrutural chave para formação desta coluna vertebral é a para-orientação do anel de benzeno, o que permite a formação de uma estrutura molecular tipo bastão (DU PONT, 199-).

A vantagem desta nova situação decorre do fato de que soluções poliméricas cristalinas líquidas demonstram um comportamento único sob cisalhamento. À medida que estas soluções passam através de um orifício, submetidas a forças de cisalhamento, os segmentos orientados aleatoriamente começam a se alinhar na direção do fluxo e terminam por gerar uma cadeia molecular com orientação quase perfeita. A estrutura supramolecular é quase inteiramente preservada na estrutura filamentar “puxada e torcida” das fibras, pois a relaxação da orientação induzida do cisalhamento é muito lenta.

A tecnologia de “montagem” de polímeros fortemente orientados abriu novas dimensões na fabricação e processamento de fibras, visto que o processo utiliza pouca energia para orientar fortemente moléculas poliméricas, permitindo produzir fibras muito resistentes. Esses desenvolvimentos conduziram à formulação das fibras de aramida comerciais encontradas atualmente. Algumas empresas utilizaram a tecnologia para desenvolver uma fibra de poli-para-fenol teraftalamida, a qual foi introduzida como uma fibra de aramida de alta resistência em 1971.

A conceituação das fibras aramida como fibras de alto desempenho vem se impondo

desde então, embora nem todas as fibras desta família apresentem um desempenho mecânico tão elevado, como discutido em 4.4.

O problema é que, segundo YANG (1993), o termo alto desempenho não possui uma definição técnica muito precisa. Normalmente, essa expressão é usada quando se faz referência a materiais altamente avançados tecnologicamente e que apresentam características de desempenho melhores que as de materiais similares, quando expostos a certas condições de utilização rigorosas. Isso abrange usos que implicam na exposição a altas temperaturas, elevadas cargas de tração ou compressão, ambientes hostis, e presumem propriedades como estabilidade dimensional, baixo peso, isolamento elétrico ou condutividade.

Dentro deste conceito, todas as fibras que foram desenvolvidas nos anos de 1950 a 1960, para utilização em situações de exposição a altas temperaturas, podem ser consideradas como fibras de alto desempenho. A partir de 1970, as novas fibras de alto desempenho desenvolvidas passaram a buscar outros aspectos, tais como a alta resistência mecânica, a elevação do módulo de elasticidade, a estabilidade térmica, a resistência química e o baixo peso específico, entre outras. As fibras aramida, com seu excelente desempenho mecânico e térmico, certamente compõem este grupo.

4.3 MARCAS COMERCIAIS DE FIBRA ARAMIDA

As fibras aramida são produzidas principalmente por quatro companhias, sob designações comerciais diferentes. A francesa Du Pont Co. produz o *Kevlar* e o *Nomex*, a Akzo BV, da Holanda produz a *Twaron*, a Teijian Corporation do Japão produz a *Technora* e a *Teijinconexe*, e, finalmente, a Rhodia, também francesa, produz a *Kermel*. Todos estes produtos apresentam características e propriedades físicas e mecânicas diferentes, mesmo quando produzidas por um mesmo fabricante, como é o caso do *Nomex* e do *Kevlar*, que, de acordo com YANG (1993) são os tipos de fibra de aramida mais conhecidos.

A fibra de aramida *Nomex* foi apresentada pela Companhia Du Pont em 1961. Quimicamente, ela é baseada em uma poli(*m*-fenileno isoftalamida), a qual contém segmentos de cadeia *meta*-orientados. Já a fibra de *Kevlar* começou a ser comercializada em 1972. A mesma apresenta uma composição polimérica similar à da

aramida *Nomex*, mas contém segmentos de cadeia *para*-orientados. Essa configuração de cadeia comunica um comportamento de cristal líquido liotrópico para sua solução anisotrópica, abaixo da temperatura de transição isotrópica-nemática. Tecendo a fibra a partir da solução anisotrópica se obtém uma elevação da resistência e do módulo de elasticidade, característica dessa aramida (YANG,1993).

De acordo com YANG (1993), a descoberta do processo de fabricação da fibra de aramida tipo *Kevlar* se iniciou em 1965, quando a cientista Stephanie Kwolek, pesquisadora da Du Pont, sintetizou uma série de poliamidas aromáticas *para*-orientadas. Em um segundo momento, Bair e Morgan, outros pesquisadores da Du Pont, determinaram, pela teoria de Flory, a concentração polimérica. Outro avanço significativo ocorreu em 1970, quando se descobriu que a utilização do jato seco no processo de fabricação molhado permitia obter uma fibra quase duas vezes mais resistente e quadruplicar a velocidade de fabricação.

O *Kevlar*, além de melhores propriedades físicas de tração que o *Nomex*, apresenta excelente estabilidade térmica e resistência à chama, como já foi discutido. Por estas razões acabou conquistando um mercado maior.

No Brasil, o consumo industrial de fibra e filamentos de poliamida, para vários usos, foi de 28.700 t em 1970, evoluindo para 90.800 t em 1980, caindo para 65.600 t em 1990, atingindo um pico de 101.500 t em 2000, e sofrendo uma retração em 2001 para 83.300t anuais (ABIT, 2003).

A fibra de aramida Kevlar foi inicialmente introduzida no mercado de fibra de alto desempenho como um fio de filamentos contínuos denominados de Fibra B. Posteriormente, uma versão com alto módulo foi desenvolvida e chamada de PRD-49. Esse nome foi substituído pela designação Kevlar 49, utilizada na comercialização. Outros tipos de fios de Kevlar foram produzidos em alguns períodos, para usos especiais. A tabela 4.1 mostra as denominações e as características dos mesmos.

Na tabela 4.2, observa-se uma comparação entre a fibra de aramida Kevlar 29 e Kevlar 49, usada nesta pesquisa, em relação à unidade tex, ao número de filamentos e ao percentual de umidade ambiente que cada tipo absorve. Nota-se que a densidade de ambas é igual.

Tabela 4.1 – Denominações dos tipos de Kevlar e suas características (YANG, 1993)

Denominação	Tipo
Kevlar 29	Fio para todas as utilizações
Kevlar 49	Fio alto módulo
Kevlar 68	Fio de módulo moderado
Kevlar 100	Fio colorido
Kevlar 119	Fio alta alongamento
Kevlar 129	Fio de alta tenacidade
Kevlar 149	Fio de ultra alto módulo

Tabela 4.2 – Propriedades de alguns tipos de fibra de aramida utilizados na pesquisa.

Propriedade	Unidade	Kevlar 29	Kevlar 49
Tipo	dtex	1670	1270
n° filamentos	unidades	1000	768
Densidade	g/cm ³	1,44	1,44
Umidade (ambiente)	%	7,00	3,5
Umidade (equilíbrio seco)	%	4,5	3,5

As fibras de aramida são fornecidas em diversas formas, tais como fios, segmentos curtos, polpa, tecidos e não tecidos. A principal diferença entre elas é a finalidade de aplicação. Os tecidos são utilizados principalmente na confecção de vestimentas resistentes a impactos e ao fogo. São também empregados na laminação de estruturas como raquetes, capacetes e pranchas de windsurf. A fibra de aramida na forma de polpa é usada para melhorar o desempenho dos elastômeros e resinas, principalmente quando resistências a altas temperaturas são requisitadas. Os segmentos de fibra, obtidos do corte de filamentos mais longos, com comprimento de pelo menos 6mm, são utilizados na formação de fios torcidos de alta resistência ao desgaste ou na fabricação de feltros e não tecidos, com o intuito de criar elementos de isolamento acústico ou de amortecimento de vibrações. Este é o formato que vai ser testado para incorporação no concreto. Já a aramida em forma de floco apresenta um comprimento inferior ao da forma de grampo em torno de 1mm. É utilizada para aumento da resistência sem afetar significativamente a viscosidade do sistema (DU PONT, 199-). A figura 4.4 mostra a fibra de aramida como tecido, enquanto a figura 4.5 mostra a mesma como polpa (a), segmento (b) e floco (c).

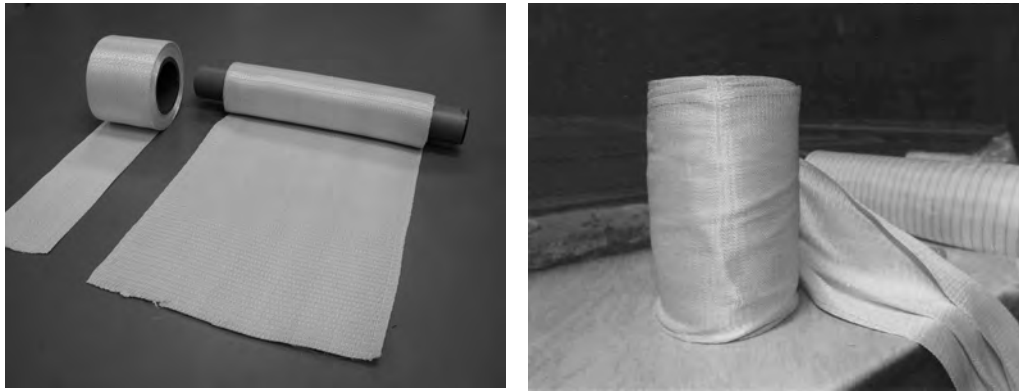


Figura 4.4 – Apresentação da fibra de aramida como tecido (DU PONT, 199-).

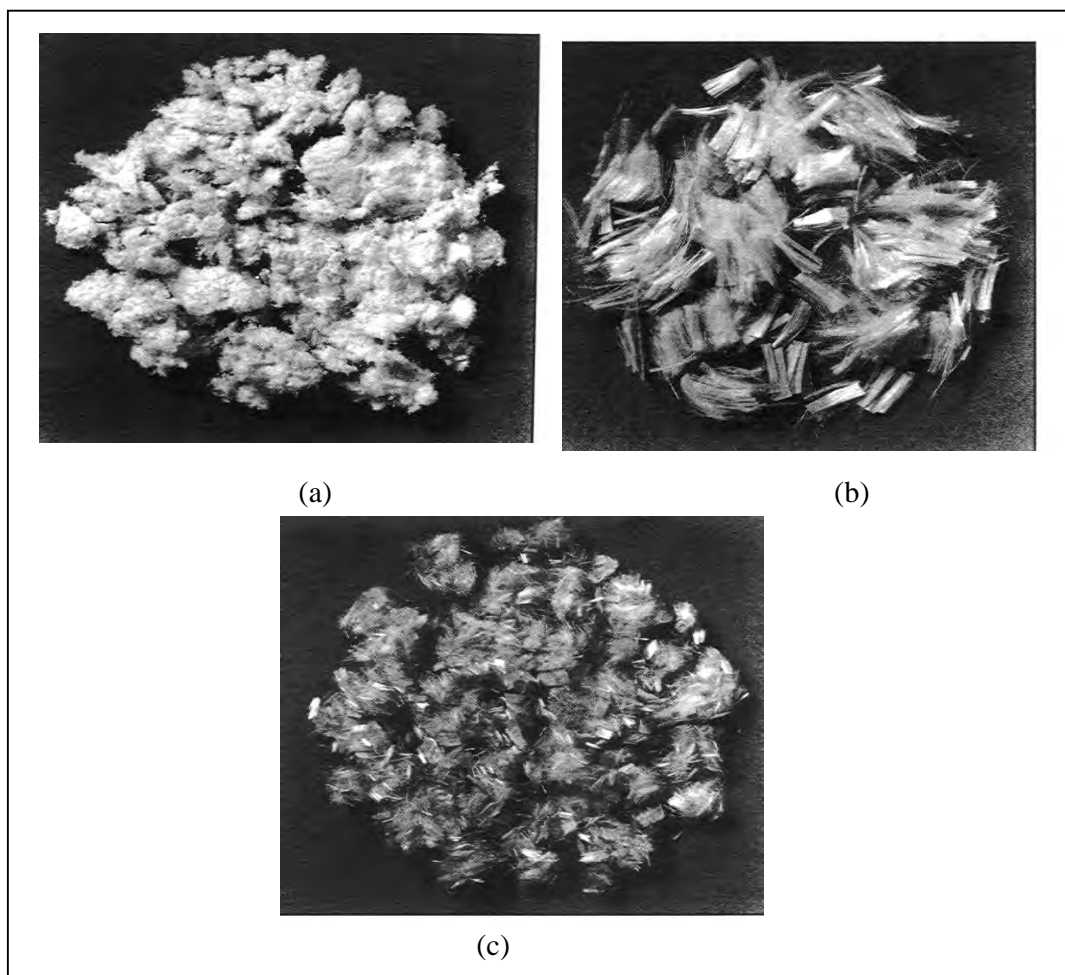


Figura 4.5 – Aramida na forma de polpa, segmentos e flocos (DU PONT, 199-)

Salienta-se que fibras de fabricantes distintos podem apresentar comportamentos similares ou bastante diferenciados. Exemplificando, compósitos de fibra de aramida da Twaron apresentam comportamento semelhante ao Kevlar 49. Já a Technora tem uma

absorção de água menor. Fabricada pela Teijian Corp. do Japão, a Technora não é fiada com uso de ácido sulfúrico e, portanto, não existem impurezas de sulfato de sódio ou ácido no seu interior. Como resultado, a absorção de umidade é inferior e, conseqüentemente, a fibra é menos suscetível à umidade (SEN et. al, 1999).

4.4 PROPRIEDADES E DESEMPENHO DAS FIBRAS ARAMIDA

Segundo MANO (2000), as propriedades físicas são aquelas que não envolvem qualquer modificação estrutural a nível molecular do material. Dentre elas, incluem-se as propriedades mecânicas, térmicas, elétricas e óticas.

Como as propriedades físicas das fibras, particularmente a resistência à tração, estão intimamente relacionadas com sua microestrutura, ou seja, com parâmetros como o grau de orientação cristalina, tamanho do cristal e cristalinidade da fibra, é fundamental, antes de analisar suas propriedades, avaliar a fibra em nível microscópico (YANG, 1993).

4.4.1 ASPECTO MICROESTRUTURAL

Como discutido no item 4.2, a fibra de aramida consiste em uma série de cadeias com grupos amida e aromáticos arranjados em seqüência, orientadas paralelamente umas as outras. Este arranjo ordenado de moléculas forma uma estrutura cristalina, bastante estável e resistente, que justifica a sua elevada resistência e rigidez.

O processo contínuo de fabricação das fibras, conhecido como fiação por fusão (MANO, 1999), envolve a passagem de uma pasta de material fundido através de uma fieira de pequenos orifícios (*spinneret*), formando filamentos viscosos ordenados em cadeias poliméricas. Quando a pasta é forçada através dos orifícios de moldagem, a cadeia polimérica se orienta de forma paralela ao eixo da fibra. Isto confere à mesma uma natureza anisotrópica, favorecendo sua resistência axial.

A fibra de aramida é formada pela união destas longas cadeias poliméricas, que se mantêm unidas por ligações de ponte de hidrogênio formadas entre os grupos de amida polares das cadeias adjacentes, conforme se observa na figura 4.6. A menor energia

destas ligações explica porque a resistência radial das fibras é muito menor que sua resistência axial.

No caso particular do Kevlar, os componentes aromáticos têm uma orientação radial, a qual fornece um alto grau de simetria e regularidade na estrutura interna da fibra, como os átomos em um cristal. Devido a essa estrutura altamente organizada, a fibra possui poucos defeitos ou lugares fracos, maior razão para a sua resistência excepcional.

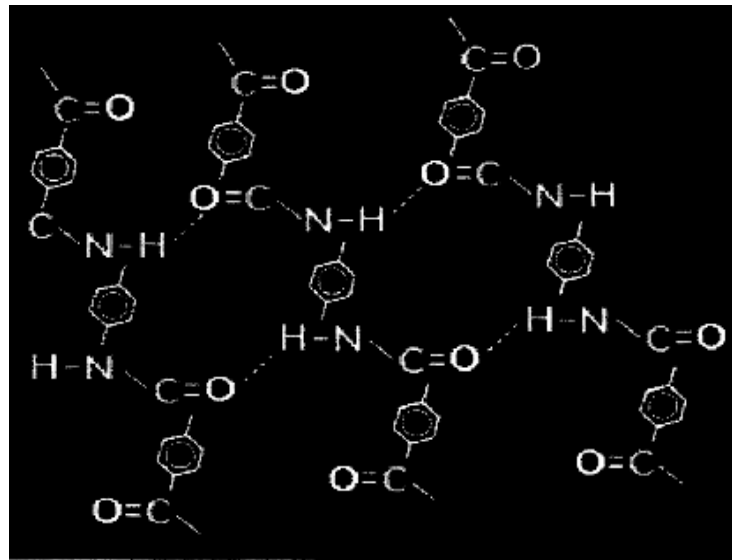


Figura 4.6 – Plano de ligação de pontes de hidrogênio (LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, 2001).

A figura 4.7 mostra uma microscopia de um fio de aramida. A imagem é proveniente do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (*National Synchrotron Light Source*) de Nova York, nos Estados Unidos, e mostra a ponta de um filamento de Kevlar.

Para produzir a imagem foi utilizado um microscópio de raio X tipo XANES, equipamento apropriado para revelar a orientação das moléculas no material (LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, 2001). Pode-se verificar na figura a orientação radial do polímero, fator decisivo na sua resistência.

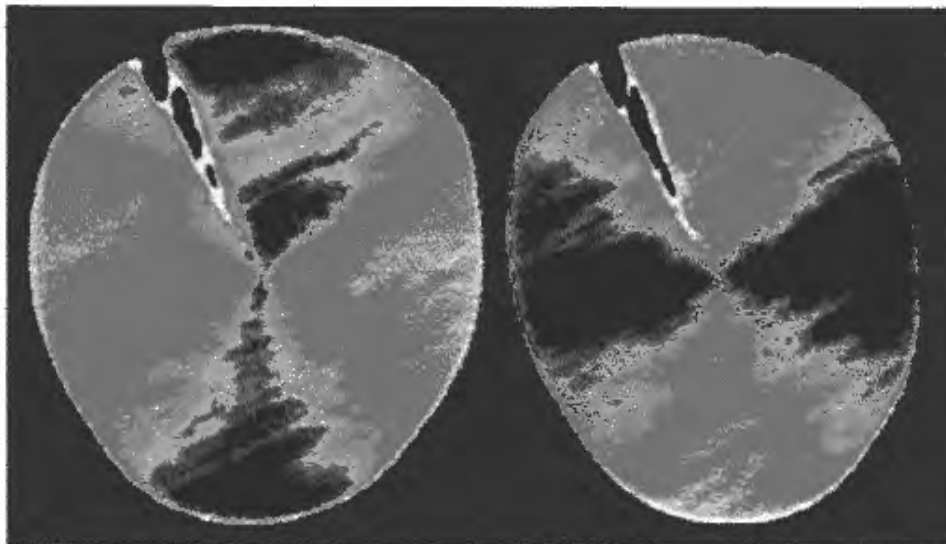


Figura 4.7 – Microscopia da seção transversal de um filamento de aramida (LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, 2001).

4.4.2 GEOMETRIA E DENSIDADE

Os vários tipos de fibra de aramida tipo Kevlar possuem propriedades muito semelhantes, conforme mostrado na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Propriedades físicas dos produtos de aramida Kevlar (YANG, 1993)

Denominação	Denier / filamentos	Diâmetro filamento (μm)	Seção transversal	Densidade (g/cm ³)	Tenacidade (GPa)	Alongamento (%)	Módulo (GPa)
Kevlar	1,5-2,25	12-15	Circular	1,44	2,9	3,6	70
Kevlar 29	1,5-2,25	12-15	Circular	1,44	2,9	3,6	70
Kevlar 49	1,5	12	Circular	1,45	2,9	2,8	135
Kevlar 68	2,25	15	Circular	1,44	3,1	3,3	99
Kevlar 119	1,5-2,25	12-15	Circular	1,44	3,1	4,4	55
Kevlar 129	1,5	12	Circular	1,45	3,4	3,3	99
Kevlar 149	1,5	12	Circular	1,47	2,3	1,5	143

Como se pode ver na tabela, todas as fibras apresentam seção circular e seus diâmetros nominais ficam entre 0,012mm e 0,015 mm, com densidade variando de 1,44 g/cm³ e 1,47 g/cm³. Em relação à densidade, é interessante estabelecer uma comparação com outras fibras. O nylon possui densidade de 1,14 g/cm³, o poliéster, 1,38 g/cm³, a fibra carbono, 1,8 g/cm³, o vidro, 2,55 g/cm³ e o aço 7,9 g/cm³.

Ou seja, as fibras de aramida tipo Kevlar são ligeiramente mais densas do que as fibras de nylon e de poliéster; porém consideravelmente menos densas do que as fibras carbono, de vidro e de aço. Por isso, apresentam uma vantagem, em termos de peso, para uma mesma referência de resistência (YANG, 1993).

4.4.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas compreendem a totalidade das propriedades que determinam a resposta dos materiais às influências mecânicas externas e são manifestadas pela capacidade desses materiais desenvolverem deformações reversíveis e irreversíveis e serem resistentes à fratura (MANO, 2000).

As propriedades mecânicas mais importantes decorrem de processos onde há grandes relaxações moleculares. Essas relaxações dependem em alto grau da temperatura e da capacidade de desenvolver deformações reversíveis pronunciadas. De acordo com MANO (2000), os polímeros com cadeias formadas por anéis aromáticos, interligados por um ou dois átomos pertencentes a grupos não-parafínicos, oferecem maior dificuldade à destruição da ordenação macromolecular e, portanto, apresentam propriedades mecânicas mais elevadas, as quais se mantêm ao longo de uma ampla faixa de temperatura.

Além disto, os polímeros normalmente apresentam valores de resistência à tração relativamente baixos (abaixo de 100 MPa), porém estes valores podem ser muito superiores quando os polímeros são transformados em fibras.

Em termos das demais propriedades mecânicas mais tradicionais, os polímeros normalmente apresentam grande alongamento na ruptura; elevada dureza e módulo de elasticidade; boa resistência à compressão, à flexão, à fadiga, ao impacto, à fricção e à abrasão. A seguir revisa-se brevemente o comportamento específico da aramida.

De acordo com SALAVERRÍA et. al (1997), as fibras de aramida apresentam resistência à tração em torno de 3.150 MPa, módulo elástico de 125.000 MPa e nenhuma resistência à compressão. Segundo YANG (1993), a fibra aramida é proporcionalmente mais resistente à tração que o aço e a fibra de vidro, como mostra a tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Comparação das fibras de alto desempenho (YANG, 1993)

Denominação	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm ³)	Resistência (GPa)	Resistência específica (GPa)	Módulo (GPa)	Módulo específico (GPa)	Alongamento (%)
Kevlar 29	12	1,43	2,9	8,8	70	2,1	3,6
Kevlar 49	12	1,45	2,9	8,8	135	3,6	2,8
Kevlar 119	12	1,44	3,1	9,2	55	1,6	4,4
Kevlar 129	12	1,45	3,4	10,1	99	3,0	3,3
Kevlar 149	12	1,47	2,3	6,9	143	4,2	1,5
Nomex		1,38	0,6	1,9	17	0,5	22,0
Technora	12	1,39	3,3	10,3	70	2,2	4,3
E Glass	5-25	2,55	2,6	4,4	72	1,2	3,0
S Glass	5-15	2,48	4,8	8,4	85	1,5	5,3
Aço		7,8	7,6	4,2	150	0,8	4,8

Quando comparada com a fibra de vidro tipo S, verifica-se que a fibra de vidro é mais atraente quando se necessita minimizar custos e não se deseja resistências tão altas. Já o Kevlar é a fibra preferida quando um peso menor é necessário e um custo mais alto é aceitável. Quanto ao comportamento à deformação, observa-se que grandes alongamentos na ruptura, da ordem de 900 %, são uma característica dos polímeros. As poliamidas, em geral, de fato apresentam um elevado alongamento e comportamento elástico até uma resistência próxima à resistência de ruptura (AGUIAR NETO, 1996). Entretanto, de acordo com YANG (1993), a fibra de aramida Kevlar possui um alongamento baixo na ruptura, comparável ao do aço. Sua tenacidade na ruptura, entretanto, é diversas vezes superior à de um arame, nylon industrial ou fibra de poliéster.

Além disso, as fibras têm características diferentes que podem ser alteradas durante seu processo de fabricação. É possível obter as curvas de tensão-deformação; entretanto, os ensaios existentes são insuficientes para descrever completamente os materiais poliméricos a nível molecular.

Na comparação da fibra de aramida com a fibra de poliéster, por exemplo, segundo AGUIAR NETO (1996), mesmo os pontos de ruptura sendo próximos, as fibras de poliéster apresentam módulo inicial visivelmente superior ao da poliamida. As diferenças nas curvas “tensão-deformação” de uma poliamida comercial e das fibras de poliéster são devidas às alterações decorrentes dos processos de extrusão e estiragem durante sua fabricação. Quando as fibras são submetidas a intervenções com calor e tensão, pode-se alterar substancialmente suas características e, conseqüentemente, as

suas curvas “tensão-deformação”.

Fibras do mesmo fabricante podem assumir características bem diferentes, dependendo do processo de fabricação e tecelagem. A tabela 4.5 mostra as propriedades de diferentes tipos de aramida Kevlar, oriundas de ensaios em cabos fabricados pela DU PONT. Observa-se que o Kevlar 49, embora apresentando a mesma densidade e tenacidade similar ao Kevlar 29, é muito mais resistente. Isto é obtido enrijecendo a cadeia, o que diminui a capacidade de alongamento, como se vê na tabela.

Tabela 4.5 – Resultados de testes com cabos DU PONT (199-)

Testes diretos em cabos condicionados			
	Unidade	Kevlar 29	Kevlar 49
Esforço de ruptura	N	338	264
Esforço de tenacidade	MPa	2920	3000
Módulo de tração	MPa	70500	112400
Alongamento de ruptura	%	3,6	2,4

4.4.4 MODO DE RUPTURA À TRAÇÃO

Existem três tipos básicos de ruptura à tração de fibras: a ruptura pontual, a ruptura fibrilada e a ruptura da região com defeito. Estes modos de ruptura podem ser prontamente identificados através do exame da superfície da fibra após a ruptura.

O primeiro tipo de ruptura, a ruptura pontual, se caracteriza por gerar uma redução gradual da seção transversal da fibra na direção do ponto de ruptura. Este fenômeno pode ser bastante intenso. Por exemplo, o diâmetro nominal de uma fibra aramida é da ordem de 12 μm , enquanto o diâmetro reduzido na seção rompida chega a ser de 2 a 4 μm . Isso é significativo, porque a tenacidade da fibra é normalmente calculada com base em sua área de seção transversal (YANG, 1993). Rupturas pontuais são freqüentemente observadas na fibra de aramida Kevlar 49, em ensaio com taxas de deformação baixas.

O segundo tipo de ruptura da fibra de aramida é o mais habitualmente observado nas rupturas a tração das fibras Kevlar. Essa ruptura é sempre fibrilada, ocorrendo uma redução considerável do diâmetro da fibra.

O terceiro tipo de ruptura é uma ruptura prematura de tração na presença de defeitos. É

caracterizada pela pouca ou nenhuma alteração do diâmetro da fibra, pelo ângulo da fratura e pela morfologia da ruptura no final da fibra (YANG, 1993). Observa-se um plano de cisalhamento do defeito, o qual representa uma descontinuidade na fibra, e, conseqüentemente, gera uma tendência de diminuição da resistência da mesma.

Muitos fatores podem afetar o tipo de ruptura da fibra na ruptura a tração. Eles incluem a interação da vizinhança de filamentos em uma fibra, tensão da fibra a flexão e a compressão, a taxa de deformação e a estrutura da fibra (YANG, 1993). Esses fatores alteram o início da ruptura e a sua propagação.

4.4.5 PROPRIEDADES TÉRMICAS

Segundo YANG (1993), sendo o Kevlar uma aramida, essa fibra é inerentemente estável em temperaturas relativamente altas. De fato, as poliamidas aromáticas tendem a apresentar uma excepcional resistência ao calor, resistindo a valores da ordem de 550°C. Por esta razão são usadas extensivamente em equipamentos de combate a incêndios e materiais anti-chama. De acordo com ROCHA (2000), a aramida quando adicionada a uma resina epóxi promove uma resistência ao calor em torno de 400°C. Esses valores não são concebíveis para a matriz.

Além disso, as fibras de aramida apresentam retração pequena a temperaturas elevadas, comportamento auto-extinguível frente à chama e excelentes propriedades dielétricas (MANO, 2000).

4.4.6 RESISTÊNCIA AO IMPACTO

Nos compósitos reforçados com fibra de aramida, observa-se uma resistência ao impacto melhor do que em compósitos com fibra de vidro ou fibra de carbono. Além disso, nota-se um grau alto de tolerância ao dano (YANG, 1993). Comparativamente, a fibra de carbono apresenta um comportamento frágil e uma baixa resistência ao impacto.

TREVISAN (2001) afirma que a resistência a impactos da fibra de aramida é bem conhecida e justifica sua utilização como material de blindagem, em pára-choques de automóveis e em dispositivos de proteção pessoal.

No caso dos compósitos balísticos, o desempenho das fibras depende da taxa de absorção de energia e dos mecanismos de fratura dinâmica durante o impacto. Normalmente, os compósitos avançados podem absorver uma energia de impacto muito maior do que os materiais metálicos convencionais. De acordo com SOUSA et. al (2002), muitas vezes se empregam tecidos com a finalidade de evitar a propagação das linhas de ruptura e desempenhar uma função estrutural e de proteção aos compósitos.

4.4.7 DURABILIDADE

Além de resistente a altas temperaturas, as fibras de aramida podem ser consideradas, de forma geral, como sendo bastante duráveis. As mesmas apresentam uma retração muito pequena, baixa fluência e uma temperatura de transição vítrea bastante elevada. Além disso, não são condutivas e são resistentes a ácidos e bases (ROCHA, 2002).

De fato, as fibras de aramida apresentam uma excelente resistência química, sendo resistentes à corrosão na presença da maioria dos produtos químicos, solventes, combustíveis, detergentes e ao ataque da água do mar. Apesar do fato de que esta durabilidade inerente à corrosão das fibras de aramida pode se constituir em uma das mais importantes vantagens competitivas que justifiquem sua utilização, as informações e estudos sobre o assunto ainda são escassos. Um pequeno número de estudos tem sido relatado, porém os mesmos se encontram focados no aspecto da durabilidade intrínseca do material, avaliando sua resistência química a álcalis ou sua fluência, por exemplo. Um número bem reduzido de estudos foi desenvolvido sobre a durabilidade da aramida no concreto. Contudo, os ensaios apresentados na literatura foram realizados em condições controladas de temperatura e umidade e, por isso, não fornecem índices confiáveis de desempenho (SEN et. al, 1999).

Um problema potencial é que as fibras de aramida são higroscópicas, ou seja, podem absorver água. Isto pode causar o inchamento das fibras acarretando, em longo prazo, problemas de aderência ou de durabilidade. A quantidade de umidade passível de ser absorvida por uma fibra depende de vários fatores, tais como: o empacotamento das fibras, a morfologia do núcleo e sua ligação com a superfície da fibra, as características das ligações ao longo da seção transversal da fibra, a presença de impurezas químicas e a umidade relativa. De forma genérica, acredita-se que as fibras podem absorver até 8

por cento de umidade em relação ao seu peso (NATIONAL CLIMATIC DATA CENTER, 1991 e KEINATH et. al, 1990 apud SEN et. al, 1999).

4.4.8 TINGIMENTO

PROVOST (apud YANG, 1993) verificou que os filamentos contínuos de Kevlar não aceitam tingimento. Entretanto, através das pontas ou fissuras na superfície das fibras, o acesso para introdução de tintas ou corantes, capazes de colorir a fibra, é possível.

4.4.9 RECOMENDAÇÕES EM RELAÇÃO AO MANUSEIO

A aramida Kevlar é estável em condições de temperatura e armazenamento normais. Ela inicia sua decomposição em torno dos 400°C ao ar pela oxidação.

O corte a laser ou o superaquecimento dos tecidos ou fios de Kevlar pode gerar alguns gases levemente tóxicos, que podem causar irritação respiratória. A Companhia Du Pont recomenda que duas fibras respiráveis/cm³ e 5mg/m³ total de resíduos de Kevlar são os limites aceitáveis de exposição. A US OSHA especificou 15 mg/m³ de resíduo total e 5 mg/m³ de fibras respiráveis como limite de exposição permitido (YANG, 1993).

O Kevlar é inerentemente resistente a chama. Ele pode entrar em ignição, mas a queima normalmente acabará quando a fonte da chama for retirada. A polpa ou o pó não apresenta perigo de explosão.

Nenhum componente na fibra de aramida Kevlar está designado como cancerígeno e seus resíduos não são um lixo perigoso.

