

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
DEGRADAÇÃO DE FIBRAS DE PET EM MATERIAIS À BASE DE CIMENTO  
PORTLAND

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL

ANDREA MURILLO BETIOLI

Florianópolis, fevereiro de 2003

DEGRADAÇÃO DE FIBRAS DE PET EM MATERIAIS À BASE DE CIMENTO  
PORTLAND

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA

Especialidade ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

-----  
Prof.<sup>a</sup> Dra. Denise Antunes da Silva (Orientadora)

-----  
Prof. Dr. Jucilei Cordini (Coordenador do PPGEC)

COMISSÃO EXAMINADORA

-----  
Prof. Dr. Philippe Jean Paul Gleize (UFSC)

-----  
Prof. Dr. Orestes Estevam Alarcon (UFSC)

-----  
Prof.<sup>a</sup> Dra. Nádia Cristina Segre (UNICAMP)

*Dedico mais esta vitória  
aos meus queridos pais  
Regina e Ideval*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao CNPq pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa de mestrado.

Agradeço a meus pais Ideval e Regina, pela força, incentivo, confiança, amor, dedicação durante toda esta caminhada, pois, sem os quais jamais teria chegado tão longe e, aos meus irmãos por entenderem meu desespero neste último mês, e desistirem de passar aquelas longas e sonhadas férias em meu apê, na Ilha da Magia.

À minha orientadora Denise, agradeço por sua dedicação, orientação e apoio. Por incentivar minha criatividade e raciocínio, contribuindo para meu crescimento profissional.

Agradeço meu namorado, Allan, pela companhia, ajuda, paciência, compreensão, força e amor. Agradeço também aos seus ouvidos por agüentarem horas e horas de elocubrações sobre “degradação de fibras de PET”. Após tantas horas que virou um perito nesta área.... E pela ajuda, tantas vezes, no computador.

Agradeço, também, minha “*room-mate*” (Raquel) por sua amizade, companhia e comidinhas gostosas.

Ao professor Philippe Gleize pelo seu apoio, discussões, idéias e ajuda nas traduções em francês. Ao professor José Luis Duarte Ribeiro, da UFRGS, pela ajuda nas análises estatísticas. Ao professor e colega Fernando Avancini, por suas idéias e discussões. Aos professores Humberto Ramos Roman, Luis Gómez, professor Luis Roberto Prudêncio, Makarini e Wellington, agradeço. Agradeço, também, à Marli do Laboratório de polímeros e à Eliane da Central de Análises.

Agradeço também meus colegas do GDA, Tina, Georg’s, Pelisser, Fred, Cledson, Tuco, Jenner, Jog, Odilar, Débora, Tati, Leca e Eunice pela amizade e companheirismo e, ao Marcelo, por sua atenção em resolver os problemas com os micros e a Juliana Casali e Luca pelos esclarecimentos de diversas dúvidas.

Agradeço ao laboratório LMCC/UFSC e aos laboratoristas Luis e Renato.

Aos meus amigos Carol Angulski, Carol, Márcia, Maria, Flora, Juli, Max, Bel, Hamed, Karim, Emerson e, a todos aqueles que, de alguma forma contribuíram, direta ou indiretamente, para o desenvolvimento deste trabalho.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>vii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>xv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xvi</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Formulação do problema e objetivos</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Justificativa e relevância do tema</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3 Estrutura da Dissertação</b> .....	<b>3</b>
<b>2 CONCRETOS E ARGAMASSAS REFORÇADOS COM FIBRAS</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1 Histórico e aplicações</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2 Fibras sintéticas utilizadas para reforço</b> .....	<b>7</b>
<b>2.3 Mecanismo de reforço das fibras</b> .....	<b>7</b>
<b>2.4 Propriedades de argamassas e concretos reforçados com fibras</b> .....	<b>13</b>
2.4.1 EFEITO DAS FIBRAS POLIMÉRICAS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS NO ESTADO FRESCO .....	13
2.4.2 EFEITO DAS FIBRAS POLIMÉRICAS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS NO ESTADO ENDURECIDO .....	15
<b>3 DURABILIDADE DE FIBRAS EM ARGAMASSAS E CONCRETOS</b> .....	<b>22</b>
<b>3.1 Durabilidade de diversas fibras</b> .....	<b>22</b>
<b>3.2 Durabilidade das fibras de PET</b> .....	<b>25</b>
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>29</b>
<b>4.1 Planejamento experimental</b> .....	<b>29</b>
<b>4.2 Caracterização dos materiais</b> .....	<b>30</b>
4.2.1 CIMENTO .....	30
4.2.2 AREIA .....	31
4.2.3 FIBRAS DE PET .....	33
<b>4.3 Avaliação da degradação das fibras imersas em soluções agressivas</b> .....	<b>41</b>
4.3.1 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO.....	43
4.3.2 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA .....	43
<b>4.4 Avaliação da degradação das fibras de PET em materiais à base de cimento</b> .....	<b>44</b>
4.4.1 PREPARO E ARMAZENAMENTO DOS CORPOS-DE-PROVA .....	44
4.4.2 ENSAIOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	46
4.4.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA .....	50
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>51</b>
<b>5.1 Avaliação da degradação das fibras imersas em soluções agressivas</b> .....	<b>51</b>
5.1.1 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO.....	51
5.1.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA .....	55

<b>5.2 Avaliação da degradação das fibras em matriz cimentícia .....</b>	<b>63</b>
5.2.1 RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO AXIAL E TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	63
5.2.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO, MÓDULO DE ELASTICIDADE E TENACIDADE .....	71
5.2.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA .....	86
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>90</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>93</b>
<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>94</b>
<b>ANEXO 1.....</b>	<b>99</b>
<b>ANEXO 2.....</b>	<b>109</b>
<b>ANEXO 3.....</b>	<b>119</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Diagrama tensão-deformação de fibras de baixo e alto módulo de elasticidade trabalhando em conjunto (FIGUEIREDO, 2000).....	10
FIGURA 2 - Comportamento de um material frágil e dúctil até a rupturas.....	18
FIGURA 3 - Estrutura molecular do poli (etileno tereftalato) .....	26
FIGURA 4 - Princípio esquemático das reações de depolimerização do PET.....	28
FIGURA 5 - Composição granulométrica da areia .....	32
FIGURA 6 - Aspecto superficial das fibras de PET em microscópio eletrônico de varredura.....	33
FIGURA 7 - Recipiente para ensaio de absorção de água das fibras de PET em ambiente a 75% de umidade relativa.....	34
FIGURA 8 - Gráfico de variação de massa das fibras de PET expostas em ambiente a 75% de umidade relativa .....	35
FIGURA 9 - Curva de calorimetria diferencial de varredura (DSC) - (a) de PET não reciclado e (b) fibras de PET reciclada, em atmosfera dinâmica de nitrogênio a 50 ml/min, com taxa de aquecimento de 10°C/min.....	37
FIGURA 10 - Gráfico deslocamento x carga de feixes de fibra PET .....	38
FIGURA 11 - Espectro no infravermelho da fibra de PET .....	40
FIGURA 12 - Esquema de montagem para ambientes a $50 \pm 5^\circ\text{C}$ .....	42
FIGURA 13 - Ensaio de tração na flexão de corpo-de-prova de argamassa (40x20x160mm).....	47
FIGURA 14 - Aparato para ensaio de tração na flexão - (a) vista superior e (b) desenho esquemático da vista lateral.....	48
FIGURA 15 - Gráfico de medida dos índices de tenacidade segundo ASTM C 1018 .....	50
FIGURA 16 - Espectros no infravermelho da fibra virgem e das fibras imersas em solução de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), 10M a $50^\circ\text{C}$ , durante 150 dias .....	51
FIGURA 17 - Espectro no infravermelho do pó formado na solução de hidróxido de cálcio a $5^\circ\text{C}$ .....	52
FIGURA 18 - Espectro no infravermelho do pó formado da interação da fibra com as soluções de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a 25 e $50^\circ\text{C}$ .....	53
FIGURA 19 - Espectro no infravermelho do pó formado da interação da fibra com a solução de Lawrence a $50^\circ\text{C}$ .....	53
FIGURA 20 - Espectro no infravermelho do pó formado na solução de ácido sulfúrico 10M a $50^\circ\text{C}$ .....	54

FIGURA 21 - Aspecto das fibras atacadas por solução de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) a $50^\circ C$ , durante 150 dias.....	56
FIGURA 22 - Aspecto das fibras atacadas por solução de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) a $25^\circ C$ , durante 150 dias.....	57
FIGURA 23 - Espectro da análise química da fibra imersa em solução de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), 10M a $50^\circ C$ durante 150 dias .....	58
FIGURA 24 - Aspecto da superfície das fibras atacadas por solução saturada de hidróxido de cálcio - $Ca(OH)_2$ , durante 150 dias.....	59
FIGURA 25 - Aspecto das fibras de PET mantidas em imersão durante 150 dias em solução de Lawrence .....	60
FIGURA 26 - Aglomerados formados na solução de $Ca(OH)_2$ à 5 e $25^\circ C$ .....	61
FIGURA 27 - Aglomerados formados após ataque agressivo às fibras de PET .....	61
FIGURA 28 - Análise química do aglomerado formado na solução de Lawrence a $50^\circ C$ .....	62
FIGURA 29 - Análise química do aglomerado formado na solução de $H_2SO_4$ (10M) a $50^\circ C$ .....	62
FIGURA 30 - Efeitos da fibra e do ambiente sobre a resistência à compressão axial .....	66
FIGURA 31 - Efeito da interação entre o teor de fibra e o ambiente agressivo na resistência à tração por compressão diametral .....	66
FIGURA 32 - Efeito da interação entre ambiente e cura na resistência à compressão axial .....	67
FIGURA 33 - Efeito da interação entre ambiente e cura na resistência à tração por compressão diametral .....	67
FIGURA 34 - Efeito da interação entre teor de fibras, ambiente e idade na resistência à compressão axial dos corpos-de-prova não curados.....	68
FIGURA 35 - Efeito da interação entre teor de fibras, ambiente e idade na resistência à compressão axial dos corpos-de-prova curados em água com cal durante 14 dias.....	69
FIGURA 36 - Efeito da interação entre teor de fibras, ambiente e idade na resistência à tração por compressão diametral dos corpos-de-prova não curados.....	70
FIGURA 37 - Efeito da interação entre teor de fibras, ambiente e idade na resistência à tração por compressão diametral dos corpos-de-prova curados em água com cal durante 14 dias .....	71
FIGURA 38 - Efeito da interação entre idade e ambiente sobre a resistência à tração na flexão.....	74
FIGURA 39 - Efeito da interação entre idade e ambiente sobre o módulo de elasticidade .....	74
FIGURA 40 - Difração de raios-X da camada branca formada na superfície dos corpos-de-prova de argamassa imersos em água do mar.....	75
FIGURA 41 - Aspecto da superfície dos corpos-de-prova expostos a diferentes ambientes.....	76

FIGURA 42 - Efeito da interação entre ambiente e fibra sobre a resistência à tração na flexão ..	77
FIGURA 43 - Efeito da interação entre ambiente e teor de fibra sobre o módulo de elasticidade .....	78
FIGURA 44 - Interação ambiente, teor de fibra e idade na resistência á tração na flexão .....	79
FIGURA 45 - Interação ambiente, teor de fibra e idade no módulo de elasticidade.....	80
FIGURA 46 - Efeitos da interação ambiente, teor de fibra e idade sobre a área até a primeira físsura .....	82
FIGURA 47 - Efeitos da interação idade e ambiente sobre o índice de tenacidade I5 .....	84
FIGURA 48 - Efeitos da interação idade e ambiente sobre o índice de tenacidade I10 .....	85
FIGURA 49 - Efeitos da interação idade e ambiente sobre o índice de tenacidade I20 .....	86
FIGURA 50 - Aspecto da fibra de PET em argamassa expostas por 28 (a) e 150 (b) dias ao ambiente de laboratório .....	87
FIGURA 51 - Aspecto da fibra de PET em argamassa expostas por 28 (a) e 150 (b) dias a ambiente com alta concentração de CO2 .....	87
FIGURA 52 - Aspecto da fibra de PET em argamassa submersa por 28 (a) e 150 (b) dias em água do mar sintética .....	88
FIGURA 53 - Vazio deixado pela degradação da fibra e os produtos de reação da mesma com o meio- 28 dias em água do mar sintética .....	88
FIGURA 54 - Análise química do vazio deixado pela degradação da fibra e os produtos de reação da mesma com o meio- 28 dias em água do mar sintética.....	89
FIGURA 56 - Infravermelho das fibras de PET imersas em água deionizada a 5°C durante 150 dias.....	101
FIGURA 57 - Infravermelho das fibras de PET imersas em água deionizada a 25°C durante 150 dias.....	101
FIGURA 58 - Infravermelho das fibras de PET imersas em água deionizada a 50°C durante 150 dias.....	101
FIGURA 59 - Infravermelho das fibras de PET imersas em ácido sulfúrico à 0,1 M a 5°C durante 150 dias.....	102
FIGURA 60 - Infravermelho das fibras de PET imersas em ácido sulfúrico à 0,1 M a 25°C durante 150 dias.....	102
FIGURA 61 - Infravermelho das fibras de PET imersas em ácido sulfúrico à 0,1 M a 50°C durante 150 dias.....	102

FIGURA 62 - Infravermelho das fibras de PET imersas em ácido sulfúrico à 1 M a 5°C durante 150 dias.....	103
FIGURA 63 - Infravermelho das fibras de PET imersas em ácido sulfúrico à 1 M a 25°C durante 150 dias.....	103
FIGURA 64 - Infravermelho das fibras de PET imersas em ácido sulfúrico à 1 M a 50°C durante 150 dias.....	103
FIGURA 65 - Infravermelho das fibras de PET imersas em ácido sulfúrico à 10 M a 5°C durante 150 dias.....	104
FIGURA 66 - Infravermelho das fibras de PET imersas em ácido sulfúrico à 10 M a 25°C durante 150 dias.....	104
FIGURA 67 - Infravermelho das fibras de PET imersas em ácido sulfúrico à 10 M a 50°C durante 150 dias.....	104
FIGURA 68 - Infravermelho das fibras de PET imersas em Ca(OH) <sub>2</sub> a 5°C durante 150 dias..	105
FIGURA 69 - Infravermelho das fibras de PET imersas em Ca(OH) <sub>2</sub> a 25°C durante 150 dias	105
FIGURA 70 - Infravermelho das fibras de PET imersas em Ca(OH) <sub>2</sub> a 50°C durante 150 dias	105
FIGURA 71 - Infravermelho das fibras de PET imersas em solução de Lawrence a 5°C durante 150 dias.....	106
FIGURA 72 - Infravermelho das fibras de PET imersas em solução de Lawrence a 25°C durante 150 dias.....	106
FIGURA 73 - Infravermelho das fibras de PET imersas em solução de Lawrence a 50°C durante 150 dias.....	106
FIGURA 74 - Infravermelho das fibras de PET imersas em NaOH a 0,1M a 5°C durante 150 dias .....	107
FIGURA 75 - Infravermelho das fibras de PET imersas em NaOH a 0,1 M a 25°C durante 150 dias.....	107
FIGURA 76 - Infravermelho das fibras de PET imersas em NaOH a 0,1M a 50°C durante 150 dias.....	107
FIGURA 77 - Infravermelho das fibras de PET imersas em água do mar sintética a 5°C durante 150 dias.....	108
FIGURA 78 - Infravermelho das fibras de PET imersas em água do mar sintética a 25°C durante 150 dias.....	108
FIGURA 79 - Infravermelho das fibras de PET imersas em água do mar sintética a 50°C durante 150 dias.....	108

FIGURA 80 - Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova sem fibra em ambiente com alta concentração de CO <sub>2</sub> .....	120
FIGURA 81 - Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova com fibra em ambiente com alta concentração de CO <sub>2</sub> .....	120
FIGURA 82 - Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova sem fibra em ambiente de laboratório.....	121
FIGURA 83 - Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova com fibra em ambiente de laboratório.....	121
FIGURA 84 - Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova sem fibra em água do mar sintética.....	122
FIGURA 85 - Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova com fibra em água do mar sintética.....	122
FUGURA 86 - Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova sem fibra em água deionizada .....	123
FIGURA 87 - Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova com fibra em água deionizada .....	123
FIGURA 88 - Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova sem fibra em MgSO <sub>4</sub> .....	124
FIGURA 89 - Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova com fibra em MgSO <sub>4</sub> .....	124

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Propriedades físicas de fibras poliméricas (BALAGURU <i>apud</i> ZHENG, 1995).....	7
TABELA 2 - Valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade de diversos tipos de fibra e matriz (BENTUR e MINDESS, 1990) .....	11
TABELA 3 - Durabilidade de fibras para reforço de concreto (BENTUR e MINDESS <i>apud</i> ZHENG, 1995) .....	25
TABELA 4 - Caracterização química do cimento CP V ARI.....	31
TABELA 5 - Caracterização física do cimento CP V ARI .....	31
TABELA 6 - Caracterização química do cimento CP IIF 32.....	31
TABELA 7 - Caracterização física do cimento CP IIF 32 .....	31
TABELA 8 - Distribuição granulométrica da areia (NBR 7217/87).....	32
TABELA 9 - Características da areia .....	32
TABELA 10 - Condições experimentais empregadas no ensaio de tração das fibras de PET.....	38
TABELA 11 - Resultados dos ensaios de tração nas fibras PET, conforme ASTM D 3822-96 ..	38
TABELA 12 - Análise das bandas do espectro no infravermelho das fibras de PET .....	40
TABELA 13 - Análise de variância dos resultados de resistência à compressão axial.....	63
TABELA 14 - Análise de variância dos resultados de resistência à tração por compressão diametral .....	64
TABELA 15 - Análise de variância dos resultados de resistência à tração na flexão.....	72
TABELA 16 - Análise de variância dos resultados de módulo de elasticidade .....	72
TABELA 17 - Análise de variância dos resultados da área até a primeira fissura.....	81
TABELA 18 - Análise de variância dos resultados Índice de Tenacidade I5 .....	83
TABELA 19 - Análise de variância dos resultados Índice de Tenacidade I10 .....	84
TABELA 20 - Análise de variância dos resultados Índice de Tenacidade I20 .....	85
TABELA 21 - Resultados de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral dos corpos-de-prova em ambiente com alta concentração .....	110
TABELA 22 - Resultados de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral dos corpos-de-prova em ambiente de laboratório.....	111
TABELA 23 - Resultados de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral dos corpos-de-prova em água do mar sintética .....	112
TABELA 24 - Resultados de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral dos corpos-de-prova em água deionizada.....	113

TABELA 25 - Resultado de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral dos corpos-de-prova em MgSO <sub>4</sub> .....	114
TABELA 26 - Resultados de resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e área até a primeira fissura dos corpos-de-prova expostos em ambiente com alta concentração de CO <sub>2</sub> e laboratório.....	115
TABELA 27 - Resultados de resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e área até a primeira fissura dos corpos-de-prova expostos em água do mar e água deionizada.....	116
TABELA 28 - Resultados de resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e área até a primeira fissura dos corpos-de-prova expostos em MgSO <sub>4</sub> .....	117
TABELA 29 - Resultados dos índices de tenacidade I5, I10 e I20 dos corpos-de-prova nos diferentes ambientes de exposição .....	118

**LISTA DE EQUAÇÕES**

Eq. (1)  $\sigma = \frac{1,5PL}{bh^2}$ , 46

Eq. (2)  $E_c = \frac{(\sigma_{30} - \sigma_5)}{(\varepsilon_{30} - \varepsilon_5)}$ , 48

Eq. (3)  $In = \frac{\text{Energia absorvida até um múltiplo da primeira fissura}}{\text{Energia absorvida até a primeira fissura}}$  49

## RESUMO

A adição de fibras em argamassas e concretos tem como finalidade a melhoria do desempenho desses materiais quando submetidos a esforços mecânicos, especialmente a esforços de tração e flexão. Entretanto, deve haver estabilidade das fibras no interior da matriz cimentícia para que seja garantida a durabilidade da argamassa ou concreto. Devido à disponibilidade de fibras PET (poli-etileno tereftalato) na região de Florianópolis (SC), obtidas por reciclagem de embalagens plásticas, as mesmas têm sido utilizadas para pisos e revestimento à base de cimento Portland. Com o objetivo de verificar se existe degradação das fibras de PET quando em serviço, as mesmas foram expostas a diferentes soluções agressivas (soluções básicas, ácidas e salinas) durante 5 meses, e foram posteriormente analisadas por espectroscopia no infravermelho e microscopia eletrônica de varredura. Estas análises mostraram que as fibras de PET sofrem degradação em solução aquosa de ácido sulfúrico, hidróxido de cálcio e também em solução de Lawrence, que simula a água de poro de argamassas e concretos de cimento Portland. Foi testada, também, a influência das fibras de PET no desempenho de argamassas de cimento e areia submetidas aos seguintes ambientes agressivos: ambiente com alta concentração de CO<sub>2</sub>, água do mar sintética, solução de MgSO<sub>4</sub> e, água deionizada e ambiente de laboratório, para controle. Os resultados mostraram que as fibras praticamente não influenciam o desempenho das argamassas à tração por compressão diametral, à compressão axial e tração na flexão, independentemente do ambiente de exposição. O módulo de elasticidade não diminuiu com a presença das fibras, devido à degradação das mesmas no interior da matriz cimentícia. Os índices de tenacidade I5, I10 e I20 indicaram que ocorre degradação das fibras de PET em materiais à base de cimento Portland em curto espaço de tempo (alguns meses), independentemente do ambiente de exposição.

## ABSTRACT

The addition of fibers in mortars and concretes improves the performance of these materials when submitted to mechanical loads, specially tensile and flexural stresses. Nevertheless, the chemical stability of the fiber must exist inside the cement matrix, in order to guarantee the durability of the mortar or concrete. In order to evaluate the degradation of recycled PET fibers (poly-ethylene terephthalate) in such materials, the fibers were exposed to different aggressive solutions (basic, acid and saline solutions) for 5 months and were then analyzed through infrared spectroscopy and scanning electron microscopy techniques. The results showed that PET fibers are susceptible to degradation in sulfuric acid,  $\text{Ca(OH)}_2$  and Lawrence's solutions, the latest being a solution that simulates the pore water of mortars and concretes. The influence of PET fibers in the performance of mortars submitted to various aggressive environments was also tested. The results showed that PET fibers slightly influence the performance of mortars under splitting tensile, compression and flexural stresses, regardless the aggressive environment. The Young's modulus of the mortars was not reduced by the fibers, due to their degradation in the cement matrix. However, toughness indexes I5, I10 and I20 indicated degradation of PET fibers in cement based materials after short time of exposure (some months), regardless the aggressive environment.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Formulação do problema e objetivos

Materiais constituídos de matriz cimentícia, como concreto e argamassa, são materiais frágeis com baixa resistência à tração, baixa ductilidade e baixa tenacidade. Uma forma de melhorar este último requisito é a adição de pequenas frações (0,5 a 2% do volume) de fibras durante a mistura (WANG *et al.*, 2000). De acordo com Houget (1992), a incorporação de fibras curtas ou contínuas é largamente utilizada para melhorar as resistências à tração e à flexão de concretos e argamassas, permitindo ainda uma diminuição da fissuração por retração nas primeiras idades.

Segundo Wang *et al.* (2000), outros benefícios de concretos reforçados com fibras incluem resistência à fadiga, resistência ao desgaste e durabilidade. Através do uso destes compósitos<sup>1</sup>, seções frágeis podem ser minimizadas e a fissuração pode ser controlada, resultando em uma estrutura mais leve com expectativa de vida mais longa. As fibras restringem a propagação das fissuras no concreto. Desta forma, tem-se um aumento da resistência à entrada de agentes agressivos, com conseqüente aumento da durabilidade da estrutura (CHANVILLARD *et al.*, *apud* FIGUEIREDO, 2000).

Uma variedade de fibras como aço, vidro, fibras naturais e sintéticas têm sido desenvolvidas para uso na indústria da construção civil como reforço para concreto, que passa a ser denominado concreto reforçado com fibra (CRF) (*fiber reinforced concrete -FRC*).

As fibras para reforço de concreto devem ser duráveis em meios cimentícios, devem ser facilmente dispersas na mistura, ter boas propriedades mecânicas e possuir uma configuração geométrica apropriada (WANG *et al.*, 2000).

A durabilidade e compatibilidade química das fibras encapsuladas pela matriz de cimento devem ser individualmente investigadas. Houget (1992) afirma que a solução intersticial do cimento é muito básica (pH entre 13 e 14). Desta forma é importante que as fibras utilizadas não sejam sensíveis às soluções alcalinas. Fibras acrílicas, aramid<sup>2</sup>, carbono, náilon, poliéster, polietileno e polipropileno geralmente apresentam um bom desempenho em matrizes de cimento Portland (ACI-544, 1996).

---

<sup>1</sup> Uma definição para material compósito é todo material formado de matriz e elementos de reforço (JELIDI, 1991).

<sup>2</sup> Aramid- é um termo genérico para uma fibra manufaturada que forma uma substância de cadeia longa na qual pelo menos 85% das ligações amidas são unidas diretamente por dois anéis aromáticos (ZHENG *et al.*, 1995).

Segundo o comitê ACI-544 (1996), as fibras de poli(etileno tereftalato) ou PET, pertencentes à família dos poliésteres, são utilizadas somente na forma de monofilamentos<sup>3</sup>. São hidrofóbicas (pouco absorventes) e têm mostrado não afetar a hidratação do cimento no concreto. Entretanto, não há consenso sobre a durabilidade desse tipo de fibra em argamassas e concretos de cimento Portland.

Alguns autores como Wang *et al.* (1987), Jelidi (1991) e Houget (1992) afirmam que as fibras de poliéster, em contato com meio cimentício e básico, sofrem degradação, diminuindo sua capacidade de reforço nos compósitos. No entanto, Jakel, citado por Wang *et al.* (1987), alegou sucesso no uso de fibras de poliéster no melhoramento dos produtos à base de cimento Portland.

Perante o exposto, o principal objetivo deste trabalho é avaliar a degradação das fibras de PET em materiais à base de cimento. Tendo em vista os requisitos de durabilidade de argamassas e concretos quando em serviço, o objetivo do trabalho é, também, avaliar a degradação das fibras em materiais à base de cimento submetidos a ambientes agressivos.

De forma mais específica, os seguintes objetivos foram propostos:

- a) avaliar a degradação das fibras de PET imersas em soluções agressivas;
- b) avaliar a degradação das fibras de PET em materiais à base de cimento submetidos a ambientes agressivos;
- c) avaliar a influência das fibras de PET no desempenho mecânico de argamassas.

## 1.2 Justificativa e relevância do tema

Sabe-se que a resistência não é o único critério de projeto, e que muito mais importante para o desempenho dos elementos de construção é o controle de fissuras e deflexão, e, nestes aspectos, as fibras são eficientes. Conseqüentemente, há uma melhora em todas as outras propriedades ligadas à fissuração, tais como, resistência, rigidez, ductilidade, energia de absorção, resistência ao impacto, fadiga e carregamento térmico (SWAMY, 197-).

A vantagem da adição de fibras no concreto ocorre após a fissuração, pois as fibras atravessam as fissuras, atuando como ponte de transferência de tensões entre as partes da matriz separadas pela fissura, de tal forma que a deformação somente continua após um novo acréscimo de energia mecânica (BENTUR e MINDESS, 1990).

---

<sup>3</sup> Filamento individual de seção cilíndrica

Outra vantagem de incorporar fibras ao concreto é o controle ou a eliminação dos efeitos causados por retração plástica, fenômeno que causa fissuras superficiais ou de grande profundidade no concreto. As fissuras causadas pela retração por secagem, por outro lado, podem apenas ter sua abertura limitada nas primeiras idades pela presença das fibras (JÚNIOR, 2001).

Entretanto, para que as fibras desempenhem seu papel como reforço, devem ser duráveis no interior de materiais à base de cimento, pois construções de concreto são geralmente projetadas para várias décadas de serviço satisfatório. Infelizmente, informações disponíveis na literatura, referentes à estabilidade de fibras de poliéster em concreto reforçado com fibra, são insuficientes, inconsistentes e controversas.

Em geral, a possibilidade de deterioração da fibra no contato com os constituintes do cimento e misturas químicas ou minerais deveria sempre ser considerada, especialmente quando há pequena ou nenhuma evidência documentada confirmando satisfatoriamente sua resistência ao longo do tempo (JOHNSTON, 2001).

Se as fibras deterioram, o comportamento do compósito será como o de um concreto convencional, com a desvantagem de que podem ser gerados vazios ou canais que reduzem a vida-útil do compósito (BALAGURU e SLATTUM, 1995).

Desta forma, as fibras de PET necessitam ser duráveis em materiais à base de cimento. Como não há consenso sobre a durabilidade das fibras de PET em materiais à base de cimento, há a necessidade de se avaliar esta propriedade para garantir o desempenho do compósito.

Ainda, uma outra vantagem de avaliar o desempenho das fibras de PET como reforço é que, como são provenientes da reciclagem de garrafas plásticas, material que possui um longo tempo de decomposição (superior a 100 anos), seu consumo na confecção de argamassas e concretos ajuda na preservação do meio ambiente. Vale ressaltar que a produção de PET no Brasil é de 360 mil toneladas onde o consumo é de 270 mil toneladas e a reciclagem de 89 mil toneladas, segundo a Associação Brasileira de Embalagens PET (2002).

### **1.3 Estrutura da Dissertação**

O presente trabalho está dividido em sete capítulos, objetivando um melhor entendimento por parte do leitor.

Inicialmente, no Capítulo 1, introduziu-se o tema proposto, salientando-se a importância da durabilidade de fibras em compósitos à base de cimento Portland. Desta forma, foram

propostos os objetivos, geral e específicos, que embasaram a metodologia de ensaios para avaliar a degradação de fibras de PET em ambientes à base de cimento Portland.

Os Capítulos 2 e 3 dedicam-se ao estado da arte sobre o tema. No Capítulo 2, realizou-se uma revisão cronológica da utilização de fibras como reforço. Ainda neste capítulo, abordaram-se diversos temas, dentre eles os tipos de fibras utilizadas como reforço, o mecanismo de reforço das fibras e a influência das fibras nas propriedades dos compósitos. O Capítulo 3 trata da durabilidade de diversos tipos de fibras em argamassas e concretos, da definição de fibras de PET, e da sua durabilidade e processo de degradação, buscando dar o embasamento teórico necessário para a obtenção dos objetivos propostos.

O Capítulo 4 dedica-se à parte experimental do trabalho, em que foi avaliada a degradação de fibras de PET expostas a diferentes soluções agressivas e a sua durabilidade em corpos-de-prova de argamassa submetidos a diferentes ambientes. Ainda neste capítulo, são apresentadas a caracterização físico-mecânica das fibras de PET e suas propriedades mecânicas. Os resultados qualitativos, análises estatísticas e respectivas discussões encontram-se no Capítulo 5.

Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões deste trabalho e recomendações para estudos futuros, no Capítulo 7.

## 2 CONCRETOS E ARGAMASSAS REFORÇADOS COM FIBRAS

A incorporação de fibras curtas ou contínuas é largamente utilizada para melhorar as resistências à tração e à flexão de concretos e argamassas, permitindo ainda uma diminuição de fissuras causadas por retração nas primeiras idades (HOUGET, 1992). Tem-se, desta forma, um material compósito.

Um material compósito pode ser definido como aquele formado de matriz e elementos de reforço, perfeitamente homogêneo. A matriz e o reforço podem ser de naturezas diferentes (mineral ou orgânica). O reforço ainda pode ser de natureza vegetal ou mineral, em forma de fibra, tramos de fio, geotêxtil ou resina (JELIDI, 1991).

Concreto reforçado com fibras (CRF) é um compósito produzido com cimento hidráulico, agregados (miúdo e graúdo) e fibras, podendo conter, também, aditivos e adições. Geralmente, o comprimento e diâmetro das fibras para CRF não excedem a 76mm e 1mm, respectivamente (ACI-544, 1996).

O concreto não armado é um material frágil. Quando este é submetido a excessivos esforços de tração pura ou de tração por flexão, ocorre ruptura brusca sem aviso, ou seja, não há o desenvolvimento de fissuração ou deformação intensas previamente à ruptura (JELIDI, 1991).

Segundo Jelidi (1991), dentro da matriz cimentícia de um concreto, desde as primeiras 24 horas, existem numerosas microfissuras devidas, principalmente, à retração. Essas microfissuras estão localizadas dentro das zonas de descontinuidade nas superfícies de contato entre os agregados. Quando a matriz é solicitada por esforços de tração, ela se deforma elasticamente. Em seguida, rapidamente a energia transmitida pelas solicitações se concentra nas extremidades das microfissuras, tornando seu alargamento incontrolável e causando um aumento do número de superfícies de ruptura. Assim, conduzirá o material a uma fase plástica e, em seguida, à sua ruptura.

Este comportamento normalmente frágil do concreto simples aproxima-se mais do dúctil com adições de fibras, de tal forma que a sua capacidade portante é conservada mesmo depois de fissurado (JUNIOR, 2001).

### 2.1 Histórico e aplicações

O primeiro registro de uso de fibras como reforço, de acordo com Exodus capítulo 5 versículo 6, aconteceu quando os egípcios utilizavam fibras de asbestos para reforçar tijolos de

barro. Há evidências de que esse mesmo tipo de fibra tenha sido utilizado na construção civil para reforçar postes de argila há 5000 anos (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Naaman, citado por Gani (1997), descreve uma revisão cronológica das patentes mais antigas de cimento e concreto reforçados com fibras. Dentre elas está a patente francesa de 1918 por Alfsen, que descreve a utilização de fibras (ferro, madeira, etc) com intuito de aumentar a resistência à tração do concreto, sugerindo que as superfícies das fibras fossem mais rugosas ou suas extremidades encurvadas para melhor desempenho. Em 1926, foi registrada uma patente por Martin, que descreve o uso de arames de aço (estendidos ou enrolados) para reforçar o concreto. Em 1943, Constantinesco registrou uma patente na qual descreveu o uso de vários tipos de fibras de aço para aumentar a dureza do concreto, e sugeriu aplicações para esse concreto, tais como abrigos para proteção de ataques aéreos, tanques de guerra e fundações de máquinas. As fibras descritas por ele são similares às usadas atualmente.

O início do estudo científico sobre o comportamento de compósitos ocorreu na década de 50 com a utilização das fibras de aço e vidro (BENTUR e MINDESS, 1990). No caso das fibras poliméricas, a primeira tentativa foi de Goldfein, em 1965 (TANESI e FIGUEIREDO, 1999).

Hoje, o CRF é principalmente utilizado na construção de estruturas de pavimentos de aeroportos, rodovias, túneis, pontes e fundações de máquinas, sendo a maioria destas estruturas submetida a carregamentos cíclicos (ZHANG, 1999). Além disso, encontra várias outras aplicações na construção civil, tais como telhas e painéis de vedação vertical e estruturas de concreto (FIGUEIREDO, 2000).

As fibras correntemente utilizadas no cimento e concreto podem ser classificadas, de modo geral, em dois tipos, de acordo com suas propriedades mecânicas (SWAMY *et al. apud* GANI, 1997):

a) Fibras de alta resistência, com elevado módulo de elasticidade. Estas incluem fibras de aço, vidro, amianto e carbono, que produzem compósitos muito fortes com cimento, transmitem resistência e rigidez aos compósitos e aumentam a dureza;

b) Fibras de grande deformação, com baixo módulo de elasticidade. Estas incluem náilon, polipropileno, polietileno e poliéster. Os compósitos produzidos com estas fibras são caracterizados por grande energia de absorção. As fibras não conduzem a nenhuma melhora na resistência, mas aumentam as resistências ao impacto e a cargas explosivas.

## 2.2 Fibras sintéticas utilizadas para reforço

As fibras sintéticas tornaram-se atrativas nos últimos anos como reforço para materiais cimentícios devido, também, ao seu custo relativamente baixo. As fibras sintéticas alteram, de forma importante, principalmente o módulo de elasticidade de argamassas e concretos. Essa é uma influência importante quando fibras são utilizadas como reforço (ZHENG, 1995).

Fibras sintéticas, como as de polipropileno e náilon, vêm sendo utilizadas como alternativa às fibras de amianto no reforço de matrizes cimentícias (HANNANT *apud* FIGUEIREDO, 2000). Esta substituição vem sendo realizada mais por motivos de saúde, uma vez que o amianto é responsável pela asbestose, do que pelo desempenho propriamente dito, pois o amianto proporciona um ganho de desempenho no reforço mecânico comparado com as fibras orgânicas, sejam sintéticas ou vegetais, devido à maior flexibilidade destas últimas (FIGUEIREDO, 2000).

Como fibras sintéticas incorporadas em matrizes de cimento, incluem-se, também, as fibras acrílicas, poli (vinil-álcool), poliamida, aramid e carbono. As fibras poliméricas mais utilizadas são as de polipropileno e outros tipos, como náilon, poliéster, polietileno e celulose. A Tabela 1 apresenta as propriedades físicas de algumas fibras sintéticas (ZHENG, 1995).

**TABELA 1 - Propriedades físicas de fibras poliméricas (BALAGURU *apud* ZHENG, 1995)**

Tipo de fibra	Peso específico g/cm <sup>3</sup>	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento máximo (%)
Acrílica	1,17	207-1000	14,6-19,6	7,5-50,0
Aramid I	1,44	3620	62	4,4
Aramid II	1,44	3620	117	2,5
Náilon	1,16	965	5,17	20,0
Poliéster	1,34-1,39	896-1100	17,5	-
Polietileno	0,96	200-300	5,0	3,0
Polipropileno	0,90-0,91	310-760	3,5-4,9	15,0

## 2.3 Mecanismo de reforço das fibras

Na prática, o principal mecanismo de reforço das fibras ocorre após a fissuração da matriz, onde as mesmas atuam como pontes de transferência de esforços através das fissuras, até serem arrancadas da matriz. Esse mecanismo previne uma ruptura brusca do compósito (BENTUR e MINDESS, 1990; TANESI e FIGUEIREDO, 1999; JELIDI, 1991).

Jenq e Shah (1986) concorda com esta idéia e afirma que, para carga superior àquela que fissurou a matriz, o surgimento e abertura de novas fissuras serão resistidas através de uma “ponte” de fibras atravessando a fissura.

O número de fissuras em um compósito com fibra será maior que na matriz sem reforço, porém com menores aberturas. O controle de abertura das fissuras e sua estabilização ocorrerão desde que a tensão de ruptura da fibra não seja atingida, e desde que haja suficiente aderência entre fibra e matriz para que a fibra não sofra escorregamento e conseqüentemente arrancamento da matriz (TANESI e FIGUEIREDO, 1999).

O efeito de ponte de transferência promove tanto o aumento de deformação para o aparecimento da primeira fissura, como também a deformação até a ruptura, pois o compósito continua se deformando e suportando carregamento durante o processo de arrancamento das fibras (TANESI e FIGUEIREDO, 1999).

Da mesma forma, Agopyan, citado por Júnior (2001), cita que as fibras possuem dois papéis importantes: transferência de esforços para a matriz através da aderência (chamada de micro-ação) e efeito “costura” da matriz fissurada em estágios mais avançados de carregamento (conhecido como macro-ação).

Nestes casos, a principal contribuição das fibras é transformar matrizes tipicamente frágeis em materiais “quase dúcteis”, como definiram Bentur e Mindess (1990). Isto traz como vantagem um ganho de desempenho aos esforços de impacto e redução de fissuração do material (FIGUEIREDO, 2000). E, segundo Jelidi (1991), também ocorre uma melhora na tenacidade, assim como a resistência à fadiga e a resiliência (resistência ao choque) do material.

Para que o mecanismo de ação das fibras seja eficaz, as mesmas devem atender a características específicas.

Quando o objetivo é melhorar a resistência à fissuração do compósito, as fibras devem possuir alta resistência à tração e alto módulo de elasticidade, adequada capacidade de extensão, uma ligação razoável na interface fibra-matriz e boa estabilidade química. Além disso, devem suportar tensão por um longo período de tempo (SWAMY, 197-).

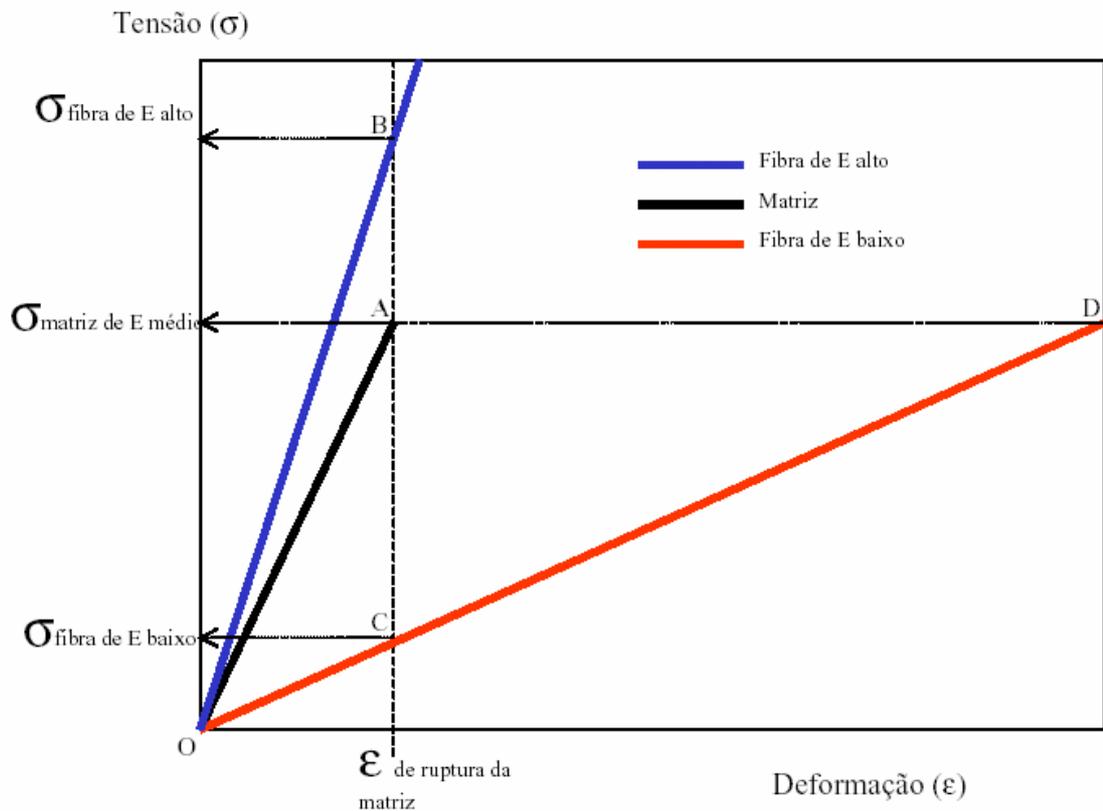
A resistência à tração da fibra não é um fator crítico se o compósito rompe devido ao arrancamento da mesma. Entretanto, se a fibra escoar ou romper, então a resistência da fibra é importante na resistência do compósito (SWAMY, 197-).

O módulo de elasticidade da fibra é uma propriedade importante, pois atua no sentido de dar maior rigidez e capacidade de impedir que a fissuração se propague. Para um mesmo nível de deformação do conjunto fibra-matriz, a fibra de baixo módulo permite maior grau de abertura

das fissuras que as fibras de alto módulo (ARMELIN e BANTMA *apud* TANESI e FIGUEIREDO, 1999).

A Figura 1 apresenta o trabalho de uma matriz hipotética reforçada com dois tipos de fibras, uma de baixo módulo de elasticidade e outra com alto módulo, sendo todas de comportamento elástico perfeito. A linha O-A apresenta a curva *tensão x deformação* da matriz cimentícia e as curvas O-B e O-C representam o trabalho elástico das fibras de alto e baixo módulo, respectivamente. No momento em que a matriz se rompe (ponto A) e transfere a carga para a fibra de módulo baixo (ponto C), esta apresenta uma tensão muito baixa neste nível de deformação ( $\sigma_{\text{fibra}}$  de baixo módulo de elasticidade), deformando-se até o ponto D para garantir o mesmo nível de tensão ( $\sigma_{\text{matriz}}$  de módulo de elasticidade médio). Portanto, a fibra de baixo módulo não oferecerá reforço após a matriz ter fissurado ou deformar-se-á muito com uma conseqüente elevada fissuração (ponto D) (FIGUEIREDO, 2000).

Por outro lado, as fibras de alto módulo de elasticidade apresentam um nível elevado de tensão ( $\sigma_{\text{fibra}}$  de alto módulo de elasticidade) no momento da ruptura da matriz, permitindo atuar como reforço a partir do ponto B, caso sua resistência não seja superada. Portanto, podem ser destinadas ao reforço primário do concreto, isto é, não se destinam ao mero controle de fissuração, pois, segundo Tanesi e Figueiredo (1999), possuem capacidade portante após o aparecimento da fissuração (FIGUEIREDO, 2000).



**FIGURA 1** - Diagrama tensão-deformação de fibras de baixo e alto módulo de elasticidade trabalhando em conjunto (FIGUEIREDO, 2000)

Para aumentar a resistência do compósito, a fibra deve possuir um módulo de elasticidade superior ao da matriz. No caso de materiais cimentícios, que normalmente têm módulo de elasticidade em torno de 15-30 GPa, este aumento é difícil de se obter com fibras sintéticas, o que justifica o desenvolvimento de fibras com alto módulo de elasticidade para reforço de concretos e argamassas. Entretanto, pesquisas teóricas e práticas indicam que, mesmo com baixo módulo de elasticidade, as fibras melhoram consideravelmente a capacidade de deformação, resistência ao impacto e controle de fissuras de compósitos com fibras. E, em muitas aplicações, a melhora destas propriedades é mais significativa que o pequeno aumento na resistência à flexão (ZHENG, 1995).

A Tabela 2 mostra os valores de características mecânicas de algumas fibras e da matriz cimentícia como valor comparativo.

**TABELA 2** - Valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade de diversos tipos de fibra e matriz (BENTUR e MINDESS, 1990)

Material da fibra	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	190-210	0,5-2,0	0,5-3,5
Vidro	9-15	2,60	70-80	2-4	2-3,5
Amianto	0,02-0,4	2,6	160-200	3-3,5	2-3
Polipropileno	20-200	0,9	5-7,7	0,5-0,75	8,0
Kevlar	10	1,45	65-133	3,6	2,1-4,0
Carbono	9	1,9	230	2,6	1,0
Náilon		1,1	4,0	0,9	13-15
Celulose		1,2	10	0,3-0,5	
Acrílico	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3
Poliétileno		0,95	0,3	0,7x10 <sup>-3</sup>	10
Poliéster*	11 - 28	1,4	8-17	0,8-1,1	10-30
Fibra de madeira		1,5	71	0,9	
Sisal	10-50	1-50		0,8	3,0
Matriz de cimento (para comparação)		2,50	10-45	3,7x10 <sup>-3</sup>	0,02

\*fonte: JELIDI (1991)

De acordo com Swamy (197-), as fibras de baixo módulo como náilon, polipropileno, polietileno e poliéster não melhoram a resistência do compósito. Compósitos reforçados com tais fibras não suportam carregamentos adicionais depois da primeira fissura. Entretanto, a ruptura não é imediata, havendo considerável reserva de resistência com o aumento da fissuração e deformação. O elevado alongamento das fibras permite que o compósito absorva uma grande quantidade de energia, concedendo principalmente tenacidade e resistência ao choque. Tanesi e Figueiredo (1999) comentam, também, o efeito benéfico das fibras de baixo módulo na resistência à fadiga de argamassas e concretos.

Para Figueiredo (2000), a aplicação de fibras de polipropileno, náilon e poliéster restringe-se ao controle de fissuração quando a matriz possui baixo módulo de elasticidade, como é o caso da retração plástica em argamassas e concretos nas primeiras idades, pois as deformações estão associadas a um baixo nível de tensão, compatível com aquele absorvido pelas fibras. Assim, a utilização destas fibras pode vir a ser muito interessante quando o reforço mecânico da matriz não é o principal objetivo. A presença das fibras resulta em maior proteção contra danos físicos durante incêndios, pois, com o aumento da temperatura, as fibras fundem

produzindo um caminho livre para a saída do vapor de água, evitando, assim, a ruptura superficial pela pressão do vapor.

O mecanismo das fibras no compósito conta ainda com a eficiência e orientação das fibras e a resistência da zona interfacial fibra-matriz. Nesta última influenciam o comprimento e o diâmetro das fibras (SWAMY, 197-).

Na interface fibra/matriz ocorrem fenômenos químicos, físicos e mecânicos. Jelidi (1991) distingue a interface fibra-cimento em quatro zonas bem distintas, com distanciamento crescente da superfície da fibra:

- a zona da matriz mais próxima da fibra, onde há um filme de aparência amorfa;
- uma camada descontínua de cristais orientados de  $\text{Ca(OH)}_2$ ;
- uma zona porosa;
- uma pasta de cimento compacta, na região mais afastada da fibra.

As propriedades dos compósitos são muito influenciadas pelas interações químicas e físicas de seus constituintes. Em compósitos à base de cimento, as zonas de contato entre a matriz e as inclusões são muitas vezes difusas, isto é, há uma transição contínua entre uma fase e outra. A resistência e a dureza da zona de transição (interfacial) demonstra haver uma combinação química e física quando há formação de produtos de reação na superfície. Estas ligações interfaciais influenciam as propriedades do compósito e, muitas vezes, constituem a ligação mais fraca do sistema (SWAMY, 197-).

Em compósitos à base de cimento, o conceito de zona interfacial é muito complexo. A matriz, por si só, é porosa, e ocorrem mudanças nas propriedades devidas a variações de volume e outros fenômenos dependentes do tempo (SWAMY, 197-).

Segundo o autor citado, a ligação fibra-matriz de fibras poliméricas como náilon, poliéster e polipropileno é inteiramente mecânica, e a resistência da região depende da ligação entre a matriz e os filamentos individuais das fibras. Nas fibras de aço, a ligação provém da combinação da adesão, atrito e intertravamento devido às reações superficiais. As fibras de vidro são atacadas pelos álcalis do cimento, e têm seus reforços comprometidos, resultando em modificações das propriedades da interface com o tempo (MAJUNDAR *apud* SWAMY, 197-).

Segundo Diamond e Bentur, citados por Jenq (1986), a resistência oferecida pela fibra depende principalmente da interface fibra-matriz, devido aos pequenos comprimentos de fibra (da ordem de 25 mm) e à zona mais fraca da matriz ao redor das fibras.

O processo de ruptura do compósito é contínuo e não confinado até o estágio final. A ruptura ocorre devido a um deslocamento das fibras. No estágio pós-fissuração, a resistência para separação total do compósito é, portanto, provida pelas fibras, por meio de pontes que atravessam as superfícies fissuradas (SWAMY, 197-).

A extensão do comportamento pós-fissuração e o grau de ductilidade tanto para fissuras simples ou múltiplas dependem das propriedades e geometria das fibras, da sua ligação interfacial com a matriz e do volume de fibras adicionado (SWAMY, 197-).

## **2.4 Propriedades de argamassas e concretos reforçados com fibras**

### **2.4.1 EFEITO DAS FIBRAS POLIMÉRICAS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS NO ESTADO FRESCO**

As características das combinações fibra-matriz no estado fresco dependem do tipo e forma das fibras, natureza e proporções dos constituintes da matriz, e do processo de dispersão das fibras na matriz. Fibras que absorvem água podem diminuir a fluidez de concreto, argamassa ou pasta. As fibras que não absorvem água podem causar uma diminuição na fluidez da mistura devido ao formato das fibras e sua alta área específica (JOHNSTON, 2001).

A adição de fibras no concreto reduz a trabalhabilidade do mesmo, independentemente do tipo de fibra. A perda de trabalhabilidade é proporcional à concentração volumétrica das fibras (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Fatores que governam a quantidade máxima possível de fibras mantendo o aspecto de trabalhabilidade ou fluidez da mistura são: a fluidez e fração de volume da pasta, dimensão máxima dos agregados graúdos (quando presentes), e a relação comprimento/ diâmetro da fibra (fator de forma) (JOHNSTON, 2001). Quanto maior o fator de forma, maior será a influência da fibra na perda de fluidez, devido à elevada área específica, resultando numa demanda maior de água de molhagem. Porém, este efeito pode até ser positivo nos casos de exigência de elevado nível de coesão do material, como, por exemplo, no caso de concreto projetável, pois as fibras causam redução da reflexão e do deslocamento do concreto (FIGUEIREDO, 2000).

Pelisser (2002) trabalhou com concretos reforçados com fibras de PET, e observou uma redução de trabalhabilidade com o aumento no teor de fibras. Balaguru e Shah, citados por Figueiredo (2000), afirmam que esta redução na trabalhabilidade do concreto pode ocasionar

prejuízos à sua compactação e, conseqüentemente, à sua durabilidade e desempenho mecânico, incluindo, segundo Bentur e Mindess (1990), a própria tenacidade.

As fibras resultam em redução da fissuração causada por retração plástica de materiais à base de cimento (BENTUR e MINDESS, 1990; SWAMY *apud* TOLÊDO e SANJUÁN, 1999; FIGUEIREDO *apud* FIGUEIREDO, 2000). Este fenômeno ocorre no estado fresco, quando a taxa de evaporação de água na superfície do concreto é maior que a taxa de migração da mesma na superfície, pelo efeito de exsudação. Uma pequena quantidade de fibras é suficiente para reduzir a fissuração por retração plástica, pois a resistência e dureza do concreto são muito baixas no estado fresco (WITTMANN *apud* TANESI e FIGUEIREDO, 1999; WANG *et al.*, 2000).

As fibras sintéticas têm se mostrado efetivas nas primeiras idades do compósito quando a matriz é fraca, e apresenta baixo módulo de deformação. Segundo Tolêdo e Sanjuán (1999), pequenos teores de fibras de polipropileno e sisal retardam o aparecimento da primeira fissura, e controlam a fissuração. Esse efeito se deve ao maior módulo de elasticidade das fibras em relação à matriz cimentícia. Segundo Wang *et al.* (2000), com apenas 0,1% de fibras de polipropileno pode-se reduzir a fissuração por retração plástica no concreto. Já para concretos com idades mais avançadas a melhora da tenacidade depende da quantidade de fibra e da sua durabilidade na matriz cimentícia (ACI-544, 1996).