Uma das desvantagens da fibra de aramida é a dificuldade de cortá-la. Foram desenvolvidas tesouras específicas para essa finalidade justamente devido a essa dificuldade. As dificuldades do corte provem da dureza da fibra, pois a aramida Kevlar é um material inerentemente resistente devido a sua natureza organizada e à combinação de suas propriedades físicas (MINER, 1984). A aramida não é um material frágil, como o carbono ou as fibras de vidro e, por essa razão, apresenta vantagens em um grande número de usos finais.

Além de tesouras, outras ferramentas foram desenvolvidas para facilitar o corte e aparar a aramida, conforme se pode verificar na figura 4.8.



Figura 4.8 – Corte do tecido de aramida com disco de corte.

4.5 APLICAÇÕES

Como discutido no item anterior, as fibras aramida são materiais com baixo peso específico e alta resistência à tração, que não corroem, que apresentam alto módulo de deformação, que não conduzem eletricidade e que são resistentes a agentes químicos, a altas temperaturas e a impactos. Isto justifica sua larga utilização, tanto para aplicações industriais como civis. YANG (1993) afirma que as fibras aramida são usadas, sob diversas formas, pelas indústrias aeroespacial, química, mecânica e militar.

No caso específico do Kevlar, LANGSTON (1984) identifica uma tendência de crescimento no consumo, devido ao emprego em uma grande variedade de aplicações, incluindo a fabricação de pneus, de satélites espaciais e de cabos subaquáticos de comunicação de dados. Capacetes, pranchas de surfe e a área recreativa também constam da lista de aplicações da fibra Kevlar. No caso de capacetes, observa-se um aumento da resistência a impactos na ordem de 30%, acrescido de uma redução de peso. A indústria aeroespacial, em particular, se beneficiou muito com a utilização do Kevlar em diversas peças dos aviões, foguetes, helicópteros e mísseis. O Concorde, após o trágico acidente ocorrido na França, teve seu projeto reformulado, e seus tanques de combustíveis foram revestidos com Kevlar para aumentar a resistência a impactos, explosões e altas temperaturas. De acordo VAN HAASTERT e ROSENBERG (1984),

no caso dos esquemas de proteção de cabines nas aeronaves de vôo, a demanda por materiais leves e altamente resistentes vem justificando a utilização do Kevlar.

MORRIS (1984) descreve aplicações do Kevlar em motores de foguetes de alto desempenho e em vasos de pressão, salientando que a aramida Kevlar provou ter potencial para fabricação de compósitos de alto desempenho e foi selecionada para emprego em tanques de armazenagem no espaço. A aramida também é freqüentemente utilizada em serviços subaquáticos, revestindo tanques e plataformas submarinas, dadas as suas características de ser imune à corrosão, não ser eletro-condutora e ser resistente a produtos químicos (ROCHA, 2002).

As características da aplicação definem qual o tipo de aramida a empregar. Por exemplo, o Kevlar é indicado para reforço de pneus, cintos de segurança e cabos eletromecânicos. Já o Kevlar 29 é mais aplicado em equipamentos de proteção pessoal e na área balística, sendo também utilizado na produção de tecidos, fitas adesivas e telas. O Kevlar 49, mais resistente e com módulo mais elevado, é empregado em plásticos reforçados, aviões e área aeroespacial, naval, produtos esportivos, área elétrica e em produtos pultrudados.

4.5.1 EMPREGO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Embora largamente utilizada em outras indústrias, na construção civil a fibra aramida ainda é pouco usada. A premissa da presente pesquisa é investigar sua utilização nesta função, como discutido no capítulo 1. Três estratégias de utilização poderiam ser concebidas: fibras incorporadas na massa, tecidos de aramida como parte de um compósito de reforço ou perfis pultrudados de aramida.

Neste trabalho só interessa o primeiro tipo de utilização. Neste caso, as fibras aramida, cortadas em segmentos curtos, são misturadas à massa de concreto, de maneira a gerar uma rede tridimensional que colabora para aumentar a resistência do material à fissuração, pela inclusão de uma série de elementos que atuam como “grampos”, de acordo com o mecanismo discutido em 2.2.2.

Os segmentos podem ser obtidos do fabricante já na forma de grampos, como discutido anteriormente, ou podem ser cortados a partir de fios de aramida, que são fornecidos em rolos para confecção de tecidos. Cada fio é formado por vários filamentos que devem

ser separados para uma melhor dispersão no concreto.

Segundo TANESI e AGOPYAN (1997), as fibras aramida não apresentam problemas de durabilidade em ambientes alcalinos, o que é fundamental para viabilizar sua utilização “in natura” no concreto. Entretanto, estes autores comentam que pode haver problemas de aderência.

Como benefícios esperados da incorporação de aramida ao concreto, temos o aumento da capacidade de carga, a restrição da deformação, o aumento da ductilidade e da segurança, a imunidade à eletro-corrosão, uma maior durabilidade e um alto desempenho em caso de acidentes ou atentados.

Desta forma, embora tenham um custo elevado e haja suspeitas quanto à sua aderência ao concreto, as excelentes propriedades mecânicas e a boa durabilidade da fibra aramida parecem indicar que sua utilização no concreto é viável e que uma pequena quantidade de fibras pode já ter efeitos positivos quanto ao controle da fissuração e aumento da ductilidade. Esta convicção guiou o estabelecimento do programa experimental discutido no capítulo 5.

CAPÍTULO 5 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nesse capítulo será apresentada a estratégia de pesquisa adotada e serão descritos os materiais utilizados, bem como os procedimentos de ensaio empregados para analisar o comportamento mecânico de concretos fabricados com e sem adição de fibra aramida.

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Como detalhado no capítulo 1, a presente pesquisa tem por objetivo verificar o comportamento da fibra de aramida quando incorporada a uma matriz de cimento, buscando fornecer dados sobre sua viabilidade como alternativa para confecção de concretos especiais.

A escolha da fibra de aramida foi baseada nas suas características de alto desempenho, assim como a fibra de carbono, entretanto apresentando um custo competitivo e uma boa durabilidade em relação a outras fibras. Supõe-se, portanto, que a mesma possa trazer melhorias significativas ao comportamento do concreto quando o compósito for submetido a solicitações mecânicas, colaborando para controlar ou distribuir mais adequadamente fissuras provocadas por cargas ou variações volumétricas. Além disso, como a fibra de aramida apresenta elevada resistência à tração e alto módulo de elasticidade, acredita-se que a mesma seja especialmente propícia para a confecção de concretos resistentes a solicitações dinâmicas, resultantes de impactos, uma área de grande interesse na atualidade.

A problemática consiste no fato de que o comportamento da fibra aramida no concreto

ainda é pouco conhecido, embora a fibra de aramida já seja amplamente empregada nas indústrias têxtil e automobilística. Dados confiáveis sobre as propriedades químicas e mecânicas do compósito resultante não estão disponíveis. Isso influenciou na definição da estratégia de pesquisa adotada no trabalho, apresentada a seguir.

5.2 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

Diante da escassez de estudos sobre o assunto, a estratégia de pesquisa teve que assumir um caráter exploratório, com o estabelecimento de uma série de ensaios independentes, organizados em duas fases.

Na primeira fase, denominada **preliminar ou exploratória**, se definiram os parâmetros básicos para geração de um compósito com incorporação da aramida. Para tanto, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos para os ensaios de compressão simples e corpos-de-prova prismáticos nas dimensões 4x4x16 cm para o ensaio de tração na flexão, com teores e comprimentos de fibra diferentes. Os resultados da fase preliminar foram utilizados para subsidiar a fase seguinte.

Na segunda fase, **de avaliação**, buscou-se analisar a eficácia de altos teores de fibra de aramida, com vistas a definir um traço para os ensaios de desempenho comparativo de concretos com fibras ao impacto. Desta forma, concretos com diferentes teores de aramida foram inicialmente caracterizados, em termos de suas resistência à compressão e à tração na flexão, sendo avaliados ainda os efeitos da variação de teor sobre a trabalhabilidade e o peso específico dos corpos-de-prova. Feito isto, definiu-se um teor de referência recomendado para uso da fibra. Este teor foi empregado para estabelecer a base de comparação para a confecção dos corpos-de-prova com incorporação de outras fibras (sisal, polipropileno, aço e vidro) para os ensaios de desempenho comparativo ao impacto. Em todos os ensaios adotou-se, como parâmetro de referência, um concreto sem adição de fibra, com resistência média à compressão de 30 MPa.

Paralelamente a estas análises sobre o desempenho do compósito, foram também realizados ensaios de caracterização da fibra aramida. Cabe ainda ressaltar que, de forma geral, se admitiram como válidos os valores fornecidos pelo fabricante para as propriedades da fibra de aramida Kevlar utilizada nessa pesquisa. Contudo, optou-se pela realização de alguns ensaios específicos que permitissem validar os dados

disponíveis e esclarecer como a fibra funcionava. Estes ensaios compreenderam a análise da resistência média à tração de fios de aramida, visto que, como o fio é formado por vários filamentos independentes, muitas vezes não é possível mobilizar todos simultaneamente, o que reduz a resistência potencial da fibra. Foram também realizados ensaios de análise termogravimétrica e de módulo de armazenamento, para fins comparativos com os valores fornecidos pelo fabricante. Por fim, foram feitas análises por microscopia eletrônica dos segmentos de fio antes da incorporação ao concreto, visando obter dados qualitativos sobre a espessura e aparência dos filamentos.

Microscopias do compósito também foram realizadas para análise da aderência e da forma de distribuição da fibra na matriz cimentícia, assim como para verificar a forma de ruptura do compósito e dos filamentos.

5.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Apresenta-se na figura 5.1 o fluxograma das etapas do programa experimental desenvolvido na pesquisa. Como explicado acima, o estudo está dividido em duas etapas: exploratória e de avaliação.

A **etapa exploratória** de estudos consistiu em uma bateria de ensaios de caracterização que buscaram analisar as variações de comportamento de concretos com a adição de fibra de aramida Kevlar. Decidiu-se que seria fundamental iniciar o trabalho pela coleta de dados básicos sobre o comportamento mecânico do concreto com fibra de aramida. Dessa forma, tomando como referência os dados disponíveis na bibliografia, relativos à adição de fibras ao concreto, foi proposta uma série de ensaios de resistência à compressão simples e de resistência à tração na flexão. Os ensaios foram realizados para vários comprimentos e teores de fibra, buscando indicativos sobre quais os valores mais interessantes, sob uma perspectiva de custo-benefício, dentro do intervalo examinado. Foram analisadas misturas com teores de fibra de $0,3 \text{ kg/m}^3$, $0,6 \text{ kg/m}^3$ e $0,9 \text{ kg/m}^3$ e comprimentos de 12mm, 25mm, 50mm e 100mm.

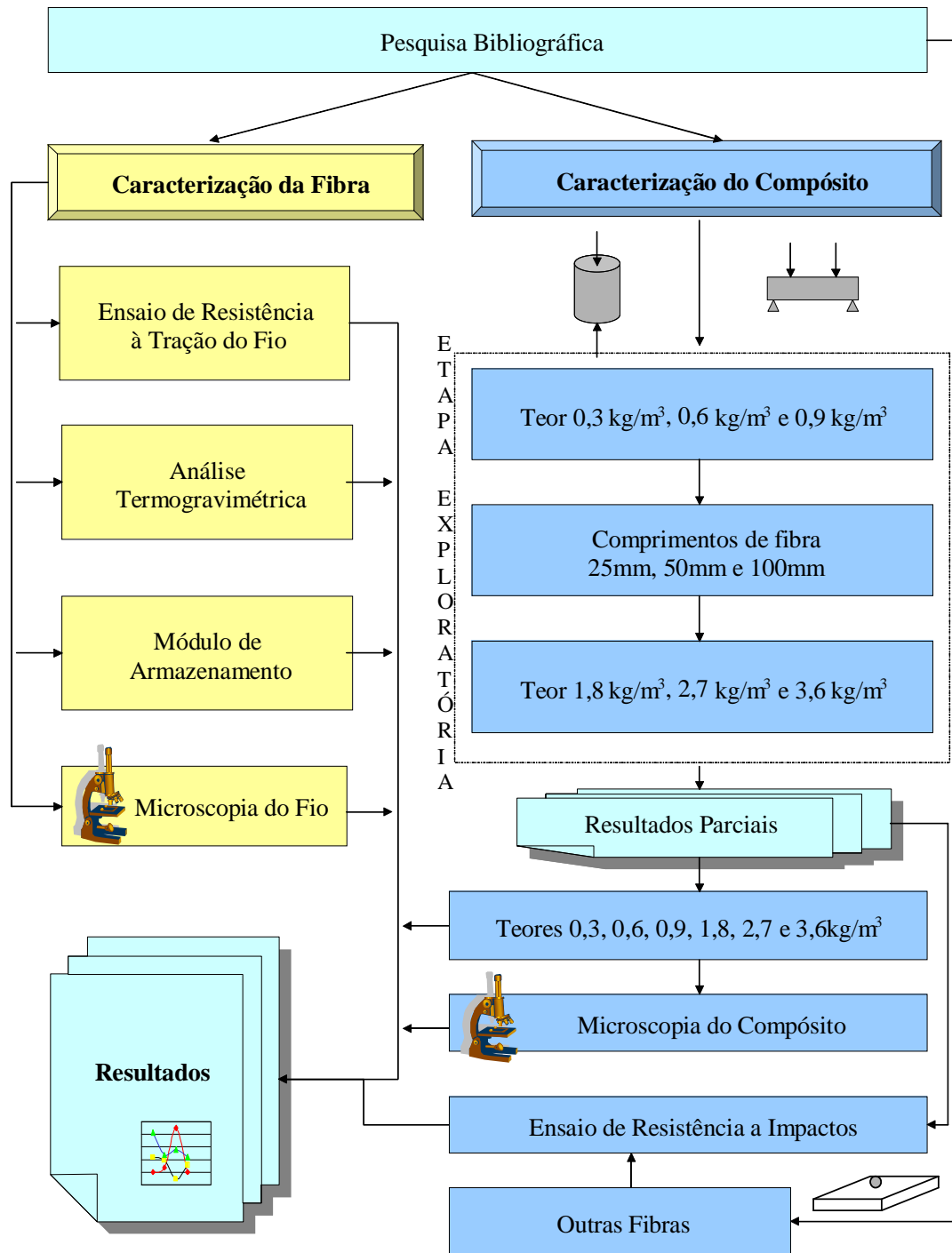


Figura 5.1 – Fluxograma de etapas

A definição destes teores foi baseada no fato de que a fibra de aramida se assemelha, dada sua natureza química e diâmetro, à fibra de polipropileno, como discutido nos capítulos 3 e 4. O fabricante da fibra de polipropileno recomenda que se utilize um teor

0,6 kg/m³ de fibras, com comprimento de 12 mm, para redução da retração plástica de concretos. Decidiu-se então iniciar a investigação com variações em torno destes valores.

Os primeiros resultados indicaram que a utilização de teores superiores a 0,9 kg/m³ poderia se mostrar promissora. Antes de prosseguir nesta investigação, entretanto, foi necessário definir qual o comprimento da fibra a empregar. Assim, o segundo passo abordou compósitos formados com adição de fibra de aramida com comprimentos de 25mm, 50mm e 100mm, para o teor de 0,9 kg/m³, além de concretos sem adição de fibra. Ainda nessa fase, foram avaliadas as alterações do peso específico dos corpos-de-prova devido à adição de fibra de aramida e foram realizados testes de abatimento para avaliar a alteração da trabalhabilidade pelo mesmo motivo. Os ensaios realizados na etapa exploratória, além de fornecerem os dados utilizados no ensaio de impacto, também forneceram as amostras utilizadas na microscopia do compósito.

De posse de todos os dados da etapa exploratória, partiu-se para a etapa de avaliação propriamente dita, onde foram avaliados teores mais elevados, mantendo-se o comprimento fixo de 12mm.

Na **etapa de avaliação** foram analisados concretos com teores de fibra de 0,3 kg/m³, 0,6 kg/m³, 0,9 kg/m³, 1,8 kg/m³, 2,7 kg/m³ e 3,6 kg/m³, através de ensaios de compressão simples (com corpos-de-prova cilíndricos de 10x20 cm) e de tração na flexão (em vigas com dimensões 10x10x30 cm).

Para o ensaio de impacto foram moldadas placas de 30x30x6 cm, com diferentes tipos de fibra, além da aramida. As razões para a seleção destas fibras foram discutidas no capítulo 3.

De forma resumida, as fibras de aço e polipropileno foram escolhidas por já serem comercializadas com a finalidade de aumentar a resistência a impactos. A fibra de vidro, dada sua utilização crescente em consórcio com matrizes cimentícias. O sisal, representante das fibras naturais, foi escolhido por ser abundante e ter custo baixo.

Todos os experimentos foram realizados no LEME (Laboratório de Ensaios e Modelagem Estrutural), do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com exceção dos ensaios de caracterização da fibra, realizados no Laboratório de Materiais Poliméricos (LAPOL) e da análise microscópica das amostras de concreto e da fibra de aramida, as quais foram realizadas no Centro de Microscopia da mesma universidade.

5.4 MATERIAIS EMPREGADOS

Tendo em vista que o objetivo da pesquisa era analisar o potencial de utilização da fibra de aramida em estruturas de concreto armado, foram utilizados, para confecção do concreto de referência, materiais comumente encontrados em obras. Não houve preocupação com a definição de fornecedores ou marcas específicas, sendo utilizados os materiais disponíveis no laboratório, isto é, cimento Portland de alta resistência inicial, areia média do rio Jacuí, brita de basalto, descritos a seguir.

5.4.1 FIBRAS

A fibra de aramida utilizada, tipo KEVLAR 49, foi doada para a pesquisa pela empresa DU PONT. A mesma foi obtida na forma de uma bobina de fio de cinco feixes. Os segmentos de aramida foram obtidos a partir do corte do fio com auxílio de uma guilhotina. Para os testes iniciais, a fibra de aramida foi cortada nos comprimentos de 12mm; 25mm, 50mm e 100mm. Posteriormente, a mesma foi pesada e separada, para ser adicionada à mistura em diversos teores. Para os testes comparativos, se estabeleceu um comprimento padrão de 12mm.

A fibra de aço utilizada era procedente da empresa Belgo Mineira, comercializada sob a marca Dramix, com $\varnothing = 0,8$ mm e comprimento de 60 mm.

A fibra de polipropileno foi fabricada pela Fitesa, é comercializada sob a marca Crackstop e apresenta diâmetro $\varnothing = 18$ μ m e comprimento de 12 mm.

Já a fibra de vidro foi adquirida da FIBERLITE e é fabricada pela Owens Corning Fiberglas A.S. Ltda. O lote de fibra tipo Roving 158B 4400 empregado foi produzido entre os dias em 28-30/03/2001. Esta é uma fibra não resistente à álcalis, empregada para laminação, com comprimento nominal de 40 mm.

Finalmente, a fibra de sisal utilizada foi a mesma que é empregada para reforço de matrizes de gesso. Ela é proveniente de Araripina-PE, em fardos de 350kg, aproximadamente, e foi doada pela empresa GESSOTEC. Este tipo de fibra, nesta forma, apresentava um comprimento médio superior a 1200 mm, sendo necessário cortar a mesma em segmentos menores para que pudesse ser utilizada. Definiu-se que a mesma seria cortada em segmentos de 12 mm, visto ser este o comprimento das fibras

de polipropileno e de aramida.

Para cada fibra foram analisados três teores, visando possibilitar a geração de curvas de desempenho. Estes teores foram utilizados na confecção das placas de concreto que foram submetidas ao ensaio de impacto. A tabela 5.1 apresenta os teores que foram adotados para cada uma das fibras.

Tabela 5.1 – Teores utilizados no ensaio de impacto.

Tipo de Fibra	Comprimento (mm)	Teores de Fibra (kg/m ³)		
		Mínimo	Intermediário	Máximo
Aço	60	1,8	9,7	30
Polipropileno	6	0,6	1,14	1,8
Sisal	12	1,4	1,8	3,6
Vidro	40	1,31	1,8	3,19
Aramida	12	0,9	1,8	3,6

No caso da fibra de aramida, optou-se por investigar os teores em torno do teor de 1,8 kg/m³, apontado como sendo o mais eficiente nos ensaios anteriores de compressão simples. Para as demais fibras, os teores, em massa, foram definidos através de três critérios:

o primeiro teor adotado para cada fibra era o teor mais eficiente adotado para a fibra de aramida, 1,8 kg/m³, visando permitir uma comparação direta;

o segundo teor foi definido buscando estabelecer uma equivalência em termos de quantidade de fibra no compósito. Desta forma foram calculados os teores, em peso, que provocariam a utilização de um volume das outras fibras equivalente ao volume de aramida utilizado no teor de 1,8 kg/m³. Isto resultou em valores de 9,7 kg/m³ para o aço, 1,14 kg/m³, para o polipropileno, 3,6 kg/m³ para o sisal e 3,19 kg/m³ para o vidro;

o terceiro valor foi tomado para representar o teor ideal recomendado pelo fabricante, ou seja, 30 kg/m³ para o aço e 0,6 kg/m³ para o polipropileno, respectivamente. No caso do sisal e do vidro, como não havia teor ideal, foram adotados os valores de 1,4 kg/m³ e 1,31 kg/m³, respectivamente, correspondentes, em massa, ao teor de 1,8 kg/m³ de fibra de aramida.

5.4.2 CIMENTO PORTLAND

Nessa pesquisa foi adotado como material aglomerante o cimento tipo CP-V (ARI), com massa específica de $2,97 \text{ g/cm}^3$, da marca VOTORAN, sendo suas propriedades físicas apresentadas na tabela 5.2 (VOTORAN, 2003).

Como o programa experimental era muito extenso, foram utilizados lotes de cimentos diferentes para a fase exploratória e a fase de avaliação. Não se considera que isto possa ter acarretado problemas para os experimentos realizados, pois além das fases da pesquisa serem estanques, pequenas variações no cimento não causariam mudanças de comportamento significativas nos compósitos.

Tabela 5.2 – Propriedades físicas do cimento (VOTORAN, 2003).

Item de Controle	Unidade	Média	Desvio	Mínimo	Máximo
Material retido #200 (mesh)	%	0,10	0,04	0,00	0,20
Material retido #325 (mesh)	%	0,88	0,16	0,50	1,20
Blaine	cm^2/g	5129	70	5000	5280
Água de consistência	%	31,22	0,17	30,80	3160
Início de pega	horas	4:14	0:19	3:35	4:45
Fim de pega	horas	5:24	0:19	4:45	5:55
Expansibilidade a quente	mm	0,13	0,23	0,00	1,00
Resistência R1	MPa	26,62	0,81	24,80	27,70
Resistência R3	MPa	34,94	0,64	33,40	36,10
Resistência R7	MPa	39,35	0,52	38,50	40,20
Resistência R28	MPa	47,25	0,75	46,20	48,70

5.4.3 AGREGADO MIÚDO (AREIA)

O agregado miúdo utilizado nos ensaios dessa pesquisa foi a areia de uso corrente nas obras de construção civil da região, proveniente do Rio Guaíba e classificada comercialmente como areia regular ou média.

Dentro da rotina do laboratório, o agregado é lavado e seco ao ar, para retirada de impurezas, antes de ser armazenado. A distribuição granulométrica e os índices de qualidade deste agregado miúdo estão de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 1983). A tabela 5.3 apresenta sua caracterização granulométrica.

Tabela 5.3 – Caracterização granulométrica do agregado miúdo.

Abertura da Peneira	Percentual Retido	Percentual Retido Acumulado
4.8 mm	3,19	3,19
2.4 mm	8,69	11,88
1.2 mm	14,96	26,84
0.6 mm	23,19	50,03
0.3 mm	36,81	86,84
0.15 mm	12,28	99,12
Fundo	0,85	100
DMC = 4,8 mm		
MF = 2.62		

5.4.4 AGREGADO GRAÚDO (BRITA)

O agregado graúdo adotado para a confecção dos corpos-de-prova de concreto foi uma brita 1 de origem basáltica com a distribuição granulométrica apresentada na tabela 5.4. Como no caso da areia, este agregado foi lavado e seco antes de armazenado.

Tabela 5.4 – Caracterização do agregado graúdo.

Abertura da Peneira	Percentual Retido	Percentual Retido Acumulado
38 mm	0	0
19 mm	1	1
12.5 mm	50	51
9.5 mm	36	87
6.3 mm	11	98
4.8 mm	1	99
Fundo	1	100
DMC = 19 mm		
MF = 1.87		

5.4.5 ADITIVO

Optou-se pelo acréscimo de aditivo plastificante em todos os traços de concreto com adição de fibra de aramida, devido à possibilidade de que a adição de fibra poderia comprometer a trabalhabilidade e afetar a resistência dos corpos-de-prova. Como o objetivo dessa pesquisa era a comparação entre os traços sem e com adição, o aditivo foi

acrescentado inclusive aos traços sem adição de fibra.

O aditivo selecionado foi um superplastificante à base de naftaleno sulfonado, de fabricação nacional, marca Fosroc - SP 430/Conplast. O mesmo apresenta densidade média de $1,21 \text{ g/cm}^3$, seu teor de cloretos é zero, sendo a incorporação de ar inferior a 2%, para a dosagem utilizada, e possui prazo de validade de 12 meses na embalagem original lacrada (FOSROC, 2000).

O aditivo foi utilizado na proporção de 0,30%, em relação à massa de cimento. O mesmo foi misturado à água de amassamento para facilitar sua dispersão na massa de concreto.

5.4.6 ÁGUA DE AMASSAMENTO

A água para amassamento da mistura de concreto utilizada foi a água disponível na rede local de abastecimento, ou seja, água potável.

5.5 TRAÇOS DE CONCRETO UTILIZADOS

A definição do traço a ser adotado nessa pesquisa foi feita a partir de análises de dados de traços similares disponíveis no LEME. O traço foi ajustado levando em consideração a relação água/cimento considerada necessária para atingir o fcm desejado e os teores de fibra de aramida a serem incorporados à massa.

O traço final definido para a pesquisa foi de 1: 2,21: 3,21 (cimento:areia:brita), em massa, com uma relação água/cimento de 0,52 e um teor de superplastificante de 0.3%.

5.6 MOLDAGEM E CURA

A ordem de colocação dos materiais para confecção dos concretos foi a seguinte:

100% do agregado graúdo

60% da água

100% do cimento

40% de água + 100% do superplastificante

100% do agregado miúdo

100% da fibra

Cada mistura foi realizada em um tempo aproximado de 4 minutos, quando não havia adição de fibra. Nos concretos com adição de fibra, após a decorrência deste tempo de mistura, a fibra era adicionada. Isto era feito de forma gradual, visando evitar a formação de grumos. Na figura 5.2, observa-se o processo de adição de fibra de vidro a uma das misturas de concreto.



Figura 5.2 - Adição da fibra a mistura de concreto.

Após a adição das fibras, era iniciado um novo período de mistura, com duração de 2 minutos, para garantir a homogeneização da massa e a dispersão da fibra. A medição do abatimento era realizada após o término da mistura.

Para a etapa exploratória foram moldados corpos-de-prova cilíndricos com dimensão de 9,5 cm de diâmetro x 19,0 cm de altura e vigotas de 4 cm x 4 cm de seção transversal por 16 cm de comprimento para ensaio de flexão, visto que na primeira etapa, por questões de economia, não foram respeitadas as exigências de Norma de que a dimensão mínima do corpo-de-prova seja superior a três vezes o diâmetro máximo do agregado.

Para as etapas de avaliação do comportamento mecânico e da resistência a impacto foram moldados corpos-de-prova cilíndricos com as mesmas dimensões do anterior e

corpos-de-prova prismáticos com 10cm x 10cm x 35cm. A dimensão dos corpos-de-prova prismáticos foi alterada na segunda etapa da pesquisa para garantir melhor representatividade dos resultados. Na etapa exploratória foram usados corpos-de-prova menores para economizar material.

Para os ensaios de impacto foram moldadas placas de concreto nas dimensões de 30cm x 30cm x 6cm. As placas foram moldadas com essas dimensões, porque dimensões reduzidas poderiam não garantir a propagação da energia através do compósito e dimensões maiores seriam anti-econômicas.

A moldagem de todos os corpos-de-prova foi realizada de acordo com as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 1994).

Em seguida à desmoldagem, que se deu após 24 h, após a colocação do concreto nas formas, os corpos-de-prova foram armazenados em câmara úmida, com temperatura de 23°C +/- 2°C e umidade relativa > 95%, até a idade de ensaio, quando eram capeados com camada de enxofre derretido.

5.7 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA DE ARAMIDA

Para caracterizar a fibra aramida se realizaram testes de microscopia eletrônica, de termo-gravimetria, de determinação do módulo de armazenamento e de resistência à tração de fios, cuja descrição é feita a seguir.

5.7.1 CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA DAS AMOSTRAS DO FIO DE ARAMIDA KEVLAR ISOLADA E NO COMPÓSITO

A microestrutura das amostras do fio de aramida Kevlar, bem como a da matriz reforçada com fibra de aramida, foram analisadas com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca JEOL JSM 5800, pertencente ao Centro de Microscopia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A análise com imagem de elétrons secundários fornece micrografias em três dimensões e são feitas sobre uma superfície de fratura com material condutor, nesse caso, metalização com ouro. A distância de trabalho (distância entre a abertura da objetiva e o corpo-de-prova) ficou

em 3,77 mm e a tensão aceleradora foi de 10kV.

Inicialmente realizou-se a microscopia da fibra de aramida. O filamento ensaiado foi retirado da amostra de fio fornecida pelo fabricante, o qual não havia sido submetido a nenhum ensaio. Com a realização do ensaio, tornou-se viável a medição do diâmetro do filamento do fio com o auxílio de um editor gráfico de imagens. Segundo a DU PONT (199-) um fio de fibra de aramida tipo Kevlar 49 possui 768 filamentos e um tipo Kevlar 29 possui 1000 filamentos. Sabendo a dimensão de cada filamento é possível determinar a área da seção transversal de cada fio.

Além da microscopia da fibra foi realizada a microscopia do compósito. O objetivo, neste caso, foi analisar a interface entre a matriz cimentícia e a fibra de aramida, a aderência entre ambas e a forma e posição das fibras dispersas na massa de concreto. Procurou-se observar ainda a forma de ruptura do compósito e da fibra.

5.7.2 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA E MÓDULO DE ARMAZENAMENTO

A determinação da perda de massa de um material em função da temperatura é denominada de termogravimetria (TGA). Mesmo sendo conhecida desde 1915, essa análise só começou a ser aplicada ao estudo de polímeros há pouco tempo. A perda de massa ocorre pela decomposição do polímero, portanto a TGA fornece informações diretas sobre a estabilidade térmica. A TGA é também muito útil na caracterização da estrutura do polímero (AGUIAR NETO, 1996).

Nos ensaios de TGA citados por SEM et. al (1993) foram obtidas curvas para as fibras de Kevlar 29 e de Kevlar 49. A perda de massa para a fibra de Kevlar 29 foi menor do que 1%, para temperaturas abaixo de 350°C, de 4,8%, para um nível de temperatura próximo a 450°C, de 7% nos 500°C e de 51% para 675°C. Para o Kevlar 49, observa-se uma perda de massa também de 1% abaixo dos 350°C, de 3,9% aos 450°C, de 5,5% para temperaturas de 500°C e de 20,4% aos 675°C. Ou seja, o Kevlar 49 é mais estável em altas temperaturas.

Para o ensaio de TGA utilizou-se um analisador termogravimétrico, modelo TGA 2050, fabricado pela TA Instruments. Realizou-se o teste em condições de atmosfera de N₂ (sem presença de oxigênio) e com taxa de aquecimento de 20°C/min.

Para o ensaio de módulo de armazenamento o equipamento utilizado foi um DMA, modelo 2980, também fabricado pela TA Instruments, sendo o ensaio realizado nas condições de frequência de 1 Hz, amplitude de deformação de 10 μm e taxa de aquecimento de 2°C/min. A amostra foi fixada com um clamp de tensionamento. Os resultados obtidos são discutidos no capítulo 6.

5.7.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS FIOS DE ARAMIDA

As amostras para este ensaio foram extraídas de fios de Kevlar 49, formados por 768 filamentos, consolidados em cinco feixes. As amostras foram selecionadas de uma bobina de material, desprezando-se os segmentos de fio que se apresentassem esfiapados ou tivessem sua integridade comprometida visualmente. Antes do corte, cada feixe do fio foi separado e alinhado. Foram separados 20 feixes, sendo os mesmos cuidadosamente manuseados devido à dificuldade de manter seus filamentos alinhados. Os feixes foram então “penteados” e cortados na dimensão necessária. O comprimento especificado foi de 30cm, distância existente entre os ganchos utilizados para fixação da amostra. As extremidades do conjunto foram então enroladas nos ganchos e presas de leve com fita adesiva para evitar o escorregamento. O ensaio realizou-se numa prensa marca SHIMADZU, modelo AG-100kN, controlada por computador. Após a conferência de posicionamento e da prumada, as amostras foram ensaiadas até a ruptura. A figura 5.3 (a) mostra uma amostra sendo submetido ao ensaio, enquanto na figura 5.3 (b) pode-se observar a mesma após o ensaio.