As fibras de polipropileno, náilon e poliéster têm-se mostrado efetivas na redução da fissuração por retração plástica, mesmo com baixos volumes de adição (0,1%). Devido a essa eficácia as fibras poliméricas são hoje utilizadas em compósitos. Por exemplo, em 1997 cerca de 10% de todos os compósitos produzidos nos E.U.A. continham fibras de polipropileno (KURTZ, 1999). Ainda, as fibras de poliéster têm sido utilizadas para controle de fissuração por retração plástica-induzida (WANG e BACKER; CASAMATTA; e JAKEL *apud* ACI-544, 1996). Para este objetivo a adição de fibras é da ordem de 0,1% do volume.

#### 2.4.2 EFEITO DAS FIBRAS POLIMÉRICAS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Segundo Johnston (2001), as fibras na pasta de cimento, argamassa ou concreto podem ter pelo menos três efeitos importantes no estado endurecido destes materiais. Um dos efeitos é a tendência de aumento da tensão à qual a matriz fissa, entretanto, esta é uma afirmação genérica, a qual depende do tipo de esforço e fibra utilizada. Este reforço é mais evidente sob carregamentos que geram esforços de tração, como tração direta, flexão e cisalhamento. A amplitude do reforço depende do modo de carregamento e do tipo e quantidade de fibras.

Outro efeito das fibras, também dependente do modo de carregamento e do tipo e quantidade de fibras, é a melhora da capacidade de deformação ou ductilidade de materiais de natureza frágil, devida ao aumento da capacidade de absorção de energia ou tenacidade, caracterizada, em geral, pela área sob a curva *tensão x deformação* ou sob parte dela. O aumento da ductilidade e da tenacidade pode ocorrer mesmo quando o aumento da resistência é mínimo.

O terceiro efeito das fibras é a tendência de inibir ou modificar o desenvolvimento da fissuração no sentido de reduzir a abertura e o espaçamento entre as fissuras. O efeito depende do tipo e quantidade de fibras adicionadas, assim como da natureza do mecanismo de fissuração. Para Swamy (197-), esse efeito das fibras é mais importante, pois resulta em melhora de todas as propriedades ligadas à fissuração tais como, resistência, rigidez, ductilidade, energia de absorção, resistência ao impacto, fadiga e carregamento térmico.

O controle de abertura de fissuras é fundamental em peças de concreto armado, já que existe uma relação entre este parâmetro e a durabilidade do subsistema. Com a utilização das fibras, há um aumento do número de fissuras, mas com largura e área total menores (BALAGURU e SHAH *apud* TANESI e FIGUEIREDO, 1999).

As fibras poliméricas são utilizadas há mais de 15 anos. Na maioria dos casos, são adicionadas em baixo teor (menos de 1Kg de fibra/m<sup>3</sup> de concreto) com objetivo de reduzir a fissuração por retração durante o período de cura dos compósitos. Recentemente, as fibras poliméricas têm sido usadas em grandes teores para reparos estruturais, revestimentos de túneis e revestimento interno de tubos (BALAGURU e SLATTUM, 1995).

Metodologias para utilização de fibras sintéticas em baixos teores ainda não são bem definidas. Dependendo do objetivo da utilização e do modo de manuseio, podem ser necessários diferentes teores e dimensões das fibras (ACI-544, 1996).

Apesar da melhora de algumas propriedades de argamassas e concretos quando são adicionadas fibras sintéticas na sua produção, o emprego deste material tem sido pequeno na construção civil brasileira, pois os critérios de projeto não podem ser aplicados antes que todas as propriedades sejam totalmente compreendidas. Propriedades como tenacidade, resistências ao impacto e à fadiga têm sido amplamente pesquisadas, assim como a durabilidade das fibras sintéticas no interior de argamassas e concretos (AL-TAYYIB; PADRON *apud* KURTZ, 1999).

Balaguru, citado por Tanesi e Figueiredo (1999), realizou um programa experimental de argamassas com diversos tipos de fibras e, observou que a adição de fibras influencia o comprimento e abertura das fissuras. A área de abertura diminuiu 5% e 53% para teores de fibras de 0,1 e 0,2% (em volume), respectivamente. Estes resultados não parecem coerentes com outros autores, pois há uma diminuição muito grande do grau de fissuração para um pequeno intervalo entre os teores, sendo que ambos teores são muito inferiores ao volume crítico<sup>4</sup>. É importante destacar que este autor utilizou aceleradores, modificando assim o comportamento quanto à fissuração por retração plástica, pois esta depende não somente das tensões de tração, mas também do ganho de resistência da matriz com o tempo.

#### **a. Resistência à flexão, tenacidade, módulo de deformação e resistência à tração**

O concreto normalmente contém numerosas fissuras que se propagam sob tensão, diminuindo a resistência à tração do material. Inicialmente, acreditava-se que tanto a resistência à tração quanto à flexão do concreto poderiam ser aumentadas com introdução de fibras próximas umas das outras, onde estas obstruiriam a propagação de microfissuras, retardando o aparecimento de fissuras, aumentando assim sua resistência à tração. Entretanto, segundo Mehta e Monteiro (1994), a incorporação de fibras com volumes e tamanhos convenientes em concretos e argamassas não causa aumento considerável das resistências à tração e flexão, mas há um melhor desempenho quanto ao comportamento pós-fissuração desses materiais.

O concreto convencional rompe repentinamente quando sua resistência última à flexão for atingida. Por outro lado, o concreto reforçado com fibras continua a resistir a cargas consideráveis, mesmo com deformações bem superiores às de ruptura do concreto convencional (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

---

<sup>4</sup> O volume crítico de fibras é entendido como aquele para o qual a capacidade portante residual do compósito fissurado é a mesma da matriz, e é normalmente expresso em porcentagem (FIGUEIREDO, 2000).

Testes mecânicos estáticos para compósitos reforçados com fibra são baseados principalmente em carregamentos à tração e flexão. Para caracterizar estes comportamentos, é necessário medir as curvas de tensão-deformação (ou carregamento-deflexão), as quais refletem o efeito das fibras na tenacidade do compósito e no potencial de controle de fissuração (BENTUR e MINDESS, 1990).

Para Jelidi (1991), o ensaio mecânico mais significativo no comportamento de argamassas e concreto com fibras é o ensaio de tração na flexão. Nesse ensaio, a resistência do compósito à primeira fissura é geralmente próxima à resistência do material sem reforço. Entretanto, a fase pós-primeira fissura é diferente, e permite caracterizar o compósito com fibra. Esta fase se estende desde a primeira fissura (limite de proporcionalidade) até a ruptura do compósito.

Pelisser (2002) avaliou a resistência à tração na flexão de concretos com diferentes teores e comprimentos de fibras de PET e constatou resistências à tração na flexão superiores para os concretos reforçados com fibras, além de um aumento desta propriedade com o aumento no volume de fibras. O autor realizou, também, ensaio de tração por compressão diametral e concluiu não haver diferença significativa nesta propriedade quando se adicionou fibras ao concreto.

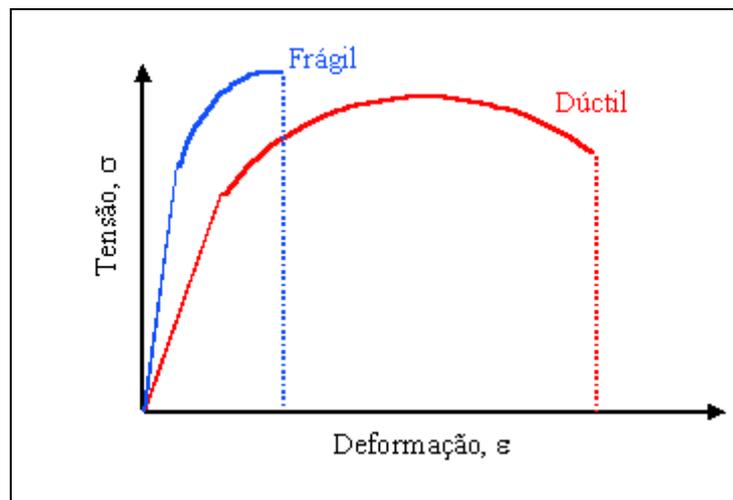
Para concreto reforçado com fibras (CRF), o conceito de tenacidade na flexão (que é medida pela energia absorvida) é normalmente usado para caracterizar seu desempenho, embora se saiba que ela depende do método de ensaio adotado. Além disso, há inúmeras incertezas quanto às formas de avaliação, interpretação e utilização de resultados de resistência à flexão (CHEN *et al.*, 1995). A tenacidade também é uma propriedade bastante influenciada pelas fibras, sendo dessa forma, muitas vezes empregada para caracterizar o desempenho de materiais compósitos.

Segundo Figueiredo (2000), a definição de tenacidade mais aceita atualmente é interpretada como a área sob a curva carga por deflexão, traçada em ensaio de flexão (ACI-544, 1996; BENTUR e MINDESS, 1990), que representa o trabalho dissipado no material até um certo nível de deflexão. Apesar desse valor ser utilizado na avaliação de materiais compósitos, possui a desvantagem básica de depender das dimensões do corpo-de-prova, bem como do sistema de aplicação dos esforços.

O mecanismo de tenacidade é bem explicado por Shah, citado por Mehta e Monteiro (1994):

*“O compósito suportará cargas cada vez maiores, após a primeira fissura da matriz, se a resistência das fibras ao arrancamento na primeira fissura é maior do que a carga na primeira fissuração;...em uma seção fissurada, a matriz não resiste a nenhuma tração e as fibras suportam todo o carregamento do compósito. Com um aumento de carga no compósito, as fibras tendem a transferir a tensão adicional para a matriz, através das tensões de aderência. Se essas tensões de aderência não excedem a resistência de aderência, pode haver uma fissuração adicional na matriz. Este processo de fissuração múltipla continuará até que haja ou o rompimento da fibra ou o seu arrancamento, devido a perda de aderência acumulada”.*

A Figura 2 mostra que o material frágil tem maior limite de escoamento e maior limite de resistência. No entanto, possui menor tenacidade devido à falta de ductilidade (área sob a curva é menor).



**FIGURA 2** - Comportamento de um material frágil e dúctil até a rupturas (PACIORNIK, 2002)

Para compósitos com fibras, segundo Tanesi e Figueiredo (1999), uma característica importante é o teor de fibras: quanto mais se aproximar do volume crítico, maior será a tenacidade do compósito. Dessa forma, as matrizes cimentícias perdem sua característica frágil, devido ao gasto de energia (trabalho realizado) para deformação plástica da fibra e seu arrancamento da matriz, em decorrência de um maior número de fibras e da diminuição de abertura das fissuras.

Valores de tenacidade superiores são obtidos quando alguns parâmetros são otimizados, como: dimensões das fibras, resistência da fibra e as propriedades da ligação fibra-matriz (WANG, 1994).

Para Chen e Chung (1996), o concreto reforçado com fibras curtas tem recebido considerável atenção recentemente devido à alta tenacidade e aumento da resistência à flexão e à tração. Estes autores pesquisaram concreto com adição de fibra de aço, polietileno de alto módulo de elasticidade e carbono, e observaram que as de polietileno são as que propiciam maior tenacidade ao concreto, comparativamente às fibras de aço e carbono, devido à combinação dos efeitos do seu módulo de elasticidade à tração, resistência à tração e alongamento na ruptura. Além disso, a boa dispersão das fibras na mistura colaborou para maior homogeneidade do compósito e maior tenacidade. Os autores concluíram, ainda, que a fibra de carbono, possuindo o menor módulo à tração, menor resistência e menor ductilidade entre as três fibras estudadas é a que obteve a maior resistência à tração, devido ao seu pequeno diâmetro, à maior ligação fibra-matriz e, também, à melhor dispersão das fibras.

Bauer e Cortez (2001), estudando argamassas com fibras de náilon e polipropileno, concluíram que o ensaio de tração na flexão traz poucas informações sobre o estágio pré-fissuração, importante para as argamassas de revestimento. Os autores observaram que as fibras reduziram o valor do módulo de deformação à compressão, e afirmaram que a influência das fibras no estágio pré-fissuração é marcante, com conseqüente aumento na capacidade de absorver deformações. No caso das fibras de náilon, a redução do módulo foi maior. Os autores atribuíram essa diferença, em grande parte, à geometria das fibras, particularmente ao fator de forma, quase quatro vezes maior que a fibra de polipropileno. Foi observado pelos autores, também, um aumento de tenacidade com o aumento do teor das fibras utilizadas.

De acordo com Zheng (1995), em alguns casos, a resistência à tração de concretos pode ser melhorada através da incorporação de fibras com pequeno diâmetro, em teor de 1% do volume de concreto. Entretanto, Shah, citado por Zheng (1995), comenta que volumes maiores de fibras sintéticas no concreto (acima de 15%) podem causar um substancial aumento na resistência à tração do material.

#### **b. Resistência à compressão**

O objetivo principal da adição de fibras ao concreto não é alterar sua resistência à compressão. Vários estudos avaliam resistência à compressão de maneira secundária e, como

apontou Armelin, citado por Figueiredo (2000), não há um consenso entre os resultados. Segundo Figueiredo (2000), os trabalhos apontam para uma redução nos valores obtidos para a resistência à compressão devido à má compactação do material. No entanto, como as fibras atuam como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, sejam elas produzidas por esforços de tração ou cisalhamento como ocorre no ensaio de compressão, o concreto também apresentará um ganho quanto à tenacidade, isto é, haverá um maior consumo energético após a fissuração do material.

Jelidi (1991) afirma que a resistência à compressão do concreto não varia com a presença das fibras, e que a presença de fibras na compressão pode aumentar a capacidade de deformação de matrizes não reforçadas. Segundo Swamy (197-), mesmo depois da ruptura completa, as fibras mantêm o compósito unido, tanto na tração quanto na compressão, sendo esta uma propriedade única de compósitos com fibra.

Pelisser (1992), utilizando fibras de PET em concreto, não notou diferença significativa na resistência à compressão dos concretos com fibra comparados aos concretos sem fibra, mostrando que não há influência destas fibras nesta propriedade.

### **c. Resistência ao impacto**

De acordo com Figueiredo (2000), as resistências a esforços dinâmicos como cargas explosivas, queda de massas, e cargas dinâmicas de compressão, flexão e tração são de 3 a 10 vezes maiores para os concretos reforçados com fibras. Isto ocorre devido à grande quantidade de energia dissipada no processo de arrancamento da fibra da matriz para a ruptura do material.

Reforçando a idéia do autor, cabe destacar ainda que no concreto reforçado com fibras há um aumento considerável na resistência ao impacto, pois o concreto se apresenta mais tenaz com a adição de fibras. Desta forma, à medida que se aumenta a tenacidade, há aumento também da resistência ao impacto e à fadiga.

Pelisser (2002) concluiu que há aumento na resistência ao impacto de concretos com fibras de PET em relação ao concreto sem fibras aos 35 dias de idade, de 10%, 233% e 533% para os teores de 0,05, 0,18 e 0,30% em volume de fibras, respectivamente.

Patel *et al.*, citados por Zheng (1995), estudaram as propriedades de concreto reforçado com fibras de poliéster e concluíram que, para adição de 1% de fibras no concreto (volume), a resistência ao impacto aumenta 75%, à tração por compressão diametral aumenta por volta de

9%, a resistência à flexão aumenta 7% e a resistência à compressão, 5%. Os autores não observaram mudança no módulo de elasticidade e resistência ao cisalhamento.

#### **d. Retração por secagem**

Segundo Zollo *et al.* e Wang *et al.*, citados por Wang *et al.* (1994), têm sido pesquisados os efeitos positivos do uso de fibras como reforço, no controle da retração por secagem e fissurações por retração do concreto. Não somente o teor de fibras é importante no controle da fissuração ou na distribuição das fissuras, mas também o comprimento, a forma, a textura de superfície da fibra, a densidade da interface fibra-matriz (SAVASTANO *apud* TANESI e FIGUEIREDO, 1999), e, em última análise, a aderência fibra-matriz.

A deformação devida à retração por secagem, quando restringida, é uma das maiores razões de fissuração do concreto (WANG *et al.*, 1994). Estas mudanças de volume, quando restringidas pela presença de agregado, armadura ou contato com outra superfície, geram tensões internas na massa de concreto que, ao superarem sua resistência, induzem à fissuração. Nas primeiras horas de idade, nas quais o concreto possui resistência muito baixa, o surgimento destas fissuras é mais pronunciado (TANESI e FIGUEIREDO, 1999).

### 3 DURABILIDADE DE FIBRAS EM ARGAMASSAS E CONCRETOS

As fibras utilizadas como reforço para concreto ou argamassa devem ser física e quimicamente compatíveis com o meio úmido e alcalino da matriz cimentícia. Certas fibras podem ser atacadas tanto por água quanto por álcalis presentes na pasta de cimento. Por exemplo, muitas fibras vegetais à base de celulose, como cóton, sisal e cânhamo não são compatíveis em meio úmido. Já as fibras de vidro e alguns tipos de poliéster, segundo Johnston (2001) são propensos à deterioração em contato com os álcalis do cimento.

#### 3.1 Durabilidade de diversas fibras

A durabilidade é um dos principais parâmetros de desempenho de argamassas e concretos reforçados com fibras sintéticas. Apesar dos estudos desenvolvidos sobre estes compósitos desde a década de 60, muitas dúvidas e controvérsias existem a respeito da sua durabilidade. Segundo projeto de norma NBR 6118/2001, a vida útil é de, no mínimo, 50 anos para materiais de construção. Desta forma, para materiais reforçados com fibras, há uma necessidade em avaliar seu desempenho ao longo do tempo.

O problema da durabilidade de compósitos está ligado à degradação química e, em certas ocasiões, à degradação física de alguns tipos de fibras em contato com o meio cimentício (PERA *apud* HOUGET, 1992). Segundo Accion, citado por Houget (1992), fibras de vidro, de PET e certos tipos de fibra de poliácrlonitrila possuem comportamento inadequado em ambientes básicos.

A matriz cimentícia constitui um ambiente básico contendo, em sua solução intersticial, íons  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{OH}^-$ , que são oriundos da dissolução do cimento Portland. As concentrações desses íons atingem valores máximos na interface fibra-matriz devido à alta porosidade desta zona (JELIDI, 1991). Quando não há compatibilidade entre a fibra e a matriz, não se pode esperar uma durabilidade satisfatória do conjunto, como no caso de fibra de vidro em matrizes cimentícias. Neste caso, ocorre deterioração natural das fibras devida aos álcalis do cimento, o que torna necessária a utilização de uma fibra especial, resistente aos álcalis (FIGUEIREDO, 2000).

O desempenho de fibras de vidro resistentes a álcalis em matriz de cimento é muito superior às fibras de vidro E<sup>5</sup>. Porém, devido à interação química entre a fibra resistente a álcalis e a pasta de cimento, o meio tem efeito na resistência e rigidez dos compósitos reforçados com estas fibras (SWAMY, 197-).

De acordo com Briggs, citado por Swamy (197-), as fibras de polipropileno são resistentes a ácidos e álcalis, e não são afetadas pela água. Testes indicam que tanto polipropileno como o náilon são duráveis em meio alcalino, presente no concreto (BALAGURU e SLATTUM, 1995; WANG *et al.*, 1994). As fibras de náilon resistem bem à radiação ultravioleta (UV), o que não ocorre para as fibras de polipropileno, sendo a deterioração para monofilamentos ainda mais rápida do que para forma fibrilada. Dessa forma, deve-se ter o cuidado de não usá-las em locais com possível fissuração e exposição das mesmas, quando sua contribuição é necessária (BALAGURU e SLATTUM, 1995).

As fibras orgânicas de origem vegetal, tais como a palha, sisal, casca de coco, celulose, etc., são normalmente utilizadas na produção de tijolos, telhas e cochos. Essas fibras também apresentam problema de durabilidade quando aplicadas em meios alcalinos, como no caso de matrizes de cimento. No entanto, podem ser utilizadas como uma alternativa interessante para as construções em meio rural ou em habitações populares que não exijam um desempenho tão elevado (FIGUEIREDO, 2000).

Segundo Marikunte e Soroushian (1994), as fibras naturais de celulose (sisal) são atacadas pela água de poro dos concretos, pois esta reage com a lignina e hemicelulose existentes no meio das lamelas das fibras de madeira. Esta reação enfraquece a ligação entre as células individuais que constituem as fibras naturais. Gram, citado por Marikunte e Soroushian (1994), obteve sucesso, em alguns casos, diminuindo a alcalinidade do meio cimentício com o uso de adições pozolânicas.

Balaguru e Slattum (1995) realizaram testes acelerados de durabilidade em meio alcalino com alguns tipos de fibra. Concluíram, nesta análise, que as fibras de poliéster, comparadas às fibras de náilon e polipropileno, têm sua tenacidade diminuída com o passar do tempo e, através de análise visual, notou-se uma desintegração das fibras de poliéster nas idades mais avançadas.

---

<sup>5</sup> Fibra de vidro E é um tipo de fibra comumente utilizada na indústria de plásticos reforçados. É produzida com vidro tipo E (elétrico) que se diferencia do vidro tipo A (alcalino) pela elevada resistividade elétrica, em razão do baixo teor de óxidos alcalinos em sua composição (CARVALHO *apud* OLIVEIRA, 2000).

Houget (1992) trabalhou com diversas fibras orgânicas em compósitos à base de cimento. Dentre elas, as fibras de PET sofrem fortes degradações químicas e físicas dentro de uma matriz cimentícia, ocorrendo a perda total da ductilidade do compósito. O autor constatou que, aos 90 dias de idade, o compósito com este tipo de fibra apresenta comportamento similar ao concreto convencional, fato observado também por Jelidi (1991), que afirma que isto ocorre devido à degradação progressiva e rápida das fibras de PET dentro da matriz cimentícia.

Pelisser (2002) trabalhou com diferentes teores de fibras de PET no concreto, e obteve o máximo valor de tenacidade para os teores máximos de fibras aos 35 dias de idade. Este valor diminuiu bruscamente aos 150 dias de idade, o que pode ser explicado pela degradação da fibra no interior do concreto. O autor observou, ainda, uma diminuição no módulo de elasticidade à compressão dos concretos com adição de fibras, sendo a diminuição mais significativa para os teores mais elevados, devido ao aumento da porosidade do concreto.

Entretanto, Zheng (1995) afirma que as fibras de poliéster propiciam um aumento no módulo de ruptura nas primeiras idades, mas os valores diminuem ou permanecem os mesmos nas idades mais avançadas.

Pelisser (2002) verificou que existe uma perda na resistência ao impacto com o passar do tempo, o que pode ser devido à degradação da fibra no interior de compósitos à base de cimento.

A Tabela 3 mostra dados sobre a durabilidade de algumas fibras utilizadas para reforço de concreto.

**TABELA 3 - Durabilidade de fibras para reforço de concreto (BENTUR e MINDESS *apud* ZHENG, 1995)**

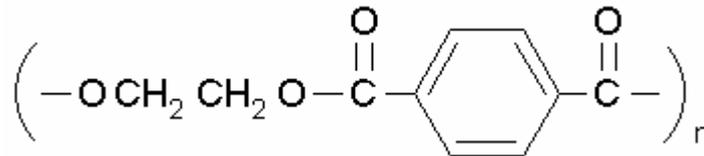
Tipo de fibra	Durabilidade do meio		Resistência térmica	
	Resistência à água	Resistência a álcalis	Comportamento em altas temperaturas	Temperatura na qual perdem a resistência (°C)
Aramid	boa	boa	perda progressiva de resist. à tração a 200°C para mais	400-500
Náilon	boa	boa	perda progressiva de resist. à tração a 100°C para mais	180-200
Polietileno	boa	boa	perda progressiva de resist. à tração a 100°C para mais	100-130
Polipropileno	boa	boa a regular	perda progressiva de resist. à tração a 100°C para mais	120-150
Poli(vinil álcool)	boa	boa	perda progressiva de resist. à tração a 200°C para mais	200-240
Carbono	boa	boa	diminuição gradual da resist. à tração a 300-350°C	500-600

Johnston (2001) lembra que, mesmo tendo conhecimento de que a fibra seja compatível com todos os constituintes do concreto, podem surgir problemas ligados ao tratamento superficial aplicado intencionalmente nas fibras para facilitar sua produção, ou introduzido não intencionalmente, como no caso de contaminantes na matéria-prima ou no processo de produção.

### 3.2 Durabilidade das fibras de PET

Desenvolvido pelos químicos ingleses Whinfield e Dickson, em 1941, o PET - poli(etileno tereftalato) é um material termoplástico, podendo ser reprocessado diversas vezes pelo mesmo ou por outro processo de transformação. Quando aquecidos a temperaturas adequadas,

esses plásticos amolecem, fundem e podem ser novamente moldados (SILVA, 2002). O PET é um polímero formado por uma reação química de policondensação, produzido pela reação do dimetil tereftalato com o etileno glicol, resultando na estrutura mostrada na Figura 3 (JELIDI, 1991; HOUGET, 1992; ZHENG, 1995).



**FIGURA 3** - Estrutura molecular do poli (etileno tereftalato)

Em 1998, o Brasil produziu 175 mil toneladas de plástico PET, sendo que a demanda mundial é de cerca de 2,2 milhões de toneladas por ano, com previsão de dobrar nos próximos cinco anos. Atualmente, o maior mercado para o PET pós consumo no Brasil é a produção de fibras para a fabricação de cordas (multifilamentos), fios de costura (monofilamentos) e cerdas de vassouras e escovas (SILVA, 2002).

Na produção das fibras, o polímero é fundido e extrudado em temperatura ambiente. As fibras são rapidamente esfriadas, tornando-se amorfas e frágeis. Os filamentos são rapidamente aquecidos acima de 80 °C (temperatura de transição vítrea do PET), para induzir a orientação cristalina e a cristalinidade. Finalmente, são aquecidas acima de 200 °C sob tensão para gerar uma estabilidade dimensional com o máximo de cristalinidade. As propriedades físicas e químicas podem sofrer modificações, alterando-se o processo de fabricação (ZHENG, 1995).

Na indústria de cordas, mais especificamente, a garrafa PET passa pelo processo de reciclagem primária, que consiste em selecionar, separar, limpar, triturar em pedaços uniformes, retornando à produção de resina na própria unidade. Desta forma, o material triturado (flake) é extrudado (derretido) formando uma fibra.

Jelidi (1991) afirma que as fibras de PET possuem as seguintes características: diâmetro que varia de 11 a 28µm, densidade de 1,4g/cm<sup>3</sup>, resistência à tração de 800 a 1100MPa, módulo de elasticidade de 8 a 17GPa e alongamento na ruptura de 10 a 30%, caracterizando uma excelente deformabilidade.

A expansão do PET na água é pequena, a perda de resistência quando imersa é nula, e possui uma elasticidade verdadeira: recuperação de 97% para um alongamento de 2%, e de 90% para um alongamento de 4% (NOZET *apud* HOUGET, 1992).

Depois da poliamida, é a fibra de PET que apresenta maior resistência à abrasão dentre as famílias dos polímeros, mesmo em atmosfera úmida, e é considerada um bom isolante dentro do intervalo de  $-40$  a  $+100^{\circ}\text{C}$  (HOUGET, 1992).