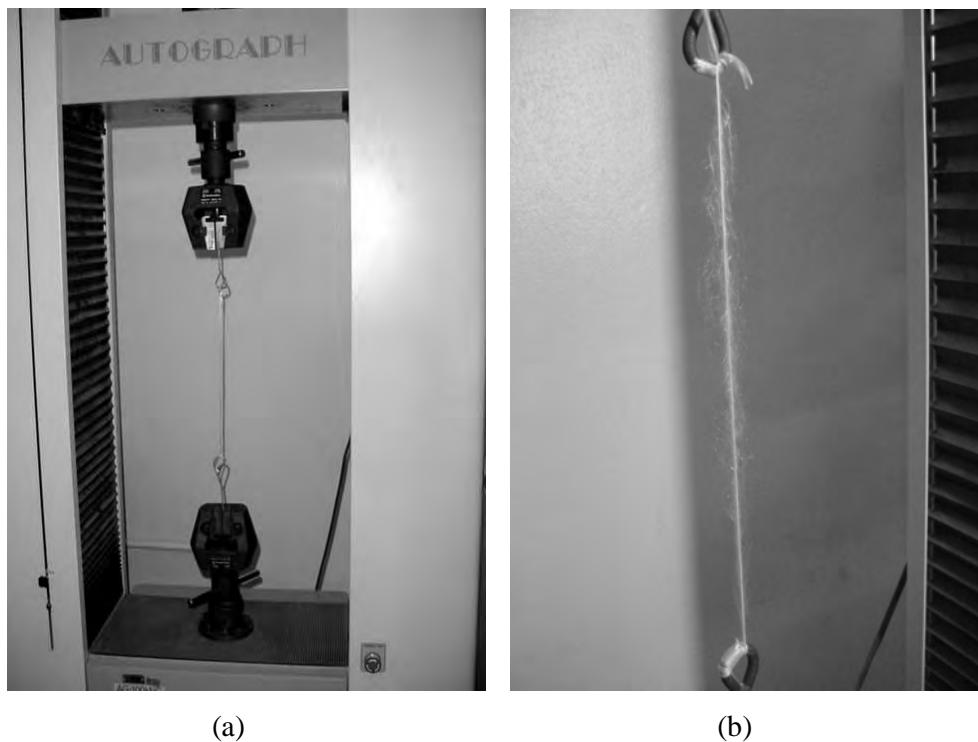


Figura 5.3 - Fio de aramida sendo (a) ensaiado à tração e (b) rompido.

5.8 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO

O conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais de construção são pré-requisitos fundamentais para a elaboração de projetos estruturais. Assim sendo, é indispensável caracterizar o desempenho mecânico dos compósitos de cimento com adição de fibras de aramida. Com esse intuito foram realizados ensaios para avaliar quantitativamente a resistência à compressão axial, a resistência à tração na flexão e, especialmente, a resistência a impactos do compósito, como já discutido. Os efeitos sobre a trabalhabilidade e o peso específico também foram avaliados.

5.8.1 ENSAIO DE ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE

Durante as moldagens dos vários traços de concreto, com e sem adição de fibras, foram realizadas medições para a determinação da consistência pelo abatimento do tronco de

cone, seguindo-se as prescrições da norma NBR 7223 (ABNT, 1992). Este controle foi desenvolvido para verificar em que medida a adição de fibras ao concreto altera a consistência e trabalhabilidade de uma mistura de concreto. Quando corretamente incorporadas à mistura, as fibras se dispersam pela massa, como mostrado na figura 5.4. Por terem elevados fatores de forma, as fibras tendem a adsorver bastante água. Além disto, estruturam a mistura, aumentando sua consistência. Na figura 5.5 observa-se a consistência de uma mistura antes (a) e após (b) a adição da fibra de aramida.

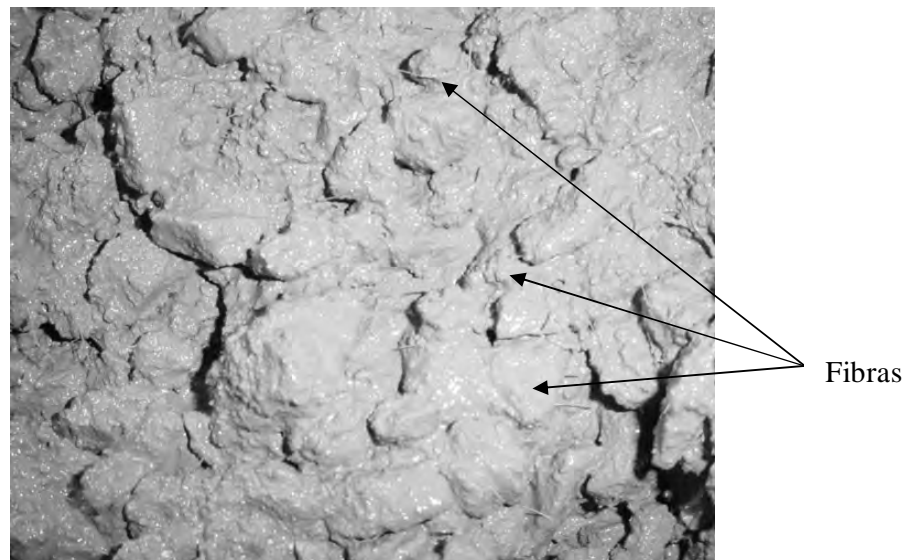


Figura 5.4 - Consistência da mistura de concreto após a adição da fibra Kevlar.

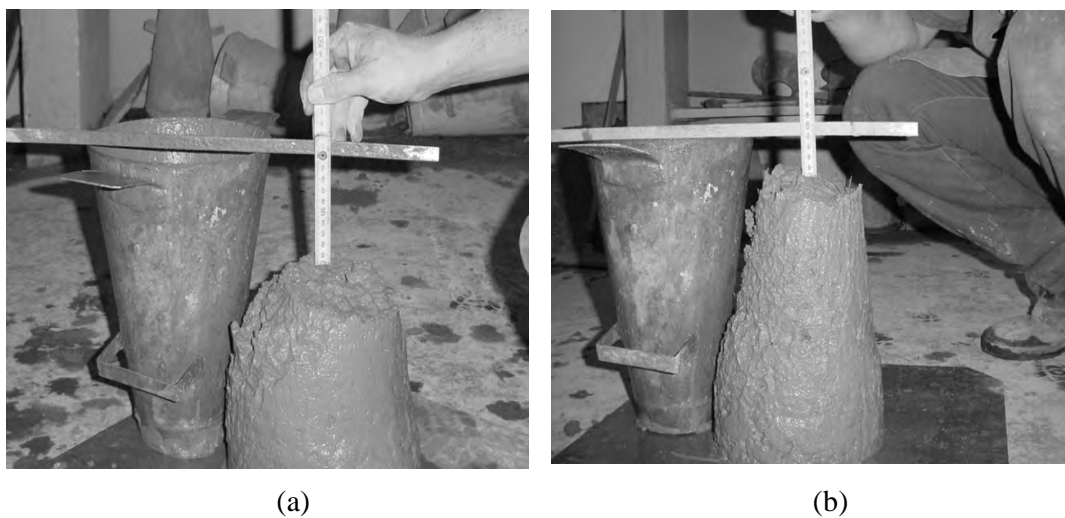


Figura 5.5 – Ensaio de abatimento de tronco de cone (a) sem a presença de fibras e (b) após a adição da fibra.

5.8.2 MASSA ESPECÍFICA

Segundo diversos autores (HANNANT, 1978; TANESI e AGOPYAN, 1997; ACCETTI et al., 2000 e ARAÚJO DA SILVA, 2002) , a adição de fibras sintéticas às misturas de concreto, dentre outras características, altera a massa específica das mesmas. Em alguns casos, isso pode representar uma redução considerável do peso próprio, principalmente quando se tratam de peças de dimensões elevadas, onde uma redução, por menor que seja, torna-se extremamente vantajosa. Para estruturas pré-moldadas ou peças de grandes vãos, pode-se então ter economias importantes quando ocorre a adição de fibras sintéticas, se for considerado o efeito da redução de peso no projeto das fundações e nas operações de transporte e manuseio de peças no canteiro de obras.

O ensaio de determinação da massa específica consistiu na pesagem dos corpos-de-prova no estado fresco e na comparação dos pesos dos corpos-de-prova com diferentes teores de adição de fibra.

5.8.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A resistência à compressão axial foi avaliada através da moldagem de corpos-de-prova cilíndricos, como já explicado. Na primeira fase da pesquisa, os teores adotados foram de $0,30 \text{ kg/m}^3$, $0,60 \text{ kg/m}^3$ e $0,90 \text{ kg/m}^3$, sendo a resistência à compressão avaliada nas idades de 3, 7 e 28 dias. Complementarmente, foram avaliados concretos com adição de fibras de diferentes comprimentos, em um teor fixo de adição de $0,90 \text{ kg/m}^3$. As idades de ensaios, neste caso, também foram de 3, 7 e 28 dias.

Com os resultados obtidos preliminarmente, definiu-se o comprimento padrão (12 mm) e estabeleceu-se que teores de adição de fibras mais elevados eram promissores. Novos teores de $1,80 \text{ kg/m}^3$, $2,70 \text{ kg/m}^3$ e $3,60 \text{ kg/m}^3$ foram então adotados na segunda etapa da pesquisa. Nessa etapa, os ensaios de compressão foram realizados nas idades de 1, 3, 7, 14, 28 e 56 dias. Ou seja, ampliou-se o número de datas para se ter uma melhor aproximação da curva de crescimento da resistência.

5.8.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Os ensaios de tração na flexão realizados nos corpos-de-prova prismáticos de concreto tiveram como objetivo verificar se há uma melhoria nas características elásticas do concreto com adição de fibra de aramida, em comparação com peças sem adição da fibra. Os ensaios seguiram as recomendações da norma NBR 12142 (ABNT, 1991), sendo realizados nas mesmas idades dos ensaio à compressão descritos no item 5.8.3.

Os ensaios foram realizados com a configuração de 4 pontos, isto é, com duas cargas iguais e simétricas, aplicadas nos terços. A resistência à tração na flexão foi calculada considerando-se a metodologia especificada na ASTM C78-94, cuja formulação é apresentada na equação 5.1, sendo o valor da resistência à tração na flexão R dado por:

$$R = \frac{PxL}{BxD^2} \quad (\text{equação 5.1})$$

onde,

R = resistência à tração na flexão (kg/cm^2); P = carga máxima aplicada (ruptura) (kg);

L = distancia entre os apoios do corpo-de-prova (cm); D = altura do corpo-de-prova (cm); B = largura do corpo de prova (cm).

5.8.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A IMPACTOS

Esse ensaio foi realizado em corpos-de-prova de concreto moldados em forma de placas. O método de ensaio foi concebido com base nos procedimentos recomendados pelo anexo Q da norma NBR 13818 – *Placas cerâmicas para revestimento – especificação e métodos de ensaio* (ABNT, 1997), sendo realizadas algumas adaptações para as placas de concreto. A lógica do ensaio consiste em submeter as placas a quedas de uma esfera de peso padronizado, estabelecendo uma comparação direta entre os resultados obtidos pelas diferentes misturas, com fibras distintas, em teores variados.

As placas utilizadas nos ensaio eram quadradas, com lado de 30 cm e espessura de 6 cm. A espessura foi definida em função do diâmetro máximo do agregado utilizado (19 mm), visto que se recomenda que a menor dimensão do corpo-de-prova deve ser três vezes superior ao diâmetro máximo do agregado graúdo utilizado. Foram moldados três corpos-de-prova para cada teor (mínimo, intermediário e máximo) para cada tipo de

fibra, conforme indicado na tabela 5.1., sendo os corpos-de-prova ensaiados na idade de 28 dias. A figura 5.6 mostra alguns corpos-de-prova em forma de placa, moldados para o ensaio.



Figura 5.6 - Corpos-de-prova em forma de placa para ensaio de impacto.

O mecanismo de ensaio proposto consiste em verificar o surgimento de fissuras devido a sucessivas quedas de uma esfera de aço-cromo pesando 1,053 kg, de alturas crescentes e variáveis. A partir desses dados, objetiva-se determinar a energia necessária para o aparecimento da primeira fissura e a resistência ao impacto dos corpos-de-prova.

O equipamento de ensaio compreendia um tubo plástico de PVC rígido com diâmetro nominal de 75mm, graduado ao longo da altura em intervalos de 10 cm, a partir de uma marcação inicial de altura de 20cm, até a altura final de 220cm, conforme pode ser visto na figura 5.7. O tubo foi fixado a um pilar de concreto através de braçadeiras metálicas. A placa estava apoiada em tiras de neoprene com 1cm de espessura, coladas com durepóxi em todo o perímetro do quadro de madeira, buscando simular um apoio semi-elástico de primeira espécie, que só oferecesse restrição ao deslocamento vertical.



Figura 5.7 – Equipamento de ensaio de impacto

Para que o posicionamento da placa em relação ao tubo fosse garantido, sem imobilizar a placa, adotou-se a medida de colocar tiras de espuma na lateral da placa, entre a mesma e o quadro. A espuma garante o posicionamento inicial da placa sem restringir qualquer movimentação. A figura 5.8 mostra um detalhe da placa e do suporte.

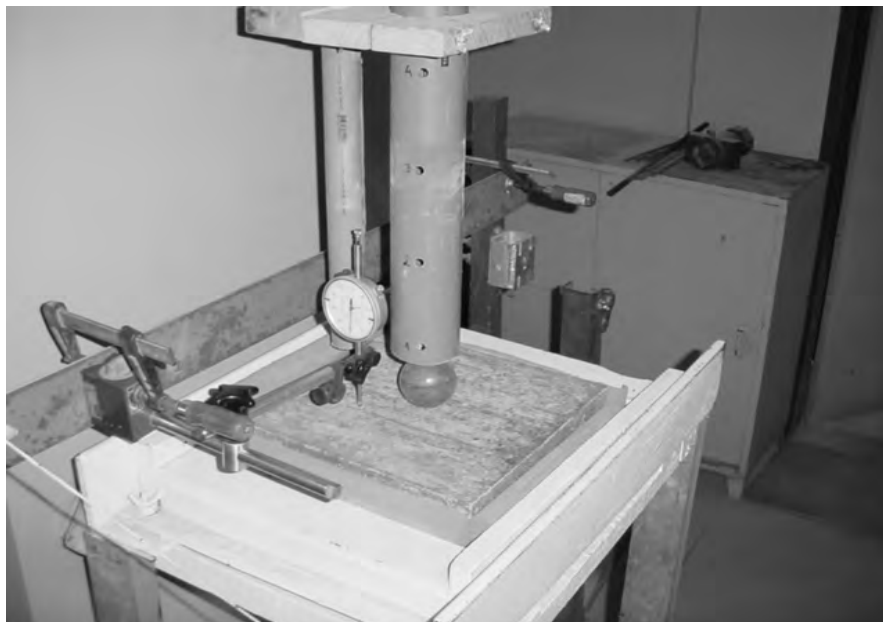


Figura 5.8 – Detalhe da placa de concreto no suporte de ensaio com deflectômetro.

Além do acompanhamento do quadro fissuratório, foi feito um controle dos

deslocamentos verticais das placas ao longo do ensaio, buscando registrar a evolução da sua deformação. As medições foram realizadas com auxílio de dois deflectômetros posicionados a 7cm do centro da placa em uma estrutura metálica independente, conforme pode ser visto na figura 5.8. Um croqui com o posicionamento dos deflectômetros está apresentado na figura 5.9.

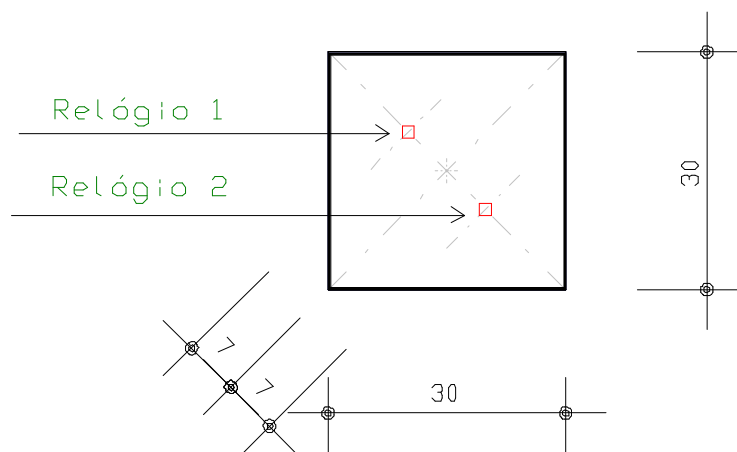


Figura 5.9 - Posição dos deflectômetros em relação ao centro da placa.

Em suma, neste ensaio, o mais importante para a presente pesquisa, foram obtidas as seguintes informações, para posterior análise:

número e altura dos golpes até a abertura da primeira fissura na face inferior das placas;
 número e altura dos golpes até o aparecimento de fissuras na parte superior da placa, que indicava a falha total;

deslocamento vertical residual, registrado nos deflectômetros, após cada golpe.

A energia de cada golpe era progressivamente maior porque se aumentava a altura de queda da bola em 10 cm. Caso se atingisse a altura máxima permitida, 220 cm, sem a falha da placa, se continuavam a aplicar golpes, desta mesma altura, até que ocorresse a falha, ou seja, quando a fissura atingisse a face superior do espécime. Os resultados são analisados no próximo capítulo.

CAPÍTULO 6 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos vários ensaios descritos no capítulo 5. Inicialmente, apresentam-se os resultados de caracterização da fibra de aramida e posteriormente os resultados de caracterização dos compósitos.

6.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA

Nesse primeiro módulo apresentam-se os resultados referentes à análise e caracterização da fibra de aramida através de sua microscopia, dos ensaios de TGA e de módulo de armazenamento, além dos resultados da resistência à tração do fio.

6.1.1 MICROSCOPIA DO FIO

Na figura 6.1, observa-se um fio de aramida ampliado. Pode-se observar que, na verdade, o fio é composto por n filamentos. A figura 6.2 contém uma imagem ampliada de um dos filamentos. Pela análise da mesma se confirma que o diâmetro de cada filamento fica em torno de 12 μm .

As características da superfície do fio de aramida são visíveis na figura 6.3. Numa ampliação de 8.000x é possível verificar a regularidade do diâmetro da fibra e sua leve rugosidade. Nessa amostra não se observam defeitos.

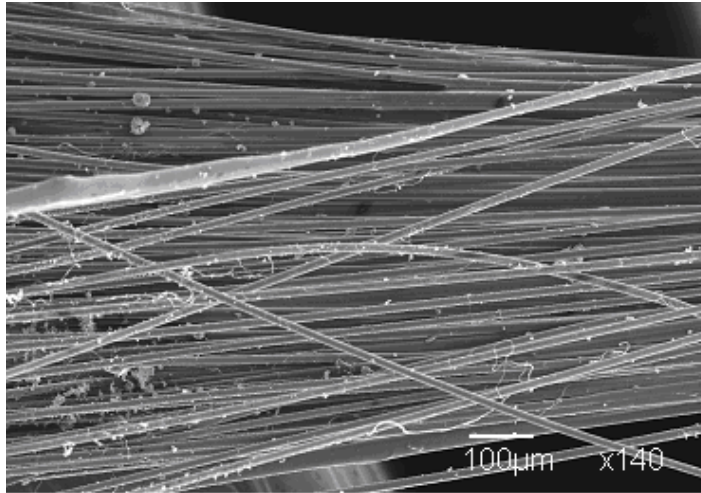


Figura 6.1 – Fio de aramida composto por um conjunto de n filamento de aramida, visto em MEV por elétrons secundários.

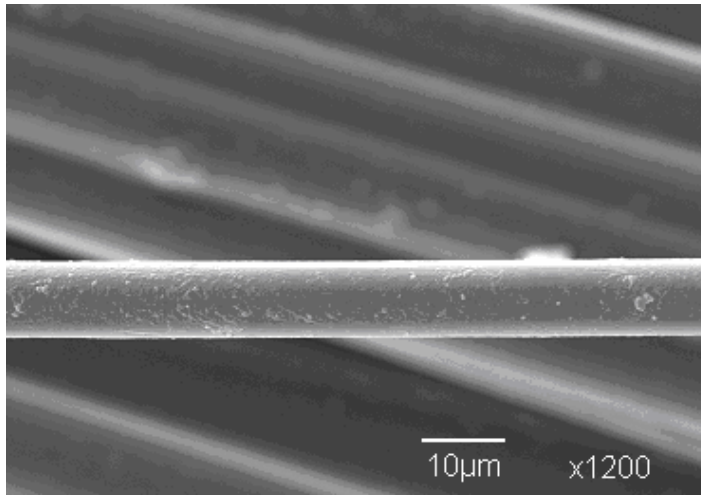


Figura 6.2 – Vista de um filamento individual do fio de fibra de aramida.

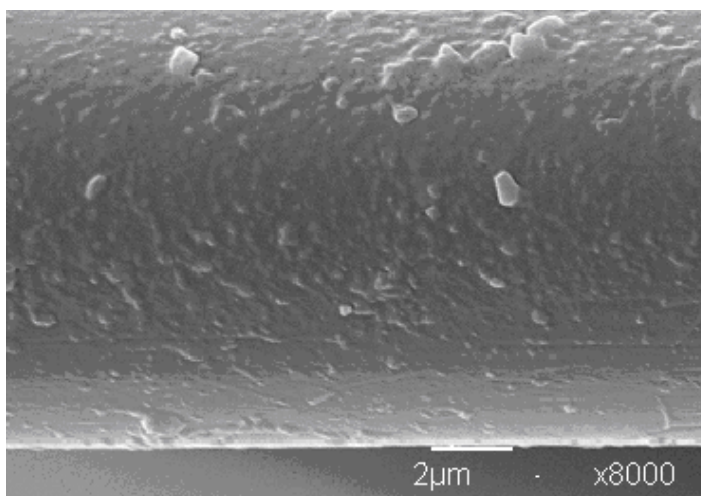


Figura 6.3 - Superfície de um filamento de aramida.

6.1.2 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)

A figura 6.4 mostra o resultado obtido através do ensaio de TGA (*Termogravimetric Analysis*) realizado em uma amostra de aramida. Pode-se observar a variação do percentual de peso da amostra, quando a mesma é submetida a um aumento constante de temperatura.

Constata-se que a amostra apresenta um percentual de massa aproximadamente constante até temperaturas no entorno de 200°C, como seria esperado de uma fibra aramida. A partir desse patamar de temperatura, a amostra apresenta perda de massa considerável. Os resultados obtidos confirmam os valores apresentados pelo fabricante.

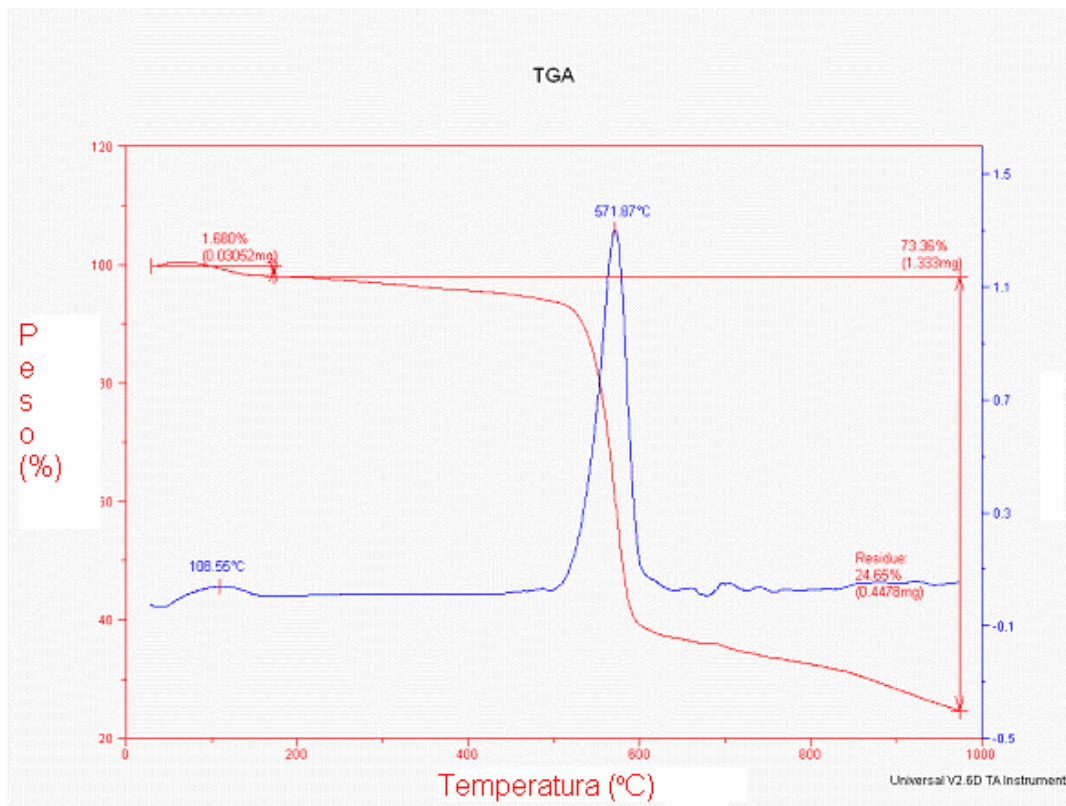


Figura 6.4 - TGA de uma amostra de fio de aramida.

6.1.3 MÓDULO DE ARMAZENAMENTO

Na figura 6.5, observa-se o gráfico referente ao módulo de armazenagem em função da temperatura. Esse ensaio monitora eventuais mudanças no comportamento da fibra com o aumento da temperatura. Observa-se que, até a temperatura de 400°C, a propriedade do módulo de armazenagem sofre pouca variação e que, em todo o intervalo, o valor do módulo de armazenagem da aramida é muito superior ao da fibra de teflon, usada de modo comparativo. A fibra de aramida manteve-se inalterada dentro do intervalo examinado, indicando que sua elasticidade não é prejudicada.

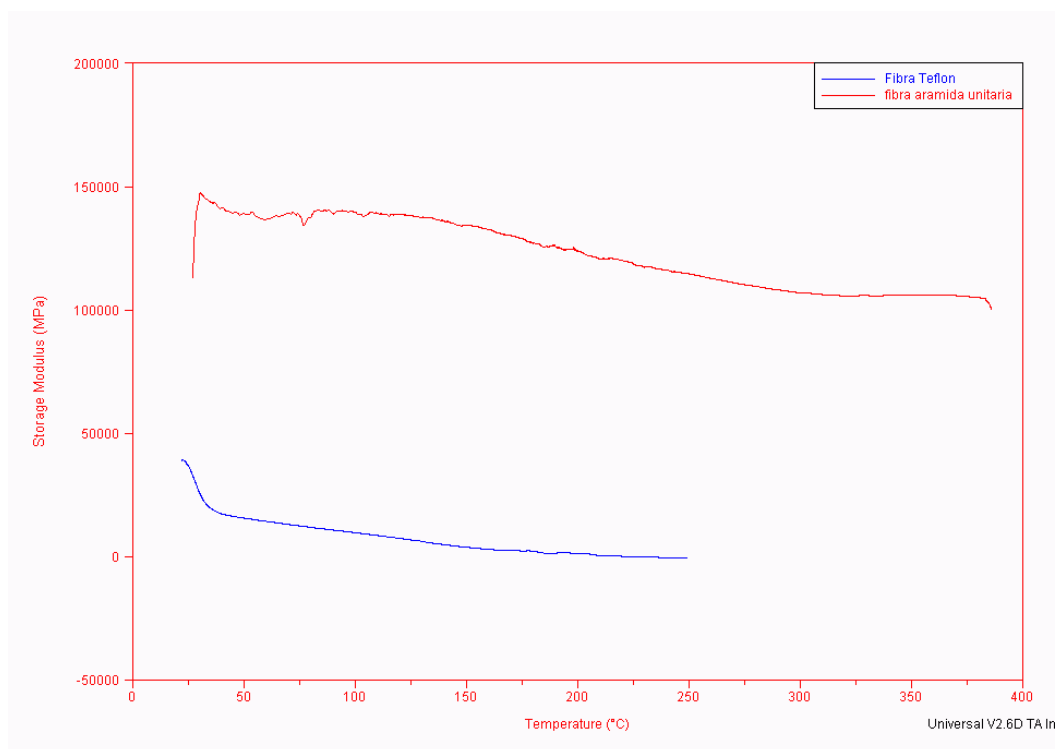


Figura 6.5 – Ensaio DMA mostrando o módulo de armazenagem da amostra de um fio de aramida.

6.1.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO FIO

Verificou-se, durante o ensaio de tração da aramida, uma alta variabilidade, porque os diversos filamentos que constituem cada feixe ensaiado não foram solicitados de forma uniforme, ou seja, não foram sujeitos à carga ao mesmo

tempo. Durante a realização do ensaio foi possível constatar este fato visualmente. Observou-se que alguns filamentos não ficavam tensionados no início do ensaio, só sendo solicitados depois que alguns dos demais começavam a romper, com o aumento da deformação. Assim, o comportamento típico observado durante o ensaio era atingir uma carga de pico, depois da qual a capacidade de carga ia sendo reduzida até que se registrasse uma pequena carga residual, logo antes da ruptura total da amostra. A figura 6.6 mostra as cargas de pico e as cargas de ruptura obtidas para cada uma das 20 amostras ensaiadas. Como se pode notar na figura, a carga de pico variou 0,08 e 0,20 kN, ou seja, entre 8 e 20 kgf.

Devido à dificuldade de distribuição da carga entre os filamentos, a resistência potencial do fio à tração não deve ser considerada como sendo expressa pela soma da capacidade de carga dos n filamentos que o constituem, mas sim como um valor intermediário entre o valor de um filamento e dos n filamentos, representativo da média de filamentos que normalmente é solicitada simultaneamente.

Analisando os resultados sob este prisma, verifica-se que as cargas de pico para cada feixe atingiram um valor médio de cerca de 0,15 kN, ou seja, 15 kgf. Considerando que tínhamos 5 feixes, isto daria uma carga média de 0,75 kN, ou 75 kgf, por fio.

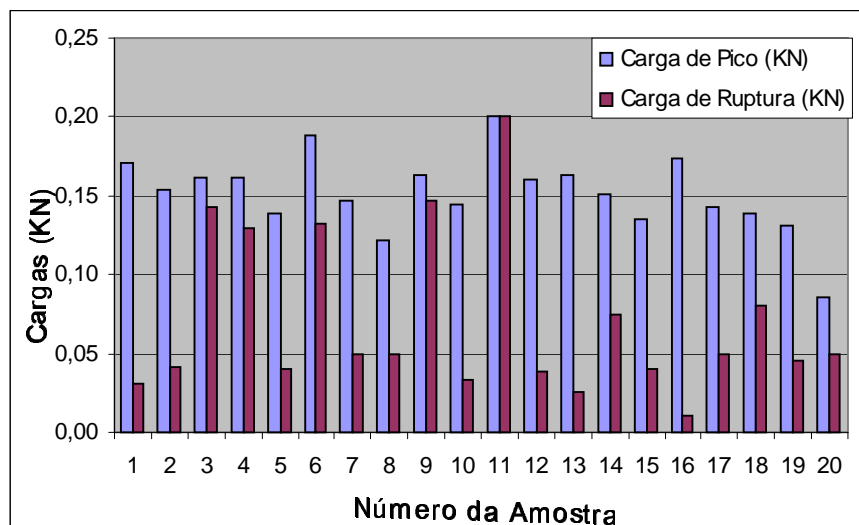


Figura 6.6 – Cargas de pico e de ruptura para as amostras do fio de aramida ensaiadas à tração.

6.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO

Na seqüência são apresentados e discutidos os resultados obtidos para os compósitos de base cimentícias reforçados com fibra de aramida, bem como os resultados do ensaio de resistência a impactos com placas de concreto reforçados com vários tipos de fibras, inclusive fibra de aramida e sem fibra. Os resultados foram consolidados nos gráficos apresentados neste item. As tendências de comportamento foram analisadas com técnicas estatísticas tipo análise de regressão linear múltipla, com o objetivo de gerar um modelo que representasse o relacionamento existente entre as variáveis de interesse do processo, como sugerem WERKENA et al. (1996).