Segundo o comitê ACI-544 (1996), não há consenso sobre a durabilidade desse tipo de fibra em argamassas e concretos de cimento Portland. No entanto, Jakel, citado por Wang (1987), alegou sucesso no uso de fibras de poliéster no melhoramento dos produtos à base de cimento Portland.

Entretanto, diversos autores afirmam que o PET sofre deterioração quando em contato com o cimento, devido à hidrólise e dissolução de constituintes básicos da sua estrutura em meio alcalino (WANG *et al.*, 1987; JELIDI, 1991; VERRONIQUE, 1992; JOHNSTON, 2001).

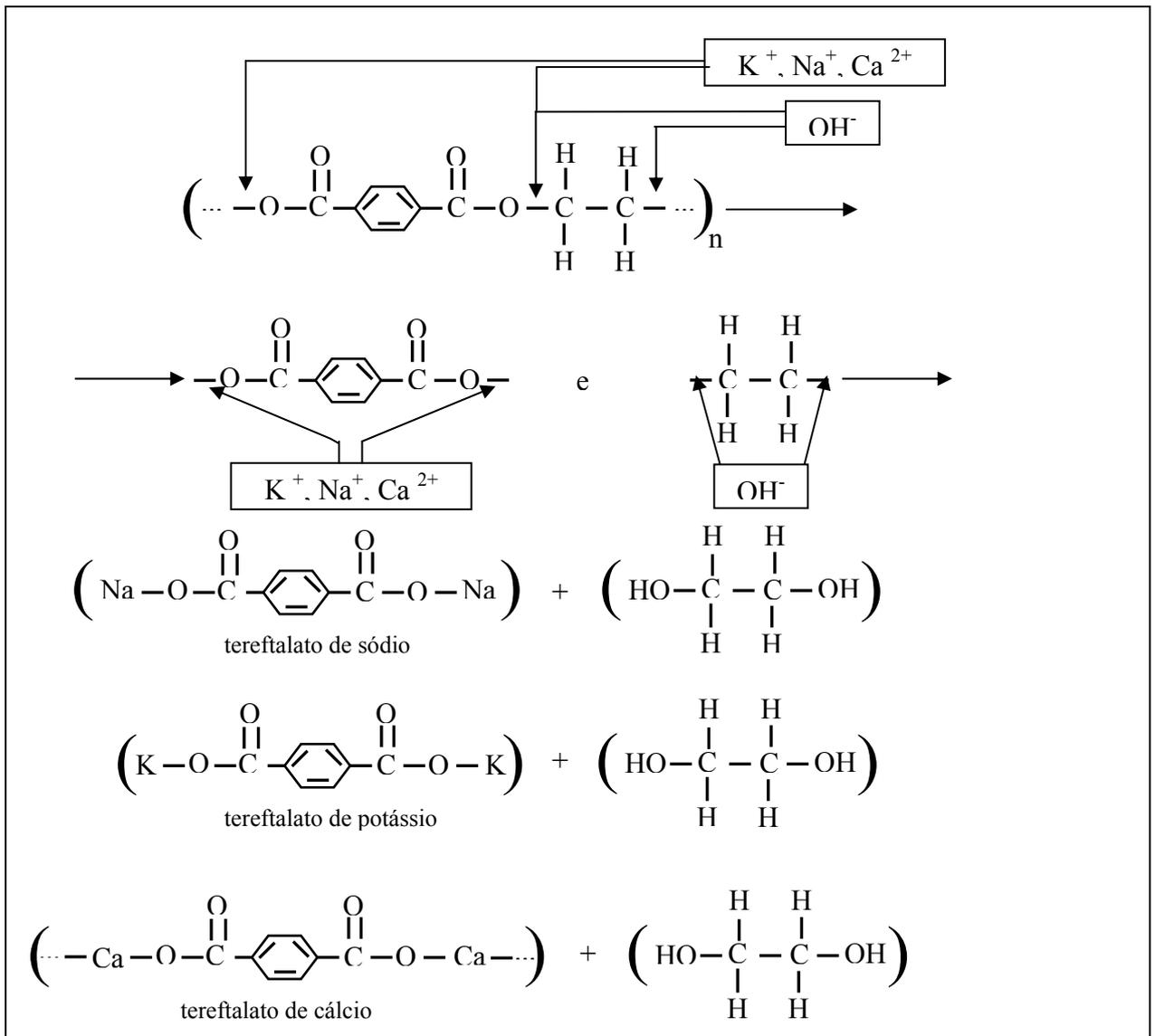
Jelidi (1991) e Houget (1992) afirmam que as reações de degradação das fibras de PET provocam uma perda de parte das propriedades de reforço dos compósitos, diminuindo sua tenacidade e ductilidade.

Jelidi (1991) afirma que as fibras de poliéster sofrem degradação ao longo do tempo dentro de pastas de cimento. Na degradação ocorrem dois fenômenos: diminuição do diâmetro das fibras com o tempo e deterioração da superfície da fibra através das incrustações de cristais hexagonais de hidróxido de cálcio, que causam cortes mais ou menos profundos. Esta diminuição progressiva do diâmetro e a deterioração física da fibra causam uma perda de massa e, portanto, uma perda de resistência.

Segundo o autor, a degradação física causa redução das propriedades iniciais das fibras, tais como, resistência à tração, módulo de elasticidade e alongamento na ruptura. Com isso, as fibras não asseguram mais seu papel de reforço, ocorrendo uma diminuição ou até mesmo ausência de tenacidade e ductilidade do compósito.

O mecanismo de degradação química da fibra de PET consistiria em uma reação de depolimerização, que divide parcial ou totalmente a cadeia em dois grupos: do anel aromático e do éster alifático. Sobre estes agrupamentos vão se fixar, respectivamente, os íons alcalinos e os íons hidroxilas.

Os íons  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{K}^{+}$  e  $\text{OH}^{-}$  nas ligações C-O, C-O-C e O-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-O atacam o PET, levando à divisão do mesmo e a formação de produtos alcalinos-tereftaláticos e de etileno glicol. As reações de hidrólise, de saponificação e de divisão transformam o PET em 2 produtos: o tereftalato de sódio e/ou potássio e/ou cálcio e etileno glicol (JELIDI, 1991). A Figura 4 ilustra o mecanismo de degradação química do PET.



**FIGURA 4** - Princípio esquemático das reações de depolimerização do PET (JELIDI, 1991)

De acordo com Jelidi (1991), a diminuição do diâmetro das fibras de PET já é detectável a partir dos 28 dias. Ela se acentua com o tempo, de tal forma que a fibra é totalmente retalhada aos 90 dias, e quase inexistente aos 180 dias, sendo distinguido seu local pela alteração na morfologia e aspecto estrutural nos limites da interface fibra-matriz. Aos 360 dias, a fibra desaparece, dando lugar aos produtos e resíduos de sua degradação e a cristais de hidróxido de cálcio, de CSH e de etringita.

Atualmente, o uso de fibras de PET em compósitos à base de cimento é impedido por razões de durabilidade. Esta propriedade pode ser eventualmente melhorada por tratamento de enzimação da superfície da fibra, por ajuda de um polímero de proteção dentro do cimento ou pela modificação da composição da matriz cimentícia (JELIDI, 1991).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Planejamento experimental

Tendo em vista os objetivos propostos nesta pesquisa, foi desenvolvido um programa experimental que permitisse identificar alguns agentes de degradação das fibras de PET e verificar a degradação das mesmas quando imersas em materiais à base de cimento.

No intuito de identificar, de forma isolada, alguns fatores de degradação<sup>6</sup> das fibras de PET, as mesmas foram expostas a soluções agressivas (soluções básicas, ácidas e salinas) durante 5 meses. Após a exposição, as fibras foram analisadas qualitativamente por espectroscopia no infravermelho e por microscopia eletrônica de varredura. A descrição completa da metodologia adotada nesta etapa é feita no item 4.3 adiante.

A degradação das fibras de PET em matriz cimentícia foi estudada em corpos-de-prova de argamassa simples de cimento e areia, e, para a verificação desta degradação, foram adotados os seguintes indicadores de degradação<sup>7</sup>: ensaios de compressão, de tração por compressão diametral e de tração na flexão e, ainda, análise em microscópio eletrônico de varredura.

As variáveis independentes adotadas no estudo de degradação das fibras de PET em materiais à base de cimento foram as seguintes:

- ✓ **idade:** em 3 níveis (28, 90 e 150 dias);
- ✓ **ambientes de exposição:** em 5 níveis (água do mar sintética, solução de MgSO<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, laboratório e água deionizada);
- ✓ **tempo de cura:** em 2 níveis (14 dias de cura submersa em água com cal previamente à exposição e exposição imediata após o desmolde);
- ✓ **teor de fibra:** em 2 níveis (0% e 0,5% em relação à massa de cimento).

As variáveis dependentes escolhidas para avaliar o efeito das fibras e sua eventual degradação nos corpos-de-prova de argamassa foram:

- ✓ resistência à compressão axial;
- ✓ resistência à tração por compressão diametral.

---

<sup>6</sup> Fatores de degradação são agentes ambientais que reconhecidamente causam degradação de um determinado material (JOHN, AGOPYAN, PRADO, 1997).

<sup>7</sup> Segundo os mesmos autores citados acima, indicadores de degradação são as propriedades mensuráveis utilizadas para medir o avanço da degradação na capacidade do desempenho do produto em uso.

Foram testados quatro corpos-de-prova para cada combinação de variáveis, o que permitiu a análise dos resultados pelo método estatístico ANOVA (análise de variâncias) com 0,5% de significância, exceto quando apontado outro valor.

Os resultados de ensaios de tração na flexão em corpos-de-prova de argamassa também foram escolhidos como variáveis dependentes. Nesse caso, foram analisados 3 corpos-de-prova para cada combinação de variáveis independentes, a saber:

- ✓ **idade:** em 3 níveis (28, 60 e 90 dias);
- ✓ **ambientes de exposição:** em 5 níveis (água do mar sintética, solução de  $MgSO_4$ ,  $CO_2$ , laboratório e água deionizada);
- ✓ **teor de fibra:** em 2 níveis (0% e 1,0% em relação à massa de cimento).

Para os ensaios de tração na flexão, o tempo de cura adotado para os corpos-de-prova foi de 14 dias, tendo sido os mesmos mantidos submersos em água com cal previamente à exposição.

As variáveis dependentes, também analisadas por análise de variâncias, foram:

- ✓ resistência à tração na flexão;
- ✓ módulo de elasticidade;
- ✓ tenacidade.

Os resultados dos ensaios foram analisados estatisticamente por meio do programa computacional *Statgraphics plus for Windows*.

## 4.2 Caracterização dos materiais

Além das fibras de PET, foram utilizados cimento e areia na confecção dos corpos-de-prova de argamassa, cujas caracterizações são apresentadas a seguir.

### 4.2.1 CIMENTO

Foram empregados dois tipos de cimento na confecção dos corpos-de-prova de argamassa, apesar de não ter sido esta uma variável de estudo. Os cimentos utilizados - CPV-ARI e CII-F32, fornecidos pela Itambé - foram selecionados por não possuírem qualquer tipo de adição pozolânica, o que alteraria a composição da água de poro dos corpos-de-prova, podendo afetar, dessa forma, a durabilidade das fibras. As características químicas e físicas dos cimentos estão apresentadas nas Tabelas 4 a 7.

A caracterização física e química dos cimentos, fornecida pelo fabricante, é apresentada nas Tabelas 4, 5, 6 e 7.

**TABELA 4 - Caracterização química do cimento CP V ARI**

	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	P. Fogo	CaO L.	R. Ins.	Eq. Alc.
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Média	4,39	18,71	2,47	60,11	5,13	3,12	3,42	1,66	0,87	0,60
Sd	0,22	0,38	0,07	0,41	0,30	0,09	0,15	0,27	0,10	0,02
Min	4,18	18,04	2,41	59,42	4,93	2,99	3,25	1,35	0,70	0,57
Max	4,97	19,55	2,62	60,68	5,99	3,27	3,67	2,27	0,97	0,64

**TABELA 5 - Caracterização física do cimento CP V ARI**

	Exp. Quente mm	Tempo de Pega (min)		Cons. Normal %	Blaine cm <sup>2</sup> /g	#200 %	# 325 %	Resistência à Compressão (MPa)			
		Início	Final					1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
Média	0,73	167	223	29,7	4118	0,19	1,84	22,6	34,7	40,1	50,0
Sd	0,26	9,8	11,9	0,6	36,01	0,08	0,39	0,4	0,7	0,6	0,2
Min	0,50	155	205	28,6	4080	0,10	1,20	22,0	33,5	39,1	49,6
Max	1,00	180	240	30,4	4210	0,40	2,80	23,5	35,9	41,3	50,4

**TABELA 6 - Caracterização química do cimento CP IIF 32**

	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	P. Fogo	CaO L.	R. Ins.	Eq. Alc.
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Média	4,29	17,97	2,50	59,73	5,19	3,00	5,34	1,61	1,13	0,56
Sd	0,06	0,24	0,04	0,28	0,15	0,09	0,18	0,20	0,11	0,01
Min	4,22	17,59	2,44	59,17	4,99	2,82	5,02	1,32	0,93	0,55
Max	4,42	18,36	2,59	60,06	5,48	3,09	5,70	1,96	1,30	0,57

**TABELA 7 - Caracterização física do cimento CP IIF 32**

	Exp. Quente mm	Tempo de Pega (min)		Cons. Normal %	Blaine cm <sup>2</sup> /g	#200 %	# 325 %	Resistência à Compressão (MPa)			
		Início	Final					1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
Média	0,82	161	220	26,3	3189	2,85	12,90	16,5	27,1	33,2	40,8
Sd	0,25	7,8	7,4	0,2	29,82	0,35	1,15	0,3	0,6	0,8	0,7
Min	0,50	150	210	26,0	3130	2,40	11,30	16,0	26,0	31,6	39,3
Max	1,00	170	230	26,6	3220	3,60	14,20	16,9	27,9	34,7	41,9

#### 4.2.2 AREIA

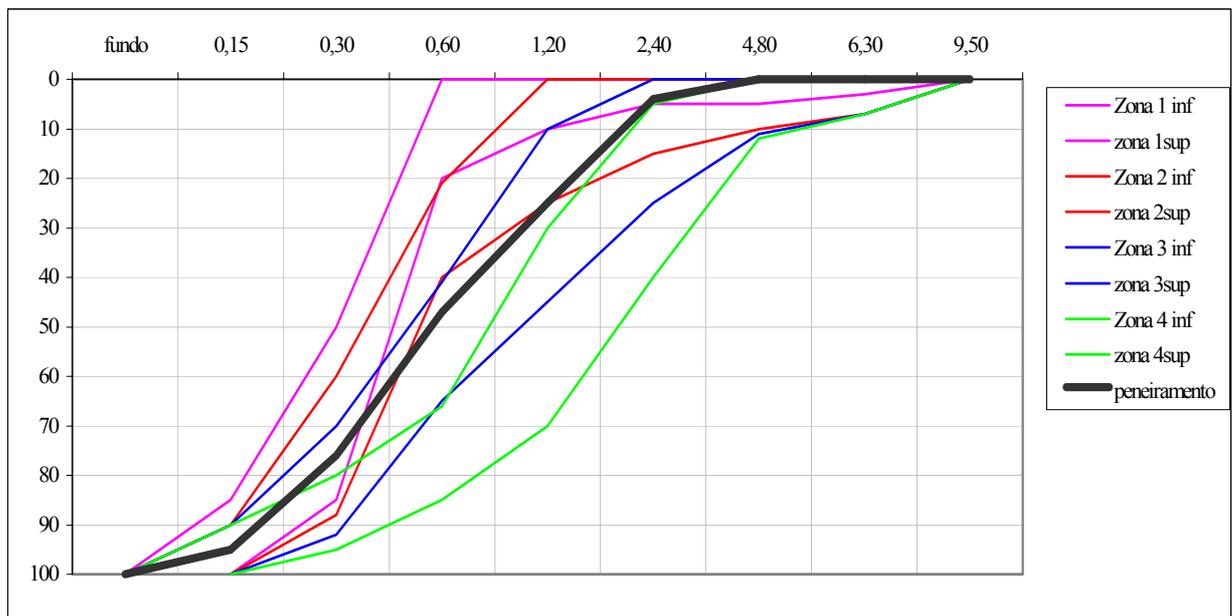
Para confecção dos corpos-de-prova de argamassa, foi empregada uma areia classificada como média (Zona 3, conforme classificação da NBR 7217/87). A composição granulométrica

da areia foi realizada de acordo com a norma para agregado miúdo (NBR 7217/87); massa unitária conforme NBR 7251/82; índice de pulverulento de acordo com NBR 7219/87; e impurezas orgânicas e húmicas, conforme NBR 7220/87.

Os resultados do ensaio de granulometria da areia encontram-se na Tabela 8 e Figura 5, e dos outros ensaios da Tabela 9.

**TABELA 8 - Distribuição granulométrica da areia (NBR 7217/87)**

Peneiras (mm)	Massa (g)		% retida		% retida média	% retida acumulada
4,8	0,3	0,9	0,06	0,2	0	0
2,4	20,5	24,2	4,11	4,85	4	4
1,2	104,5	105,2	20,93	21,08	21	25
0,6	108,7	108,9	21,81	21,82	22	47
0,3	142,1	141,5	28,51	28,36	29	76
0,15	91,1	92,9	19,48	18,62	19	95
fundo	25,4	25,4	5,1	5,09	5	100
Total	498,4	499	100	100	100	



**FIGURA 5 - Composição granulométrica da areia**

**TABELA 9 - Características da areia**

Módulo de finura	2,47
Diâmetro máximo	2,4 mm
Massa unitária	1,46 kg/dm <sup>3</sup>
Material Pulverulento	1,5%
Matéria orgânica	< 300 ppm

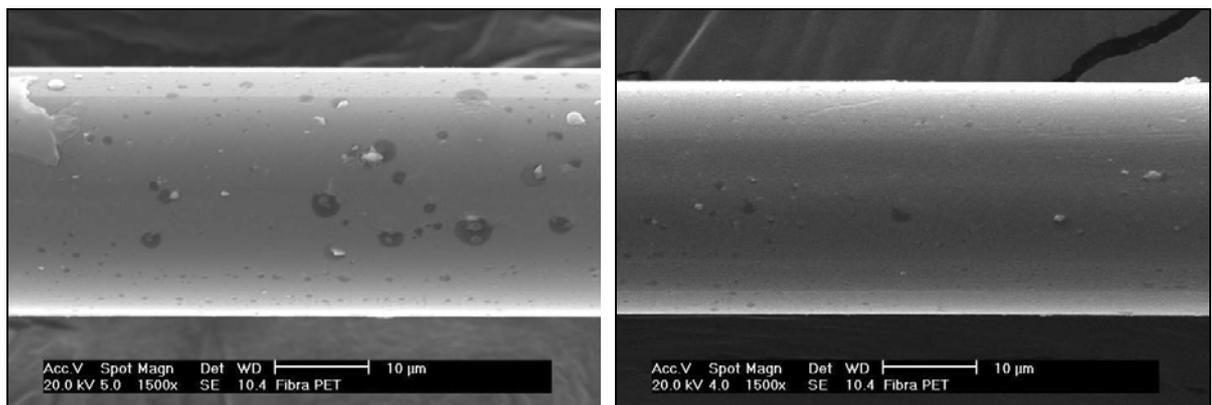
### 4.2.3 FIBRAS DE PET

Foi realizada a caracterização físico-mecânica das fibras através da determinação da sua textura e diâmetro, absorção de água, densidade, temperaturas de transição vítrea e de fusão, e também de propriedades mecânicas como resistência à tração, tenacidade e módulo de elasticidade. Os métodos utilizados são descritos a seguir.

#### a. Seção transversal e textura

As fibras de PET utilizadas nesta pesquisa foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Na análise, observou-se que as fibras possuem seção transversal circular, com diâmetro que varia entre 25 e 30 $\mu\text{m}$ , como mostra a Figura 6.

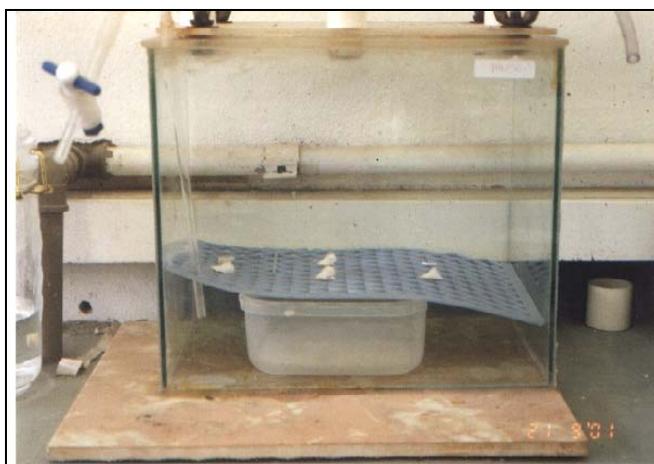


**FIGURA 6** - Aspecto superficial das fibras de PET em microscópio eletrônico de varredura

A textura superficial das fibras é lisa, mas apresenta uma série de manchas que podem ser traduzidas como pequenos defeitos superficiais. A causa do aparecimento desses poros ou incrustações não foi determinada, mas provavelmente os mesmos se devem a um processo de remoção de alguma substância volátil durante a secagem das amostras ou à própria técnica de obtenção das fibras.

### b. Absorção de água

Para determinar a absorção de água foi utilizada uma técnica de pesagem proposta por PIRES (2001)<sup>8</sup>. As amostras de fibras (fundidas umas às outras nas pontas) foram mantidas em ambiente com umidade relativa constante de 75% e uma temperatura aproximada de 20°C. Para tanto, foi utilizado um recipiente vedado, dentro do qual foi colocada uma solução supersaturada de NaCl, como corpo de chão, garantindo umidade constante. O recipiente, mostrado na Figura 7, foi mantido no interior de uma sala climatizada para garantir constância de temperatura.

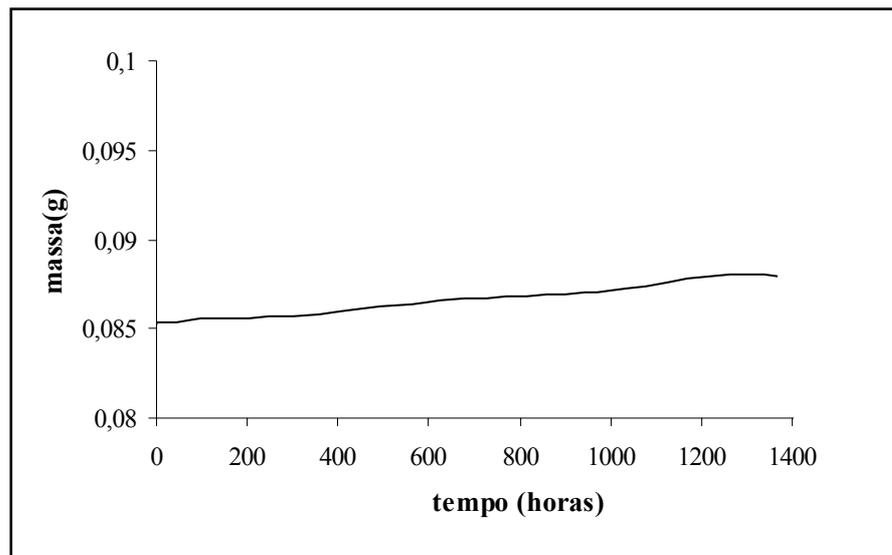


**FIGURA 7** - Recipiente para ensaio de absorção de água das fibras de PET em ambiente a 75% de umidade relativa

A massa inicial de cada amostra (massa seca) foi anotada e, por um período de várias semanas, foram feitas medidas das massas das amostras. Com os valores obtidos, foi traçada uma curva *tempo x massa* para análise do teor de água absorvido, mostrada na Figura 8. O aumento de massa por absorção de umidade pelas fibras é linear e, ao final de nove semanas, é de cerca de 3%.

---

<sup>8</sup> Comunicação pessoal



**FIGURA 8** - Gráfico de variação de massa das fibras de PET expostas em ambiente a 75% de umidade relativa

### c. Densidade

Para a determinação da densidade foi utilizado um multiplicnômetro, que consiste em um instrumento designado especificamente para determinar a verdadeira medida do volume de diferentes quantidades de materiais sólidos, equipamento este localizado no LabMat da UFSC.

A técnica utiliza o princípio de Arquimedes de deslocamento do fluido para se determinar o volume. O deslocamento do fluido é dado por um gás que possa penetrar nos pequenos poros da amostra a fim de garantir uma máxima exatidão. Por esta razão, o gás hélio é recomendado, uma vez que seu átomo tem pequena dimensão que garante penetração dentro dos poros e vazios da amostra com dimensão aproximada de  $1\text{Å}$  ( $1/10.000.000$  mm). Outros gases, como o nitrogênio, podem ser usados, geralmente sem diferença nos resultados.

Foram feitas cinco medidas de volume de uma mesma amostra através do multiplicnômetro. Com estes volumes e com a massa da amostra, foram determinadas as densidades através da média aritmética dos valores, resultando em  $1,3311\text{ g/cm}^3$ .

### d. Temperaturas de transição vítrea e de fusão

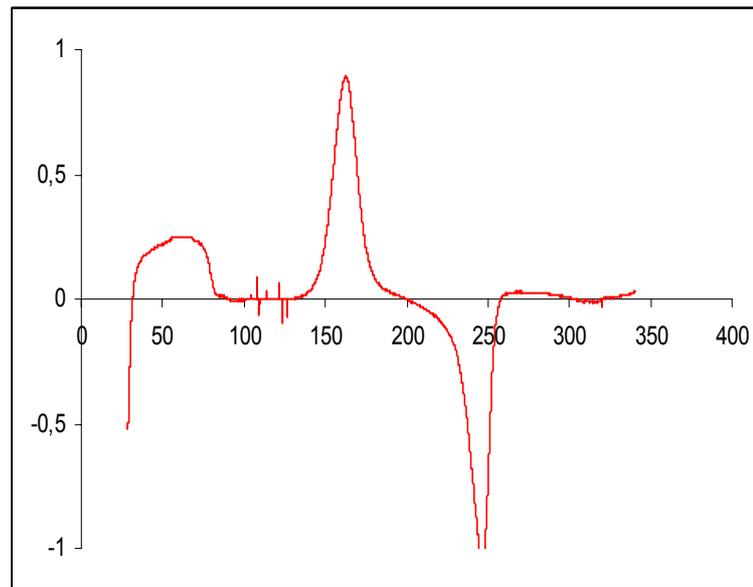
O ensaio para a determinação das temperaturas de transição vítrea e de fusão foi realizado por Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC), uma das técnicas mais utilizadas para caracterização de polímeros. Foi utilizado um DSC da marca Shimadzu que possui um nível de ruído muito baixo, permitindo uma medição confiável de reações endotérmicas e exotérmicas. O

equipamento está localizado no Laboratório de Polímeros do Departamento de Química da UFSC.

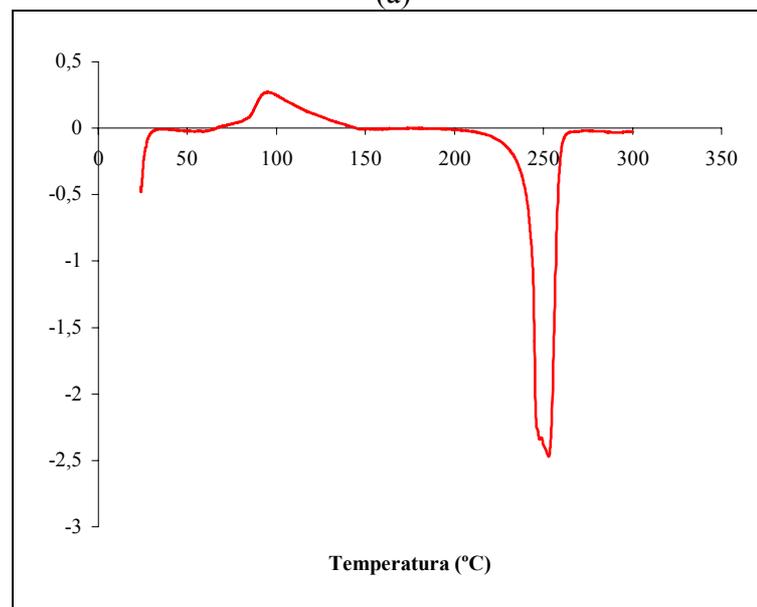
O equipamento de DSC mede o fluxo de calor por manter um balanço térmico entre a amostra e a referência, que estão confinadas em calorímetros separados. O compartimento da amostra possui um aquecedor e um detector que registra qualquer variação de calor. Quando a amostra é aquecida, a diferença de temperatura é detectada por um termômetro. Logo, há uma diminuição na intensidade do aquecimento para que a amostra volte ao equilíbrio térmico. Esta diferença de energia entre a amostra e a referência é então gravada e ampliada. Os dados são armazenados em um computador onde se pode visualizar a curva característica do comportamento de cada amostra (UFBA, 2002).

A seguir serão mostrados dois gráficos de DSC com intuito de comparar propriedades de PET não reciclado e reciclado respectivamente. A Figura 9 (a) mostra o gráfico DSC do material PET não reciclado e, nota-se que a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) encontra-se em torno de  $79^\circ\text{C}$ . Observa-se, ainda, um pico de cristalização ( $T_c$ ) em  $162^\circ\text{C}$  e um pico de fusão ( $T_f$ ) em  $247^\circ\text{C}$ .

A Figura 9 (b) mostra o gráfico de DSC das fibras de PET utilizadas nesta pesquisa, pode-se observar a temperatura de fusão ( $T_f$ ) em torno de  $252,8^\circ\text{C}$  e a temperatura de cristalização ( $T_c$ ) em aproximadamente  $95^\circ\text{C}$ , valor este, inferior à temperatura de cristalização do PET não reciclado, fato que pode ser atribuído a uma pequena oxidação do material durante seu processo de reutilização.



(a)



(b)

**FIGURA 9** - Curva de calorimetria diferencial de varredura (DSC) - (a) de PET não reciclado e (b) fibras de PET reciclada, em atmosfera dinâmica de nitrogênio a 50 ml/min, com taxa de aquecimento de 10°C/min

**e. Determinação das propriedades mecânicas das fibras: resistência à tração, tenacidade e módulo de elasticidade**

As fibras foram submetidas a ensaio de tração conforme método de ensaio descrito pela norma ASTM D3822/96, em feixes de fibras com comprimento de 25,4 cm. Calculou-se a resistência à tração, a tenacidade e o módulo de elasticidade (inicial) das fibras por este método de ensaio.

A determinação destas propriedades mecânicas foi realizada em prensa Instron localizada no Laboratório de Microestrutura (LME) da Escola Politécnica da USP. As condições experimentais constam na Tabela 10.

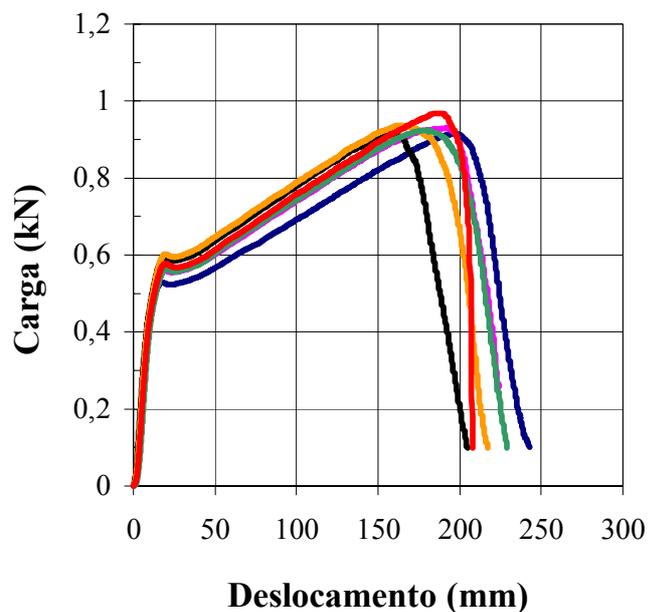
**TABELA 10** - Condições experimentais empregadas no ensaio de tração das fibras de PET

Velocidade de carregamento	25,4 mm/min
Temperatura	23 °C
Umidade relativa do ar	50%

Os ensaios foram realizados em seis amostras, e os resultados individuais e médios são apresentados na Tabela 11 e Figura 10. Através do ensaio, determinou-se também a densidade linear das fibras, cujo valor é 3840 tex, o que corresponde a cerca de 3,84 kg/km.

**TABELA 11** - Resultados dos ensaios de tração nas fibras PET, conforme ASTM D 3822-96

Nº amostra	Resistência à tração (cN/tex)	Alongamento na ruptura (%)	Tensão de escoamento (cN/tex)	Alongamento até o escoamento (%)	Módulo de elasticidade inicial (cN/tex)	Tenacidade (cN/tex)
1	23,83	78,0	13,6	6,30	3,14	1380,22
2	24,24	75,6	14,6	6,90	3,26	1402,36
3	23,85	61,8	15,3	7,30	3,44	1128,59
4	24,40	64,2	15,6	7,50	3,27	1197,65
5	24,06	70,1	14,6	7,90	2,71	1266,44
6	25,21	74,4	14,9	7,20	2,99	1402,27
<b>Média</b>	<b>24,26</b>	<b>70,7</b>	<b>14,77</b>	<b>7,18</b>	<b>3,14</b>	<b>1296,25</b>



**FIGURA 10** - Gráfico deslocamento x carga de feixes de fibra PET

## f. Espectroscopia no Infravermelho

Para as análises, foi empregado um equipamento Perkin Elmer modelo 16 PC por transformada de Fourier (FT-IR), localizado na Central de Análises do Departamento de Química da UFSC.

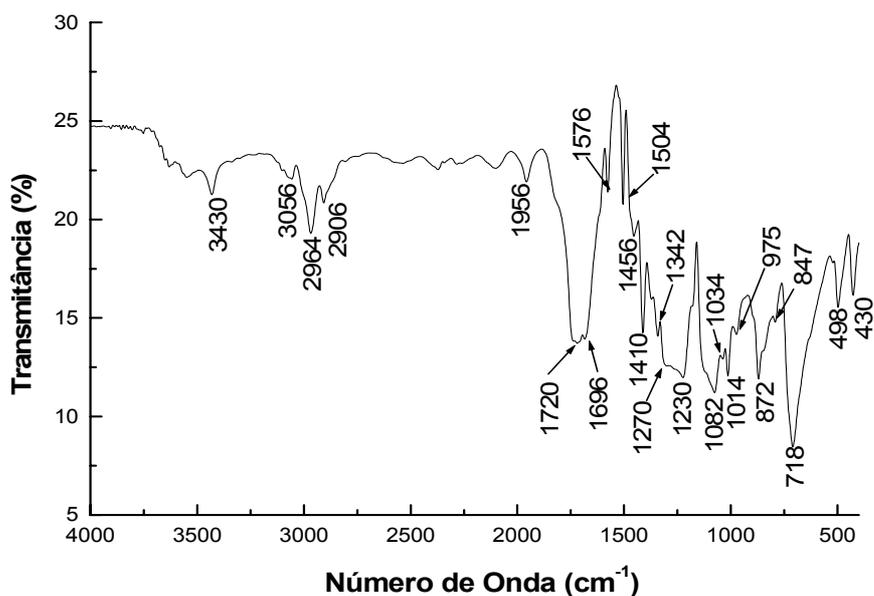
Materiais poliméricos podem ser analisados na forma de filmes. Para formar este filme, foram testadas duas formas diferentes. Uma delas, sem sucesso, foi realizada em uma máquina extrusora, com objetivo de fundir as fibras. A segunda tentativa de formação de filme foi feita com um forno elétrico a uma temperatura próxima da temperatura de fusão destas fibras (250°C), utilizando um papel crpto<sup>9</sup> como base. Dessa forma, obteve-se um filme pouco homogêneo, mas adequado à realização do ensaio. Entretanto, devido à necessidade de aquecimento a altas temperaturas para obtenção do filme e à possibilidade de influência desse processo sobre os resultados, a técnica foi abandonada.

Optou-se, então, pela preparação das amostras em pastilha de KBr. Para tanto, as fibras foram picotadas e misturadas com 80-100mg de KBr, e a mistura foi compactada a vácuo, formando pastilhas transparentes.

A Figura 11 apresenta o espectro de transmitância no infravermelho da fibra de PET utilizada nesta pesquisa e, a identificação das bandas foi feita com base na literatura consultada e encontra-se na Tabela 12 (JELIDI, 1991; KOENIG, 1992; HOUGET, 1992; HOLLAND e HAY, 2002). Com intuito de comparar novamente as propriedades do PET reciclado e não reciclado, a Figura 55 do Anexo 1 trás o espectro de transmitância no infravermelho obtido na análise de material PET sem nenhum processo de reciclagem.

---

<sup>9</sup> Crpto é um material que suporta elevadas temperaturas



**FIGURA 11** - Espectro no infravermelho da fibra de PET

**TABELA 12** - Análise das bandas do espectro no infravermelho das fibras de PET

$\text{cm}^{-1}$	ligação
3430	C=O
3056	C-H do anel
2964	CH <sub>2</sub>
	C-H estiramento alifático
2906	CH <sub>2</sub>
1956	
1720	C=O
1696	C=O
1576	
1504	
1456	CH <sub>2</sub>
	
1410	
1342	CH <sub>2</sub>
1230	C-O
1082	C-O
	CH do anel
1034	O-CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -O
1014	
	CH do anel
	O-C
975	O-CH <sub>2</sub>
	C-O
870	
	CH do anel
	CH <sub>2</sub>
847	CH do anel
718	CH do anel
498	
	C-(O)-O
	C=O

### 4.3 Avaliação da degradação das fibras imersas em soluções agressivas

O estudo da degradação das fibras de PET foi realizado por imersão das fibras em diversas soluções agressivas durante 150 dias, análise por espectroscopia no infravermelho e microscopia eletrônica de varredura (MEV). O objetivo foi verificar a ocorrência de alguma alteração ou degradação das fibras, por meio de comparação qualitativa com a fibra virgem (não exposta aos ambientes agressivos).

Foi adotada a metodologia proposta por SEGRE (1998), em que amostras de fibras são imersas nas seguintes soluções:

- a. solução de NaOH a 0,1M;
- b. soluções de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 0,1, 1 e 10M;
- c. água do mar sintética;
- d. água de-ionizada (controle).

Além desses ambientes propostos por SEGRE, as fibras também foram imersas em:

- a. solução de Lawrence;
- b. solução saturada de Ca(OH)<sub>2</sub>.

O ácido forte simula a exposição do concreto a chuvas ácidas e eventual contato com substâncias ácidas, tais como construções agrícolas (devido à presença de ácido lático e acético no alimento dos animais, com pH<4,5) (BELIE *et al.*, 1997), tubos para passagem de esgoto, águas subterrâneas, pisos de indústrias químicas, entre outros. A solução básica (NaOH) foi escolhida por ser esta uma base forte, simulando um ambiente altamente agressivo a certos tipos de fibras, como citado no Capítulo 3.

A água do mar sintética, obtida pela mistura de 29,25g/L de NaCl e 9,85g/L de MgSO<sub>4</sub> (CAPEL, 2001), permite avaliar a degradação das fibras de PET expostas em regiões litorâneas e em construções que entrem em contato com o mar.

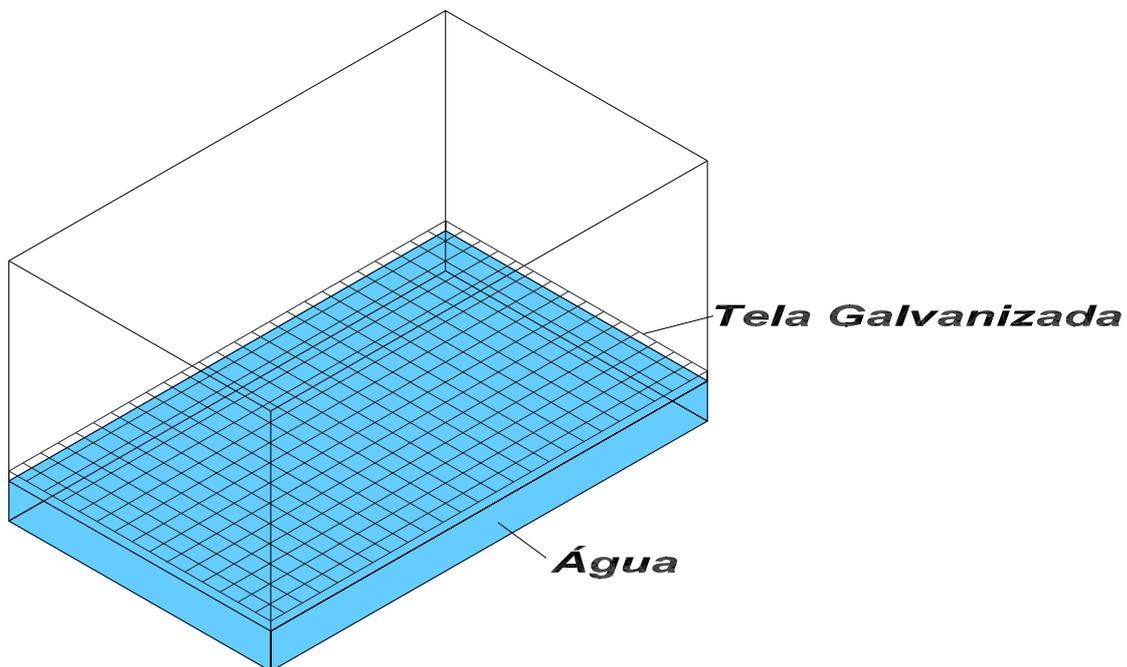
A solução saturada de hidróxido de cálcio foi escolhida, pois este composto é um dos principais produtos de hidratação do cimento, e produz um ambiente altamente alcalino, que segundo John, Agopyan e Prado (1997), possui pH (12,4) similar à água de poro de materiais à base de cimento Portland.

A solução de Lawrence simula a água de poro de materiais à base de cimento, e tem a seguinte concentração: 0,48 g/L de Ca(OH)<sub>2</sub> + 3,45 g/L de KOH + 0,88 g/L de NaOH (JELIDI, 1991).

Previamente à imersão nessas soluções, as fibras de PET foram lavadas com água deionizada e, após isso, com álcool etílico para acelerar a secagem. Foram então mantidas em estufa a 40 °C, até constância de massa.

Após o preparo, as soluções foram distribuídas em frascos, nos quais foram colocadas pequenas porções de fibras de PET. Os frascos vedados contendo as fibras imersas nas soluções agressivas foram mantidos a 5, 25 e 50 °C, durante 150 dias. Os frascos que permaneceram a 5 °C foram armazenados em geladeira. Os frascos que permaneceram a 25 °C foram colocados em uma caixa de isopor parcialmente tampada em sala climatizada. Os frascos a  $50 \pm 5^\circ\text{C}$  foram mantidos em uma caixa de isopor fechada contendo uma lâmina d'água de aproximadamente 8cm, onde permaneceram sobre uma grade.

Para manter a temperatura de  $50 \pm 5^\circ\text{C}$  constante por mais tempo possível, como mostra a Figura 12, foram introduzidos aquecedores na água para que, quando houvesse redução da temperatura, os mesmos fossem automaticamente ligados até que a temperatura da água se igualasse com a do ar, controlada por um termostato.



**FIGURA 12** - Esquema de montagem para ambientes a  $50 \pm 5^\circ\text{C}$

Após a exposição às soluções agressivas durante 150 dias, as fibras foram analisadas por espectroscopia no infravermelho e por microscopia eletrônica de varredura, para análise da eventual degradação das mesmas.

#### 4.3.1 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO

A radiação de infravermelho faz parte do espectro eletromagnético, incluindo as regiões visíveis e de microondas. As moléculas absorvem radiações com frequência entre 10.000 e 100  $\text{cm}^{-1}$  que são convertidas em energia de vibração molecular. Obtém-se, no ensaio, um espectro resultante de vários fenômenos relativos à vibração rítmica molecular (SILVERSTEIN, BASSLER, MORRILL, 1991).

O espectro é constituído por bandas, cuja posição é dada em função do comprimento de onda ( $\text{Å}$  ou  $\mu\text{m}$ ) ou do número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ ), que é proporcional à energia de vibração. A intensidade das bandas pode ser expressa em transmitância, que é a relação entre a energia radiante transmitida pela amostra e a energia radiante incidente na amostra, ou em absorbância, que é obtida pelo logaritmo, na base 10, do inverso da transmitância (SILVERSTEIN, BASSLER, MORRILL, 1991). Cada substância possui um espectro característico de infravermelho, que pode servir para análises qualitativas e quantitativas, sendo esta última a mais complexa.

#### 4.3.2 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA

O microscópio eletrônico de varredura utilizado neste trabalho está localizado no LabMat da UFSC, da marca Philips, modelo XL30, sendo dotado de micro-sonda para análise elementar (EDAX).

O princípio da microscopia eletrônica de varredura é a incidência de um feixe de elétrons sobre a amostra, que interage com o feixe incidente e emite diversos sinais. A imagem é formada pelo método da varredura, ou seja, um feixe de elétrons percorre a amostra e, em cada momento, apenas um ponto da amostra interage, fornecendo sinais que são captados. Sendo a varredura suficientemente rápida, a imagem é contínua e visível a olho humano (GOODHEW e HUMPHREYS *apud* SILVA, 2001). Através desta técnica pode-se observar possíveis modificações na superfície das fibras após a exposição às soluções agressivas.

Para análise, a amostra deve estar seca e com a superfície condutora. Portanto, é necessário o seu recobrimento com uma fina película de ouro (material condutor), através de alto vácuo.

Devido ao custo elevado deste ensaio, foram analisadas primeiramente as fibras que permaneceram nas soluções a 50°C, pois a temperatura elevada acelera a degradação das fibras.

Caso ocorresse degradação em alguma das soluções, haveria análise das fibras que ficaram neste mesmo meio a 25°C e, se ocorresse degradação a essa temperatura, seriam analisadas aquelas mantidas a 5°C.

#### **4.4 Avaliação da degradação das fibras de PET em materiais à base de cimento**

##### **4.4.1 PREPARO E ARMAZENAMENTO DOS CORPOS-DE-PROVA**

Para avaliar a degradação das fibras d% PET em materiais cimentício, foram moldados corpos-de-prova de argamassa com traço 1:3 (cimento:areia média, em massa de materiais secos), relação água/cimento de 0,61 e 0,5-1% de fibras de PET em relação à massa de cimento.

A relação água/cimento e a porcentagem de fibras foram fixadas a partir de testes preliminares, quando se obteve consistência adequada para moldagem dos corpos-de-prova de argamassas.

A mistura foi realizada em um misturador mecânico de argamassa, conforme descrito na norma NBR 7215/96. A mesma norma define a ordem de colocação dos materiais, descrita a seguir:

1. colocar a água no recipiente;
2. adicionar o cimento;
3. misturar por 30 segundos na velocidade lenta;
4. nos próximos 30 segundos adicionar a areia com as fibras;
5. misturar por mais 30 segundos na velocidade rápida;
6. deixar a mistura em repouso por 1 minuto e 30 segundos, com o recipiente tampado com pano úmido, evitando a evaporação de água da mistura;
7. remisturar por mais 1 minuto na velocidade rápida;
8. moldar os corpos-de-prova.

As fibras de comprimento de 2cm foram misturadas previamente à areia seca, para melhor dispersão das mesmas. A moldagem foi realizada em 4 camadas de 30 golpes em moldes de 5cm de diâmetro e 10cm de altura, conforme NBR 7215/96.

No intuito de avaliar a influência de ambientes agressivos na degradação das fibras, os corpos-de-prova de argamassa foram expostos à água do mar sintética (pH próximo de 12, medido após a imersão dos corpos-de-prova), à solução de MgSO<sub>4</sub> (0,25M) (pH em torno de 9,

medido após a imersão dos corpos-de-prova) e a ambiente com alta concentração de CO<sub>2</sub>. Posteriormente, foram submetidos a ensaios mecânicos.

A água do mar sintética foi produzida da mesma forma como descrito no item 4.3. A monitoração do pH das soluções de sulfato de magnésio e da água do mar é importante para controle na concentração de sulfatos, e foi realizada semanalmente por meio de um pHmetro. No caso de alteração, a solução era automaticamente substituída.

O ambiente com alta concentração de CO<sub>2</sub>, com umidade relativa constante de 75% a uma temperatura aproximada de 20°C, foi obtido por meio de fluxo de CO<sub>2</sub> dentro de um recipiente vedado, dentro do qual foi colocada uma solução supersaturada de NaCl, como corpo de chão, garantindo umidade constante.

Não foi possível controlar a concentração do gás carbônico no interior do recipiente, pois, em uma tentativa de confinamento deste, ocorreu uma queda de pressão em seu interior com conseqüente ruptura das paredes (implosão). Foi então realizada uma abertura no recipiente para que houvesse um equilíbrio das pressões interna e externa, mantendo-se o CO<sub>2</sub> no interior do recipiente por tempo indeterminado. É importante ressaltar, entretanto, que todos os corpos-de-prova inseridos neste meio tiveram a mesma exposição ao longo do tempo.

Foram moldados 240 corpos-de-prova cilíndricos com diâmetro de 5cm e altura de 10cm que permaneceram em cura submersa de água com cal, durante 14 dias antes de serem submetidos aos ambientes agressivos. Outros 240 corpos-de-prova foram expostos aos ambientes agressivos imediatamente após a desmoldagem, realizada 24 horas após a moldagem. Foram armazenados, também, corpos-de-prova em água de-ionizada (pH em torno de 13, medido após a imersão dos corpos-de-prova) e, em ambiente de laboratório, para controle. Os corpos-de-prova cilíndricos foram utilizados para determinação das resistências à compressão e à tração por compressão diametral, e eram retirados dos ambientes 4 horas antes da data de ensaio. A argamassa utilizada foi confeccionada com 0,5% de fibras em relação à massa de cimento, com consistência na *flow-table*, medida de acordo com a NBR 7215/96, de 190,3mm em média. A argamassa sem fibra apresentou consistência de, aproximadamente, 245,9mm.

Além dos corpos-de-prova cilíndricos, foram moldados 90 corpos-de-prova prismáticos com dimensões 40x20x160 mm, para serem submetidos aos ensaios de flexão, em que foi determinada a resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e a tenacidade da argamassa. Os corpos-de-prova foram retirados 24 horas antes da realização do ensaio. Como o desempenho à flexão é bastante influenciado pelas fibras, optou-se por empregar, neste caso, 1% de fibras em relação à massa de cimento, sendo esse o máximo teor possível a ser adicionado, sem que

houvesse prejuízo na moldagem dos corpos-de-prova, porém, não foi possível medir a consistência na *flow-table*, pois a mistura apresentava-se muito seca. Os corpos-de-prova para ensaio de flexão foram mantidos, durante 14 dias após a desmoldagem, imersos em água com cal.

#### 4.4.2 ENSAIOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

A avaliação da degradação das fibras no interior dos corpos-de-prova cilíndricos de argamassa foi realizada por ensaios de compressão axial (NBR 13279/95) e tração por compressão diametral (NBR 7222/94), nos tempos de exposição de 28, 90 e 150 dias.

De acordo com Morgan *et al.*, citados por Tanesi e Figueiredo (1999), não há métodos de ensaio aceitos mundialmente para avaliar a tenacidade e comportamento pós-fissuração de concretos e argamassas com fibras, apesar da existência de normas americanas e japonesas, e de recomendações da RILEM.

Nesta pesquisa, os corpos-de-prova prismáticos (20 x 40 x 160mm) foram ensaiados à flexão de acordo com a metodologia adotada por BASTOS (2001), nos períodos de exposição de 28, 60 e 90 dias. Este autor realizou os ensaios de tração na flexão adaptando o método ISO/DIS 679 - *Methods of testing cements - Determination of strength* (International Organization for Standardization, 1987), para corpos-de-prova de dimensões 40 x 40 x 160 (mm). Segundo o método, aplicando-se uma carga distribuída uniformemente na seção transversal do meio do corpo-de-prova bi-apoiado, a tensão de tração na flexão é dada pela Equação 1:

$$\sigma = \frac{1,5PL}{bh^2}, \quad (1)$$

onde:  $\sigma$  - tensão de tração na flexão (MPa)

P - carga aplicada no meio do prisma (N)

L - distância entre os apoios (mm)

b - maior lado da seção transversal do corpo-de-prova (mm)

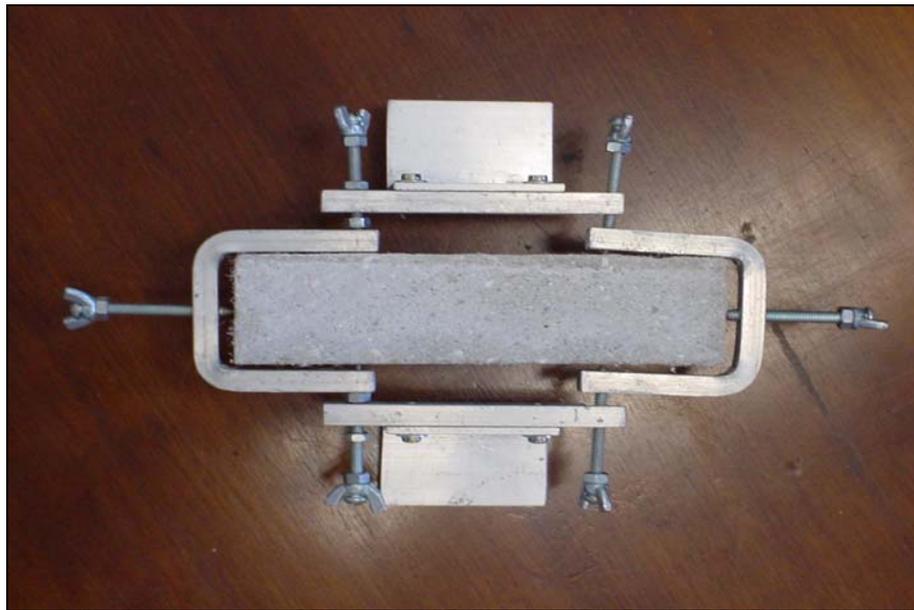
h - espessura do corpo-de-prova (mm)

Foi adotada uma velocidade de aplicação da carga de 0,1 mm/minuto. O aparato para ensaio de tração na flexão foi desenvolvido no LMCC/UFSC, e conta com uma prensa automática, mesa de amplificadores, medidores de deformação LVDT's (precisão de 0,0025mm), sendo todos esses dispositivos interligados e controlados por um micro-computador,

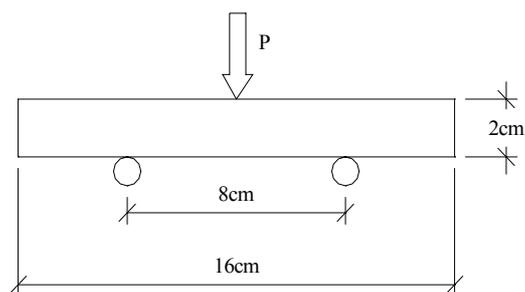
como se pode observar na Figura 13. A Figura 14, mostra a vista superior e o desenho esquemático do aparato.