6.2.1 ENSAIO DE ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE

A figura 6.7 apresenta um gráfico mostrando a variação da trabalhabilidade, medida pelo ensaio de abatimento de tronco de cone, com o aumento do percentual de adição de fibra de aramida. Observa-se uma clara tendência de redução de trabalhabilidade com o aumento do teor de fibra. Os valores numéricos estão indicados no anexo 1.

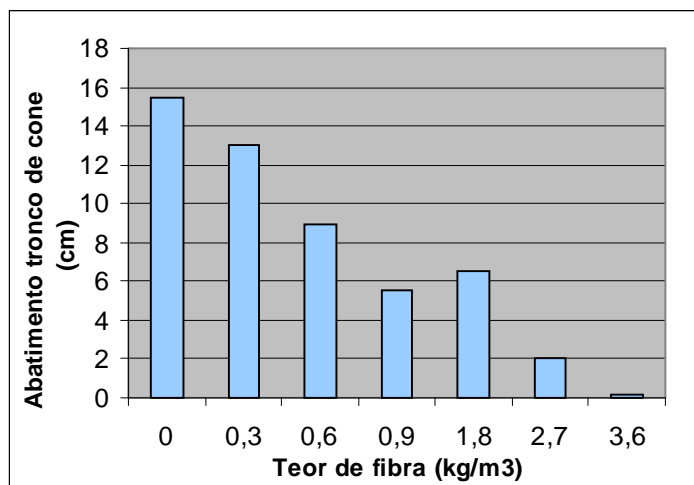


Figura 6.7 – Ensaio de tronco de cone para concreto com fibra de aramida.

Buscou-se modelar esta tendência através de uma análise de regressão. A equação 6.1 apresenta a melhor regressão obtida com o software Statgraphic, resultando em um valor de R^2 de 71,67%, razoável para uma aproximação linear do fenômeno. Os termos da equação são significativos a um nível de significância $\alpha=0,05$. A equação sugere que, para o traço estudado, os teores de fibra utilizados já estavam perto da saturação, em termos de trabalhabilidade.

$$\text{Abatimento} = 14,4843 - 4,8741 x (\text{teor de adição fibra}) \quad (\text{equação 6.1})$$

6.2.2 MASSA ESPECÍFICA

A figura 6.8 contém os resultados das pesagens dos corpos-de-prova no estado fresco, realizado para os traços com teores de 2,7 e 3,6 kg/m^3 de fibra de aramida, comparados com os traços sem adição de fibra, sendo os resultados apresentados no anexo 1. Constata-se que a adição de fibra de fato altera a massa específica média dos espécimes e que, conforme a quantidade de adição aumenta, a massa específica diminui.

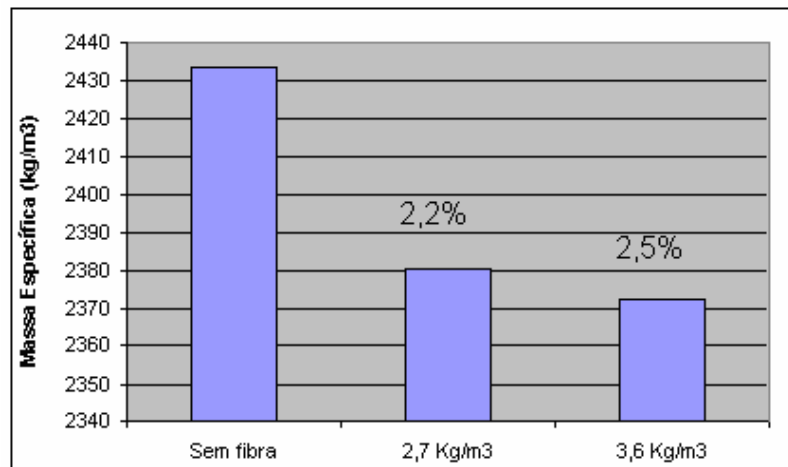


Figura 6.8 – Representação da massa específica dos espécimes avaliados.

Os resultados foram avaliados com o auxílio do software Statgraphics, para análise de regressão múltipla, o qual indicou a equação 6.2 como adequada para

modelagem do fenômeno, sendo obtido um coeficiente R^2 de 88,29%, valor bastante elevado. Os termos da equação são significativos a um nível de significância $\alpha=0,05$. Cabe salientar que, como o número de pontos analisados é pequeno, esta equação deve ser vista como uma mera indicação de comportamento.

$$\text{MassaEspecífica} = 2432,22 - 17,4937 x (\text{teor de adição}) \quad (\text{equação 6.2})$$

6.2.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES – FASE PRELIMINAR

As figuras 6.9 a 6.11 apresentam os gráficos representativos dos resultados dos ensaios de resistência à compressão simples obtidos na etapa exploratória. As análises estatísticas realizadas com estes dados (indicados no anexo 1) não serão apresentadas porque o objetivo desta etapa era simplesmente obter subsídios para a definição dos traços a serem utilizados na etapa de avaliação das propriedades mecânicas e da resistência ao impacto. Analisando o gráfico 6.9 verifica-se que as fibras mais curtas (12 mm) foram as que apresentaram melhores resultados, embora as diferenças entre os vários comprimentos não sejam muito elevadas. A análise do gráfico 6.10 mostrou uma tendência de melhoria do desempenho com o aumento do teor de fibra. Porém, quando uma nova série de corpos-de-prova foi ensaiada, com teores maiores, como mostra a figura 6.11, observou-se que teores muito altos começavam a trazer problemas de trabalhabilidade. Decidiu-se então refazer todos os teores até 3,6 kg/m³ na segunda fase. Um fato surpreendente observado foi que a adição de fibras causou um incremento significativo na resistência à compressão, para os teores de 0,6 a 1,8 kg/m³.

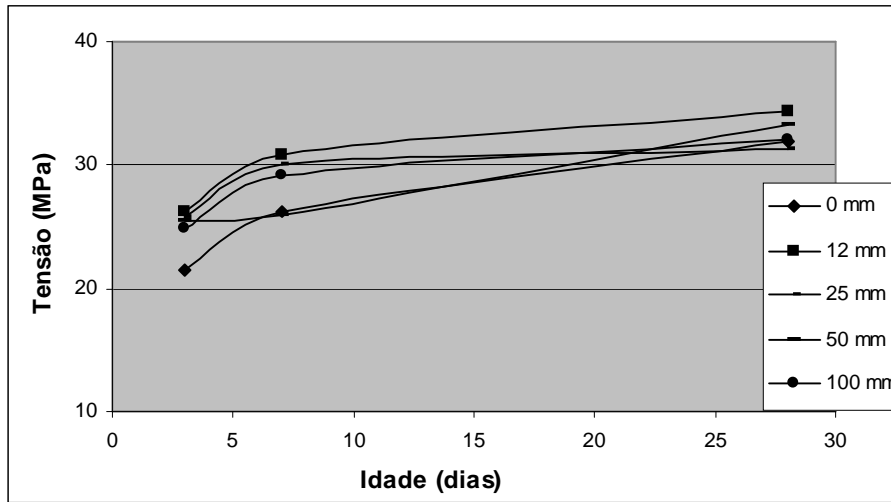


Figura 6.9 – Resistência à compressão simples de misturas com fibras de comprimentos diferentes – Etapa Preliminar.

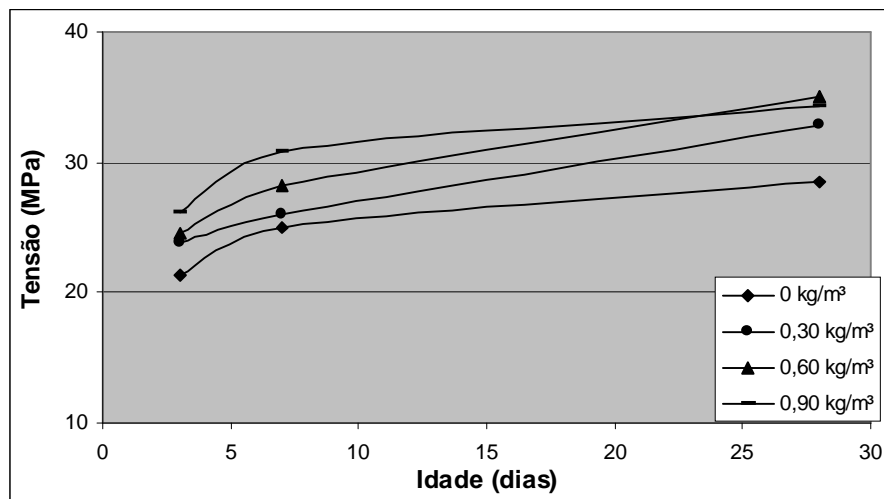


Figura 6.10 – Resistência à compressão simples para teores de adição até 0,9 kg/m³ – Etapa preliminar

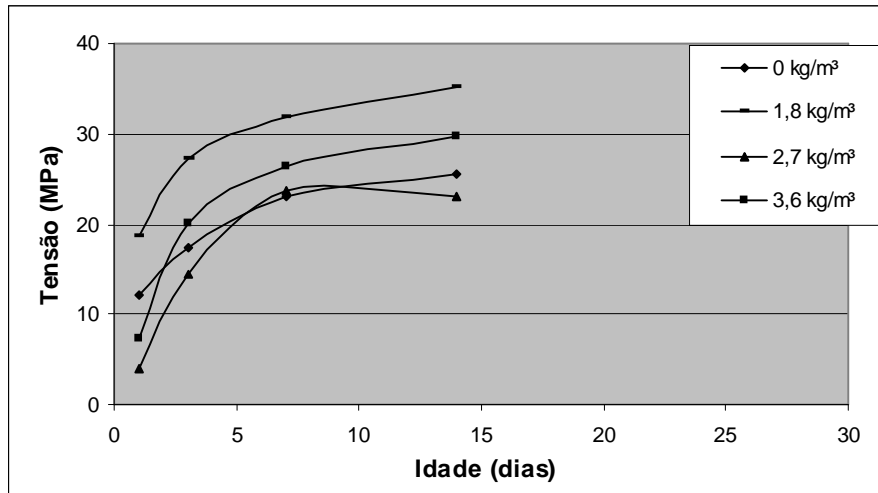


Figura 6.11 – Resistência à compressão simples para teores entre 1,8 kg/m³ e 3,6 kg/m³.

6.2.4 ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO – FASE PRELIMINAR

A seguir são apresentados os resultados de tração na flexão dos corpos-de-prova 4x4x16, moldados na etapa exploratória com base nos valores numéricos indicados no anexo 1. Os mesmos confirmam, em geral, as tendências observadas nos ensaios de compressão, confirmando a impressão de que seria adequado utilizar fibras mais curtas. A principal diferença é que os teores mais elevados de adição de fibras não mostraram uma tendência de queda na resistência tão acentuada quanto nos ensaios de compressão.

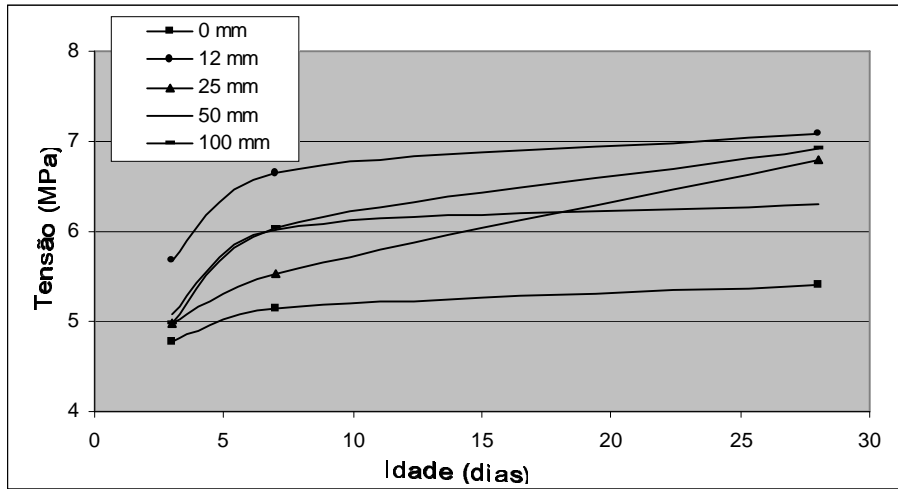


Figura 6.12 – Ensaio de tração na flexão para diferentes comprimentos de fibra de aramida.

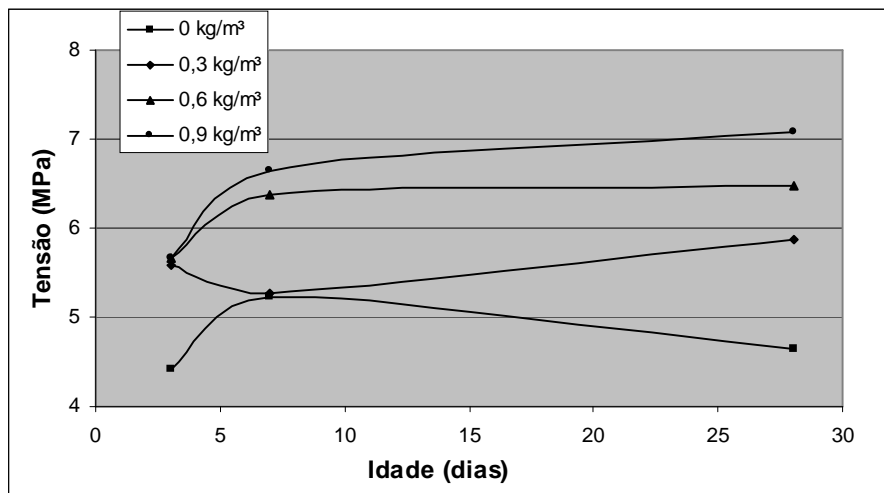


Figura 6.13 - Ensaio de tração na flexão para teores de fibra de aramida até 0,9 kg/m³.

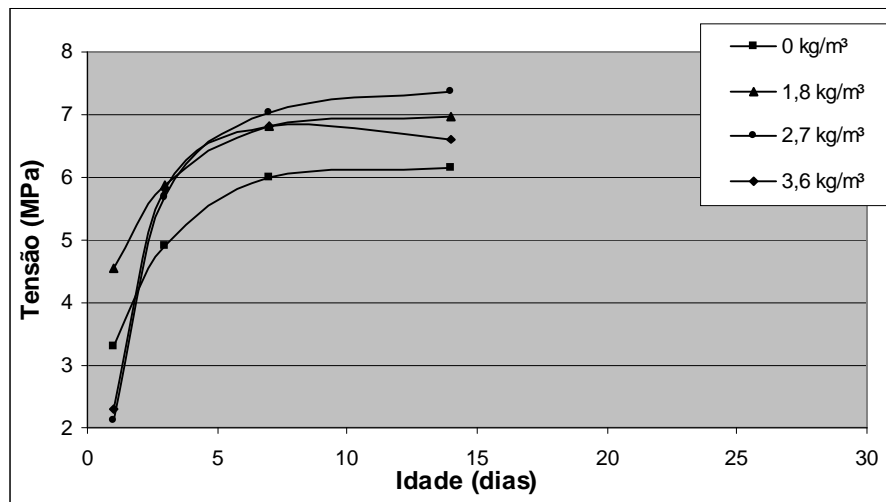


Figura 6.14 – Ensaio de tração na flexão para teores de fibra de aramida entre 1,8 kg/m³ e 3,6 kg/m³

A diferença de comportamento entre os resultados dos ensaios de tração e compressão poderia indicar que a queda de resistência estaria associada a uma maior incorporação de ar, devido aos problemas de trabalhabilidade decorrentes da utilização de teores mais elevados de fibra, o que afeta mais a resistência à compressão.

6.2.5 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES – FASE DE AVALIAÇÃO

Os resultados da segunda série de ensaios à compressão estão apresentados na figura 6.15. A análise do gráfico indica que, de forma geral, com o aumento do teor de fibra incorporado, ocorre um incremento na resistência à compressão simples.

Entretanto, o teor que mostrou melhor comportamento foi o 1,8 kg/m³, o que parece confirmar a possibilidade de que teores mais elevados gerem problemas de incorporação de ar ou falta de homogeneidade.

Foi então realizada uma análise de regressão linear múltipla para modelar o experimento e obteve-se a equação 6.3, que tem coeficiente $R^2 = 80,13\%$. Os termos do modelo são significativos a um nível de significância de $\alpha=0,05$.

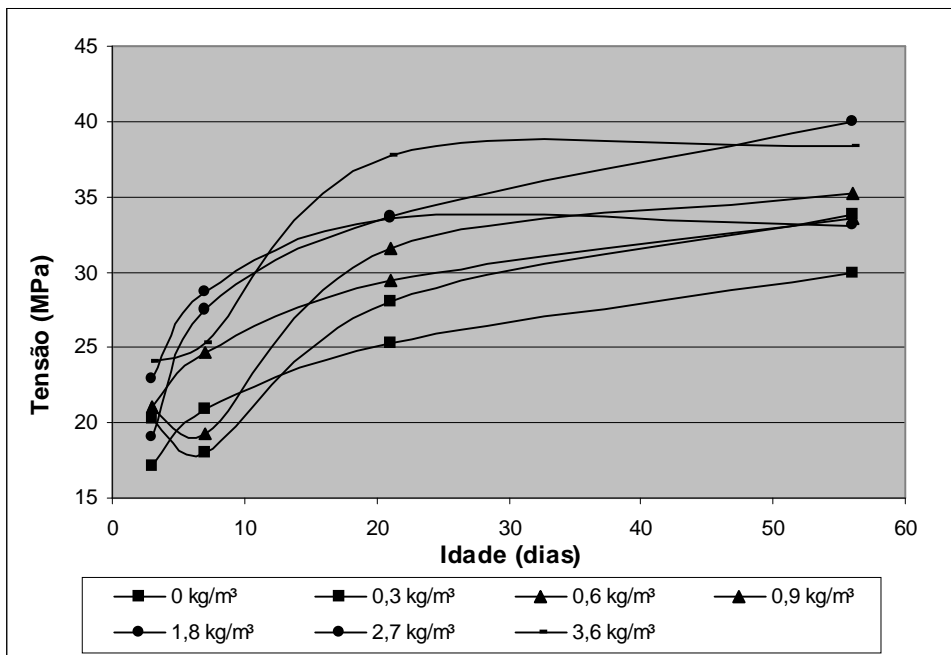


Figura 6.15 – Resistência à compressão simples com todos os teores.

No desenvolvimento desta análise de regressão foi realizada uma avaliação dos resíduos padronizados, sendo desconsiderados os dados espúrios, isto é, aqueles cujo resíduo era três vezes maior do que o desvio padrão.

$$\text{TensãoRup} = 78,5146 + 17,2733 (\text{teor}) + 37,8077 \log (\text{idade}) \quad (\text{equação 6.3})$$

Com esta equação foi montado o gráfico 6.16, onde se apresentam as curvas de comportamento predito. Observa-se que, dada a natureza da equação 6.3, a modelagem não consegue prever a queda na resistência para teores mais altos de adição. Ao contrário, o modelo estima que aumentos no teor provocam aumentos diretos na resistência do compósito. Desta forma, considera-se que o modelo não deve ser empregado para teores acima de 1,8 kg/m³.

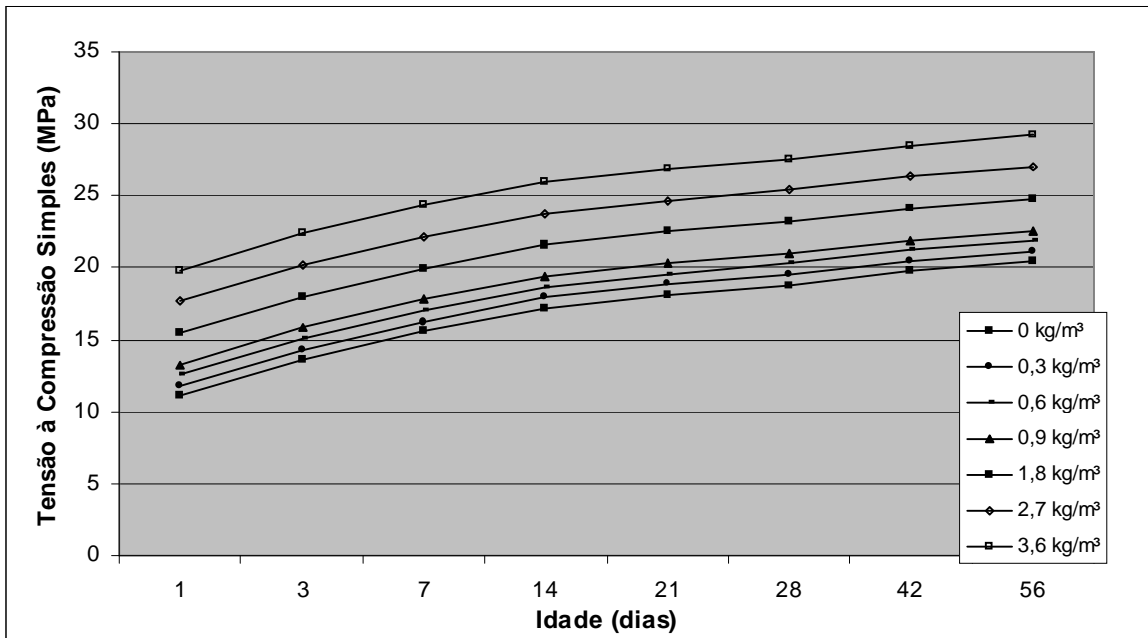


Figura 6.16 - Modelo predito para compressão simples com diferentes teores de fibra incorporados.

6.2.6 ANÁLISE DA DUTILIDADE – FASE DE AVALIAÇÃO

Além de analisar a resistência, os dados dos ensaios de compressão foram utilizados para analisar o comportamento pós-fissuração dos compósitos de aramida. A seguir apresentam-se as figuras 6.17 a 6.19, contendo os gráficos carga x deformação obtidos nos ensaios de compressão simples realizados aos 3, 7 e 21 dias. Os gráficos foram montados com a média das cargas e a média dos deslocamentos dos três corpos-de-prova de cada teor ensaiado.

De forma geral observa-se que a ductilidade dos compósitos, com qualquer teor de adição, tende a ser superior ao desempenho do testemunho (corpo-de-prova sem fibra), em termos de carga e deslocamento. Aos 3 dias, o teor de 2,7 kg/m³ apresenta um comportamento levemente superior aos demais. No gráfico da figura 6.18, com os dados aos 7 dias, os teores 1,8 kg/m³ e 2,7 kg/m³ se destacam. Já na figura 6.19 verifica-se que, aos 21 dias, o teor de 3,6 kg/m³ apresentou um comportamento superior aos demais, tanto em relação ao carregamento máximo quanto em relação à quantidade de energia necessária para causar a ruptura total do compósito.

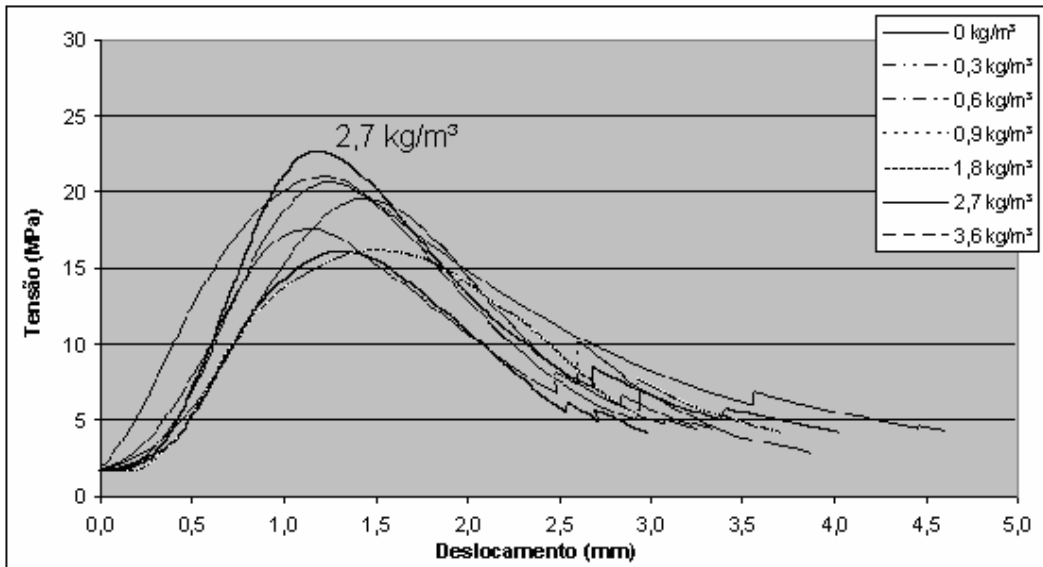


Figura 6.17 – Resistência à compressão simples aos 3 dias.

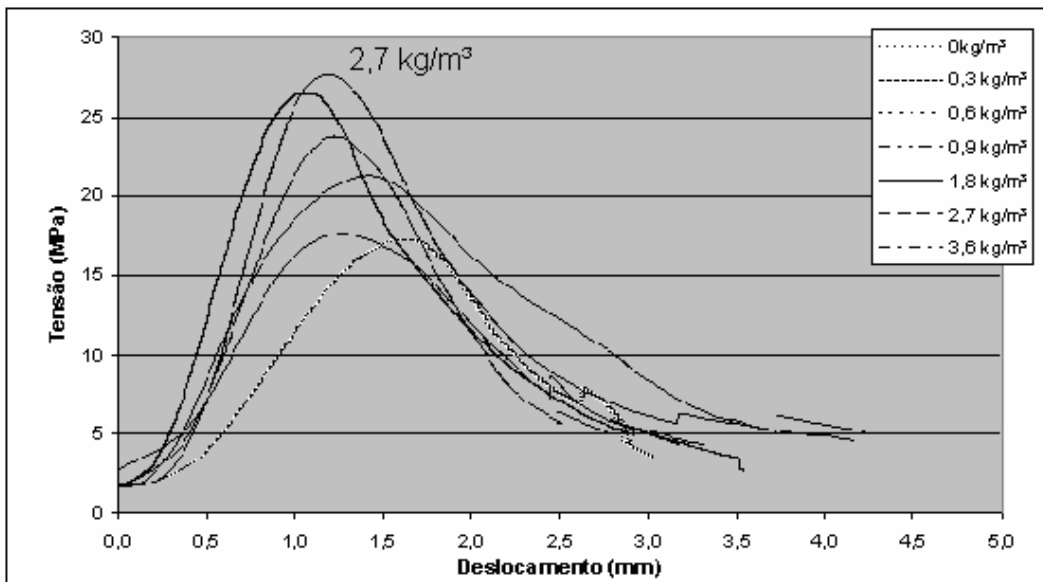


Figura 6.18 – Resistência à compressão simples aos 7 dias.

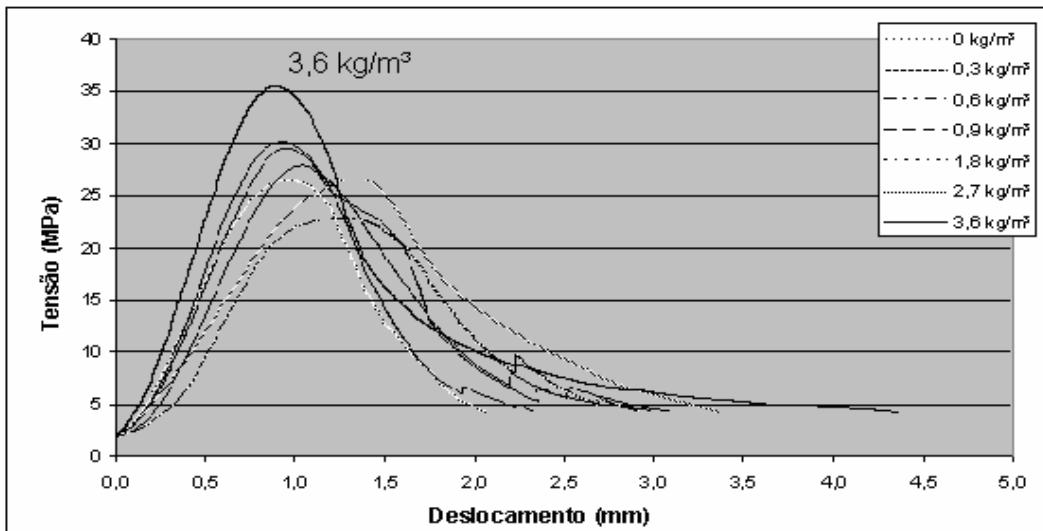


Figura 6.19 – Resistência à compressão simples aos 21 dias.

6.2.4 ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO – FASE DE AVALIAÇÃO

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de tração na flexão realizados nos corpos-de-prova 10x10x30 cm. Pode-se observar na figura 6.20 as tendências de comportamento para cada teor de adição. Surpreendentemente, neste caso, a adição de fibras não causou melhorias de comportamento. Ao contrário, as resistências médias à tração dos compósitos com todos os teores de adição, excetuando o teor de 0,9 kg/m³, foram inferiores à do testemunho. Por isso, não foi possível a modelagem do fenômeno.

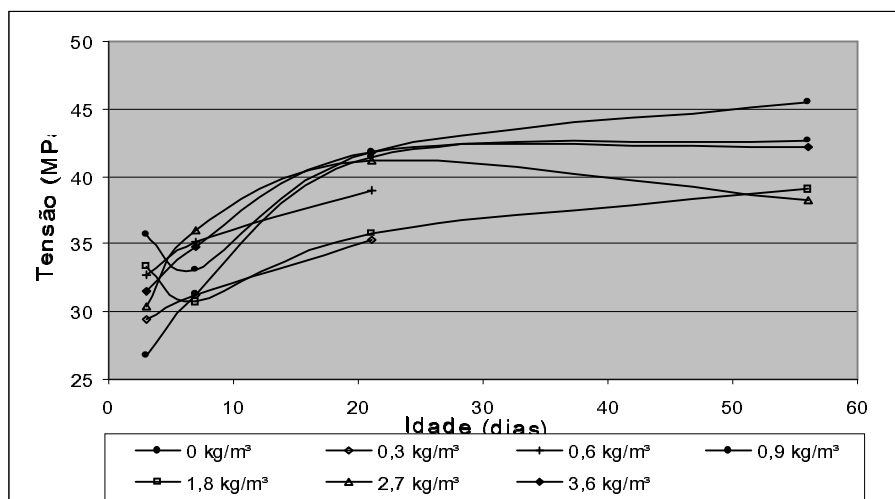


Figura 6.20 – Tensão de tração na flexão dos teores ensaiados na etapa de avaliação.

6.2.5 RESISTÊNCIA A IMPACTOS

A seguir apresentam-se os resultados do ensaio de impacto realizado com placas de concreto sem adição de fibra e com adição das fibras de sisal, polipropileno, aço, vidro e aramida. Os dados numéricos para cada tipo de fibra encontram-se no anexo 2.

Visto que este era o principal teste do programa experimental, decidiu-se, preliminarmente, realizar uma análise de variância multifatorial ANOVA, apresentada na tabela 6.1. para verificar se os resultados para cada tipo de fibra diferem significativamente entre si.

Tabela 6.1 – Análise de variância ANOVA

Tipo de Fibra	Código da Fibra	Homogeneidade do Grupo			
Placas sem fibra	6	x			
Placas com sisal	3	x			
Placas com vidro	4	x			
Placas com aço	1		x		
Placas com aramida	5			x	
Placas com polipropileno	2				x

Analisando os resultados desta análise, observa-se que o conjunto de dados obtidos para os vários corpos-de-prova de um mesmo tipo de fibra são homogêneos, porém existe diferença significativa entre os resultados obtidos para cada grupo, ou seja, para cada compósito confeccionado com fibras diferentes.

Assim, as análises realizadas a seguir serão baseadas na consideração dos resultados obtidos para cada tipo de fibra separadamente.

Foram analisadas as alturas de queda e os deslocamentos medidos pelos relógios comparadores posicionados na superfície das placas.

As alturas de queda são registradas em centímetros, sendo registrados ainda o número de golpes até a ruptura caso a altura máxima de 220 cm seja atingida.

No caso dos deslocamentos foi feita a média das leituras dos dois relógios comparadores de cada placa, e posteriormente calculada a média das médias de cada uma das 3 placas, utilizada como referência de deslocamento em função de

uma certa altura de queda.

- Fibras de Aço

A figura 6.21 mostra o gráfico gerado para os compósitos de fibra de aço. Observa-se que houve variação significativa no comportamento dos espécimes em função do teor adicionado, sendo que as placas com adição de $9,7 \text{ kg/m}^3$ foram as que se mostraram menos dúteis, apresentando deslocamentos menores, antes da fissuração.