**FIGURA 13** - Ensaio de tração na flexão de corpo-de-prova de argamassa (40x20x160mm)



(a)



(b)

**FIGURA 14** - Aparato para ensaio de tração na flexão - (a) vista superior e (b) desenho esquemático da vista lateral

Ainda de acordo com BASTOS (2001), como não houve proporcionalidade na relação tensão/deformação do ensaio de flexão das argamassas ao longo do ensaio, optou-se nesta pesquisa por fixar alguns parâmetros para facilitar o cálculo do módulo de deformação. Desta forma, adotou-se o Módulo Corda para representar a deformabilidade das argamassas, cujo valor é calculado pela declividade da reta secante nos pontos correspondentes a 5% e 30% da tensão de ruptura da curva *tensão x deformação* (MEHTA e MONTEIRO, 1994) através da Equação 2:

$$E_c = \frac{(\sigma_{30} - \sigma_5)}{(\varepsilon_{30} - \varepsilon_5)}, \quad (2)$$

onde:

$E_c$  = módulo corda (MPa);

$\sigma_5$  = tensão de tração na flexão igual a 5% da tensão de ruptura (MPa);

$\sigma_{30}$  = tensão de tração na flexão igual a 30% da tensão de ruptura (MPa);

$\varepsilon_5$  = deformação longitudinal específica de tração (mm/mm) no corpo-de-prova na posição mais distante da linha neutra, no meio do vão, correspondente à tensão de tração na flexão igual 5% da tensão de ruptura;

$\varepsilon_{30}$  = deformação longitudinal específica de tração (mm/mm) no corpo-de-prova na posição mais distante da linha neutra, no meio do vão, correspondente à tensão de tração na flexão igual 30% da tensão de ruptura.

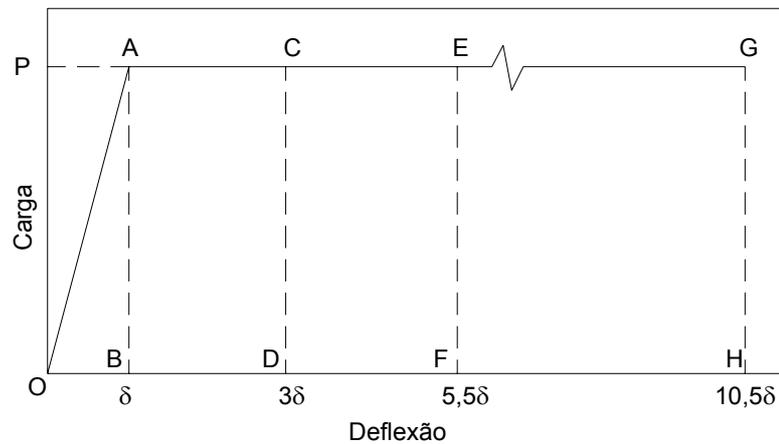
A deformação longitudinal específica (mm/mm) foi calculada nos pontos de 5% e 30% da carga de ruptura pela relação  $\varepsilon = \sigma / E$ , sendo  $\sigma = 1,5PL / bh^2$  e  $E = PL^3 / 4\delta bh^3$ , considerando regime elástico-linear apenas no trecho inicial do ensaio, até 30% da tensão de ruptura.

A tenacidade das argamassas foi calculada segundo a ASTM C 1018/94, que define tenacidade como sendo a área sob a curva *tensão x deformação*. O comportamento pós-fissuração das argamassas foi avaliado através dos índices de tenacidade I5, I10 e I20, descritos a seguir:

- ✓ I5 é calculado dividindo-se a área sob a curva obtida até 3 vezes a deformação na primeira fissura pela área sob a curva até a primeira fissura;
- ✓ I10 é obtido dividindo a área até 5,5 vezes a deformação da primeira fissura pela área até a primeira fissura, e;
- ✓ I20 é obtido dividindo-se a área até 10,5 vezes a deformação até a primeira fissura pela área até a primeira fissura, como mostra a Equação 3 e Figura 15.

A Equação 3 e a Figura 15 demonstram o cálculo destes índices:

$$I_n = \frac{\text{Energia absorvida até um múltiplo da primeira fissura}}{\text{Energia absorvida até a primeira fissura}} \quad (3)$$



**FIGURA 15** - Gráfico de medida dos índices de tenacidade segundo ASTM C 1018

As curvas *tensão x deformação* para todas as argamassas analisadas foram interrompidas em 10,5 vezes o valor da deformação até a primeira fissura, o que corresponde à deformação utilizada para cálculo do índice de tenacidade I20.

#### 4.4.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A degradação superficial das fibras no interior da matriz de cimento foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em fragmentos de argamassa obtidos após a ruptura por tração na compressão diametral dos corpos-de-prova curados durante 14 dias, para as idades de 28 e 150 dias. Nem todos os ambientes foram analisados devido ao elevado custo deste ensaio. Os ambientes escolhidos foram alta concentração de  $\text{CO}_2$  e água do mar sintética, sendo estes os meios agressivos mais freqüentes aos quais os compósitos reforçados com fibras podem estar submetidos, tomando-se o ambiente de laboratório como referência.

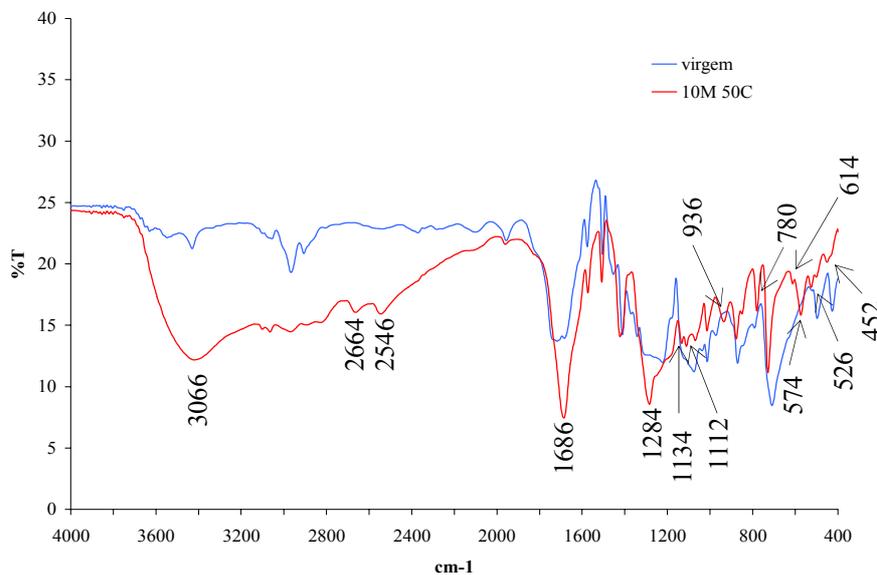
Os fragmentos de argamassa foram submetidos à secagem sob vácuo durante 24 horas. A superfície de ruptura foi recoberta com uma camada de ouro, para conferir maior condutividade elétrica à superfície da amostra.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Avaliação da degradação das fibras imersas em soluções agressivas

#### 5.1.1 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO

Os espectros das fibras imersas durante 150 dias nas soluções agressivas de hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), solução de Lawrence, água do mar sintética, soluções a 1 e 0,1M de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e água deionizada apresentaram-se idênticos ao espectro da fibra virgem, independentemente da temperatura de exposição (Anexo 1). No entanto, no espectro da fibra imersa na solução de 10M de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a  $50^\circ\text{C}$  (Figura 16), observou-se um aparecimento de algumas bandas, identificadas na Figura 16, desaparecimento de bandas em 1456, 1410, 1342, 1230 e  $498\text{cm}^{-1}$  e redução de outras, comparativamente ao espectro da fibra virgem.



$\text{cm}^{-1}$	Ligações desaparecidas
1456	$\text{CH}_2$
1410	
1342	$\text{CH}_2$
1230	C-O
498	C-(O)-O
	C=O

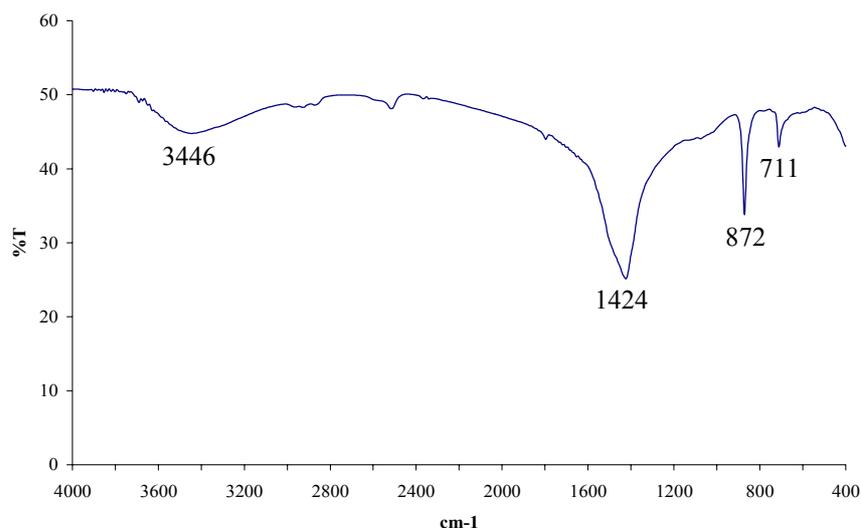
**FIGURA 16** - Espectros no infravermelho da fibra virgem e das fibras imersas em solução de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), 10M a  $50^\circ\text{C}$ , durante 150 dias

Segundo Bellamy (1986), as bandas em 1134, 1112 e  $614\text{cm}^{-1}$  são devidas ao sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), indicando, desta forma, que houve uma interação da cadeia polimérica da fibra de PET com o meio agressivo de ácido sulfúrico a 10M, a  $50^\circ\text{C}$ .

Em alguns casos, houve formação de um produto de reação da fibra com a solução aquosa, como no caso das soluções de hidróxido de cálcio a 5, 25 e  $50^\circ\text{C}$ , da solução de

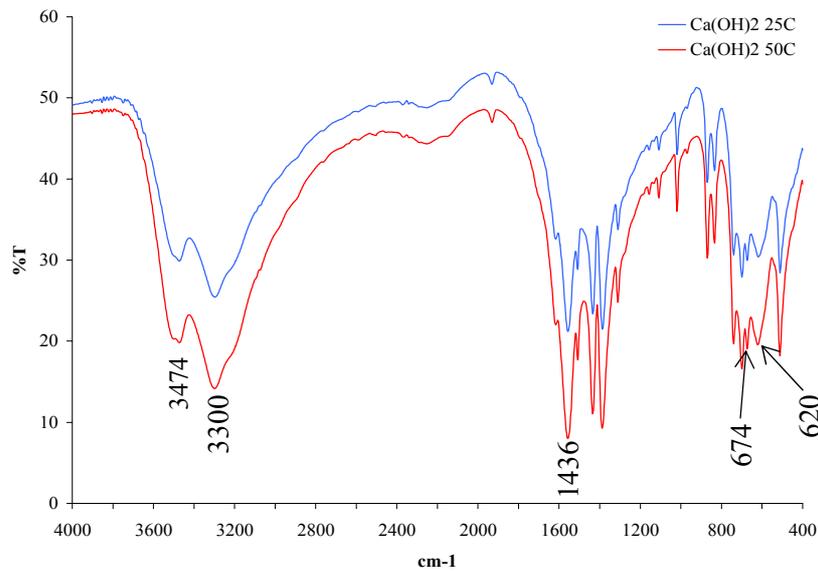
Lawrence a 50°C e da solução de ácido sulfúrico 10M a 50°C. Nesses casos, os produtos de reação, na forma de pó de coloração esbranquiçada, foram também submetidos à espectroscopia no infravermelho.

A Figura 17 mostra o espectro obtido na análise do pó formado na imersão das fibras em solução de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a 5°C. Por sua análise, conclui-se que o pó resultante não é um produto de interação fibra-solução. Trata-se de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) identificado através das bandas do íon  $\text{CO}_3^{2-}$  em  $1490\text{-}1410\text{ cm}^{-1}$  e  $880\text{-}860\text{ cm}^{-1}$  (BELLAMY, 1986). Segundo Silverstein *et al.* (1991), entre  $3200\text{-}3550\text{ cm}^{-1}$  encontra-se o OH da água adsorvida, que indica presença de umidade na amostra. Isso provavelmente indica que, devido à baixa temperatura (5°C), a solubilidade da solução de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  diminuiu, ocorrendo precipitação dessa fase. Como a análise em infravermelho não foi realizada imediatamente após a coleta e secagem da amostra, a mesma, provavelmente, carbonatou.

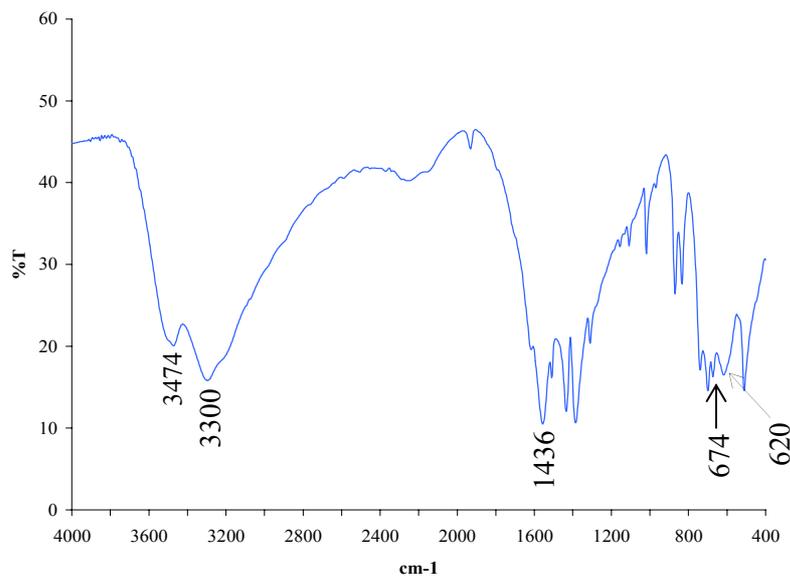


**FIGURA 17** - Espectro no infravermelho do pó formado na solução de hidróxido de cálcio a 5°C

A Figura 18 mostra o espectro do pó formado na imersão das fibras nas soluções de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a 25°C e 50°C e a Figura 19 apresenta o espectro do pó formado na solução de Lawrence a 50°C.



**FIGURA 18** - Espectro no infravermelho do pó formado da interação da fibra com as soluções de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a 25 e 50 °C

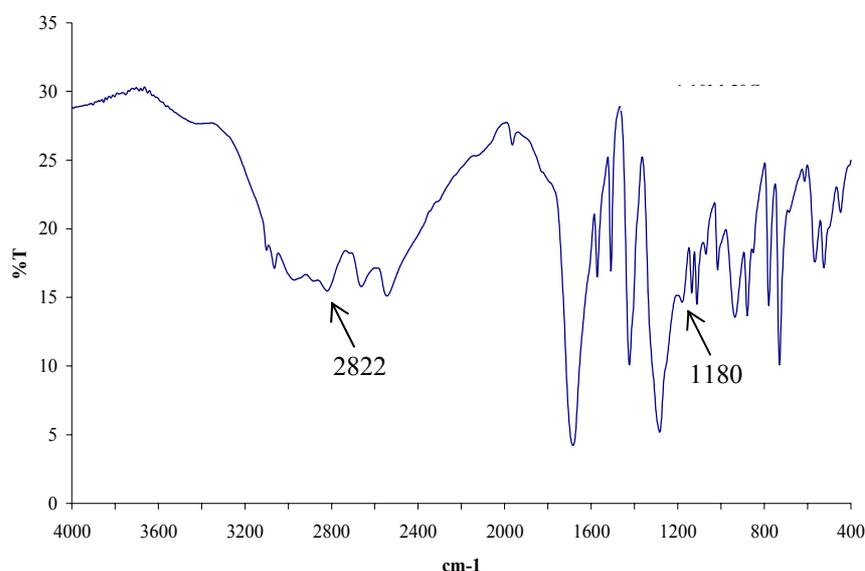


**FIGURA 19** - Espectro no infravermelho do pó formado da interação da fibra com a solução de Lawrence a 50 °C

Segundo Jelidi (1991), o mecanismo de degradação química da fibra de PET consiste numa reação de depolimerização que quebra parcial ou totalmente a cadeia do polímero em dois grupos: o grupo do anel aromático e o grupo do éster alifático. São estes grupos nos quais vão se fixar respectivamente os íons álcalis e os íons hidroxilas (esquema mostrado na Figura 4), resultando em dois produtos: tereftalato de sódio e/ou potássio e/ou cálcio e etileno glicol.

Analisando-se as bandas do espectro dos pós formado na imersão das fibras nas soluções de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a  $25^\circ\text{C}$  e  $50^\circ\text{C}$  e na solução de Lawrence a  $50^\circ\text{C}$  (Figuras 18 e 19), conclui-se ter ocorrido a formação de tereftalatos alcalinos de cálcio, potássio e sódio, ou seja, há uma interação da fibra com o meio, ou seja, degradação das fibras que permaneceram nestes ambientes. As bandas identificadas no espectro são atribuídas somente ao tereftalato de cálcio. A banda em  $1436\text{cm}^{-1}$  é atribuída ao tereftalato de cálcio e potássio, enquanto que as demais bandas coincidem para todos os tereftalatos-alcalinos. Essas conclusões foram tiradas a partir da comparação dos espectros obtidos na presente pesquisa com aqueles apresentados por Jelidi (1991).

A Figura 20 mostra o espectro do pó formado na imersão das fibras em solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a 10M, a  $50^\circ\text{C}$ . Comparando o espectro do pó formado na solução de 10M de ácido sulfúrico com o espectro da fibra imersa nesta mesma solução, observou-se o aparecimento de novas bandas em  $2822$  e  $1180\text{cm}^{-1}$ , identificadas na Figura 20, o que indica novamente, um ataque do ácido sobre a fibra de PET.



**FIGURA 20** - Espectro no infravermelho do pó formado na solução de ácido sulfúrico 10M a  $50^\circ\text{C}$

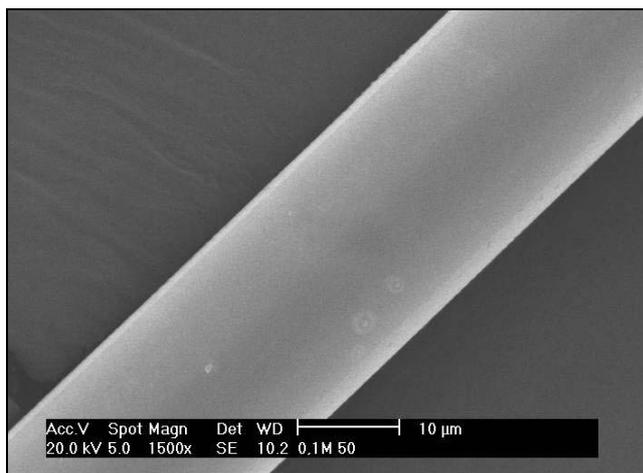
Como se pôde observar, através dos espectros resultantes do infravermelho das fibras imersas nas soluções, não foi possível verificar a degradação das mesmas, ao contrário do que ocorreu com os produtos de reação (pó) da fibra com algumas soluções. Isto pode ser devido aos seguintes fatores: à preparação das amostras, onde se pode ter analisado somente a região interna da fibra não atacada; a degradação pode ser tão pequena que o equipamento utilizado para

análise não tenha sensibilidade suficiente para captar estas alterações; ou, ainda, a forma de análise por infravermelho não ser a melhor opção neste caso.

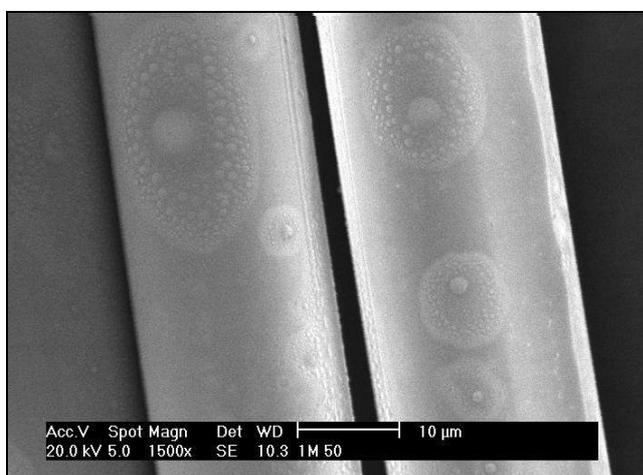
Desta forma, optou-se, também, pela análise da superfície das fibras, aspecto e diâmetro das mesmas em microscópio eletrônico de varredura (MEV), onde é possível, através da análise visual, observar se houve ou não degradação das fibras.

### 5.1.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

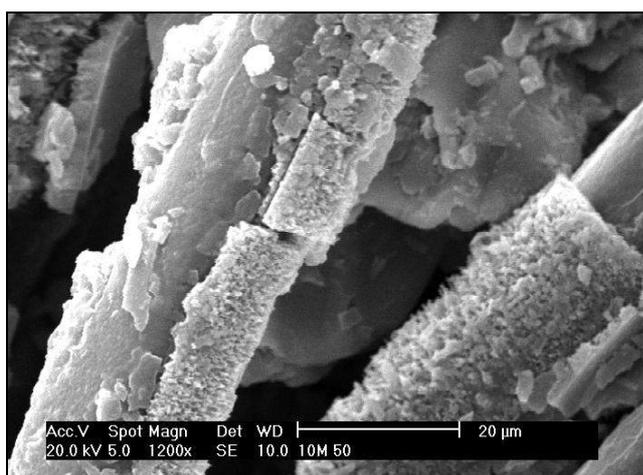
Através do MEV, observou-se que as fibras foram atacadas pelas soluções de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$  a 0,1; 1 e 10M), sendo a intensidade maior para maior concentração de solução. As Figuras 21 e 22 mostram o aspecto das fibras após imersão a 25 e 50°C. Observa-se que o ataque é menos intenso para menores temperaturas de armazenamento.



a) solução a 0,1M

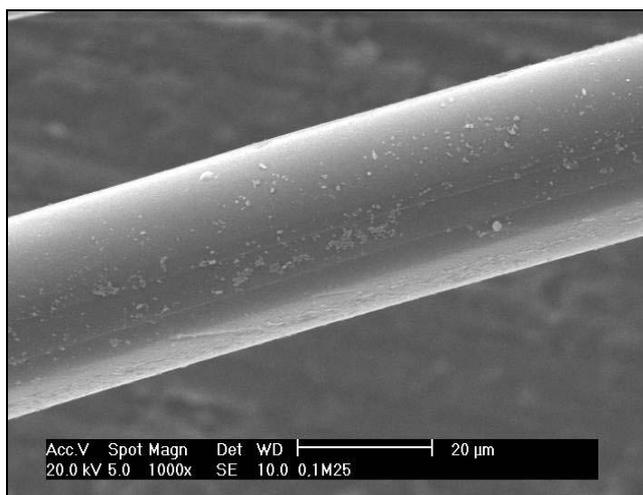


b) solução a 1M

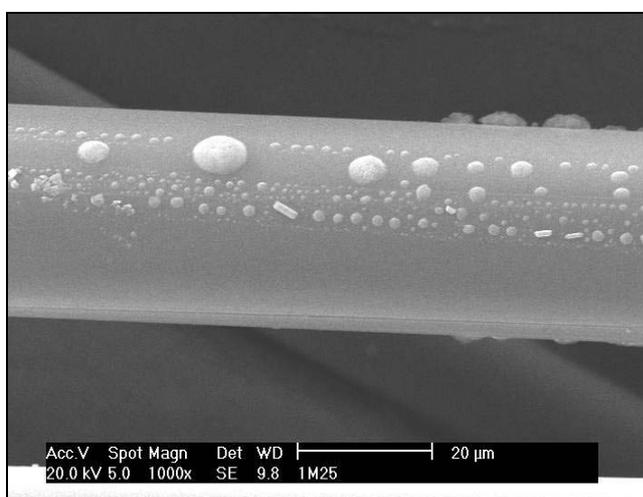


c) solução a 10M

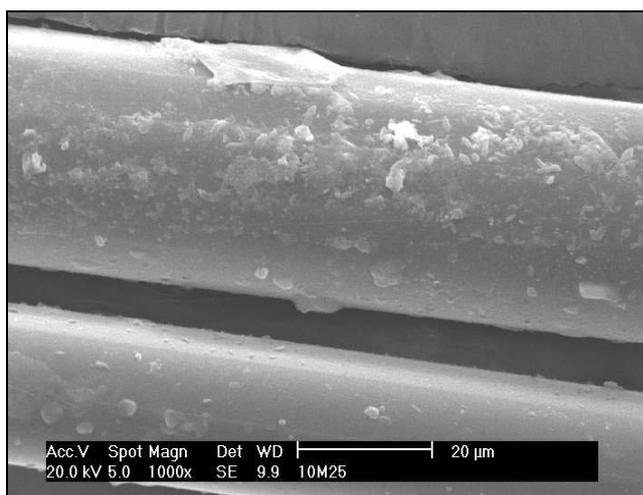
**FIGURA 21** - Aspecto das fibras atacadas por solução de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) a  $50^\circ C$ , durante 150 dias



a) solução a 0,1M



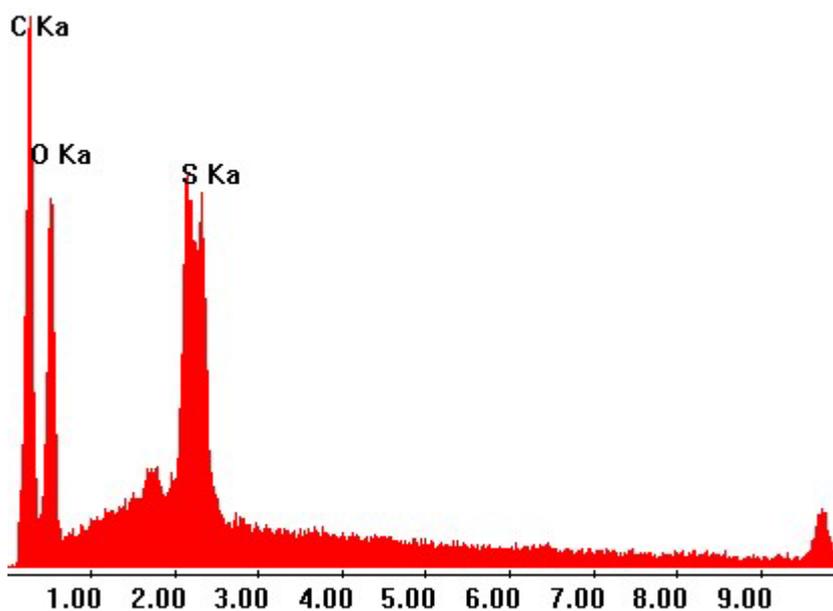
b) solução a 1M



c) solução a 10M

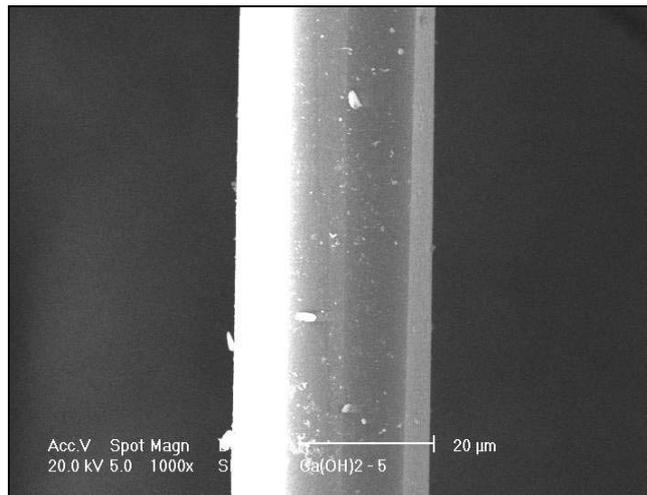
**FIGURA 22** - Aspecto das fibras atacadas por solução de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) a 25°C, durante 150 dias

A Figura 23 mostra o espectro de análise química realizada na superfície de uma fibra imersa em solução de ácido sulfúrico a 10M, a 50°C. A presença do pico de enxofre indica que houve interação da fibra com o ácido.