Entretanto, em termos de resistência, o reforço mais efetivo foi obtido com adição de 30 kg/m^3 , pois neste caso a ruptura ocorreu para uma altura de queda de 220 cm, sendo necessários 8 lançamentos, em média, para provocar sua ruptura. Já a ruptura média das placas com adições de $9,7 \text{ kg/m}^3$ ocorreu a uma altura de 210cm. Observa-se que os deslocamentos tendem a se acelerar com o decorrer do ensaio, indicando um aumento na abertura das fissuras. Estão indicadas as medias das energias acumuladas até a ruptura para o três teores.

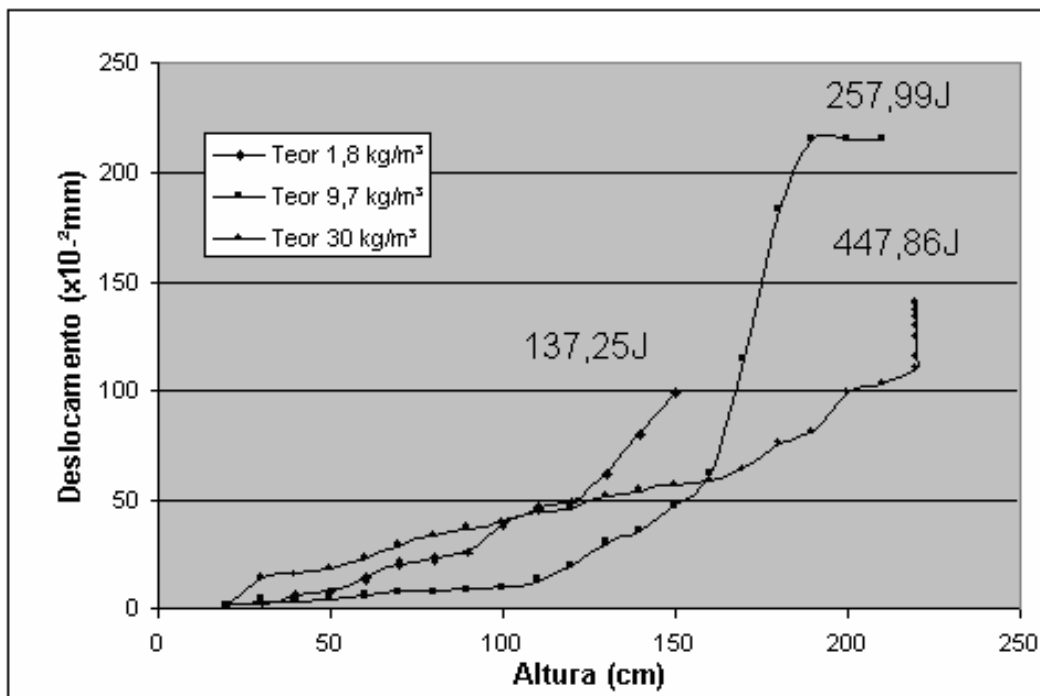


Figura 6.21 – Ensaio de impacto de placas com fibra de aço incorporada.

- Fibras de Polipropileno

A figura 6.22 apresenta o gráfico com os resultados das placas com adição de fibra de polipropileno. Observa-se que o teor intermediário de $1,14 \text{ kg/m}^3$ foi o que apresentou melhores resultados em relação à altura média de queda da esfera e aos deslocamentos médios medidos nos relógios comparadores. A ruptura, neste caso, ocorreu para uma altura de queda média de 180cm. Contudo, de forma geral, a diferença entre o comportamento dos três teores foi pequena e as fibras pareceram manter um mesmo efeito ao longo de todo o ensaio.

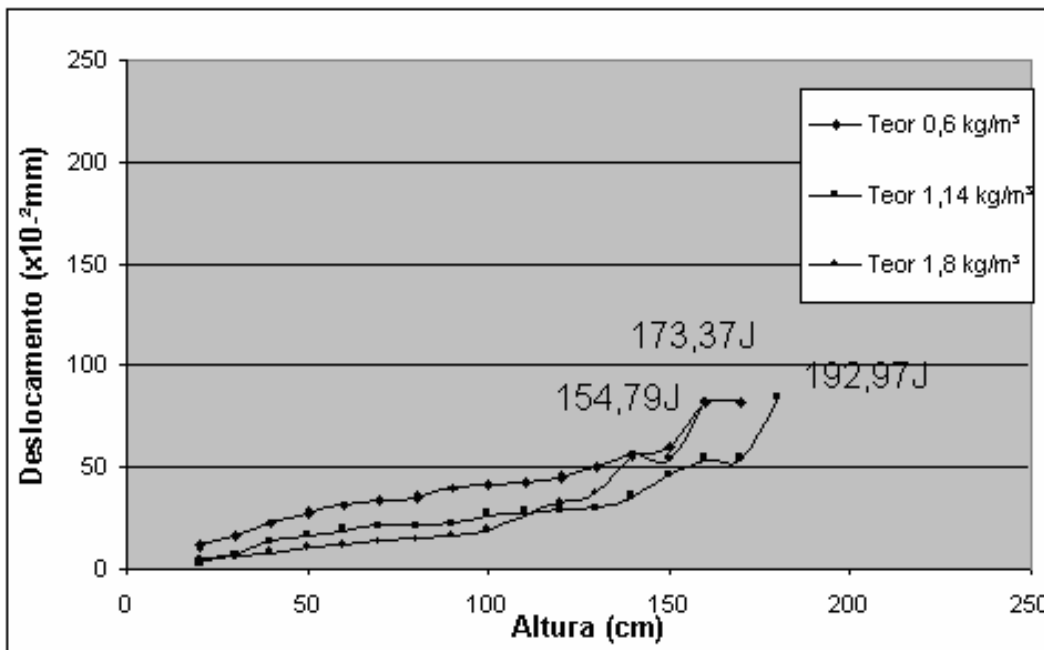


Figura 6.22 – Ensaio de impacto de placas com a incorporação de fibra de polipropileno.

- Fibras de Sisal

A figura 6.23 mostra o gráfico representativo dos resultados obtidos para as placas com fibra de sisal. Observa-se que o comportamento foi semelhante para todos os teores estudados, porém o teor de $3,6 \text{ kg/m}^3$ apresentou uma deformação levemente superior e uma altura de queda da esfera também maior, com a ruptura

sendo registrada para uma altura média de 170cm neste teor. Observa-se que, nestas placas, ocorre uma mudança notável de comportamento após o aparecimento da primeira fissura, com uma intensificação da magnitude dos deslocamentos verticais.

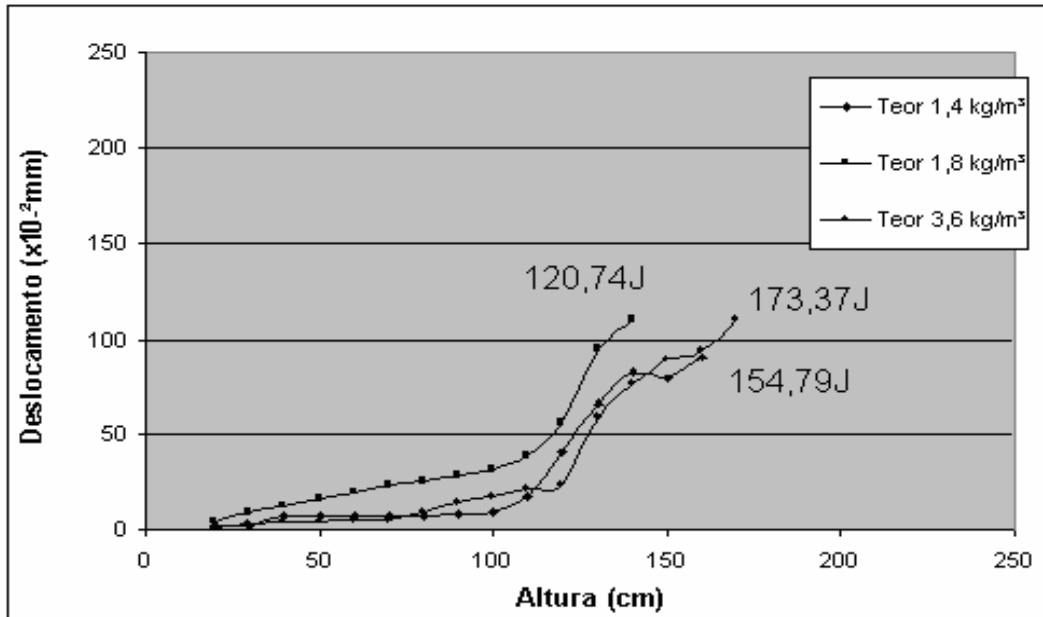


Figura 6.23 – Ensaio de impacto de placas com fibra de sisal incorporada.

- Fibras de Vidro

A figura 6.24 mostra o gráfico com os resultados das placas de concreto com fibra de vidro incorporada. Observa-se que o melhor comportamento ocorreu para o teor de 1,8 kg/m³, que apresentou deslocamentos médios de 92x10⁻²mm, para alturas máximas de queda de 170 cm, superiores ao teor de 3,19 kg/m³, que atingiu a ruptura a uma altura média de 140cm, com deslocamentos médios de 126x10⁻²mm.

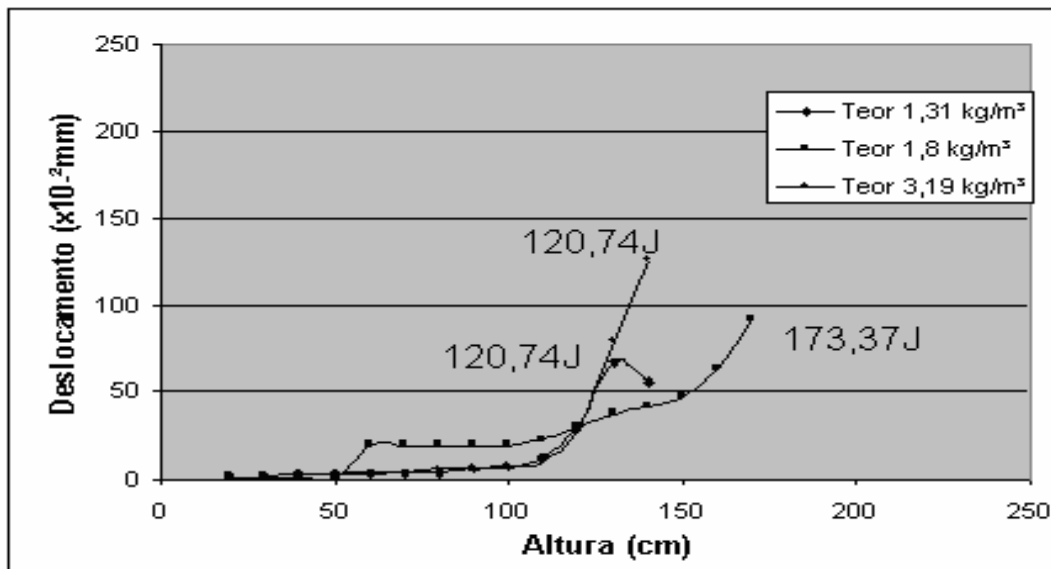


Figura 6.24 - Ensaio de impacto para placas com fibra de vidro incorporada.

- Fibras de Aramida

A figura 6.25 é representativa dos resultados obtidos no ensaio de impacto para os corpos-de-prova com fibra de aramida incorporada à mistura de concreto. Pode-se constatar que para os três teores estudados, o comportamento foi semelhante até a altura média de queda de 150cm. Porém, após este patamar, as placas com teor incorporado de fibra de 0,9 kg/m³ e 1,8 kg/m³ começaram a se deformar mais rapidamente, atingindo uma altura média de ruptura de 200cm. Um melhor resultado foi obtido para os exemplares com 3,6 kg/m³ de adição, que atingiram uma altura média foi de 220cm, com deslocamento médio de 27x10⁻² mm, sendo necessárias três quedas da altura máxima para que as placas rompessem. A magnitude dos deslocamentos foi reduzida durante todo o ensaio, embora se possa identificar uma tendência de aumento dos deslocamentos após a abertura da primeira fissura na face inferior.

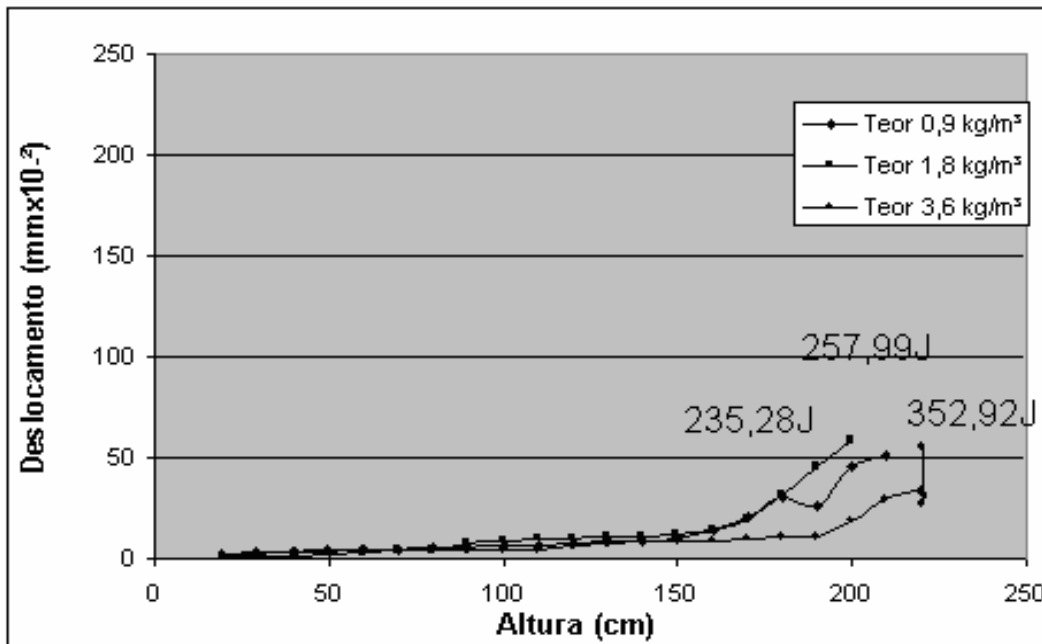


Figura 6.25 - Ensaio de impacto para placas com fibra de aramida incorporada.

- Testemunho

A figura 6.26 mostra o gráfico elaborado para as placas sem adição de fibra. A altura média atingida foi de 160cm, com deslocamentos da ordem de $80 \times 10^{-2} \text{mm}$. Entretanto, antes desse ponto ser atingido, houve uma fissuração excessiva nas placas, que ocorreu em torno da altura de 150cm.

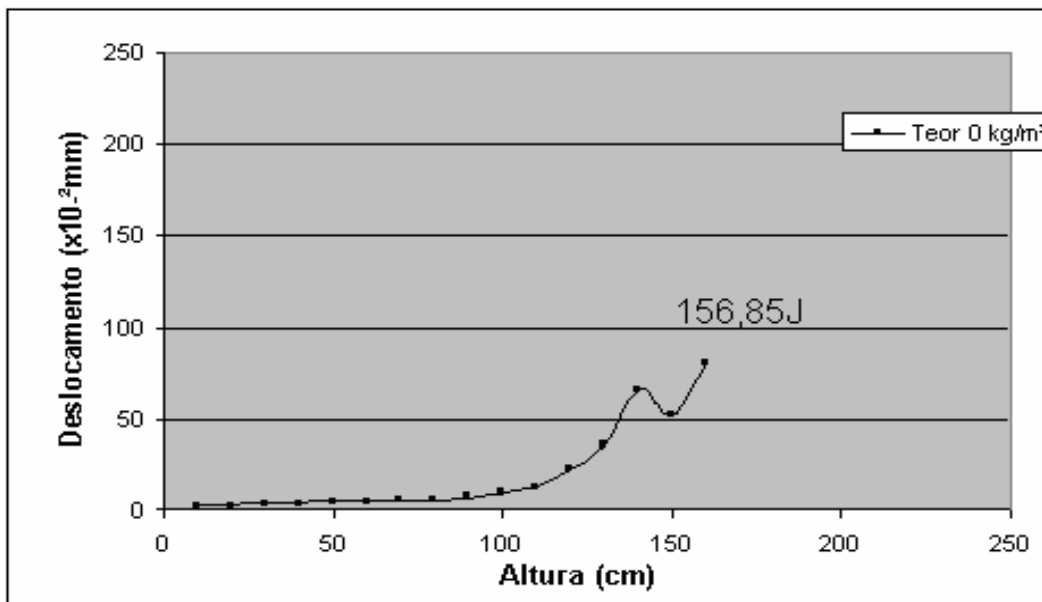


Figura 6.26 – Ensaio de impacto para placas sem adição de fibra.

- Comparativo de Desempenho

A tabela 6.2 apresenta os resultados do ensaio de impacto com as médias das alturas de queda da esfera para o aparecimento da primeira fissura nas placas com todos os tipos de fibra, e seus respectivos teores, além da altura de ruptura dos exemplares.

Tabela 6.2 – Ensaio de impacto para as diferentes alturas de queda da esfera.

Tipo de Fibra	Teor (kg/m ³)	Altura (cm)	
		Primeira Fissura	Ruptura
Aço	1,8	117	143
	9,7	127	187
	30	120	220
Polipropileno	0,6	130	160
	1,14	143	173
	1,8	117	150
Sisal	1,4	110	143
	1,8	103	137
	3,6	127	163
Vidro	1,31	133	153
	1,8	153	177
	3,19	153	173
Aramida	0,9	160	183
	1,8	173	190
	3,6	207	217
Sem Fibra	0	120	147

A figura 6.27 apresenta um gráfico comparativo dos resultados anteriores. Analisando os resultados de cada tipo de compósito ensaiado em conjunto verifica-se que as placas que apresentaram melhor comportamento, em relação ao impacto provocado pela queda da esfera, foram as placas de aço com adição de 30 kg/m³ e as placas de aramida com adição de 3,6 kg/m³. Em ambos os casos, as placas não romperam quando foi atingida a altura máxima de ensaio. Contudo, para as placas com adição de fibra de aramida foram necessários apenas três vezes o lançamento da altura de 220 cm, enquanto para as placas com adição de fibra de aço foram necessários mais seis arremessos. Por outro lado, observou-se que as placas com adição de aço apresentaram deslocamentos na ordem de quatro vezes superiores aos deslocamentos médios das placas com aramida, o que acarretou numa abertura de fissuras maior.

Observa-se ainda que a fibra de aramida com teor de 3,6 kg/m³ apresentou

melhor resultado para o aparecimento da primeira fissura, ou seja, a primeira fissura nessas placas ocorreu, em média, a uma altura superior do que nas placas das demais fibras.

Pode-se concluir, portanto, que a fibra de aramida é muito promissora para confecção de compósitos resistentes ao impacto. A mesma retarda o aparecimento da primeira fissura e tem desempenho semelhante ao aço após a fissuração.

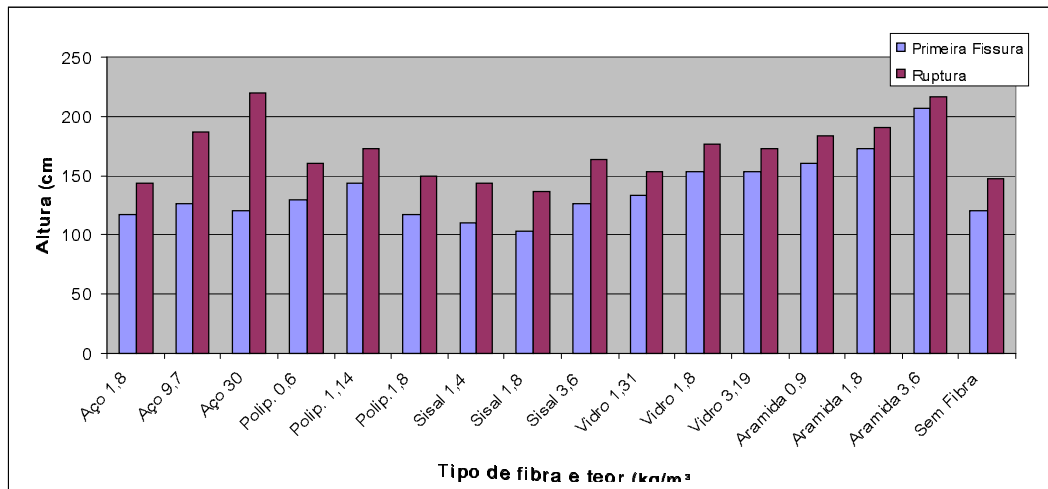


Figura 6.27 – Comparativo entre os desempenhos de distintos tipos de fibras com diferentes teores incorporados.

Dentre as outras fibras, observa-se que a fibra de aço não consegue retardar o aparecimento da primeira fissura, atuando principalmente após a fissuração, quando consegue aumentar significativamente a resistência do compósito.

As fibras de sisal não se mostraram adequadas para controlar o impacto. A primeira fissura aconteceu antes neste tipo de compósito do que no testemunho e sua ruptura se deu em alturas similares às dos testemunhos. Apenas no teor de 3,6 kg/m³ é que este tipo de compósito começou a mostrar um desempenho melhor. Talvez seja necessário trabalhar com teores mais elevados desta fibra, embora isto possa gerar problemas de trabalhabilidade.

No caso dos compósitos com adição de fibras de polipropileno, as cargas de fissuração inicial e de ruptura foram superiores às do testemunho, porém estas fibras tiveram desempenho inferior às fibras de vidro e de aramida, similares em termos de forma e tamanho. Os resultados não indicam que o aumento do teor de

fibra poderia colaborar para a melhoria deste desempenho.

Os compósitos com adição de fibra de vidro apresentaram desempenho superior ao dos compósitos com adição de fibra de sisal ou vidro e ao testemunho. Além disto, seus desempenhos foram superiores ao compósito com adição de fibra de aço em teor de $1,8 \text{ kg/m}^3$, ou seja, para o mesmo volume de fibra. Não existe grande diferença entre os teores de $1,8$ e $3,19 \text{ kg/m}^3$ de adição de fibra de vidro, sendo o desempenho do teor de $1,31 \text{ kg/m}^3$ levemente inferior.

6.2.6 MICROSCOPIA DO COMPÓSITO

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de microscopia eletrônica por varredura de elétrons realizados em amostras de corpos-de-prova de concreto rompidos à compressão simples. Pode-se observar nas figuras 6.28, 6.29 e 6.30 a disposição e distribuição da fibra de aramida no compósito e o envolvimento da fibra pela matriz cimentícia. Observa-se que ocorreu boa dispersão das fibras de aramida na matriz, mesma havendo uma coesão natural entre elas antes da incorporação, devido ao fato de que as mesmas foram obtidas de um fio. Na figura 6.28, observa-se o detalhe de um filamento de aramida perfeitamente aderido a matriz.

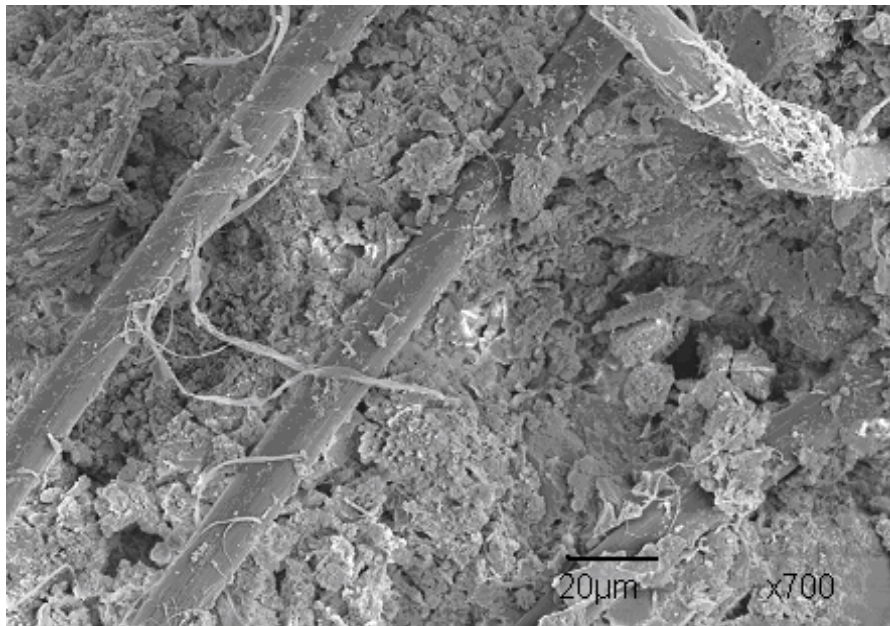


Figura 6.28 – Compósito de matriz cimentícia com fibra de aramida incorporada.

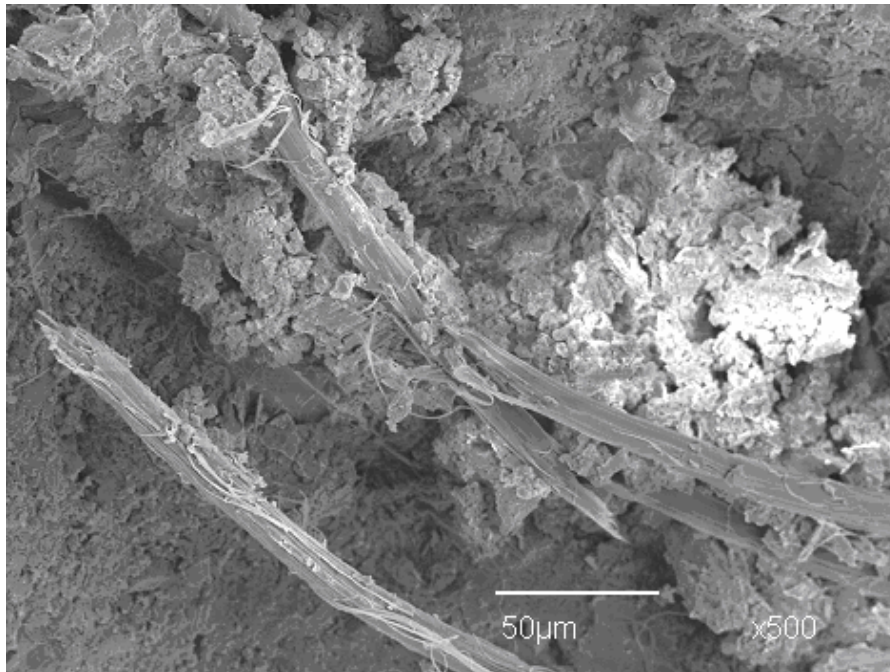


Figura 6.29 – Compósito de matriz cimentícia com fibra de aramida incorporada com ampliação de 500x.

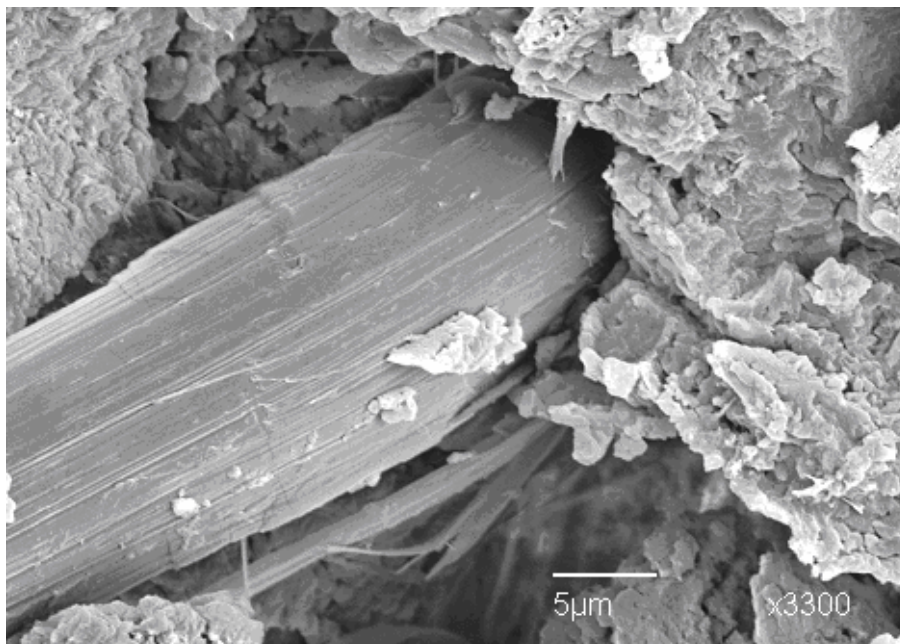


Figura 6.30 – Aspecto da ancoragem de uma fibra de aramida no compósito, com ampliação de 3.300x.

Nas figuras 6.31, 6.32 e 6.33, pode-se constatar a forma de ruptura do reforço do compósito. Observa-se que as fibras romperam por cisalhamento ou escoamento, não havendo sinais de arrancamento devido à falta de aderência.

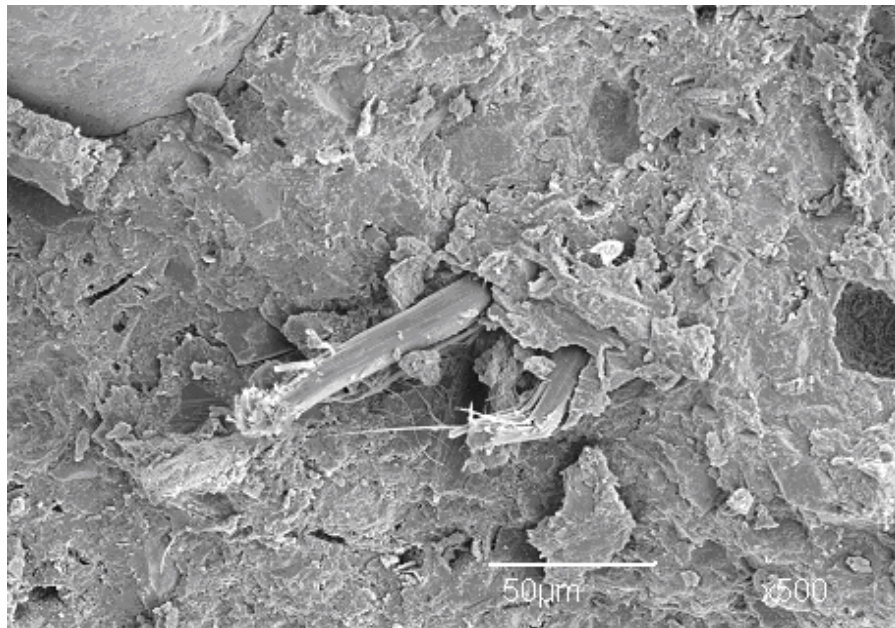


Figura 6.31 – Aspecto de uma superfície de ruptura do compósito de fibra aramida com ampliação de 500x.

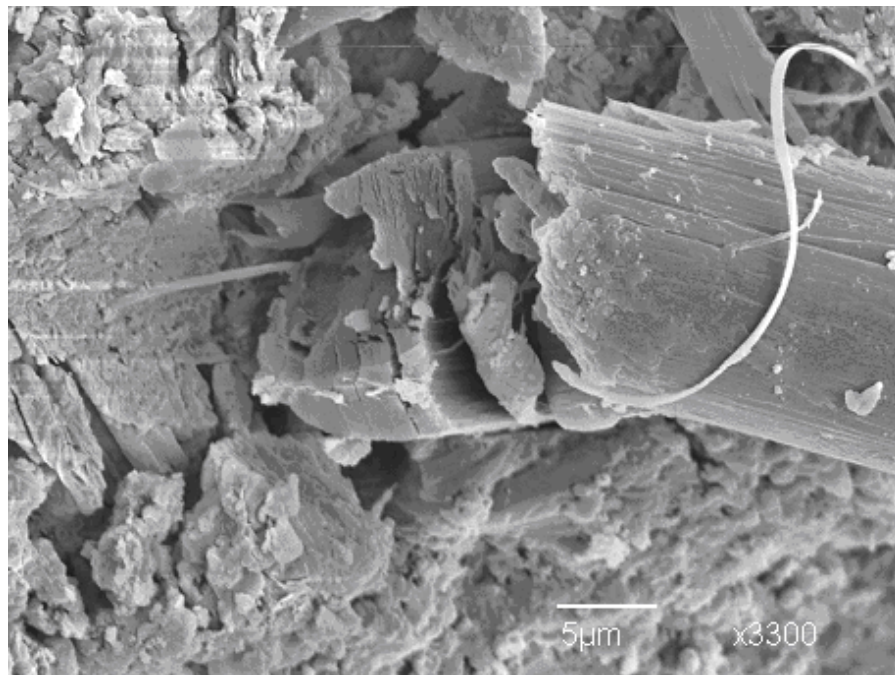


Figura 6.32 — Aspecto de uma superfície de ruptura do compósito de fibra aramida com ampliação de 3.300x.

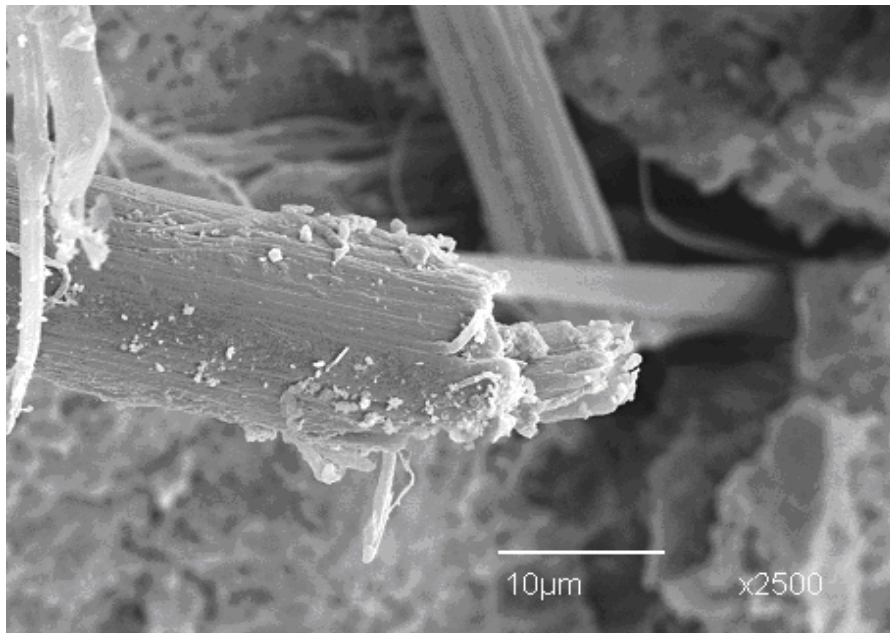


Figura 6.33 – Aspecto de uma superfície de ruptura do compósito de fibra aramida com ampliação de 2.500x.

Nas figuras 6.34 a 6.36, pode-se verificar que a fibra tende a sofrer um desfibrilamento que pode colaborar para aumentar sua aderência, mas que pode ter conseqüências sobre sua durabilidade. Considera-se que este aspecto deve ser estudado em maior detalhe.

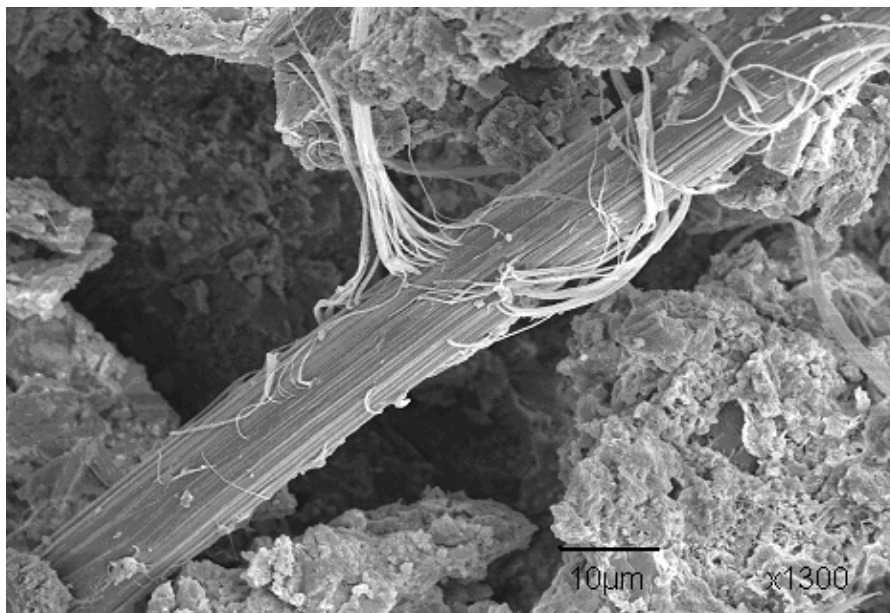


Figura 6.34 – Vista da fibra aramida no compósito ampliada a 1.300x.

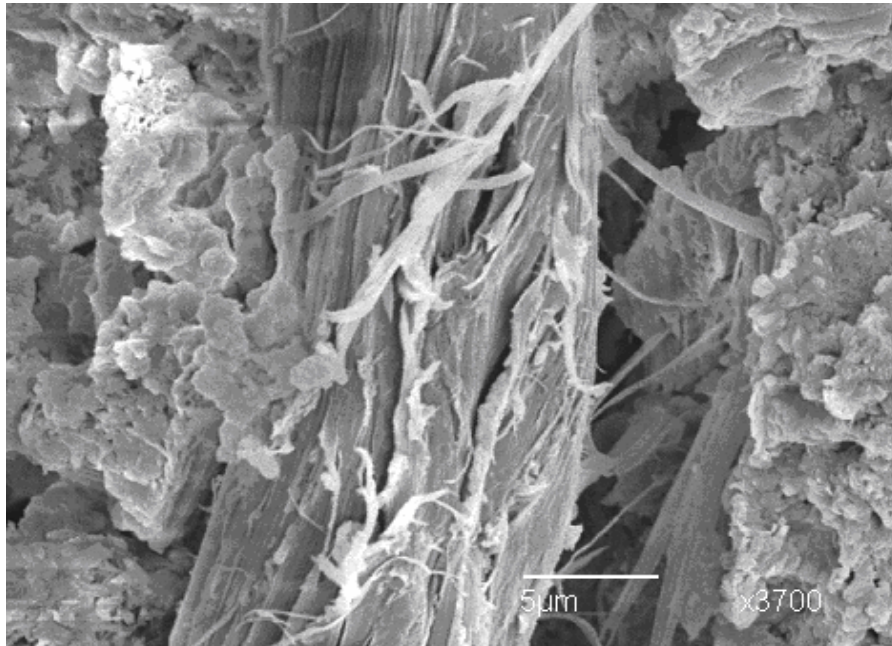


Figura 6.35 – Vista da fibra aramida no compósito ampliada 3.700x.

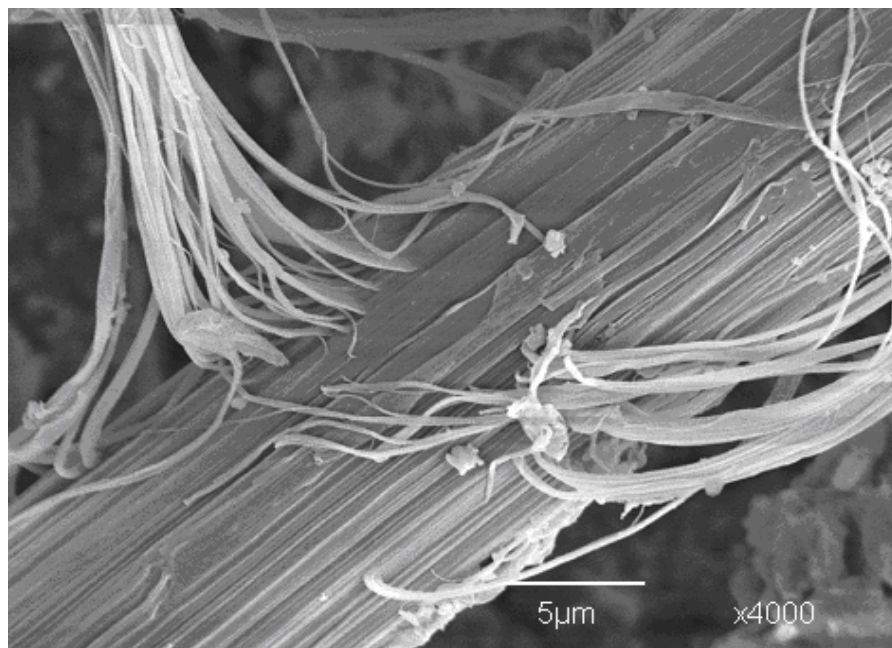


Figura 6.36 – Vista da fibra aramida no compósito ampliada 4.000x.

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Há tempos atrás, a idéia de um concreto estrutural reforçado com materiais sintéticos não passava de uma boa idéia. De acordo com HANNANT (2002), há aproximadamente 40 anos, foi publicado o trabalho de ROMUALDI e BATSON, o qual estimulava pesquisas com a aplicação de fibras em matrizes cimentícias. Atualmente, essa tecnologia está evoluindo rapidamente. É inevitável que os avanços nas indústrias químicas e têxtil continuarão e, conseqüentemente, cada vez mais se disponibilizarão novos materiais de alto desempenho para aplicação na construção civil. A questão para o sucesso na utilização destes está na compreensão de suas propriedades e no desenvolvimento de uma tecnologia apropriada para seu uso.

Nessa pesquisa buscou-se avaliar o comportamento da fibra de aramida Kevlar em matrizes de base cimentícias, pois essa fibra é um material de alto desempenho e que já é utilizado sob diferentes formas em outras indústrias. O trabalho objetivou determinar a potencialidade de utilização dessa fibra para formação de compósitos resistentes ao impacto, gerando uma alternativa a mais para o mercado da construção.

Sendo a utilização da aramida no concreto um tema novo no país, a pesquisa teve caráter exploratório e incluiu a caracterização da fibra e das propriedades mecânicas básicas do compósito, visto que a adição de fibras em matrizes cimentícias é uma das maneiras de controlar a fissuração, e todas as patologias decorrentes da mesma, e aumentar a capacidade à deformação de matrizes cimentícias.

7.2 CONCLUSÕES

A fibra de aramida mostrou-se uma alternativa viável e promissora no reforço de matrizes com bases cimentícias. Os resultados obtidos no capítulo 6 mostram que é possível obter um concreto com peso específico menor, ou seja, um concreto mais leve do que o convencional e ainda incrementar o comportamento mecânico do mesmo sob certos aspectos.

De fato, observou-se que a adição das fibras de aramida causou um incremento importante de 12% na resistência à compressão aos 28 dias em relação aos espécimes moldados sem fibra, para teores moderados de adição, em torno de $1,8 \text{ kg/m}^3$, contrariando a hipótese formulada no capítulo 1. Embora não se deva, por motivos de segurança, considerar este aumento de resistência no cálculo estrutural, o mesmo pode representar uma importante reserva de resistência em peças estruturais. Acredita-se que este efeito seja decorrente do fato de que a presença das fibras reduz a deformação transversal durante o ensaio de compressão simples, retardando a ruptura do corpo-de-prova. Em teores muito altos a adição de fibras não se mostrou tão eficiente, provavelmente devido ao fato de que a fibra pode comprometer a trabalhabilidade e causar a incorporação de ar.

No caso da resistência à tração na flexão, embora os ensaios preliminares tenham apontado uma tendência de melhoria, a série de ensaios principal não conseguiu demonstrar que a adição de fibras aumenta a resistência dos compósitos de forma consistente, não permitindo confirmar esta hipótese.

A incorporação de todas as fibras causou impactos na trabalhabilidade, confirmando a hipótese levantada no capítulo 1. O uso de superplastificantes de alta eficiência, à base de naftaleno sulfonado, entretanto, permitiu obter concretos trabalháveis, embora em teores elevados de fibra aramida pareça ter ocorrido uma certa incorporação de ar. Outra medida de prevenção seria a molhagem da fibra para diminuição da absorção de água.

Em relação ao impacto, o desempenho dos compósitos com adição de fibra aramida foi excelente. As mesmas apresentaram a maior capacidade de controle da fissuração inicial e foram capazes de incrementar muito a resistência e ductilidade do compósito, apresentando desempenho similar ao aço após a fissuração e confirmando a hipótese estabelecida no capítulo 1. As fibras de vidro e de polipropileno formaram um grupo intermediário, inferiores ao aço e à aramida porém capazes de proporcionar melhorias

em relação ao desempenho. Por fim, a fibra de sisal utilizada nesta pesquisa só se mostrou capaz de produzir um desempenho levemente superior ao testemunho para um teor de $3,6 \text{ kg/m}^3$.

Salienta-se que estas tendências de comportamento são válidas para os compósitos estudados nessa pesquisa. Como o assunto é inovador, é necessária uma investigação complementar mais abrangente sobre o desempenho dos compósitos de matriz cimentícia reforçados com fibra de aramida Kevlar antes de seu emprego em larga escala. É também necessário expandir os testes para outros teores e comprimentos de fibras e ampliar as comparações para outras fibras. Além disso, os aspectos ligados à durabilidade devem ser investigados. Ou seja, este trabalho inicial aponta no sentido da viabilidade de utilização da fibra aramida, porém estabelece a demanda por pesquisas complementares. A seguir são apresentadas algumas sugestões para o prosseguimento dos trabalhos na área.

7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com TANESI et. al (1997), é necessário um entendimento melhor do comportamento dos compósitos reforçados com fibras para que suas potencialidades sejam aproveitadas e o consumo se torne corriqueiro, inclusive diminuindo seu custo. Apesar das expectativas positivas geradas pelos dados coletados, outros estudos se fazem necessários antes que se possa recomendar com segurança a adição da fibra de aramida Kevlar às matrizes cimentícias. Sugere-se a realização de trabalhos sobre:

- determinação de teores e comprimentos ótimos para incorporação da fibra aramida;
- estudo da estabilidade físico-química da fibra na matriz cimentícia;
- modelagem teórica do efeito de “reforço ao impacto” proporcionado pela fibra;
- efeitos de variações no processo de moldagem, no tipo de cimento e aditivo, e nas características do agregado (tipo e tamanho) sobre as propriedades dos compósitos;
- estudo de combinações binárias e terciárias de fibras em matrizes cimentícias;
- estudo de concreto projetado com fibra de aramida;
- caracterização do módulo de elasticidade e de outros parâmetros de importância do material, incluindo um estudo detalhado do efeito da fibra nas resistências à tração e à compressão, para esclarecer as tendências registradas nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABADIE, E. **Petróleo e seus derivados**. Petrobrás, Rio de Janeiro, 1989. 86 p.

ABIT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL). Disponível em: <<http://www.sinditextil.org.br/dados/excell>>. Acesso em: 04 jun. 2003.

ACCETTI, K.; PINHEIRO, L.M. Tipos de fibras e propriedades do concreto com fibras. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 42., 2000, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2000.

A FIBRA. Disponível em: <<http://www.sisalfashion.com.br/fibra.htm>>. Acesso em: 17 jun. 2002.

AGOPYAN, V.; VANDERLEY, M.J. **Building panels made with natural fibre reinforced alternative cements**. Fibre reinforced cements and concretes recent developments, Elsevier, 1990. p. 296-305

AGUIAR NETO, P.P. **Fibras têxteis**. Rio de Janeiro: SENAI-DN: SENAI-CETIQT: CNPq: IBICT: PADCT: TIB , v. 1 e 2, 1996.

AL-QURESHI, H.A. Disponível em: <<http://mec-r.mec.ita.cta.br/lab/>> Acesso em: 29 mai. 2002.

ARAÚJO DA SILVA, P.F. Concreto projetado com fibra: estágio atual. In: SIMPÓSIO SOBRE TÚNEIS URBANOS, 4., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 2002. p. 203-206.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 5738**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Agregados para concreto: NBR 7211**. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone: NBR 7223**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Concreto: determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos**: NBR 12142. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Placas cerâmicas para revestimento – especificação e métodos de ensaios**: NBR 13818. Rio de Janeiro, 1997.

BARROS, J.A.O. Comportamento à tração uniaxial aos 28 dias de argamassa reforçada com fibras de vidro. **Engenharia Civil**, Universidade do Minho, n. 4, p.15-30, 1996a.

BARROS, J.A.O. Estado-da-arte dos betões reforçados com fibras. **Engenharia Civil**, Universidade do Minho, n. 3, p.29-47, 1996b.

BARROS, J.A.O.; GOUVEIA, A.V. Simulação do comportamento à compressão uniaxial do betão reforçado com fibras de aço. **Engenharia Civil**, Universidade do Minho, n. 8, p.39-52, 2000.

BATSON, G.B. State-of-art report on fiber reinforced concrete. **An International Symposium: Fiber Reinforced Concrete**. Canadá: 1973. Detroit, ACI, 1974. p. 535-549

BAYASI, Z.; DHAHERI, M.A. Effect of exposure to elevated temperature on polypropylene fiber-reinforced concrete, **ACI Materials Journal**, v.99, n.1, jan.-fev. 2002. p. 22-26.

BAZIN, M. Mitos e verdades sobre os compósitos na construção civil. In.: **Arquimacom'2002**. São Paulo, 2002.

BEAUDOIN, J.J. **Handbook of fiber-reinforced materials**: principles, properties, developments and applications. Ottawa, Canadá, Noyes Publications, 1990. 331 p.

BINDIGANAVILE, V.; BANTHIA, N. **Polymer and steel fiber-reinforced cementitious composites under impact loading – Part 1: bond-slip response e Part 2: flexural toughness**. ACI Structural Journal, vol.98, n.1, jan.-fev. 2001. p.10-24.

CASATI, B. Utilização de tecidos de fibra de vidro em sistemas na construção civil. In.: **Arquimacom'2002**. São Paulo, 2002.

CEPED (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento). **Utilização de fibras vegetais no fibro-cimento e no concreto-fibra**. Rio de Janeiro, BNH/DEPEA, 1982.

DU PONT. Du Pont de Nemours & Co., Inc., E.I Catálogo Técnico, 199-.

ERHARDT, T; BLUMCKE, A.; BURGER, W.; MARKLIN, M.; QUINZLER, G. **Curso Técnico Têxtil**. São Paulo: EPU, v.1,2,3, 1975.

- FACÓ, C.A. **Adesivos**. Boletim Técnico nº 28 da ABTB (Associação Brasileira de Tecnologia da Borracha) out/1983.
- FALCÃO BAUER, L.A.; TOKUDOME, S.; TAKASHIMA, S. Melhoria de propriedade do concreto de elevado desempenho, com adição de alto teor de fibra de aço. 2001 In: Congresso Brasileiro do Concreto, 44., 2001, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2001.
- FÉLIX, A.H.O. **Compósitos de polipropileno com fibra de vidro utilizando viniltriatoxisilano como agente de adesão**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- FERREIRA, A.B.H. **Novo dicionário da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 198-.
- FOSROC. Guia de Produtos. Catálogo técnico. 2000.
- GREGORY, I.T. **Estruturas de concreto e de aço no século XXI**. Hong Kong, 1995. Disponível em:
<<http://www.redlandprecast.com.hk/grc.htm>&lp=em_p> Acesso em: 17 jun. 2002.
- GRISON, E.C; HOINACKI, E. **Identificação de Materiais Poliméricos: Via Úmida**. Fundação de Ciência e Tecnologia: Porto Alegre, 1985.
- HARRIES, K.A.; YOUNG, S.C. Sprayed-fiber-reinforced composites materials for infrastructure rehabilitation. **Concrete International**. United States of America, v. 25, n. 1, p. 47-51, jan 2003.
- HANNANT, D.J. **Fibre cements and fibre concretes**. Wiley Interscience Publication: John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, 1978. 219 p.
- HANNANT, D. Fibres in concrete – a perspective. **Concrete for the construction industry**. v. 36, n. 8, p. 40-43, set 2002.
- KASWELL, E.R. **Textile fibers, yarns, and fabrics**. Reinhold Publishing Corporation, Boston, 1953.
- KELBERT, E. Use of natural fibres in composite materials. In.: **Arquimacom'2002**. São Paulo, 2002.
- KERN, A.P. **Estudo da Viabilidade da Incorporação de Resíduos de Contrafortes de Calçados em Matriz de Gesso para Uso como Material de Construção Civil**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 1999.
- LANGSTON, P.R. **Overview of Kevlar composites: properties and uses**. Kevlar Composites. 3 ed. USA: T/C Publications, 1984.

LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. **Kevlar-putting it all together**. Disponível em: <<http://www.lbl.gov/MicroWorlds/Kevlar>> Acesso em: 8 jun. 2001.

LEGGATT, A. **GRC and other laminar concrete**. New Concrete Technologies and Building Design. Lancaster: Longman Group Ltd., 1979. p. 107-118

LIMA, R.C.A.; SILVA FILHO, L.C.P. Analysis of high performance concrete with polypropylene and/or steel fiber in high temperature. 2002 In: Congresso Brasileiro de Concreto, 45., 2003, Vitória. **Anais ...** Vitória, 2003.

LORENTSEN, M. Steel fibre concrete for structural elements. In: **Steel Fiber Concrete**. Sweden: Elsevier, 1985. p.421-442

MANO, E.B. e MENDES, L.C. **Introdução a polímeros**. São Paulo: Edgar Blucher, 2 ed., 1999.

MANO, E.B. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Edgar Blucher, 2 ed., 2000.

MARTINEAU, P; AGOPYAN, V. Conferência Magna I – Compósitos: material inovador. In.: **Arquimacom'2002**. São Paulo, 2002.

MASTER CHEMICALS. **Boletim técnico**. Disponível em: <<http://www.mastercompanyltd.com.br/download/fibrasdeaco.zip>> Acesso em: 30 mai 2002.

MATSUMOTO, T. & LI, V.C. Fatigue crack growth analysis of fiber reinforced concrete with effect of interfacial bond degradation. **Cement & Concrete Composites**, v.20, p.339-350, out 1998.

MATSUMOTO, T. & LI, V.C. Fatigue life analysis of fiber reinforced concrete with a fracture mechanics based model. **Cement & Concrete Composites**, v.21, p.249-260, ago 1999.

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

MINDESS, S.; YOUNG, J.F.; DARWIN, D. **Concrete**. 2 ed. United States of America: Pearson Education, 2002. 644 p. Inclui índice. ISBN 0-13-064632-6.

MINER, L.H. **Cutting and machining Kevlar aramid composites**. Kevlar Composites. 3 ed. USA: T/C Publications, 1984.

MONTARDO, J. **Tecnologia do uso da fibra de polipropileno na construção civil**. Auditório do Senge. Palestra proferida em 30 out 2001.

PUERTAS, F., AMAT, T., VÁZQUEZ, T. **Comportamiento de morteros de cementos alcalinos reforzados com fibras acrílicas y de polipropileno.** *Materiales de Construcción*, Espanha, n. 259, 2000.

REDON, C.; CHERMANT, J.L. Damage mechanics applied to concrete reinforced with amorphous cast iron fibers, concrete subject to compression. **Cement & Concrete Composites**, v.21, p.197-212, mai 1999.

ROCHA, C.C. E a fibra de aramida? : a fibra de aramida chegou para concorrer com a fibra de carbono. **Recuperar**, Rio de Janeiro, v.38, p.30-33, nov/dez 2000.

ROCHA, C.C. **A fibra de aramida.** Disponível em:
<http://www.casadagua.com/casa_viewcase.asp?idcase=179> Acesso em: 21 out 2002.

SALAVERRÍA, J.H. ; CASAS, J.R. ; APARICIO, A.C. **Estúdio experimental sobre el uso de fibras aramidadas para reparación y refuerzo de puentes existentes.** IV Congresso Iberoamericano de Patología das Construções, 1997.

SANTIAGO, M.O. Aplicações do GRC-cimento reforçado com fibras de vidro em novos estádios de Sevilha, Espanha. In.: **Arquimacom'2002.** São Paulo, 2002.

SANTOS, L.A. **Desenvolvimento de cimento de fosfato de cálcio reforçado por fibras para uso na área médico-odontológica.** 2002. 247f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)-Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SAVASTANO JR, H.; AGOPYAN, V.; DANTAS, F.A.S. **Fibre-cement paste transition zone: characterization and effect on the mechanical properties.** *Interfaces in cementitious composites.* Toulouse, v.18, p.23-32, 1992.

SCHULER, A. **Caracterização de argamassas com adições de sílica ativa como material para reparos e reforços de estruturas de concreto armado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 1998.

SCHWARTZ, M.M. **Composites materials handbook.** New York: McGraw Hill, 1984.

SEN, R., SHAHAWY, M., ROSAS, J., SUKUMAR, S. **Durability of aramid fiber reinforced plastic pretensioned elements under tidal/thermal cycles.** *ACI Structural Journal*, vol.96, n.1, p.95-104, 1999.

SOUSA, A.N.; THAUMATURGO, C. **Geopolímeros para aplicações balísticas.** Disponível em: <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo_10070/> Acesso em: 29 mai. 2002

SP SYSTEMS. **Fibres for reinforcement in composites materials.** Disponível em: <<http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=984>> Acesso em: 15 ago 2002.

SWAMY, R.N. MANGAT, P.S.; RAO, C.V.S.K. The mechanics of fiber reinforcement of cement matrices. **An International Symposium: Fiber Reinforced Concrete**. Canadá: 1974. Detroit, ACI, 1974. p. 1-27

TANESI, J.; AGOPYAN, V. **Compósitos reforçados com fibras plásticas para construção civil**. II Encontro Tecnologia de Sistemas Plásticos na Construção Civil. EPSP. São Paulo, 1997.

TREVISAN, C. O mercado do medo. **Época**, Rio de Janeiro, ed. 160, jun. 2001. Disponível em: <http://epoca.globo.com/edic/20010611/brasil_4a.htm> Acesso em: 29 mai. 2001

VAN HAASTERT, J.A.; ROSENBERG, I. **Kevlar aramid composites in life-saving equipment**. Kevlar Composites. 3 ed. USA: T/C Publications, 1984.

VASCONCELOS, A.C. Da invenção do conceito de tensão aos cabos de protensão com fibras artificiais. In: IBRACON, 36., 1994, Porto Alegre. **Conferência Inaugural...** Porto Alegre: PUCRS, 1994.

VIEGAS, C. Perfil pultrudado para a utilização em cruzetas e postes para a distribuição de energia elétrica. In.: **Arquimacom'2002**. São Paulo, 2002.

VOTORAN. Relatório Técnico de Cimento, 2003.

WERKEMA, M.C.C; AGUIAR, S. **Análise de regressão: como entender o relacionamento entre as variáveis de um processo**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1996. 311 p.

WILLOUGHBY, R. **Fibres for Reinforcement in Composite Materials**. Disponível em: <http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=984#_Glass> Acesso em: 24 jun. 2003

WINGATE, I.B. **Textile fabrics and their selection**. 5edição. New York, 1964.

YANG, H.H. **Kevlar Aramid Fiber**. Wiley, 1993.

BIBLIOGRAFIA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete. (Using Simple Beam with Third Point Load)** ASTM – C78-94.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards.** Philadelphia, 1991. Standard test method for comparing concretes on the basis of bond developed with reinforcing steel: C 234-91a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 5739.** Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e execução de obras de concreto.** NBR 6118. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Cimento Portland – determinação da resistência a compressão: NBR 7215.** Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 7222.** Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Concreto para fins estruturais – classificação por grupos de resistência: NBR 8953.** Rio de Janeiro, 1992.

BANTHIA, N.; YAN, C. **Shrinkage cracking in polyolefin fiber-reinforced concrete.** ACI Structural Journal, vol.97, n.4, jul-ago 2000. p.432-437.

BATISTA, M. **Epóxis: entenda os segredos desses sistemas fantásticos de modo a saber como, quando e onde aplicá-los.** Recuperar. Maio/Junho 1999. n.29 ano.06

BEBER, A.J. **Avaliação do Desempenho de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Lâminas de Fibra de Carbono.** 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

BERALDO, A.L. **Biokreto**. Disponível em: <<http://www.agr.unicamp.br/biokreto>>
Acesso em: 27 ago. 2002.

BOTELHO, E.C.; REZENDE, M.C. **Caracterização mecânica de compósitos de poliamida/fibra de carbono via ensaios de cisalhamento interlaminar e de mecânica da fratura**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, Associação Brasileira de Polímeros, v.XII, n.3, São Carlos, jul/set, 2002.

BUDWEG, F.M.G. Concreto reforçado por fibras de aço. In: REIBRAC, 36., 1994, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: PUCRS, 1994. p.277-290.

CECCATO, M.R. **Estudo da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço**. Dissertação de mestrado. São Paulo, 1998.

CHAMIS, C.C. **Test methods and design allowables for fibrous composites**. ASTM SPECIAL TECHNICAL PUBLICATION 734. 1979
Na biblioteca 678.033(063) s989p

CHUNG, K.F; YU, W.K. **Mechanical properties of structural bamboo for bamboo scaffoldings**. *Engineering Structures*, Elsevier, v.24, n.4, p. 429-442, abr. 2001.

COELHO, A.C.M.; SOUZA, A. **Papéis para sacaria**. set, 2000. p.64-69

D'ARSIÉ, D. **Los plásticos reforzados com fibras de vidro**. 2 ed. Buenos Aires: Américalee, 1970. 273 p.

FERREIRA E CASTRO, P. Elementos estruturais de concreto armado com barras de fibra de vidro. In: REIBRAC, 36., 1994, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: PUCRS, 1994. p.277-290.

FERREIRA, M.; CAMARGO JR., S.S.; BARBOSA, B.M.; GOMES, R.V.B, LACHTERMACHER, M.G.; QUINTELA, J. **Propriedades mecânicas de epóxis utilizadas no recobrimento interno de oleodutos e gasodutos**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, Associação Brasileira de Polímeros, v.XII, n.3, São Carlos, jul/set, 2002.

FOWLER, D.W. **Polymers in concrete** : a vision for the 21 th century. *Cement & Concrete Composites*. Volume 21 Ano : 1999 Octorber/December. Elsevier

GHAVAMI, K.; TOLEDO FILHO, R.D.; BARBOSA, N.P. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. **Cement & Concrete Composites**, v. 21, n. 1, p. 39-48, mai 1999.

GOLDSWORTHY, W.B. **Economic advantages of reinforced plastics/composites in high-volume applications**. Kevlar Composites. 3 ed. USA: T/C Publications, 1984.

GOMES, C.E.M.; FERREIRA, O.P.; MARQUES, L. Avaliação das propriedades de compósitos com matrizes de cimento Portland contendo fibras de poliamida com adição

de látex SBR e sílica ativa. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2001.

GONÇALVES, J.P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos.** Dissertação (mestrado em engenharia) UFRGS, Porto Alegre, 2000.

HELENE, P.R.L., TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle de concreto.** Ed.Pini, São Paulo, 1992.

HOFFMANN, A.T. **Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2001.

HOUGET, V.; CHABANNET, M.; PERA, J. **Etude des interfaces ciment-fibres organiques.** Interfaces in cementitious composites. Toulouse, v.18, p.79-88, out. 1992.

ISTO É – Século 21. De volta à mamãe natureza. Disponível em:
<<http://www.terra.com.br/isote/ciencia/155603.htm>> Acesso em: 29 mai. 2002.

MAC VICAR, R., MATUANA, L.M., BALATINECZ, J.J. **Aging mechanisms in cellulose fiber reinforced cement composites.** Elsevier, Cement & Concrete Composites, vol.21, mai 1999.

MARTEN, B. **Glass Fibres** for cement & concrete. Concrete for the construction industry, British Cement Association, vol.32, n. 10, p.20-22, November/December 1998.

MENDONÇA, J.E.F.; HOLANDA, F.G. Concreto projetado com fibras metálicas. In: REIBRAC, 36., 1994, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: PUCRS, 1994. p.277-290.

MORRIS, E.E. **Kevlar aramid composites in pressure vessels/tanks.** Kevlar Composites. 3 ed. USA: T/C Publications, 1984.

MOSALLAM, A.S. Composites em construction. **Handbook of materials selection.** Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2002. p. 1369-1422

NORDESTE AUTOSHOW - INBRA-BLINDADOS, 2003. Disponível em:
<http://www.mecanicaonline.com.br/2001/dezembro/especiais/nordeste/nordeste_grupo_inbra.html> Acesso em: 29 mai. 2003

PAULON, W.A.; PINTO JUNIOR, N.O.; CESTARI, D.J. Adição de fibras orgânicas no concreto. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 42., 2000, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2000.

PINZELLI, R. Contribution & role of aramid fibre for external strengthening & repair of concrete structures. In: International conference, 8., 1999, London. **Anais...** London, Edinburgh, 1999. 1 CD.

PFEIL, W. **Concreto armado**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1985.

RHODIA INDUSTRIAL YARNS. Disponível em: <http://www.rhodia-iy.com>> Acesso em: 18 mai. 2001.

RODRIGUES, J.C. Fibras Sintéticas: o agregado que faltava a concretos e argamassas. **Recuperar**, Rio de Janeiro, n.7, ano 2, set/out 1995.

RODRIGUES, J. Reforçando o concreto com fibrocarbon-E. **Recuperar**, Rio de Janeiro, n.11, p.4-9, mai/jun 1996.

RODRIGUES, J. Fibrocarbone à Italiana. **Recuperar**, Rio de Janeiro, n.28, p.30-34, mar/abr 1999.