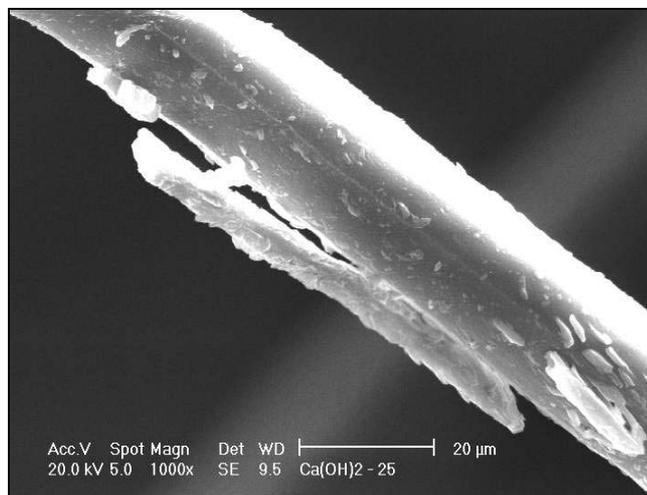


**FIGURA 23** - Espectro da análise química da fibra imersa em solução de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), 10M a 50°C durante 150 dias

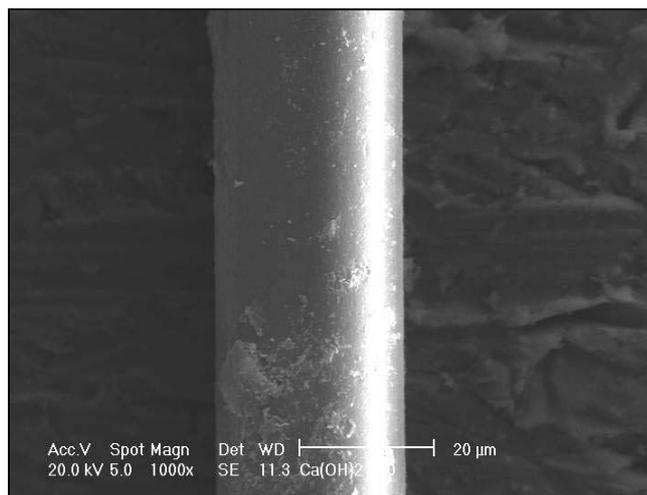
As fibras que foram mantidas na solução saturada de hidróxido de cálcio -  $Ca(OH)_2$  e na solução de Lawrence a 50°C também sofreram alterações, porém em menor intensidade, como se pode observar nas Figuras 24 e 25.



a) solução a 5°C

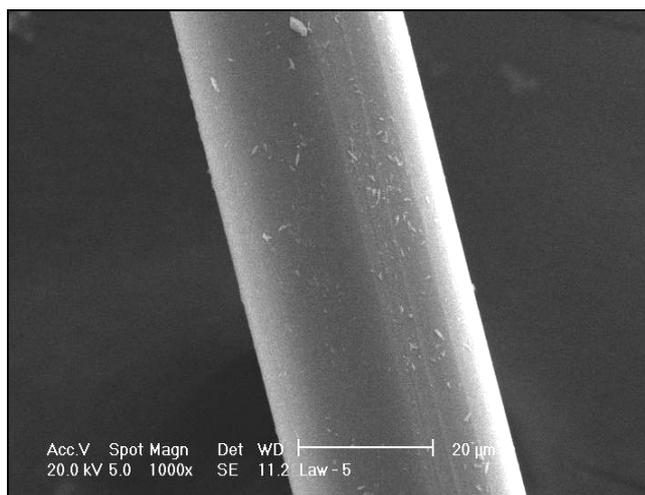


b) solução a 25°C

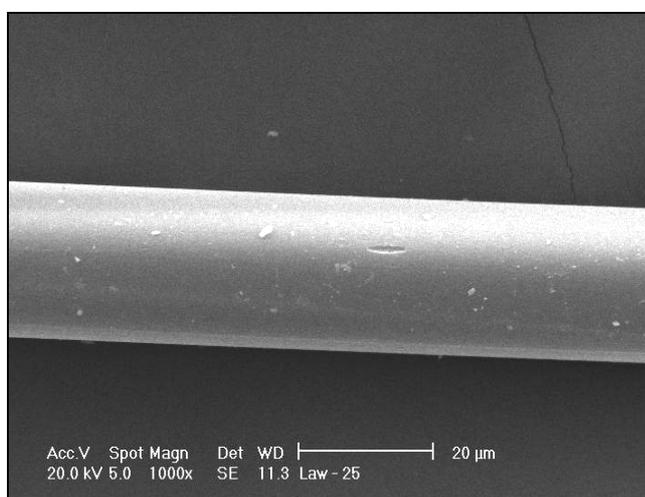


c) solução a 50°C

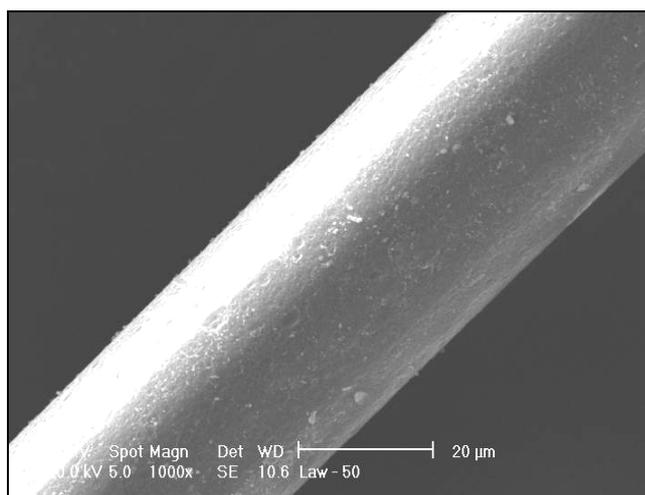
**FIGURA 24** - Aspecto da superfície das fibras atacadas por solução saturada de hidróxido de cálcio -  $\text{Ca(OH)}_2$ , durante 150 dias



a) solução a 5°C



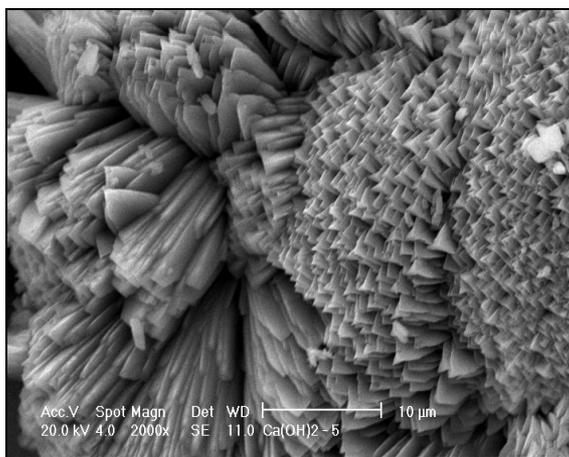
b) solução a 25°C



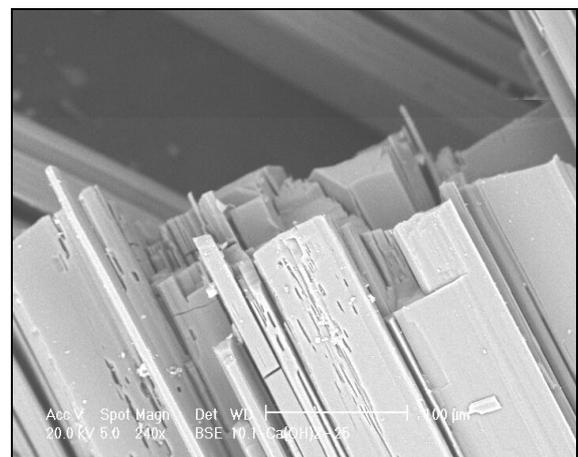
c) solução a 50°C

**FIGURA 25** - Aspecto das fibras de PET mantidas em imersão durante 150 dias em solução de Lawrence

Os pós formados nas soluções agressivas durante o período de imersão das fibras foram também analisados em MEV, e as imagens são mostradas nas Figuras 26 e 27. A Figura 26 (a) mostra a formação de carbonato de cálcio em solução de hidróxido de cálcio a 5°C, e a Figura 26 (b) mostra a formação de tereftalato de cálcio, de acordo com Jelidi (1991) e Houget (1992). Nos casos de degradação, especialmente nas soluções de Lawrence e de ácido sulfúrico de maior concentração a 50°C, observou-se redução do diâmetro médio das fibras após os 150 dias de ataque e formação de aglomerados, que podem ser vistos na Figura 27.

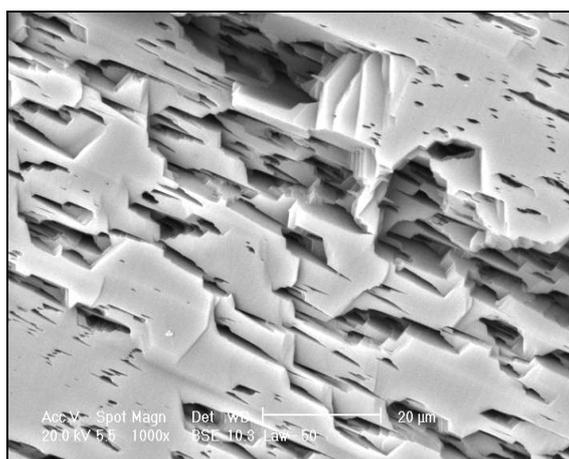


a) carbonato de cálcio

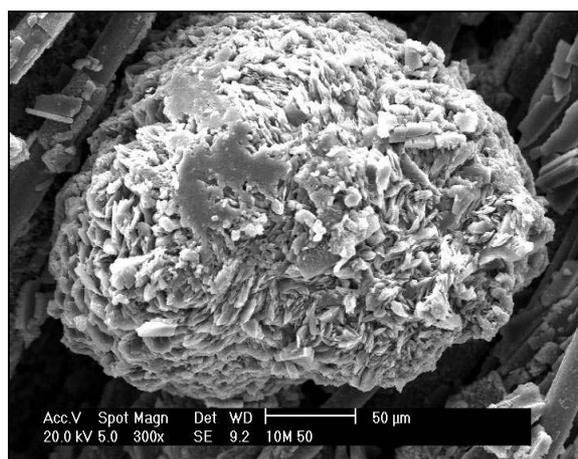


b) tereftalato de cálcio

**FIGURA 26** - Aglomerados formados na solução de  $\text{Ca(OH)}_2$  à 5 e 25°C



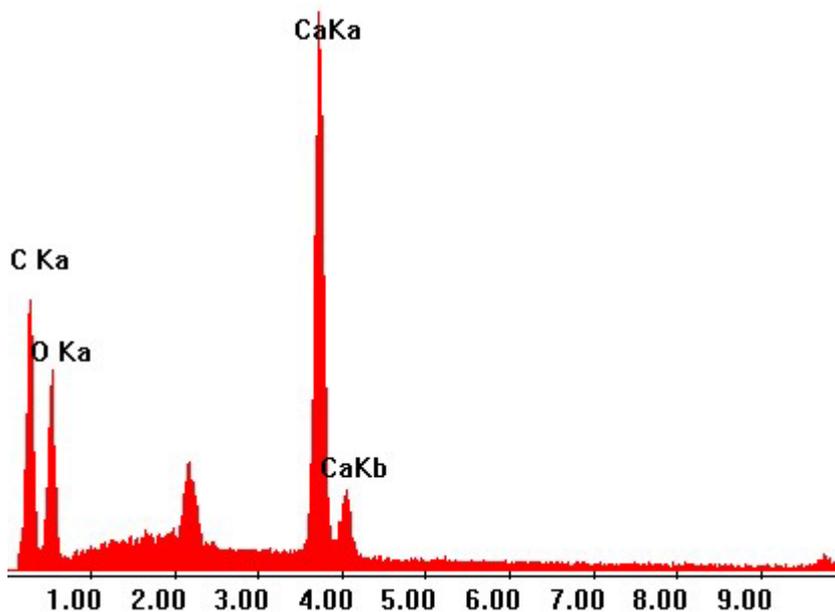
a) em solução de Lawrence a 50°C



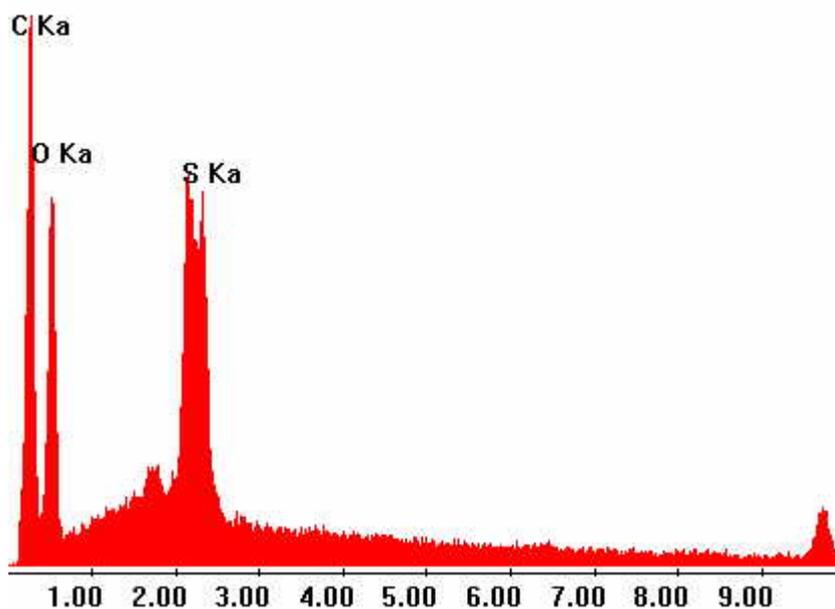
b) em solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (10M) a 50°C

**FIGURA 27** - Aglomerados formados após ataque agressivo às fibras de PET

As Figuras 28 e 29 mostram os espectros das análises químicas realizadas nos aglomerados formados na solução de Lawrence a 50°C e na solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (10M) a 50°C, respectivamente. A presença de grande quantidade de carbono, em ambos os espectros, indica que houve degradação das fibras nessas soluções.



**FIGURA 28** - Análise química do aglomerado formado na solução de Lawrence a 50°C



**FIGURA 29** - Análise química do aglomerado formado na solução de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (10M) a 50°C

A análise da superfície das fibras que ficaram imersas nas soluções agressivas de NaOH e água do mar sintética indicou que não houve deterioração perceptível nas fibras, independentemente da temperatura de exposição. Também não foi observada a formação de aglomerados.

## 5.2 Avaliação da degradação das fibras em matriz cimentícia

### 5.2.1 RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO AXIAL E TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os resultados individuais das resistências à compressão axial e à tração por compressão diametral dos corpos-de-prova encontram-se nas Tabelas 21 a 25 do Anexo 2.

A análise estatística dos dados, realizada por análise de variâncias (ANOVA), indicou que a presença das fibras não é um fator estatisticamente significativo nas resistências das argamassas à tração por compressão diametral e à compressão axial, mesmo se submetidas aos ambientes agressivos testados. As Tabelas 13 e 14 apresentam os dados desta análise.

Como mostra a Tabela 13, os fatores principais ambiente e idade exercem forte efeito sobre os resultados da compressão axial, apresentando efeitos significativos considerando-se 1% de significância. A cura também exerce efeito significativo, mas o efeito é muito menor do que aquele produzido pelos fatores ambiente e idade. Entre as interações, destacam-se aquelas que envolvem os fatores ambiente, cura e idade, todas significativas considerando-se 1% de significância.

**TABELA 13** - Análise de variância dos resultados de resistência à compressão axial

Fonte	Soma dos quadrados	GDL	Média dos quadrados	Teste F	Valor-p
<b>Efeitos principais</b>					
A: Fibra	6,92887	1	6,92887	2,20	0,1399
B: Ambiente	4013,66	4	1003,42	318,11	<b>0,0000</b>
C: Cura	20,9515	1	20,9515	6,64	<b>0,0107</b>
D: Idade	683,398	2	341,699	108,33	<b>0,0000</b>
<b>Interações</b>					
AB	14,2641	4	3,56603	1,13	0,3432
AC	10,5406	1	10,5406	3,34	0,0690
AD	11,0556	2	5,52782	1,75	0,1760
BC	106,491	4	26,6227	8,44	<b>0,0000</b>
BD	916,855	8	114,607	36,33	<b>0,0000</b>
CD	149,993	2	74,9967	23,78	<b>0,0000</b>
<b>Resíduo</b>	634,007	201	3,15426		
<b>Total(corrigido)</b>	6535,96	230			

Todos os testes F foram baseados no erro residual da média dos quadrados

Na Tabela 14, nota-se que na tração por compressão diametral, o fator principal ambiente, exerce forte influência, apresentando efeito significativo considerando-se 1% de significância. Os demais fatores exercem efeito na forma de interação. São efeitos relativamente pequenos, comparados ao efeito do fator ambiente. Entre as interações, destacam-se aquelas que envolvem os fatores ambiente, cura e idade, todas significativas considerando-se 1% ou 2% de significância.

**TABELA 14** - Análise de variância dos resultados de resistência à tração por compressão diametral

Fonte	Soma dos quadrados	GDL	Média dos quadrados	Teste F	Valor-p
<b>Efeitos principais</b>					
A: Fibra	0,149247	1	0,149247	0,47	0,4943
B: Ambiente	41,6258	4	10,4064	23,69	<b>0,0000</b>
C: Cura	0,600116	1	0,600116	1,89	0,1713
D: Idade	0,722488	2	0,361244	1,13	0,3235
<b>Interações</b>					
AB	2,17846	4	0,544615	1,71	0,1490
AC	0,000714241	1	0,000714241	0,00	0,9623
AD	0,197404	2	0,0987019	0,31	0,7338
BC	5,61476	4	1,40369	4,41	<b>0,0019</b>
BD	13,6659	8	1,70824	5,37	<b>0,0000</b>
CD	2,77121	2	1,38561	4,53	<b>0,0141</b>
<b>Resíduo</b>	63,9861	201	0,318339		
<b>Total(corrigido)</b>	131,476	230			

Todos os testes F foram baseados no erro residual da média dos quadrados

Com o objetivo de identificar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as resistências dos corpos-de-prova expostos aos diferentes ambiente, foi realizada uma comparação múltipla de médias, considerando-se significância de 5%.

Considerando-se a interação entre o ambiente e o teor de fibras (Figuras 30 e 31), por meio de comparação múltipla de médias, constatou-se que não há diferença significativa entre os resultados de resistência à compressão e tração por compressão diametral dos corpos-de-prova com e sem fibra, independentemente do ambiente em que foram mantidos. Conforme Jelidi (1991), a resistência à compressão do concreto não varia com a presença das fibras, e, ainda, segundo Swamy (197-), mesmo após a ruptura do corpo-de-prova, as fibras mantêm o compósito unido, tanto na tração quanto na compressão, sendo esta, uma propriedade única de compósitos com fibra, fato este também observado nos corpos-de-prova de argamassas com fibra utilizados nesta pesquisa.

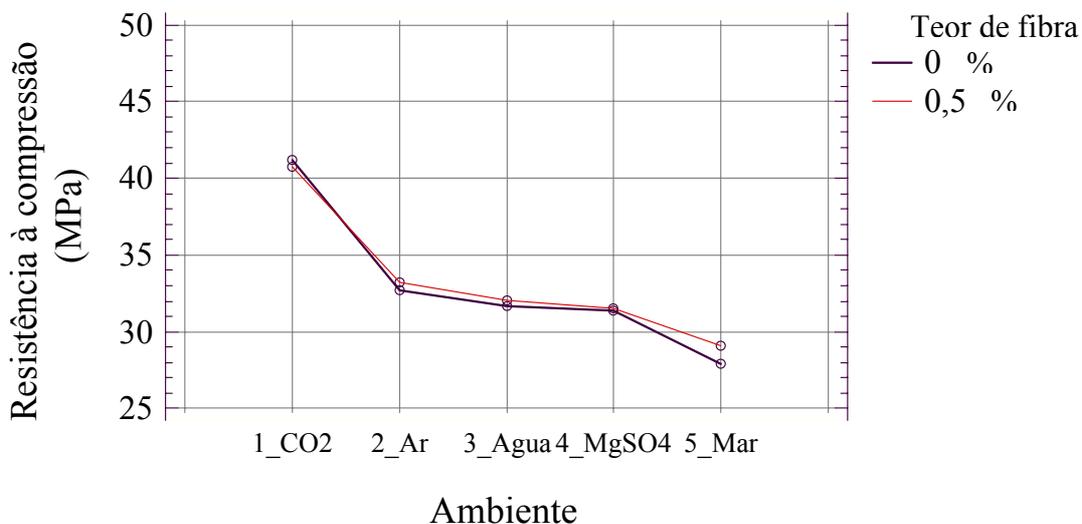
Pelisser (2002) utilizou fibras de PET no concreto, e também, não observou diferença significativa nas resistências à compressão e tração por compressão diametral dos concretos com fibra comparados aos concretos sem fibra.

Entretanto, nestas figuras observa-se que as resistências mais elevadas foram alcançadas pelas argamassas mantidas em ambiente com alta concentração de gás carbônico. Esse efeito se deve à carbonatação do hidróxido de cálcio presente na argamassa, que resulta em aumento da densidade e, conseqüentemente, da resistência mecânica.

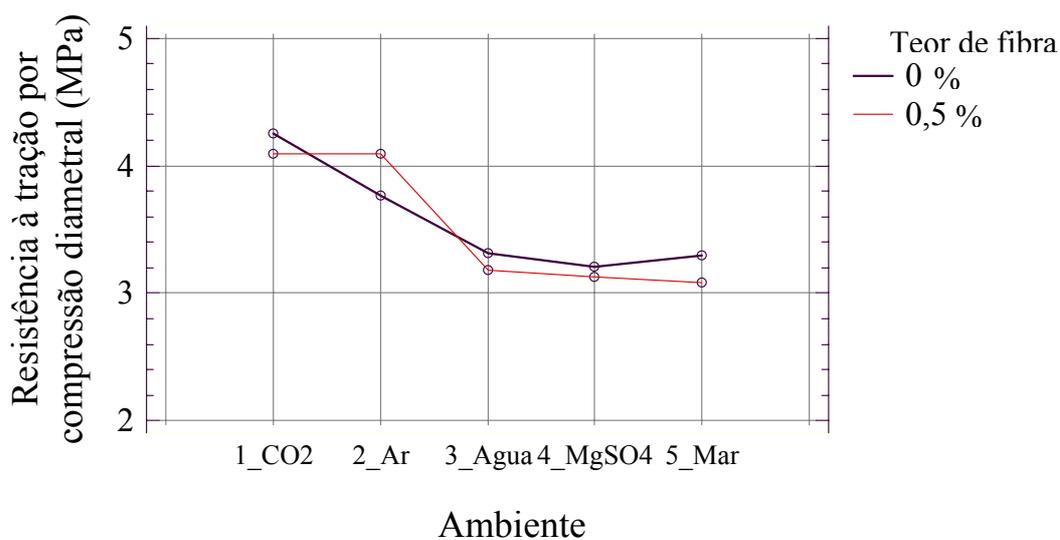
Os corpos-de-prova mantidos submersos em água do mar sintética foram os que apresentaram resistência à compressão axial mais baixa (Figura 30), pois os sulfatos presentes na água do mar penetram nos poros da argamassa, combinam-se com aluminatos (especialmente o  $C_3A$ ) formando etringita, que é um produto expansivo e prejudica a resistência da argamassa. No entanto, Cánovas e Helene, citados por Silva Filho (1994), afirmam que a presença de cloretos na água do mar pode atenuar a agressão dos sulfatos. Porém, segundo Kalousek *et al.* citado pelo mesmo autor, ocorre uma expansão maior nos corpos-de-prova expostos à água do mar do que em soluções de sulfato de sódio e magnésio.

Segundo O'Farrel *et al.* (2000), esta perda de resistência pode ser atribuída também à decalcificação do gel C-S-H, onde os íons  $Mg^{2+}$  se combinam com este gel, resultando em uma camada não cimentícia de silicato de magnésio hidratado (M-S-H), brucita ( $Mg(OH)_2$ ) e sílica gel hidratada (TAYLOR e GOLLOP *apud* O'FARREL *et al.*, 2000). Segundo Mehta e Monteiro (1994) esta camada de coloração branca se forma sobre a superfície de argamassas e concretos de cimento Portland expostos à água do mar, fato observado nesta pesquisa.

Na Figura 30, para os corpos-de-prova que permaneceram imersos em solução de  $MgSO_4$ , a resistência não foi tão afetada, pois, segundo O'Farrel *et al.* (2000), a camada de brucita, principal produto formado em exposição à solução de  $MgSO_4$ , possui baixa solubilidade, formando assim uma camada protetora na superfície do corpo-de-prova, que se mantém intacta, bloqueando a reação entre a matriz cimentícia e a solução de  $MgSO_4$ , não permitindo a penetração de íons  $Mg^{2+}$  e  $SO_4^{2-}$ . Outra explicação possível é que o tempo de exposição pode não ter sido suficiente para causar degradação da argamassa, compensando o efeito densificador causado pela deposição dos produtos da reação de ataque, especialmente a etringita.