RODRIGUES, J. Reforço com fibra de carbono. **Recuperar**, Rio de Janeiro, n.29, p.14-16, mai/jun 1999.

SANDROLINI, F.; ROSAS ROSAS, M.; BONORA, V.; SACCANI, A. **Mechanical properties and microstructure of polyester-cementitious composites**. Interfaces in cementitious composites. Toulouse, v.18, p.207-216, 1992.

SAVASTANO JR, H.; AGOPYAN, V. **Transition zone studies of vegetable fibre-cement paste composites**. Cement & Concrete Composites. v. 21, n.1 – p. 49-57, 1999.

SAVASTANO, H.; MOACYR V.; AGOPYAN, V. Substituição do amianto por fibras sintéticas e celulósicas para a produção de fibrocimento. In.: **Arquimacom'2002**. São Paulo, 2002.

SCHWARTZ, R.T. & SCHWARTZ, H.S. **Fundamental aspects of fiber reinforced plastic composites**. Interscience Publishers. Air force materials laboratory. Ohio. 1966

VANTICO. **Sinopse das resinas epóxi, agentes de cura e produtos auxiliares**: catálogo. São Paulo: 2002. 48 p.

VERÇOZA, E.J. **Patologia das Edificações**. Sagra: Porto Alegre, 1991.

ANEXO 1
PLANILHAS DE RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES,
TRAÇÃO NA FLEXÃO, ENSAIO DE SLUMP E MASSA ESPECÍFICA DO
CONCRETO

Resultados dos Ensaios de Compressão Simples e Tração na Flexão

Fatores Controláveis				Variáveis de Resposta (KN)			
Data da Concretagem	Etapa	Teor	Compr. (mm)	Idade (dias)	Compressão Simples	Tração na Flexão 4x4x16	Tração na Flexão 10x10x30
11/12/01	1	0	0	3	158,00	1,50	
11/12/01	1	0	0	3	116,00	1,98	
11/12/01	1	0	0	3	162,00	1,86	
11/12/01	1	0	0	3	169,50	1,60	
11/12/01	1	0	0	3		1,90	
11/12/01	1	0	0	3		1,80	
11/12/01	1	0	0	7	183,00	2,16	
11/12/01	1	0	0	7	191,50	2,24	
11/12/01	1	0	0	7	151,00	2,22	
11/12/01	1	0	0	7	181,50	2,12	
11/12/01	1	0	0	7		1,82	
11/12/01	1	0	0	7		1,98	
11/12/01	1	0	0	28	204,50	1,85	
11/12/01	1	0	0	28	189,50	1,54	
11/12/01	1	0	0	28	207,50	1,98	
11/12/01	1	0	0	28	206,50	1,58	
11/12/01	1	0	0	28		2,08	
11/12/01	1	0	0	28		2,12	
11/12/01	1	0,3	12	3	143,00	2,24	
11/12/01	1	0,3	12	3	169,50	2,34	
11/12/01	1	0,3	12	3	186,50	2,48	
11/12/01	1	0,3	12	3	176,50	2,40	
11/12/01	1	0,3	12	3		1,96	
11/12/01	1	0,3	12	3		1,94	
11/12/01	1	0,3	12	7	188,00	1,96	
11/12/01	1	0,3	12	7	171,00	2,00	
11/12/01	1	0,3	12	7	212,50	2,22	
11/12/01	1	0,3	12	7	166,00	2,34	
11/12/01	1	0,3	12	7		2,12	
11/12/01	1	0,3	12	7		2,00	
11/12/01	1	0,3	12	28	227,00	2,45	
11/12/01	1	0,3	12	28	240,50	1,95	
11/12/01	1	0,3	12	28	221,50	2,45	
11/12/01	1	0,3	12	28	241,50	2,45	
11/12/01	1	0,3	12	28		2,50	
11/12/01	1	0,3	12	28		2,30	
14/12/01	1	0,6	12	3	172,50	2,30	
14/12/01	1	0,6	12	3	171,00	2,34	
14/12/01	1	0,6	12	3	168,00	2,56	
14/12/01	1	0,6	12	3	183,00	2,54	
14/12/01	1	0,6	12	3		1,72	
14/12/01	1	0,6	12	3		2,14	
14/12/01	1	0,6	12	7	198,50	2,36	
14/12/01	1	0,6	12	7	205,50	3,12	
14/12/01	1	0,6	12	7	184,50	2,56	
14/12/01	1	0,6	12	7	211,00	2,18	

14/12/01	1	0,6	12	7		2,54
14/12/01	1	0,6	12	7		2,56
14/12/01	1	0,6	12	28		
14/12/01	1	0,6	12	28		
14/12/01	1	0,6	12	28		
14/12/01	1	0,6	12	28		
14/12/01	1	0,9	12	3	193,50	2,56
14/12/01	1	0,9	12	3	180,00	2,20
14/12/01	1	0,9	12	3	189,00	2,50
14/12/01	1	0,9	12	3	180,50	2,00
14/12/01	1	0,9	12	3		2,28
14/12/01	1	0,9	12	3		2,08
14/12/01	1	0,9	12	7	214,50	2,46
14/12/01	1	0,9	12	7	231,00	2,78
14/12/01	1	0,9	12	7	211,50	2,80
14/12/01	1	0,9	12	7	215,00	2,72
14/12/01	1	0,9	12	7	218,00	2,98
14/12/01	1	0,9	12	7		2,22
14/12/01	1	0,9	12	28		
14/12/01	1	0,9	12	28		
14/12/01	1	0,9	12	28		
14/12/01	1	0,9	12	28		
29/01/02	1	0	0	3	144,50	1,70
29/01/02	1	0	0	3	136,50	1,80
29/01/02	1	0	0	3	175,00	1,86
29/01/02	1	0	0	3		2,12
29/01/02	1	0	0	3		2,16
29/01/02	1	0	0	3		1,84
29/01/02	1	0,9	25	3	191,00	1,92
29/01/02	1	0,9	25	3	163,00	2,00
29/01/02	1	0,9	25	3	193,50	2,26
29/01/02	1	0,9	25	3		2,08
29/01/02	1	0,9	25	3		1,74
29/01/02	1	0,9	25	3		1,92
29/01/02	1	0,9	50	3	181,00	2,24
29/01/02	1	0,9	50	3	188,00	2,42
29/01/02	1	0,9	50	3	172,00	2,20
29/01/02	1	0,9	50	3		1,92
29/01/02	1	0,9	50	3		2,16
29/01/02	1	0,9	50	3		1,26
29/01/02	1	0,9	100	3	150,50	1,90
29/01/02	1	0,9	100	3	187,00	2,18
29/01/02	1	0,9	100	3	190,50	2,44
29/01/02	1	0,9	100	3		1,92
29/01/02	1	0,9	100	3		1,50
29/01/02	1	0,9	100	3		2,02
29/01/02	1	0	0	7	188,50	2,18
29/01/02	1	0	0	7	183,50	1,80
29/01/02	1	0	0	7	185,00	2,40
29/01/02	1	0	0	7		1,94
29/01/02	1	0	0	7		2,02
29/01/02	1	0	0	7		2,00
29/01/02	1	0,9	25	7	214,00	2,08

29/01/02	1	0,9	25	7	210,50	2,76
29/01/02	1	0,9	25	7	213,00	1,90
29/01/02	1	0,9	25	7		2,34
29/01/02	1	0,9	25	7		1,76
29/01/02	1	0,9	25	7		2,40
29/01/02	1	0,9	50	7	196,00	2,62
29/01/02	1	0,9	50	7	197,50	1,92
29/01/02	1	0,9	50	7	158,00	2,44
29/01/02	1	0,9	50	7		2,76
29/01/02	1	0,9	50	7		2,22
29/01/02	1	0,9	50	7		2,52
29/01/02	1	0,9	100	7	208,50	2,46
29/01/02	1	0,9	100	7	203,00	2,00
29/01/02	1	0,9	100	7	208,00	2,30
29/01/02	1	0,9	100	7		2,54
29/01/02	1	0,9	100	7		2,44
29/01/02	1	0,9	100	7		2,78
29/01/02	1	0	0	28	236,50	2,72
29/01/02	1	0	0	28	212,50	1,58
29/01/02	1	0	0	28	230,00	1,90
29/01/02	1	0	0	28		2,32
29/01/02	1	0	0	28		1,96
29/01/02	1	0	0	28		2,46
29/01/02	1	0,9	25	28	243,00	2,66
29/01/02	1	0,9	25	28	239,00	2,28
29/01/02	1	0,9	25	28	184,00	2,84
29/01/02	1	0,9	25	28		3,50
29/01/02	1	0,9	25	28		2,50
29/01/02	1	0,9	25	28		2,56
29/01/02	1	0,9	50	28	255,00	2,20
29/01/02	1	0,9	50	28	226,00	2,48
29/01/02	1	0,9	50	28	225,00	1,90
29/01/02	1	0,9	50	28		3,14
29/01/02	1	0,9	50	28		2,76
29/01/02	1	0,9	50	28		2,64
29/01/02	1	0,9	100	28	242,00	2,90
29/01/02	1	0,9	100	28	210,50	3,10
29/01/02	1	0,9	100	28	230,00	2,50
29/01/02	1	0,9	100	28		2,12
29/01/02	1	0,9	100	28		3,12
29/01/02	1	0,9	100	28		2,90
26/02/02	1	0	12	1	107,50	2,02
26/02/02	1	0	12	1	115,50	1,60
26/02/02	1	0	12	1	116,50	1,28
26/02/02	1	0	12	1	107,50	1,46
26/02/02	1	0	12	1		1,82
26/02/02	1	0	12	1		1,42
26/02/02	1	0	12	3	134,50	2,02
26/02/02	1	0	12	3	165,50	1,88
26/02/02	1	0	12	3	121,00	2,22
26/02/02	1	0	12	3	141,00	2,18
26/02/02	1	0	12	3		1,94
26/02/02	1	0	12	3		2,08

26/02/02	1	0	12	7	182,00	2,24
26/02/02	1	0	12	7	185,00	1,94
26/02/02	1	0	12	7	181,50	2,48
26/02/02	1	0	12	7	178,00	2,86
26/02/02	1	0	12	7		2,40
26/02/02	1	0	12	7		2,08
26/02/02	1	0	12	14	209,50	2,00
26/02/02	1	0	12	14	197,00	2,85
26/02/02	1	0	12	14	189,50	2,35
26/02/02	1	0	12	14	196,50	2,60
26/02/02	1	0	12	14		2,30
26/02/02	1	0	12	14		2,80
26/02/02	1	0	12	56	179,50	2,52
26/02/02	1	0	12	56	213,50	2,24
26/02/02	1	0	12	56	223,50	2,12
26/02/02	1	0	12	56	205,50	2,98
26/02/02	1	0	12	56		2,00
26/02/02	1	0	12	56		2,26
26/02/02	1	1,8	12	1	135,50	1,94
26/02/02	1	1,8	12	1	138,00	2,12
26/02/02	1	1,8	12	1	119,50	1,88
26/02/02	1	1,8	12	1	134,50	2,12
26/02/02	1	1,8	12	1		1,82
26/02/02	1	1,8	12	1		1,02
26/02/02	1	1,8	12	3	192,00	2,74
26/02/02	1	1,8	12	3	169,50	2,44
26/02/02	1	1,8	12	3	203,00	2,36
26/02/02	1	1,8	12	3	207,50	1,92
26/02/02	1	1,8	12	3		2,36
26/02/02	1	1,8	12	3		2,26
26/02/02	1	1,8	12	7	196,00	2,36
26/02/02	1	1,8	12	7	229,50	3,10
26/02/02	1	1,8	12	7	239,50	3,42
26/02/02	1	1,8	12	7	240,00	2,64
26/02/02	1	1,8	12	7		2,10
26/02/02	1	1,8	12	7		2,72
26/02/02	1	1,8	12	14	240,50	2,55
26/02/02	1	1,8	12	14	260,00	2,60
26/02/02	1	1,8	12	14	246,50	2,95
26/02/02	1	1,8	12	14	248,50	2,95
26/02/02	1	1,8	12	14		2,50
26/02/02	1	1,8	12	14		3,15
26/02/02	1	1,8	12	56	307,00	2,88
26/02/02	1	1,8	12	56	305,00	2,58
26/02/02	1	1,8	12	56	280,00	2,96
26/02/02	1	1,8	12	56	297,30	3,18
26/02/02	1	1,8	12	56		2,58
26/02/02	1	1,8	12	56		2,68
18/06/02	1	0	12	1	33,50	0,80
18/06/02	1	0	12	1	33,50	0,88
18/06/02	1	0	12	1		0,56
18/06/02	1	0	12	3	99,50	1,80
18/06/02	1	0	12	3	101,00	1,84

18/06/02	1	0	12	3	100,50	1,76
18/06/02	1	0	12	7	145,00	2,84
18/06/02	1	0	12	7	137,50	2,16
18/06/02	1	0	12	7	130,00	2,36
18/06/02	1	0	12	7		2,68
18/06/02	1	0	12	14	162,00	2,36
18/06/02	1	0	12	14	165,00	2,22
18/06/02	1	0	12	14	146,50	2,64
18/06/02	1	2,7	12	1	29,00	0,86
18/06/02	1	2,7	12	1	27,50	1,04
18/06/02	1	2,7	12	1		0,64
18/06/02	1	2,7	12	3	97,00	2,60
18/06/02	1	2,7	12	3	101,00	2,02
18/06/02	1	2,7	12	3	107,50	2,20
18/06/02	1	2,7	12	7	165,50	2,50
18/06/02	1	2,7	12	7	168,00	3,58
18/06/02	1	2,7	12	7	168,50	2,26
18/06/02	1	2,7	12	7		2,92
18/06/02	1	2,7	12	14	155,50	2,92
18/06/02	1	2,7	12	14	169,00	3,66
18/06/02	1	2,7	12	14	167,50	2,24
18/06/02	1	3,6	12	1	51,50	0,94
18/06/02	1	3,6	12	1	52,00	1,26
18/06/02	1	3,6	12	1		0,58
18/06/02	1	3,6	12	3	132,00	2,54
18/06/02	1	3,6	12	3	138,50	1,98
18/06/02	1	3,6	12	3	156,00	2,46
18/06/02	1	3,6	12	7	189,00	2,66
18/06/02	1	3,6	12	7	185,50	2,46
18/06/02	1	3,6	12	7	186,50	2,90
18/06/02	1	3,6	12	7		2,88
18/06/02	1	3,6	12	14	207,00	2,56
18/06/02	1	3,6	12	14	215,50	2,84
18/06/02	1	3,6	12	14	211,50	2,54
01/01/03	2	0	12	3	119,20	11,42
01/01/03	2	0	12	3	121,80	10,82
01/01/03	2	0	12	3	124,00	9,86
01/01/03	2	0	12	7	160,00	11,83
01/01/03	2	0	12	7	155,40	11,71
01/01/03	2	0	12	7	128,40	13,99
01/01/03	2	0	12	21	176,50	16,52
01/01/03	2	0	12	21	187,50	16,54
01/01/03	2	0	12	21	174,00	16,66
01/01/03	2	0	12	56	206,60	16,73
01/01/03	2	0	12	56	198,20	17,14
01/01/03	2	0	12	56	230,60	17,28
01/01/03	2	0,3	12	3	124,80	13,80
01/01/03	2	0,3	12	3	160,60	10,61
01/01/03	2	0,3	12	3	146,80	10,83
01/01/03	2	0,3	12	7	150,80	11,94
01/01/03	2	0,3	12	7	151,40	13,37
01/01/03	2	0,3	12	7	81,00	12,17
01/01/03	2	0,3	12	21	192,00	11,87

01/01/03	2	0,3	12	21	196,60	17,18
01/01/03	2	0,3	12	21	207,00	
01/01/03	2	0,3	12	56	236,80	
01/01/03	2	0,3	12	56	232,00	
01/01/03	2	0,3	12	56	249,40	
01/01/03	2	0,6	12	3	148,60	13,18
01/01/03	2	0,6	12	3	140,20	14,36
01/01/03	2	0,6	12	3	159,40	11,76
01/01/03	2	0,6	12	7	190,00	15,70
01/01/03	2	0,6	12	7	179,00	14,21
01/01/03	2	0,6	12	7	156,20	12,30
01/01/03	2	0,6	12	21	228,50	17,38
01/01/03	2	0,6	12	21	183,50	14,60
01/01/03	2	0,6	12	21	214,60	14,73
01/01/03	2	0,6	12	56	185,80	
01/01/03	2	0,6	12	56	267,20	
01/01/03	2	0,6	12	56	261,00	16,92
08/01/03	2	0,9	12	3	147,00	14,23
08/01/03	2	0,9	12	3	147,00	16,22
08/01/03	2	0,9	12	3	152,80	12,28
08/01/03	2	0,9	12	7	108,00	12,20
08/01/03	2	0,9	12	7	119,00	12,78
08/01/03	2	0,9	12	7	183,40	14,68
08/01/03	2	0,9	12	21	223,58	15,94
08/01/03	2	0,9	12	21	234,00	16,31
08/01/03	2	0,9	12	21	214,20	17,86
08/01/03	2	0,9	12	56	275,40	
08/01/03	2	0,9	12	56	212,40	19,34
08/01/03	2	0,9	12	56	261,60	17,08
08/01/03	2	1,8	12	3	109,20	12,38
08/01/03	2	1,8	12	3	142,80	14,33
08/01/03	2	1,8	12	3	153,20	13,34
08/01/03	2	1,8	12	7	177,80	11,27
08/01/03	2	1,8	12	7	203,50	10,85
08/01/03	2	1,8	12	7	204,40	14,86
08/01/03	2	1,8	12	21	263,00	14,79
08/01/03	2	1,8	12	21	207,00	12,06
08/01/03	2	1,8	12	21	247,50	16,16
08/01/03	2	1,8	12	56	287,20	15,81
08/01/03	2	1,8	12	56	278,60	16,12
08/01/03	2	1,8	12	56	283,40	15,06
15/01/03	2	2,7	12	3	165,20	11,45
15/01/03	2	2,7	12	3	176,40	13,26
15/01/03	2	2,7	12	3	146,00	11,72
15/01/03	2	2,7	12	7	200,80	13,29
15/01/03	2	2,7	12	7	220,00	14,90
15/01/03	2	2,7	12	7	189,20	15,02
15/01/03	2	2,7	12	21	270,00	16,73
15/01/03	2	2,7	12	21	188,50	15,22
15/01/03	2	2,7	12	21	256,50	17,45
15/01/03	2	2,7	12	56	171,00	15,30
15/01/03	2	2,7	12	56	261,40	15,05
15/01/03	2	2,7	12	56	271,20	15,48

15/01/03	2	3,6	12	3	171,00	10,73
15/01/03	2	3,6	12	3	174,60	13,82
15/01/03	2	3,6	12	3	164,60	13,26
15/01/03	2	3,6	12	7	203,20	13,36
15/01/03	2	3,6	12	7	124,80	13,83
15/01/03	2	3,6	12	7	210,00	14,64
15/01/03	2	3,6	12	21	251,50	18,05
15/01/03	2	3,6	12	21	283,00	17,20
15/01/03	2	3,6	12	21		14,86
15/01/03	2	3,6	12	56	299,40	17,11
15/01/03	2	3,6	12	56	289,80	17,10
15/01/03	2	3,6	12	56	225,60	16,31

Etapa 1 = etapa exploratória

Etapa 2 = etapa de avaliação

Resultados do Ensaio de Slump

Fatores Controláveis			Variáveis de Resposta
Etapa	Teor	Compr. (mm)	Abatimento (cm)
1	0	12	17
1	0	12	15
1	0	12	16
1	0	12	14,2
1	0,3	12	8
1	0,3	12	8
1	0	12	16,5
1	0,6	12	7,5
1	0	12	13,5
1	0,6	12	5,5
1	0	12	19
1	0,9	12	11
1	0	12	10
1	0,9	12	3
1	0	12	17,5
1	0	12	18
1	0	12	17
1	0	12	18,5
1	1,8	12	3,5
1	0	12	20
1	1,8	12	3
1	0	12	16
1	1,8	12	2
1	0	12	15
1	0	12	15,5
1	0	12	16
1	2,7	12	1

1	0	12	15,5
1	2,7	12	2
1	0	12	15
1	3,6	12	1
1	0	12	11
1	3,6	12	1

Resultados do Ensaio de Massa Específica do Concreto

Fatores Controláveis					Variáveis de Resposta			
Etapa	Peso molde	Peso CP+M	Peso CP	Volume (m3)	Teor	Peso (kg/m3)	Esp. (kg/m3)	Média (kg/m3)
1	2205,70	5488	3,28230	0,001347	0	2437,18		
1	2216,40	5462	3,24560	0,001347	0	2409,93		
1	2214,90	5498	3,28310	0,001347	0	2437,77		
1	2175,00	5467	3,29200	0,001347	0	2444,38		
1	2135,20	5414	3,27880	0,001347	0	2434,58		
1	2163,80	5445	3,28120	0,001347	0	2436,36		2433,37
1	2184,00	5382	3,19800	0,001347	2,7	2374,59		
1	2208,80	5423	3,21420	0,001347	2,7	2386,61		
1	2178,80	5361	3,18220	0,001347	2,7	2362,85		
1	2199,10	5411	3,21190	0,001347	2,7	2384,91		
1	2143,30	5348	3,20470	0,001347	2,7	2379,56		
1	2198,90	5423	3,22410	0,001347	2,7	2393,97		2380,41
1	2198,80	5386	3,18720	0,001347	3,6	2366,57		
1	2190,70	5393	3,20230	0,001347	3,6	2377,78		
1	2154,60	5341	3,18640	0,001347	3,6	2365,97		
1	2217,70	5426	3,20830	0,001347	3,6	2382,23		
1	2195,00	5391	3,19600	0,001347	3,6	2373,10		
1	2192,60	5385	3,19240	0,001347	3,6	2370,43		2372,68

ANEXO 2
PLANILHAS DE RESULTADOS DOS ENSAIOS DE IMPACTO

Resultados do Ensaio de Impacto

Fatores Controláveis					Variáveis de Resposta	
Tipo Fibra	Cód.	Teor (kg/m ³)	Compr. (mm)	Altura (cm)	Relógio 1	Relógio 2
Aço	1	1,8	60	0	1327	1768
Aço	1	1,8	60	20	1324	1761
Aço	1	1,8	60	30	1325	1760
Aço	1	1,8	60	40	1338	1758
Aço	1	1,8	60	50	1347	1757
Aço	1	1,8	60	60	1355	1757
Aço	1	1,8	60	70	1361	1755
Aço	1	1,8	60	80	1365	1757
Aço	1	1,8	60	90	1373	1758
Aço	1	1,8	60	100	1382	1760
Aço	1	1,8	60	110	1394	1758
Aço	1	1,8	60	120	1380	1752
Aço	1	1,8	60	130	1351	1726
Aço	1	1,8	60	140	1307	1694
Aço	1	1,8	60	150	1246	1668
Aço	1	1,8	60	0	1123	1683
Aço	1	1,8	60	20	1117	1683
Aço	1	1,8	60	30	1116	1683
Aço	1	1,8	60	40	1118	1683
Aço	1	1,8	60	50	1103	1682
Aço	1	1,8	60	60	1131	1682
Aço	1	1,8	60	70	1161	1682
Aço	1	1,8	60	80	1168	1681
Aço	1	1,8	60	90	1178	1681
Aço	1	1,8	60	100	1181	1677
Aço	1	1,8	60	110	1157	1652
Aço	1	1,8	60	120	1149	1640
Aço	1	1,8	60	130	1147	1635
Aço	1	1,8	60	0	1323	1707
Aço	1	1,8	60	20	1318	1706
Aço	1	1,8	60	30	1314	1706
Aço	1	1,8	60	40	1318	1703
Aço	1	1,8	60	50	1319	1703
Aço	1	1,8	60	60	1319	1704
Aço	1	1,8	60	70	1318	1705
Aço	1	1,8	60	80	1315	1705
Aço	1	1,8	60	90	1315	1705
Aço	1	1,8	60	100	1253	1705
Aço	1	1,8	60	110	1260	1705
Aço	1	1,8	60	120	1256	1705
Aço	1	1,8	60	130	1216	1702
Aço	1	1,8	60	140	1176	1694
Aço	1	1,8	60	150	1138	1682

Aço	1	9,7	60	0	2522	1008
Aço	1	9,7	60	20	2522	1007
Aço	1	9,7	60	30	2522	1008
Aço	1	9,7	60	40	2522	1007
Aço	1	9,7	60	50	2522	1008
Aço	1	9,7	60	60	2524	1011
Aço	1	9,7	60	70	2525	1013
Aço	1	9,7	60	80	2524	1014
Aço	1	9,7	60	90	2524	1015
Aço	1	9,7	60	100	2525	1019
Aço	1	9,7	60	110	2526	1018
Aço	1	9,7	60	120	2525	1017
Aço	1	9,7	60	130	2522	1019
Aço	1	9,7	60	140	2510	1016
Aço	1	9,7	60	150	2494	1012
Aço	1	9,7	60	160	2485	1015
Aço	1	9,7	60	170	2692	1018
Aço	1	9,7	60	180	2878	1024
Aço	1	9,7	60	190	2772	1028
Aço	1	9,7	60	200	2763	1029
Aço	1	9,7	60	210	2762	1028
Aço	1	9,7	60	0	1751	682
Aço	1	9,7	60	20	1751	684
Aço	1	9,7	60	30	1749	688
Aço	1	9,7	60	40	1746	688
Aço	1	9,7	60	50	1745	689
Aço	1	9,7	60	60	1743	687
Aço	1	9,7	60	70	1747	688
Aço	1	9,7	60	80	1747	686
Aço	1	9,7	60	90	1746	688
Aço	1	9,7	60	100	1743	686
Aço	1	9,7	60	110	1733	680
Aço	1	9,7	60	120	1698	663
Aço	1	9,7	60	130	1656	651
Aço	1	9,7	60	140	1629	635
Aço	1	9,7	60	150	1607	618
Aço	1	9,7	60	160	1579	598
Aço	1	9,7	60	170	1555	595
Aço	1	9,7	60	0	1542	1802
Aço	1	9,7	60	20	1535	1800
Aço	1	9,7	60	30	1533	1798
Aço	1	9,7	60	40	1531	1800
Aço	1	9,7	60	50	1531	1805
Aço	1	9,7	60	60	1529	1807
Aço	1	9,7	60	70	1526	1810
Aço	1	9,7	60	80	1525	1811
Aço	1	9,7	60	90	1525	1812
Aço	1	9,7	60	100	1523	1811
Aço	1	9,7	60	110	1522	1809
Aço	1	9,7	60	120	1515	1808

Aço	1	9,7	60	130	1508	1800
Aço	1	9,7	60	140	1498	1799
Aço	1	9,7	60	150	1469	1782
Aço	1	9,7	60	160	1426	1769
Aço	1	9,7	60	170	1372	1742
Aço	1	9,7	60	180	1325	1729
Aço	1	30	60	0	1924	1748
Aço	1	30	60	20	1924	1749
Aço	1	30	60	30	1925	1750
Aço	1	30	60	40	1925	1748
Aço	1	30	60	50	1928	1750
Aço	1	30	60	60	1930	1750
Aço	1	30	60	70	1929	1750
Aço	1	30	60	80	1927	1748
Aço	1	30	60	90	1927	1747
Aço	1	30	60	100	1928	1747
Aço	1	30	60	110	1931	1748
Aço	1	30	60	120	1937	1748
Aço	1	30	60	130	1925	1746
Aço	1	30	60	140	1921	1745
Aço	1	30	60	150	1919	1743
Aço	1	30	60	160	1917	1740
Aço	1	30	60	170	1909	1736
Aço	1	30	60	180	1895	1730
Aço	1	30	60	190	1883	1727
Aço	1	30	60	200	1875	1721
Aço	1	30	60	210	1870	1715
Aço	1	30	60	220	1865	1708
Aço	1	30	60	220	1860	1700
Aço	1	30	60	220	1857	1695
Aço	1	30	60	220	1850	1693
Aço	1	30	60	220	1838	1690
Aço	1	30	60	220	1834	1694
Aço	1	30	60	220	1825	1690
Aço	1	30	60	220	1818	1690
Aço	1	30	60	0	1321	1657
Aço	1	30	60	20	1316	1656
Aço	1	30	60	30	1316	1657
Aço	1	30	60	40	1320	1655
Aço	1	30	60	50	1322	1659
Aço	1	30	60	60	1323	1659
Aço	1	30	60	70	1324	1658
Aço	1	30	60	80	1323	1656
Aço	1	30	60	90	1323	1654
Aço	1	30	60	100	1322	1653
Aço	1	30	60	110	1321	1651
Aço	1	30	60	120	1320	1651
Aço	1	30	60	130	1318	1649
Aço	1	30	60	140	1315	1644
Aço	1	30	60	150	1305	1640

Aço	1	30	60	160	1304	1632
Aço	1	30	60	170	1295	1626
Aço	1	30	60	180	1244	1626
Aço	1	30	60	190	1238	1612
Aço	1	30	60	200	1163	1601
Aço	1	30	60	210	1180	1592
Aço	1	30	60	220	1182	1581
Aço	1	30	60	220	1178	1572
Aço	1	30	60	220	1172	1565
Aço	1	30	60	220	1161	1558
Aço	1	30	60	220	1160	1552
Aço	1	30	60	220	1156	1548
Aço	1	30	60	220	1153	1545
Aço	1	30	60	0	1710	1862
Aço	1	30	60	20	1711	1864
Aço	1	30	60	30	1711	1939
Aço	1	30	60	40	1720	1941
Aço	1	30	60	50	1734	1945
Aço	1	30	60	60	1750	1949
Aço	1	30	60	70	1780	1956
Aço	1	30	60	80	1802	1955
Aço	1	30	60	90	1815	1956
Aço	1	30	60	100	1832	1958
Aço	1	30	60	110	1832	1981
Aço	1	30	60	120	1839	1981
Aço	1	30	60	130	1842	1995
Aço	1	30	60	140	1837	1992
Aço	1	30	60	150	1829	1985
Aço	1	30	60	160	1808	1972
Aço	1	30	60	170	1781	1953
Aço	1	30	60	180	1770	1950
Aço	1	30	60	190	1761	1948
Aço	1	30	60	200	1752	1956
Aço	1	30	60	210	1745	1958
Aço	1	30	60	220	1759	1965
Aço	1	30	60	220	1763	1954
Aço	1	30	60	220	1757	1985
Aço	1	30	60	220	1752	1990
Aço	1	30	60	220	1742	1991
Aço	1	30	60	220	1733	1997
Polipropileno	2	0,6	6	0	1768	1935
Polipropileno	2	0,6	6	20	1798	1948
Polipropileno	2	0,6	6	30	1814	1955
Polipropileno	2	0,6	6	40	1838	1959
Polipropileno	2	0,6	6	50	1856	1960
Polipropileno	2	0,6	6	60	1867	1961
Polipropileno	2	0,6	6	70	1874	1954
Polipropileno	2	0,6	6	80	1880	1950
Polipropileno	2	0,6	6	90	1884	1965
Polipropileno	2	0,6	6	100	1885	1965

Polipropileno	2	0,6	6	110	1885	1968
Polipropileno	2	0,6	6	120	1886	1967
Polipropileno	2	0,6	6	130	1887	1968
Polipropileno	2	0,6	6	140	1887	1964
Polipropileno	2	0,6	6	150	1864	1953
Polipropileno	2	0,6	6	160	1839	1927
Polipropileno	2	0,6	6	170	1813	1872
Polipropileno	2	0,6	6	0	2208	2144
Polipropileno	2	0,6	6	20	2210	2135
Polipropileno	2	0,6	6	30	2213	2130
Polipropileno	2	0,6	6	40	2216	2126
Polipropileno	2	0,6	6	50	2221	2120
Polipropileno	2	0,6	6	60	2221	2115
Polipropileno	2	0,6	6	70	2224	2109
Polipropileno	2	0,6	6	80	2224	2109
Polipropileno	2	0,6	6	90	2223	2106
Polipropileno	2	0,6	6	100	2223	2105
Polipropileno	2	0,6	6	110	2223	2104
Polipropileno	2	0,6	6	120	2221	2099
Polipropileno	2	0,6	6	130	2211	2081
Polipropileno	2	0,6	6	140	2205	2067
Polipropileno	2	0,6	6	150	2192	2051
Polipropileno	2	0,6	6	0	1917	1957
Polipropileno	2	0,6	6	20	1923	1954
Polipropileno	2	0,6	6	30	1923	1953
Polipropileno	2	0,6	6	40	1921	1952
Polipropileno	2	0,6	6	50	1924	1954
Polipropileno	2	0,6	6	60	1924	1952
Polipropileno	2	0,6	6	70	1928	1951
Polipropileno	2	0,6	6	80	1929	1951
Polipropileno	2	0,6	6	90	1934	1950
Polipropileno	2	0,6	6	100	1935	1945
Polipropileno	2	0,6	6	110	1939	1942
Polipropileno	2	0,6	6	120	1939	1935
Polipropileno	2	0,6	6	130	1936	1924
Polipropileno	2	0,6	6	140	1927	1906
Polipropileno	2	0,6	6	150	1912	1893
Polipropileno	2	0,6	6	160	1876	1860
Polipropileno	2	1,14	6	0	1460	1838
Polipropileno	2	1,14	6	20	1460	1836
Polipropileno	2	1,14	6	30	1460	1835
Polipropileno	2	1,14	6	40	1462	1832
Polipropileno	2	1,14	6	50	1465	1833
Polipropileno	2	1,14	6	60	1465	1835
Polipropileno	2	1,14	6	70	1472	1834
Polipropileno	2	1,14	6	80	1474	1837
Polipropileno	2	1,14	6	90	1479	1838
Polipropileno	2	1,14	6	100	1478	1836
Polipropileno	2	1,14	6	110	1481	1838
Polipropileno	2	1,14	6	120	1482	1839

Polipropileno	2	1,14	6	130	1480	1841
Polipropileno	2	1,14	6	140	1470	1833
Polipropileno	2	1,14	6	150	1446	1834
Polipropileno	2	1,14	6	160	1429	1829
Polipropileno	2	1,14	6	170	1429	1824
Polipropileno	2	1,14	6	180	1390	1768
Polipropileno	2	1,14	6	20	1768	1935
Polipropileno	2	1,14	6	30	1769	1948
Polipropileno	2	1,14	6	40	1769	1955
Polipropileno	2	1,14	6	50	1771	1959
Polipropileno	2	1,14	6	60	1775	1960
Polipropileno	2	1,14	6	70	1777	1961
Polipropileno	2	1,14	6	80	1781	1954
Polipropileno	2	1,14	6	90	1780	1950
Polipropileno	2	1,14	6	100	1782	1965
Polipropileno	2	1,14	6	110	1782	1965
Polipropileno	2	1,14	6	120	1781	1968
Polipropileno	2	1,14	6	130	1777	1967
Polipropileno	2	1,14	6	140	1758	1968
Polipropileno	2	1,14	6	150	1696	1964
Polipropileno	2	1,14	6	160	1671	1953
Polipropileno	2	1,14	6	0	1345	1841
Polipropileno	2	1,14	6	20	1351	1838
Polipropileno	2	1,14	6	30	1366	1838
Polipropileno	2	1,14	6	40	1389	1836
Polipropileno	2	1,14	6	50	1405	1835
Polipropileno	2	1,14	6	60	1412	1835
Polipropileno	2	1,14	6	70	1415	1832
Polipropileno	2	1,14	6	80	1415	1833
Polipropileno	2	1,14	6	90	1408	1836
Polipropileno	2	1,14	6	100	1414	1838
Polipropileno	2	1,14	6	110	1417	1839
Polipropileno	2	1,14	6	120	1420	1840
Polipropileno	2	1,14	6	130	1424	1841
Polipropileno	2	1,14	6	140	1422	1836
Polipropileno	2	1,14	6	150	1415	1835
Polipropileno	2	1,14	6	160	1398	1816
Polipropileno	2	1,14	6	170	1364	1770
Polipropileno	2	1,14	6	180	1398	1738
Polipropileno	2	1,8	6	0	2020	2011
Polipropileno	2	1,8	6	20	2017	2011
Polipropileno	2	1,8	6	30	2022	2015
Polipropileno	2	1,8	6	40	2024	2017
Polipropileno	2	1,8	6	50	2022	2018
Polipropileno	2	1,8	6	60	2028	2020
Polipropileno	2	1,8	6	70	2030	2022
Polipropileno	2	1,8	6	80	2028	2024
Polipropileno	2	1,8	6	90	2030	2025
Polipropileno	2	1,8	6	100	2028	2027
Polipropileno	2	1,8	6	110	2025	2024

Polipropileno	2	1,8	6	120	2024	2022
Polipropileno	2	1,8	6	130	2022	2016
Polipropileno	2	1,8	6	140	2012	1996
Polipropileno	2	1,8	6	150	1996	1976
Polipropileno	2	1,8	6	160	1957	1944
Polipropileno	2	1,8	6	0	1599	2006
Polipropileno	2	1,8	6	20	1599	1995
Polipropileno	2	1,8	6	30	1600	1997
Polipropileno	2	1,8	6	40	1604	1992
Polipropileno	2	1,8	6	50	1615	1992
Polipropileno	2	1,8	6	60	1618	1989
Polipropileno	2	1,8	6	70	1628	1988
Polipropileno	2	1,8	6	80	1634	1987
Polipropileno	2	1,8	6	90	1640	1985
Polipropileno	2	1,8	6	100	1642	1985
Polipropileno	2	1,8	6	110	1648	1983
Polipropileno	2	1,8	6	120	1648	1978
Polipropileno	2	1,8	6	130	1645	1971
Polipropileno	2	1,8	6	140	1640	1952
Polipropileno	2	1,8	6	150	1638	1936
Polipropileno	2	1,8	6	0	1577	1846
Polipropileno	2	1,8	6	20	1567	1843
Polipropileno	2	1,8	6	30	1565	1838
Polipropileno	2	1,8	6	40	1563	1838
Polipropileno	2	1,8	6	50	1563	1837
Polipropileno	2	1,8	6	60	1561	1838
Polipropileno	2	1,8	6	70	1563	1838
Polipropileno	2	1,8	6	80	1564	1838
Polipropileno	2	1,8	6	90	1560	1840
Polipropileno	2	1,8	6	100	1552	1839
Polipropileno	2	1,8	6	110	1534	1826
Polipropileno	2	1,8	6	120	1518	1813
Polipropileno	2	1,8	6	130	1517	1804
Polipropileno	2	1,8	6	140	1478	1782
Sisal	3	1,4	12	0	2384	705
Sisal	3	1,4	12	20	2380	706
Sisal	3	1,4	12	30	2380	709
Sisal	3	1,4	12	40	2379	709
Sisal	3	1,4	12	50	2379	710
Sisal	3	1,4	12	60	2379	712
Sisal	3	1,4	12	70	2379	714
Sisal	3	1,4	12	80	2383	714
Sisal	3	1,4	12	90	2382	716
Sisal	3	1,4	12	100	2379	713
Sisal	3	1,4	12	110	2371	700
Sisal	3	1,4	12	120	2349	677
Sisal	3	1,4	12	130	2332	652
Sisal	3	1,4	12	0	2289	649
Sisal	3	1,4	12	20	2291	648
Sisal	3	1,4	12	30	2292	648

Sisal	3	1,4	12	40	2294	647
Sisal	3	1,4	12	50	2297	646
Sisal	3	1,4	12	60	2298	646
Sisal	3	1,4	12	70	2298	645
Sisal	3	1,4	12	80	2304	645
Sisal	3	1,4	12	90	2306	643
Sisal	3	1,4	12	100	2310	644
Sisal	3	1,4	12	110	2311	641
Sisal	3	1,4	12	120	2306	636
Sisal	3	1,4	12	130	2290	616
Sisal	3	1,4	12	140	2279	609
Sisal	3	1,4	12	150	2214	589
Sisal	3	1,4	12	160	2194	587
Sisal	3	1,4	12	0	1627	1197
Sisal	3	1,4	12	20	1626	1189
Sisal	3	1,4	12	30	1627	1189
Sisal	3	1,4	12	40	1628	1163
Sisal	3	1,4	12	50	1630	1173
Sisal	3	1,4	12	60	1631	1182
Sisal	3	1,4	12	70	1631	1182
Sisal	3	1,4	12	80	1630	1182
Sisal	3	1,4	12	90	1629	1181
Sisal	3	1,4	12	100	1628	1181
Sisal	3	1,4	12	110	1618	1170
Sisal	3	1,4	12	120	1568	1135
Sisal	3	1,4	12	130	1517	1110
Sisal	3	1,4	12	140	1492	1100
Sisal	3	1,8	12	0	1071	1668
Sisal	3	1,8	12	20	1077	1670
Sisal	3	1,8	12	30	1083	1671
Sisal	3	1,8	12	40	1093	1671
Sisal	3	1,8	12	50	1105	1671
Sisal	3	1,8	12	60	1124	1671
Sisal	3	1,8	12	70	1140	1670
Sisal	3	1,8	12	80	1155	1671
Sisal	3	1,8	12	90	1164	1671
Sisal	3	1,8	12	100	1163	1667
Sisal	3	1,8	12	110	1150	1659
Sisal	3	1,8	12	120	1138	1640
Sisal	3	1,8	12	130	1102	1562
Sisal	3	1,8	12	0	1189	1689
Sisal	3	1,8	12	20	1201	1685
Sisal	3	1,8	12	30	1219	1683
Sisal	3	1,8	12	40	1231	1684
Sisal	3	1,8	12	50	1240	1684
Sisal	3	1,8	12	60	1243	1684
Sisal	3	1,8	12	70	1245	1685
Sisal	3	1,8	12	80	1245	1685
Sisal	3	1,8	12	90	1248	1685
Sisal	3	1,8	12	100	1243	1684

Sisal	3	1,8	12	110	1234	1680
Sisal	3	1,8	12	120	1197	1664
Sisal	3	1,8	12	130	1107	1605
Sisal	3	1,8	12	140	1019	1573
Sisal	3	1,8	12	0	1163	1568
Sisal	3	1,8	12	20	1169	1565
Sisal	3	1,8	12	30	1172	1564
Sisal	3	1,8	12	40	1182	1565
Sisal	3	1,8	12	50	1190	1564
Sisal	3	1,8	12	60	1199	1566
Sisal	3	1,8	12	70	1199	1565
Sisal	3	1,8	12	80	1199	1564
Sisal	3	1,8	12	90	1198	1561
Sisal	3	1,8	12	100	1190	1554
Sisal	3	1,8	12	110	1185	1528
Sisal	3	1,8	12	120	1149	1495
Sisal	3	1,8	12	130	1078	1472
Sisal	3	1,8	12	140	1045	1463
Sisal	3	3,6	12	20	1637	469
Sisal	3	3,6	12	30	1633	466
Sisal	3	3,6	12	40	1636	463
Sisal	3	3,6	12	50	1639	463
Sisal	3	3,6	12	60	1640	464
Sisal	3	3,6	12	70	1638	475
Sisal	3	3,6	12	80	1612	475
Sisal	3	3,6	12	90	1626	459
Sisal	3	3,6	12	100	1623	450
Sisal	3	3,6	12	110	1607	442
Sisal	3	3,6	12	120	1606	436
Sisal	3	3,6	12	130	1591	420
Sisal	3	3,6	12	140	1570	401
Sisal	3	3,6	12	150	1554	382
Sisal	3	3,6	12	0	2534	604
Sisal	3	3,6	12	20	2533	605
Sisal	3	3,6	12	30	2533	604
Sisal	3	3,6	12	40	2531	607
Sisal	3	3,6	12	50	2532	609
Sisal	3	3,6	12	60	2532	612
Sisal	3	3,6	12	70	2530	614
Sisal	3	3,6	12	80	2525	618
Sisal	3	3,6	12	90	2533	618
Sisal	3	3,6	12	100	2539	619
Sisal	3	3,6	12	110	2539	619
Sisal	3	3,6	12	120	2546	623
Sisal	3	3,6	12	130	2684	617
Sisal	3	3,6	12	140	2674	617
Sisal	3	3,6	12	150	2632	577
Sisal	3	3,6	12	160	2582	555
Sisal	3	3,6	12	170	2552	543
Sisal	3	3,6	12	0	1677	650

Sisal	3	3,6	12	20	1674	647
Sisal	3	3,6	12	30	1674	645
Sisal	3	3,6	12	40	1673	642
Sisal	3	3,6	12	50	1677	640
Sisal	3	3,6	12	60	1675	639
Sisal	3	3,6	12	70	1675	639
Sisal	3	3,6	12	80	1675	642
Sisal	3	3,6	12	90	1682	640
Sisal	3	3,6	12	100	1682	644
Sisal	3	3,6	12	110	1681	641
Sisal	3	3,6	12	120	1681	644
Sisal	3	3,6	12	130	1653	635
Sisal	3	3,6	12	140	1614	610
Sisal	3	3,6	12	150	1613	607
Sisal	3	3,6	12	160	1598	613
Sisal	3	3,6	12	170	1555	599
Vidro	4	1,31	40	0	344	800
Vidro	4	1,31	40	20	343	799
Vidro	4	1,31	40	30	343	800
Vidro	4	1,31	40	40	344	801
Vidro	4	1,31	40	50	344	802
Vidro	4	1,31	40	60	344	802
Vidro	4	1,31	40	70	345	802
Vidro	4	1,31	40	80	346	801
Vidro	4	1,31	40	90	343	797
Vidro	4	1,31	40	100	341	795
Vidro	4	1,31	40	110	335	782
Vidro	4	1,31	40	120	322	752
Vidro	4	1,31	40	130	299	732
Vidro	4	1,31	40	0	795	1641
Vidro	4	1,31	40	20	792	1640
Vidro	4	1,31	40	30	791	1640
Vidro	4	1,31	40	40	790	1640
Vidro	4	1,31	40	50	792	1641
Vidro	4	1,31	40	60	793	1641
Vidro	4	1,31	40	70	795	1641
Vidro	4	1,31	40	80	796	1642
Vidro	4	1,31	40	90	797	1643
Vidro	4	1,31	40	100	808	1644
Vidro	4	1,31	40	110	806	1638
Vidro	4	1,31	40	120	805	1609
Vidro	4	1,31	40	130	795	1552
Vidro	4	1,31	40	140	795	1554
Vidro	4	1,31	40	0	1819	1683
Vidro	4	1,31	40	20	1822	1684
Vidro	4	1,31	40	30	1823	1683
Vidro	4	1,31	40	40	1821	1683
Vidro	4	1,31	40	50	1819	1681
Vidro	4	1,31	40	60	1815	1681
Vidro	4	1,31	40	70	1815	1681

Vidro	4	1,31	40	80	1814	1682
Vidro	4	1,31	40	90	1812	1680
Vidro	4	1,31	40	100	1810	1677
Vidro	4	1,31	40	110	1807	1673
Vidro	4	1,31	40	120	1802	1652
Vidro	4	1,31	40	130	1792	1542
Vidro	4	1,8	40	0	1815	1776
Vidro	4	1,8	40	20	1813	1776
Vidro	4	1,8	40	30	1814	1777
Vidro	4	1,8	40	40	1816	1779
Vidro	4	1,8	40	50	1821	1783
Vidro	4	1,8	40	60	1821	1785
Vidro	4	1,8	40	70	1825	1785
Vidro	4	1,8	40	80	1831	1792
Vidro	4	1,8	40	90	1837	1794
Vidro	4	1,8	40	100	1843	1796
Vidro	4	1,8	40	110	1843	1797
Vidro	4	1,8	40	120	1848	1800
Vidro	4	1,8	40	130	1854	1807
Vidro	4	1,8	40	140	1856	1800
Vidro	4	1,8	40	150	1835	1780
Vidro	4	1,8	40	160	1807	1758
Vidro	4	1,8	40	0	1842	2057
Vidro	4	1,8	40	20	1838	2098
Vidro	4	1,8	40	30	1840	2123
Vidro	4	1,8	40	40	1845	2134
Vidro	4	1,8	40	50	1850	2141
Vidro	4	1,8	40	60	1856	2145
Vidro	4	1,8	40	70	1859	2149
Vidro	4	1,8	40	80	1863	2155
Vidro	4	1,8	40	90	1865	2155
Vidro	4	1,8	40	100	1868	2178
Vidro	4	1,8	40	110	1866	2164
Vidro	4	1,8	40	120	1851	2137
Vidro	4	1,8	40	130	1849	2095
Vidro	4	1,8	40	140	1832	2090
Vidro	4	1,8	40	0	1645	1785
Vidro	4	1,8	40	20	1644	1787
Vidro	4	1,8	40	30	1647	1790
Vidro	4	1,8	40	40	1654	1795
Vidro	4	1,8	40	50	1655	1799
Vidro	4	1,8	40	60	1545	1798
Vidro	4	1,8	40	70	1585	1799
Vidro	4	1,8	40	80	1603	1798
Vidro	4	1,8	40	90	1613	1798
Vidro	4	1,8	40	100	1616	1800
Vidro	4	1,8	40	110	1624	1799
Vidro	4	1,8	40	120	1631	1802
Vidro	4	1,8	40	130	1636	1805
Vidro	4	1,8	40	140	1634	1808

Vidro	4	1,8	40	150	1610	1808
Vidro	4	1,8	40	160	1596	1812
Vidro	4	1,8	40	170	1595	1783
Vidro	4	3,19	40	0	1260	1438
Vidro	4	3,19	40	20	1258	1437
Vidro	4	3,19	40	30	1257	1438
Vidro	4	3,19	40	40	1256	1439
Vidro	4	3,19	40	50	1256	1440
Vidro	4	3,19	40	60	1255	1442
Vidro	4	3,19	40	70	1256	1440
Vidro	4	3,19	40	80	1255	1438
Vidro	4	3,19	40	90	1257	1437
Vidro	4	3,19	40	100	1254	1434
Vidro	4	3,19	40	110	1253	1430
Vidro	4	3,19	40	120	1248	1425
Vidro	4	3,19	40	130	1231	1403
Vidro	4	3,19	40	140	1197	1329
Vidro	4	3,19	40	0	749	1425
Vidro	4	3,19	40	20	746	1429
Vidro	4	3,19	40	30	745	1430
Vidro	4	3,19	40	40	745	1432
Vidro	4	3,19	40	50	747	1432
Vidro	4	3,19	40	60	745	1432
Vidro	4	3,19	40	70	743	1434
Vidro	4	3,19	40	80	744	1435
Vidro	4	3,19	40	90	743	1437
Vidro	4	3,19	40	100	742	1435
Vidro	4	3,19	40	110	739	1432
Vidro	4	3,19	40	120	730	1419
Vidro	4	3,19	40	130	679	1361
Vidro	4	3,19	40	140	616	1297
Vidro	4	3,19	40	0	964	1022
Vidro	4	3,19	40	20	965	1021
Vidro	4	3,19	40	30	964	1021
Vidro	4	3,19	40	40	963	1020
Vidro	4	3,19	40	50	963	1020
Vidro	4	3,19	40	60	962	1020
Vidro	4	3,19	40	70	963	1029
Vidro	4	3,19	40	80	964	1017
Vidro	4	3,19	40	90	966	1017
Vidro	4	3,19	40	100	966	1017
Vidro	4	3,19	40	110	961	1022
Vidro	4	3,19	40	120	932	978
Vidro	4	3,19	40	130	867	884
Vidro	4	3,19	40	140	850	854
Aramida	5	0,9	12	0	516	3426
Aramida	5	0,9	12	10	515	3425
Aramida	5	0,9	12	20	517	3427
Aramida	5	0,9	12	30	520	3430
Aramida	5	0,9	12	40	521	3431

Aramida	5	0,9	12	50	523	3432
Aramida	5	0,9	12	60	524	3435
Aramida	5	0,9	12	70	523	3434
Aramida	5	0,9	12	80	524	3437
Aramida	5	0,9	12	90	525	3437
Aramida	5	0,9	12	100	526	3439
Aramida	5	0,9	12	110	529	3442
Aramida	5	0,9	12	120	526	3441
Aramida	5	0,9	12	130	526	3441
Aramida	5	0,9	12	140	522	3436
Aramida	5	0,9	12	150	478	3410
Aramida	5	0,9	12	160	394	3372
Aramida	5	0,9	12	170	369	3329
Aramida	5	0,9	12	0	1171	3571
Aramida	5	0,9	12	10	1173	3570
Aramida	5	0,9	12	20	1172	3570
Aramida	5	0,9	12	30	1171	3566
Aramida	5	0,9	12	40	1170	3568
Aramida	5	0,9	12	50	1170	3568
Aramida	5	0,9	12	60	1172	3569
Aramida	5	0,9	12	70	1173	3570
Aramida	5	0,9	12	80	1173	3571
Aramida	5	0,9	12	90	1178	3572
Aramida	5	0,9	12	100	1177	3571
Aramida	5	0,9	12	110	1175	3572
Aramida	5	0,9	12	120	1180	3574
Aramida	5	0,9	12	130	1178	3575
Aramida	5	0,9	12	140	1178	3576
Aramida	5	0,9	12	150	1177	3576
Aramida	5	0,9	12	160	1173	3574
Aramida	5	0,9	12	170	1165	3569
Aramida	5	0,9	12	180	1134	3569
Aramida	5	0,9	12	0	987	3647
Aramida	5	0,9	12	10	985	3644
Aramida	5	0,9	12	20	986	3645
Aramida	5	0,9	12	30	985	3645
Aramida	5	0,9	12	40	986	3646
Aramida	5	0,9	12	50	984	3647
Aramida	5	0,9	12	60	983	3647
Aramida	5	0,9	12	70	983	3646
Aramida	5	0,9	12	80	982	3647
Aramida	5	0,9	12	90	982	3646
Aramida	5	0,9	12	100	982	3646
Aramida	5	0,9	12	110	982	3645
Aramida	5	0,9	12	120	988	3645
Aramida	5	0,9	12	130	990	3647
Aramida	5	0,9	12	140	991	3650
Aramida	5	0,9	12	150	995	3655
Aramida	5	0,9	12	160	994	3658
Aramida	5	0,9	12	170	985	3655

Aramida	5	0,9	12	180	952	3639
Aramida	5	0,9	12	190	937	3638
Aramida	5	0,9	12	200	930	3634
Aramida	5	1,8	12	0	662	3308
Aramida	5	1,8	12	10	661	3307
Aramida	5	1,8	12	20	663	3308
Aramida	5	1,8	12	30	665	3309
Aramida	5	1,8	12	40	665	3309
Aramida	5	1,8	12	50	665	3305
Aramida	5	1,8	12	60	667	3306
Aramida	5	1,8	12	70	666	3305
Aramida	5	1,8	12	80	684	3306
Aramida	5	1,8	12	90	682	3302
Aramida	5	1,8	12	100	681	3304
Aramida	5	1,8	12	110	681	3302
Aramida	5	1,8	12	120	681	3299
Aramida	5	1,8	12	130	680	3298
Aramida	5	1,8	12	140	678	3296
Aramida	5	1,8	12	150	675	3292
Aramida	5	1,8	12	160	658	3275
Aramida	5	1,8	12	170	603	3209
Aramida	5	1,8	12	180	595	3199
Aramida	5	1,8	12	0	1204	2402
Aramida	5	1,8	12	10	1204	2401
Aramida	5	1,8	12	20	1204	2403
Aramida	5	1,8	12	30	1204	2402
Aramida	5	1,8	12	40	1204	2400
Aramida	5	1,8	12	50	1205	2401
Aramida	5	1,8	12	60	1206	2399
Aramida	5	1,8	12	70	1208	2401
Aramida	5	1,8	12	80	1209	2402
Aramida	5	1,8	12	90	1208	2403
Aramida	5	1,8	12	100	1207	2400
Aramida	5	1,8	12	110	1208	2403
Aramida	5	1,8	12	120	1210	2402
Aramida	5	1,8	12	130	1208	2402
Aramida	5	1,8	12	140	1211	2403
Aramida	5	1,8	12	150	1205	2400
Aramida	5	1,8	12	160	1213	2401
Aramida	5	1,8	12	170	1211	2403
Aramida	5	1,8	12	180	1203	2400
Aramida	5	1,8	12	190	1176	2371
Aramida	5	1,8	12	200	1145	2363
Aramida	5	1,8	12	0	934	2329
Aramida	5	1,8	12	10	933	2333
Aramida	5	1,8	12	20	934	2333
Aramida	5	1,8	12	30	934	2332
Aramida	5	1,8	12	40	933	2334
Aramida	5	1,8	12	50	932	2331
Aramida	5	1,8	12	60	932	2332

Aramida	5	1,8	12	70	932	2332
Aramida	5	1,8	12	80	933	2332
Aramida	5	1,8	12	90	935	2333
Aramida	5	1,8	12	100	933	2333
Aramida	5	1,8	12	110	936	2334
Aramida	5	1,8	12	120	939	2341
Aramida	5	1,8	12	130	939	2346
Aramida	5	1,8	12	140	941	2349
Aramida	5	1,8	12	150	938	2345
Aramida	5	1,8	12	160	936	2343
Aramida	5	1,8	12	170	934	2340
Aramida	5	1,8	12	180	905	2298
Aramida	5	1,8	12	190	852	2276
Aramida	5	3,6	12	0	469	1954
Aramida	5	3,6	12	10	467	1952
Aramida	5	3,6	12	20	467	1950
Aramida	5	3,6	12	30	467	1950
Aramida	5	3,6	12	40	467	1950
Aramida	5	3,6	12	50	466	1950
Aramida	5	3,6	12	60	466	1950
Aramida	5	3,6	12	70	465	1951
Aramida	5	3,6	12	80	465	1951
Aramida	5	3,6	12	90	465	1951
Aramida	5	3,6	12	100	465	1952
Aramida	5	3,6	12	110	472	1967
Aramida	5	3,6	12	120	477	1966
Aramida	5	3,6	12	130	472	1967
Aramida	5	3,6	12	140	471	1967
Aramida	5	3,6	12	150	471	1969
Aramida	5	3,6	12	160	470	1972
Aramida	5	3,6	12	170	472	1975
Aramida	5	3,6	12	180	470	1975
Aramida	5	3,6	12	190	470	1975
Aramida	5	3,6	12	200	470	1978
Aramida	5	3,6	12	210	465	1975
Aramida	5	3,6	12	220	452	1962
Aramida	5	3,6	12	220	445	1954
Aramida	5	3,6	12	220	377	1898
Aramida	5	3,6	12	220	358	1876
Aramida	5	3,6	12	0	1172	1344
Aramida	5	3,6	12	10	1169	1339
Aramida	5	3,6	12	20	1169	1338
Aramida	5	3,6	12	30	1171	1340
Aramida	5	3,6	12	40	1169	1338
Aramida	5	3,6	12	50	1168	1337
Aramida	5	3,6	12	60	1168	1340
Aramida	5	3,6	12	70	1168	1343
Aramida	5	3,6	12	80	1169	1344
Aramida	5	3,6	12	90	1167	1344
Aramida	5	3,6	12	100	1165	1343

Aramida	5	3,6	12	110	1166	1342
Aramida	5	3,6	12	120	1167	1340
Aramida	5	3,6	12	130	1168	1338
Aramida	5	3,6	12	140	1170	1338
Aramida	5	3,6	12	150	1173	1338
Aramida	5	3,6	12	160	1167	1335
Aramida	5	3,6	12	170	1166	1335
Aramida	5	3,6	12	180	1163	1344
Aramida	5	3,6	12	190	1124	1303
Aramida	5	3,6	12	200	1038	1242
Aramida	5	3,6	12	210	1019	1221
Aramida	5	3,6	12	0	571	2306
Aramida	5	3,6	12	10	569	2300
Aramida	5	3,6	12	20	569	2300
Aramida	5	3,6	12	30	568	2300
Aramida	5	3,6	12	40	568	2301
Aramida	5	3,6	12	50	568	2301
Aramida	5	3,6	12	60	568	2301
Aramida	5	3,6	12	70	568	2300
Aramida	5	3,6	12	80	568	2303
Aramida	5	3,6	12	90	569	2303
Aramida	5	3,6	12	100	569	2302
Aramida	5	3,6	12	110	569	2304
Aramida	5	3,6	12	120	570	2306
Aramida	5	3,6	12	130	570	2307
Aramida	5	3,6	12	140	571	2306
Aramida	5	3,6	12	150	571	2307
Aramida	5	3,6	12	160	571	2308
Aramida	5	3,6	12	170	570	2306
Aramida	5	3,6	12	180	571	2307
Aramida	5	3,6	12	190	570	2300
Aramida	5	3,6	12	200	571	2300
Aramida	5	3,6	12	210	565	2308
Aramida	5	3,6	12	220	532	2297
Aramida	5	3,6	12	220	521	2292
Aramida	5	3,6	12	220	500	2280
Sem fibra	6	0	0	0	466	2080
Sem fibra	6	0	0	10	465	2075
Sem fibra	6	0	0	20	465	2076
Sem fibra	6	0	0	30	466	2077
Sem fibra	6	0	0	40	469	2077
Sem fibra	6	0	0	50	467	2076
Sem fibra	6	0	0	60	468	2080
Sem fibra	6	0	0	70	469	2079
Sem fibra	6	0	0	80	469	2079
Sem fibra	6	0	0	90	469	2078
Sem fibra	6	0	0	100	468	2074
Sem fibra	6	0	0	110	466	2074
Sem fibra	6	0	0	120	465	2073
Sem fibra	6	0	0	130	463	2069

Sem fibra	6	0	0	140	456	2052
Sem fibra	6	0	0	150	427	2027
Sem fibra	6	0	0	160	381	2016
Sem fibra	6	0	0	0	1761	1381
Sem fibra	6	0	0	10	1761	1380
Sem fibra	6	0	0	20	1760	1380
Sem fibra	6	0	0	30	1758	1380
Sem fibra	6	0	0	40	1757	1380
Sem fibra	6	0	0	50	1755	1380
Sem fibra	6	0	0	60	1755	1380
Sem fibra	6	0	0	70	1755	1380
Sem fibra	6	0	0	80	1751	1380
Sem fibra	6	0	0	90	1750	1380
Sem fibra	6	0	0	100	1748	1379
Sem fibra	6	0	0	110	1742	1375
Sem fibra	6	0	0	120	1732	1365
Sem fibra	6	0	0	130	1702	1347
Sem fibra	6	0	0	140	1625	1286
Sem fibra	6	0	0	0	621	1294
Sem fibra	6	0	0	10	619	1292
Sem fibra	6	0	0	20	619	1290
Sem fibra	6	0	0	30	619	1288
Sem fibra	6	0	0	40	619	1286
Sem fibra	6	0	0	50	618	1286
Sem fibra	6	0	0	60	616	1285
Sem fibra	6	0	0	70	615	1285
Sem fibra	6	0	0	80	614	1285
Sem fibra	6	0	0	90	614	1285
Sem fibra	6	0	0	100	612	1283
Sem fibra	6	0	0	110	605	1277
Sem fibra	6	0	0	120	586	1257
Sem fibra	6	0	0	130	576	1245
Sem fibra	6	0	0	140	561	1240

**Resultados do Ensaio de Impacto
(Aparecimento da Primeira Fissura e Altura de Ruptura)**

Fatores Controláveis			Variáveis de Resposta		
Tipo Fibra	Cód.	Teor	Comprim. (mm)	Altura p/aparecimento da 1ª fissura	Altura de Ruptura
Aço	1	1,8	60	120	150
Aço	1	1,8	60	100	130
Aço	1	1,8	60	130	150
Aço	1	9,7	60	130	210
Aço	1	9,7	60	130	170
Aço	1	9,7	60	120	180

Aço	1	30	60	110	220
Aço	1	30	60	140	220
Aço	1	30	60	110	220
Polipropileno	2	0,6	6	150	170
Polipropileno	2	0,6	6	120	150
Polipropileno	2	0,6	6	120	160
Polipropileno	2	1,14	6	140	180
Polipropileno	2	1,14	6	140	160
Polipropileno	2	1,14	6	150	180
Polipropileno	2	1,8	6	130	160
Polipropileno	2	1,8	6	120	150
Polipropileno	2	1,8	6	100	140
Sisal	3	1,4	12	100	130
Sisal	3	1,4	12	120	160
Sisal	3	1,4	12	110	140
Sisal	3	1,8	12	100	130
Sisal	3	1,8	12	110	140
Sisal	3	1,8	12	100	140
Sisal	3	3,6	12	120	150
Sisal	3	3,6	12	130	170
Sisal	3	3,6	12	130	170
Vidro	4	1,31	40	150	170
Vidro	4	1,31	40	120	140
Vidro	4	1,31	40	130	150
Vidro	4	1,8	40	130	160
Vidro	4	1,8	40	150	170
Vidro	4	1,8	40	180	200
Vidro	4	3,19	40	150	170
Vidro	4	3,19	40	140	160
Vidro	4	3,19	40	170	190
Aramida	5	0,9	12	150	170
Aramida	5	0,9	12	160	180
Aramida	5	0,9	12	170	200
Aramida	5	1,8	12	160	180
Aramida	5	1,8	12	180	200
Aramida	5	1,8	12	180	190
Aramida	5	3,6	12	210	220
Aramida	5	3,6	12	190	210
Aramida	5	3,6	12	220	220
Sem fibra	6	0	0	140	160
Sem fibra	6	0	0	110	140
Sem fibra	6	0	0	110	140