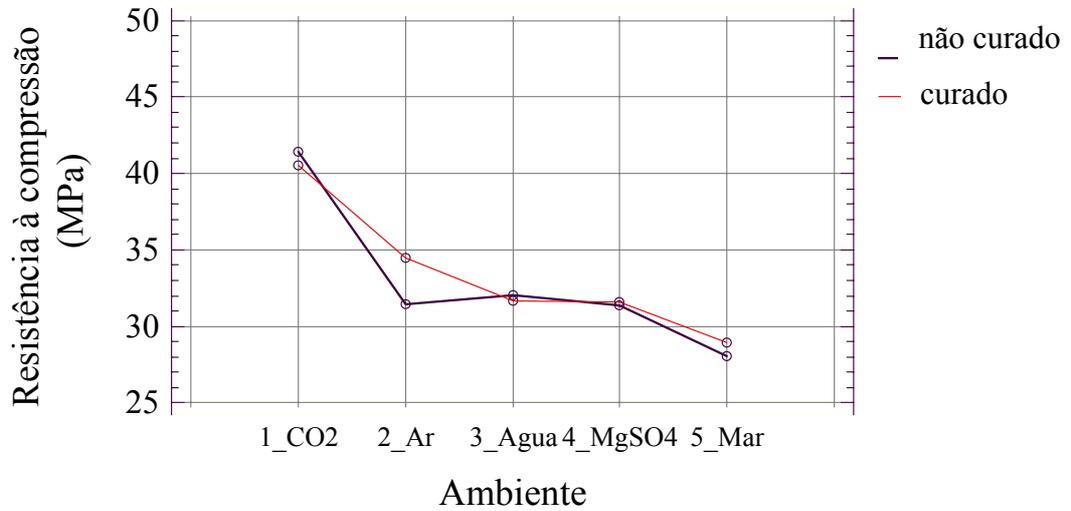
**FIGURA 30** - Efeitos da fibra e do ambiente sobre a resistência à compressão axial



**FIGURA 31** - Efeito da interação entre o teor de fibra e o ambiente agressivo na resistência à tração por compressão diametral

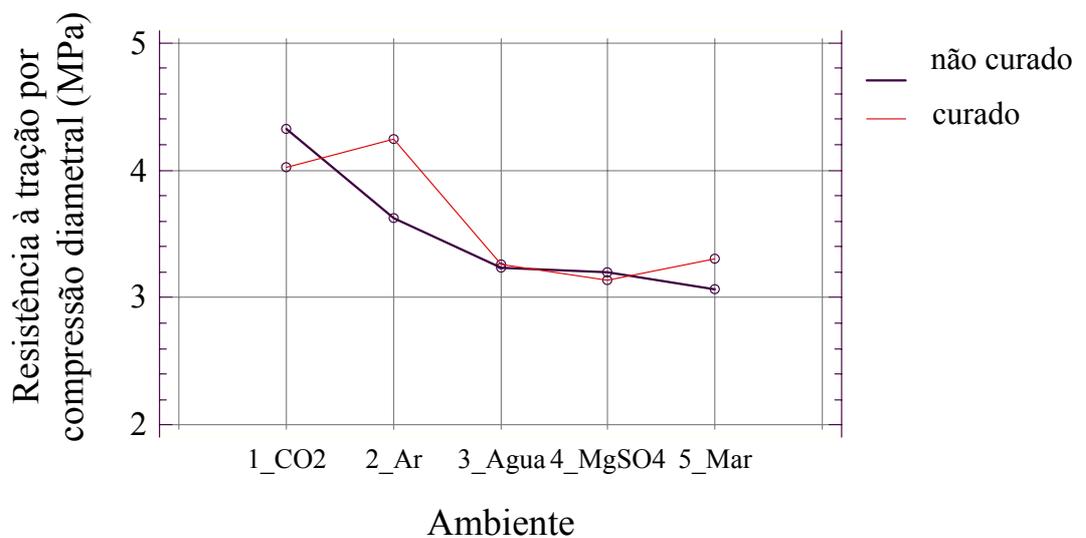
As Figuras 32 e 33 mostram a influência da interação dos fatores ambiente e cura nas resistências à compressão axial e tração por compressão diametral dos corpos-de-prova expostos em diferentes ambientes.

Nota-se que a cura dos corpos-de-prova durante 14 dias em água com cal previamente à exposição dos mesmos aos ambientes agressivos somente foi benéfica no caso dos corpos-de-prova mantidos no ambiente de laboratório.



**FIGURA 32** - Efeito da interação entre ambiente e cura na resistência à compressão axial

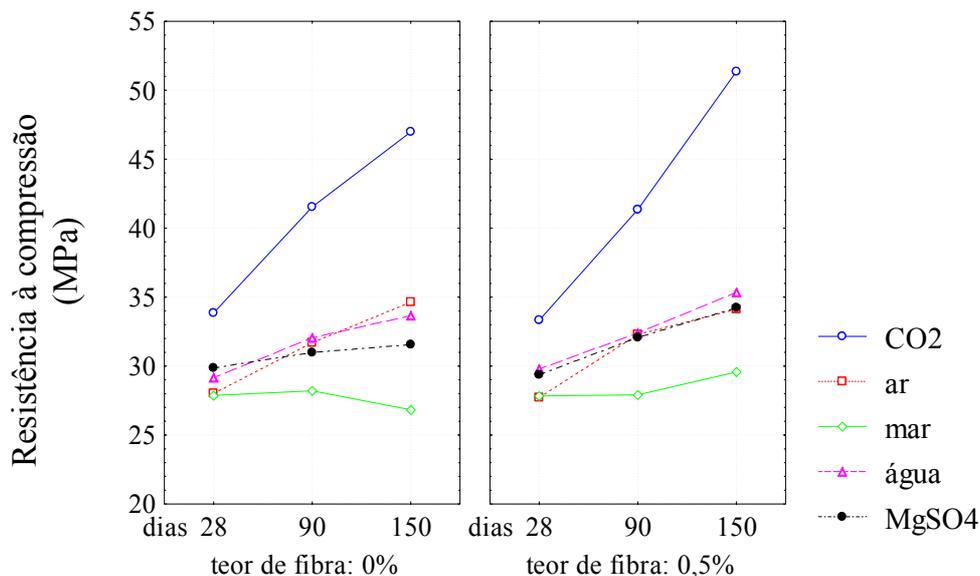
Na Figura 33, as resistências dos corpos-de-prova não curados que permaneceram em ambiente com alta concentração de CO<sub>2</sub> foram ligeiramente superiores aos curados e submetidos ao mesmo ambiente, pois, nesta condição, a colmatação dos vazios pela carbonatação do hidróxido de cálcio foi mais significativa do que a influência benéfica da cura na hidratação do cimento e, conseqüentemente, na resistência dos corpos-de-prova. A diferença entre as resistências dos corpos-de-prova com e sem cura dos corpos-de-prova imersos em água do mar, através da comparação múltipla de médias, não foi significativa.



**FIGURA 33** - Efeito da interação entre ambiente e cura na resistência à tração por compressão diametral

A Figura 34 mostra a interação da idade, ambiente e teor de fibra na resistência à compressão axial de corpos-de-prova não curados previamente à imersão nos diferentes ambientes. Através da comparação entre as médias, constatou-se que o ambiente com alta concentração de  $\text{CO}_2$  e ambiente de laboratório resultaram em ganho de resistência significativo com o passar do tempo, independentemente da presença da fibra, e que, aos 150 dias de idade, a fibra influenciou significativamente no aumento da resistência à compressão axial no ambiente de  $\text{CO}_2$ , pela possibilidade da degradação da fibra gerar vazios segundo Balaguru e Slattum (1995) e, desta forma, uma maior profundidade de carbonatação.

Os corpos-de-prova sem fibra que permaneceram em água deionizada tiveram sua resistência aumentada de 28 para 90 dias e depois permaneceu estável. Este aumento inicial se deve à hidratação do cimento. As resistências dos corpos-de-prova com fibra tiveram um aumento significativo, com avanço da idade, nos ambientes com água deionizada e  $\text{MgSO}_4$  e, nos demais ambientes, não houve diferença significativa nas resistências das argamassas.



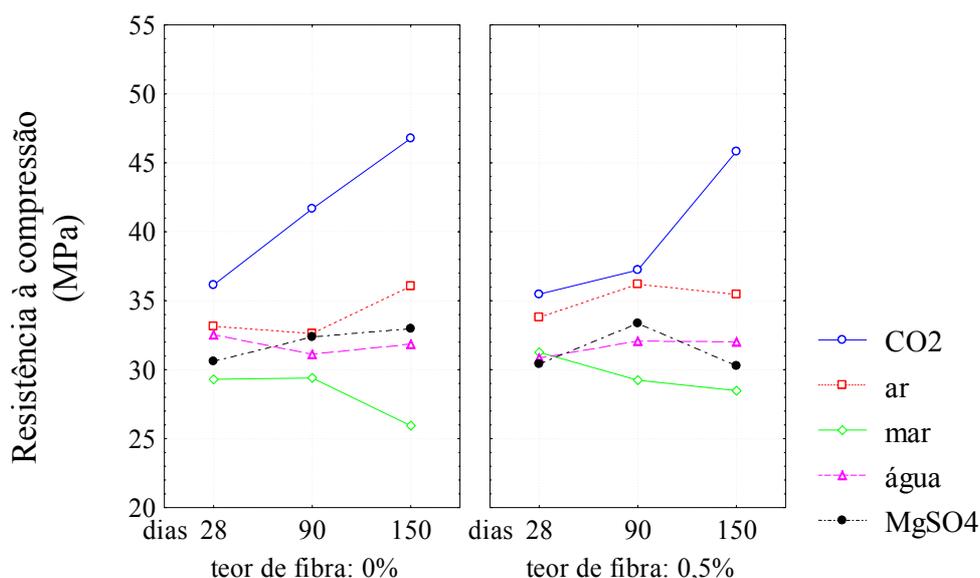
**FIGURA 34** - Efeito da interação entre teor de fibras, ambiente e idade na resistência à compressão axial dos corpos-de-prova não curados

A Figura 35 mostra o efeito da cura sobre a resistência à compressão axial através de um aumento nas resistências aos 28 dias para todos os ambientes. Na comparação múltipla de médias, constatou-se um aumento da resistência, com o tempo, dos corpos-de-prova sem fibra que permaneceram no  $\text{CO}_2$ , alcançando aos 150 dias o mesmo valor dos corpos-de-prova com fibra. Nos outros ambientes sem fibra, não há diferenças significativas entre as médias.

O comportamento das resistências dos corpos-de-prova sem fibra com o avanço da idade, nos ambientes de laboratório,  $MgSO_4$  e água deionizada não pôde ser realizado devido à rejeição da distribuição normal para os valores de resistência nos dois primeiros casos, e diferença entre as variâncias no último caso.

As resistências à compressão axial dos corpos-de-prova sem fibra que permaneceram em ambiente de laboratório, durante 150 dias, foram superiores àquelas dos corpos-de-prova que permaneceram imersos em água deionizada, pois, em ambiente de laboratório o corpo-de-prova pode ter carbonatado, aumentando sua resistência e, em água deionizada pode ter ocorrido a saída dos íons de  $Ca^{2+}$  para água, reduzindo, desta forma, a formação de produtos de hidratação. Nos corpos-de-prova com fibra este fato ocorreu para todas as idades. Além disso, a diferença do teor de umidade entre os corpos-de-prova mantidos no laboratório e os mantidos em água deionizada pode ter influenciado os resultados.

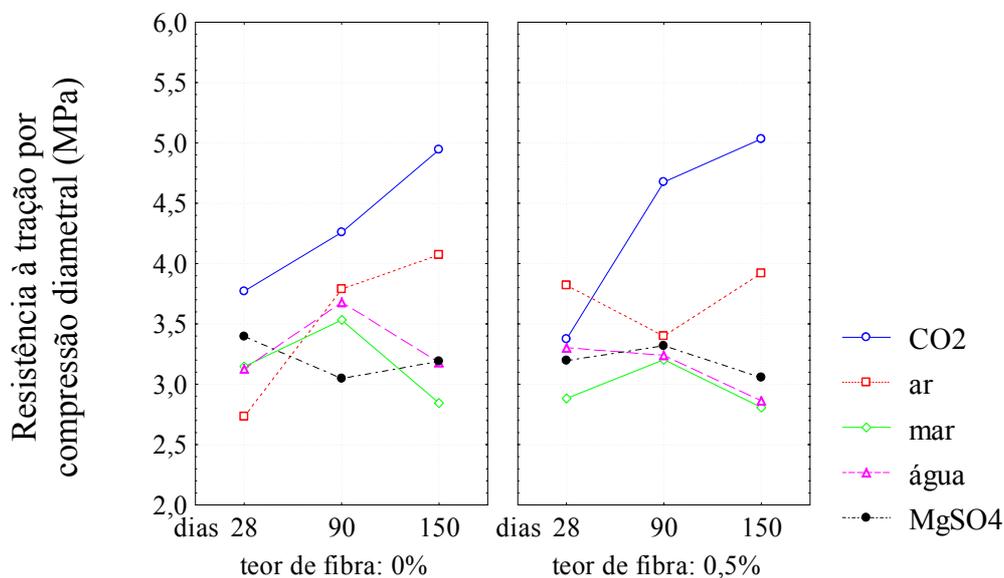
Mesmo não sendo um fator estatisticamente significativo, a presença de fibras nos corpos-de-prova mantidos em água do mar sintética causou aumento da resistência à compressão axial aos 150 dias em relação aos corpos-de-prova sem fibra, tanto para os corpos-de-prova curados (Figura 35) quanto os não curados (Figura 34). Isso pode ser explicado pela presença da fibra que, de alguma forma, amenizou os efeitos deletérios causados por ataque dos sulfatos, pois, segundo Johnston (2001), um dos efeitos das fibras é a tendência de inibir ou modificar o desenvolvimento da fissuração no sentido de reduzir a abertura e o espaçamento entre as fissuras.



**FIGURA 35** - Efeito da interação entre teor de fibras, ambiente e idade na resistência à compressão axial dos corpos-de-prova curados em água com cal durante 14 dias

Nas Figuras 36 e 37, nota-se que não há uma tendência no comportamento da resistência à tração por compressão diametral com o avanço da idade. Isso pode ser devido à grande variabilidade normalmente associada a este ensaio.

Analisando a Figura 36, apenas no ambiente com alta concentração de  $\text{CO}_2$  houve diferença significativa entre as médias, mostrando um aumento significativo apenas de 28 para 150 dias para os corpos-de-prova sem fibra, e de 28 para 90 dias para os corpos-de-prova com fibra. Nos demais ambientes não houve diferença significativa entre as médias e, no ambiente de água do mar sintética, as variâncias dos corpos-de-prova sem fibra não são iguais, não permitindo, desta forma, comparação entre as médias.

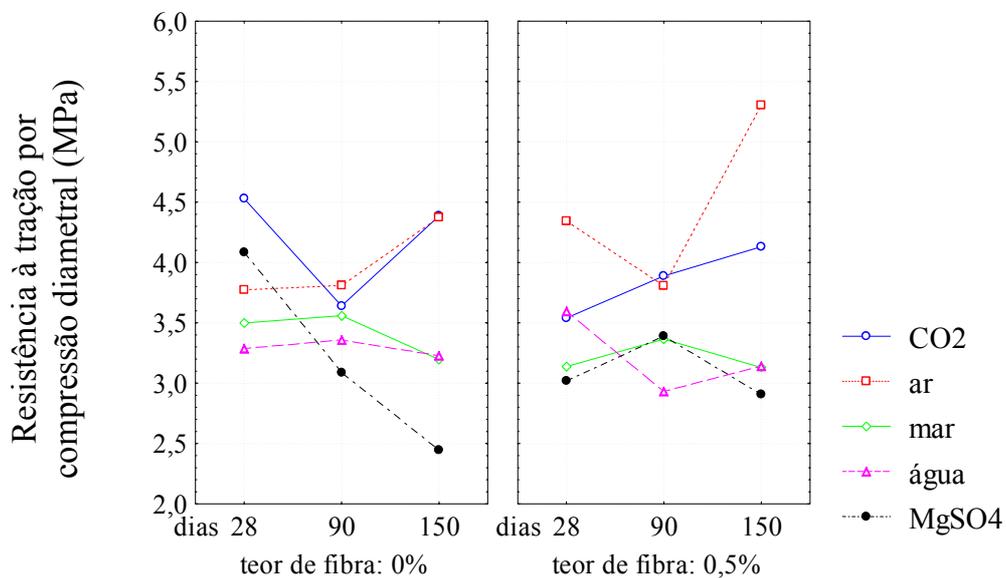


**FIGURA 36** - Efeito da interação entre teor de fibras, ambiente e idade na resistência à tração por compressão diametral dos corpos-de-prova não curados

A cura não foi um efeito significativo na resistência à tração por compressão diametral, como se pode observar na Tabela 14. Porém, da mesma forma como observado para resistência à compressão axial, a cura elevou as resistências à tração por compressão diametral, aos 28 dias, para todos os ambientes, como mostra a Figura 37. Através da análise de comparação entre as médias, pode-se afirmar que houve uma diminuição da resistência dos corpos-de-prova sem fibra de 28 para 90 dias nos ambiente de  $\text{MgSO}_4$ , e um aumento, nos corpos-de-prova com fibra, em ambiente de laboratório, de 90 para 150 dias. Nos outros ambientes, as diferenças entre as médias não foram significativas, e não foi possível comparar as médias das resistências dos corpos-de-prova com fibra em  $\text{MgSO}_4$ , pois as variâncias não são iguais.

Ainda na Figura 37, observa-se que a resistência dos corpos-de-prova com fibra, em ambiente de laboratório, foi superior à resistência em ambiente com elevada concentração de CO<sub>2</sub>. As resistências dos corpos-de-prova sem fibra aos 150 dias de exposição, com fibra aos 90 dias, e com fibra aos 150 dias, todos mantidos em ambiente de laboratório, foram superiores às resistências dos corpos-de-prova mantidos em água deionizada. Isto pode ser devido à carbonatação dos corpos-de-prova no primeiro caso, e à diminuição da formação de produtos de hidratação do cimento no segundo.

A presença da fibra influenciou significativamente a resistência à tração por compressão diametral dos corpos-de-prova imersos em MgSO<sub>4</sub>.



**FIGURA 37** - Efeito da interação entre teor de fibras, ambiente e idade na resistência à tração por compressão diametral dos corpos-de-prova curados em água com cal durante 14 dias

## 5.2.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO, MÓDULO DE ELASTICIDADE E TENACIDADE

Os valores de resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade dos corpos-de-prova encontram-se nas Tabelas 26, 27 e 28 do Anexo 2.

A análise estatística dos dados, realizada por análise de variâncias (ANOVA), assim como para as resistências à compressão axial e tração por compressão diametral, indicou que a presença das fibras não é um fator estatisticamente significativo na resistência à tração na flexão e no módulo de elasticidade das argamassas.

As Tabelas 15 e 16 apresentam os dados da análise estatística e mostram que o fator principal ambiente exerce forte efeito sobre os resultados da resistência à tração na flexão e no

módulo de elasticidade, apresentando efeito significativo considerando-se 1% de significância. A idade, apesar de apresentar um efeito menor, também exerce efeito significativo a 1% de significância para resistência à tração na flexão, e apenas a 10% para o módulo de elasticidade.

O teor de fibra exerce efeito somente na forma de interação para o ensaio de tração na flexão. As interações significativas são aquelas que envolvem o fator idade, ou seja, ambiente x idade e teor de fibra x idade, ambas significativas considerando-se 1% ou 2% de significância. As interações para o módulo de elasticidade não foram significativas.

**TABELA 15 - Análise de variância dos resultados de resistência à tração na flexão**

Fonte	Soma dos quadrados	GDL	Média dos quadrados	Teste F	Valor-p
<b>Efeitos principais</b>					
A: Ambiente	108,603	4	27,1507	89,26	<b>0,0000</b>
B: Idade	5,06945	2	2,53472	8,33	<b>0,0008</b>
C: Fibra	0,202496	1	0,202496	0,67	0,4188
<b>Interações</b>					
AB	40,5291	8	5,06614	16,66	<b>0,0000</b>
AC	2,21215	4	0,553038	1,82	0,1415
BC	3,68539	2	1,84269	6,06	<b>0,0046</b>
ABC	4,4376	8	0,5547	1,82	0,0968
<b>Resíduo</b>	13,9922	46	0,304179		
<b>Total(corrigido)</b>	186,35	75			

Todos os testes F foram baseados no erro residual da média dos quadrados

**TABELA 16 - Análise de variância dos resultados de módulo de elasticidade**

Fonte	Soma dos quadrados	GDL	Média dos quadrados	Teste F	Valor-p
<b>Efeitos principais</b>					
A: Ambiente	31,1408	4	7,78519	15,27	<b>0,0000</b>
B: Idade	2,11007	2	1,05504	2,07	0,1396
C: Fibra	0,619958	1	0,619958	1,22	0,2768
<b>Interações</b>					
AB	6,56271	8	0,820339	1,61	0,1531
AC	1,37245	4	0,343112	0,67	0,6147
BC	2,59771	2	1,29886	2,55	0,0910
ABC	7,31524	8	0,914404	1,79	0,1072
<b>Resíduo</b>	20,3988	40	0,509971		
<b>Total(corrigido)</b>	71,1233	69			

Todos os testes F foram baseados no erro residual da média dos quadrados

Nas Figuras 38 e 39, assim como observado para resistência à compressão axial, a resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade, aos 90 dias de idade, tiveram valores inferior para os corpos-de-prova expostos em água do mar devido ao ataque por sulfatos, que

provoca expansão, a decalcificação do C-S-H e formação de uma camada não cimentícia de M-S-H, conforme já explicado (TAYLOR E GOLLOP *apud* O'FARREL *et al.*, 2000). Abaixo desta camada, O'Farrel *et al.* (2000) afirmam que existe uma camada de gipsita de coloração branca. Na presente pesquisa, a existência dessa camada foi observada nos corpos-de-prova expostos em água do mar sintética, independentemente da presença de fibras. A Figura 40 mostra o espectro de difração raio-X<sup>10</sup> desta camada, realizada com o objetivo de identificar as seguintes fases: gipsita, etringita, brucita e quartzo, identificadas por O'FARREL *et al.* (2000).

Em relação aos valores de resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade para os corpos-de-prova expostos em solução de MgSO<sub>4</sub>, (Figuras 38 e 39), as resistências não foram tão afetadas quanto às resistências dos corpos-de-prova em água do mar, devido à formação da camada protetora de brucita e, pelo curto tempo de exposição e o efeito densificador causado pela deposição dos produtos da reação de ataque, especialmente a etringita, como explicado para a resistência à compressão.

Como se pode observar nas Figuras 38 e 39, os corpos-de-prova que permaneceram em ambiente de alta concentração de CO<sub>2</sub>, assim como observado para resistência à compressão axial, atingiram resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade superiores, aos 60 e 90 dias, devido à carbonatação do hidróxido de cálcio e densificação da estrutura, citado anteriormente.

As resistências dos corpos-de-prova em ambiente de laboratório tiveram resistências superiores aos corpos-de-prova que permaneceram imersos em água deionizada, conforme comentado para as resistências à compressão axial.

---

<sup>10</sup> Difração de raios-X- esta técnica identifica as fases cristalinas de materiais à base de cimento e permite obter informações sobre suas características cristalográficas e, através de alguns métodos, pode-se quantificar estas fases cristalinas e amorfas (SILVA, 2001).

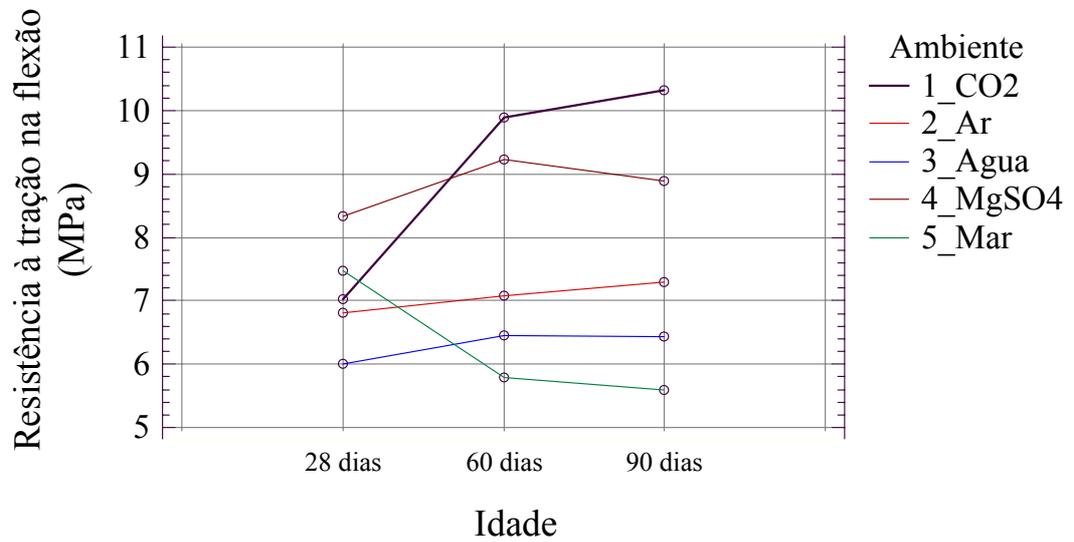


FIGURA 38 - Efeito da interação entre idade e ambiente sobre a resistência à tração na flexão

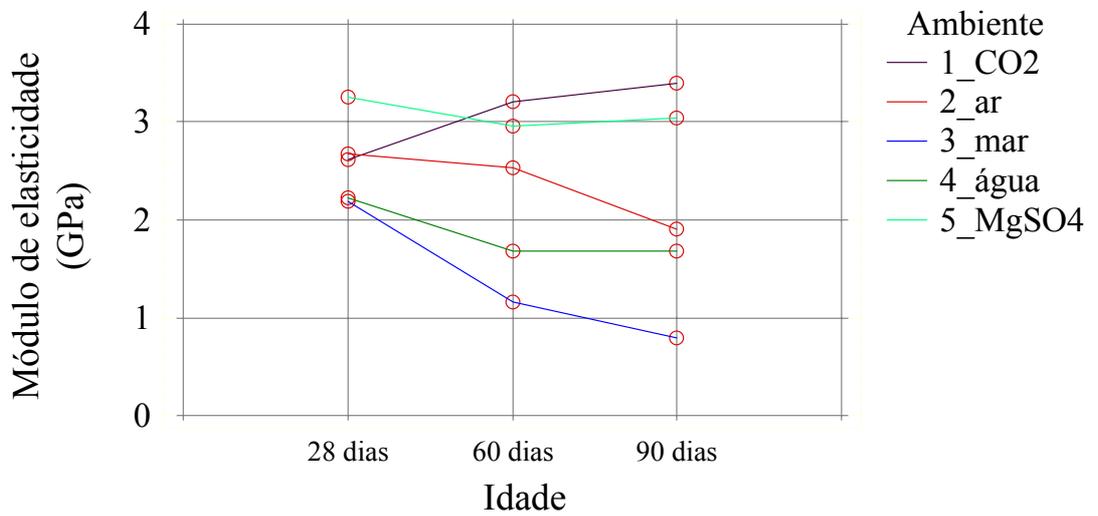
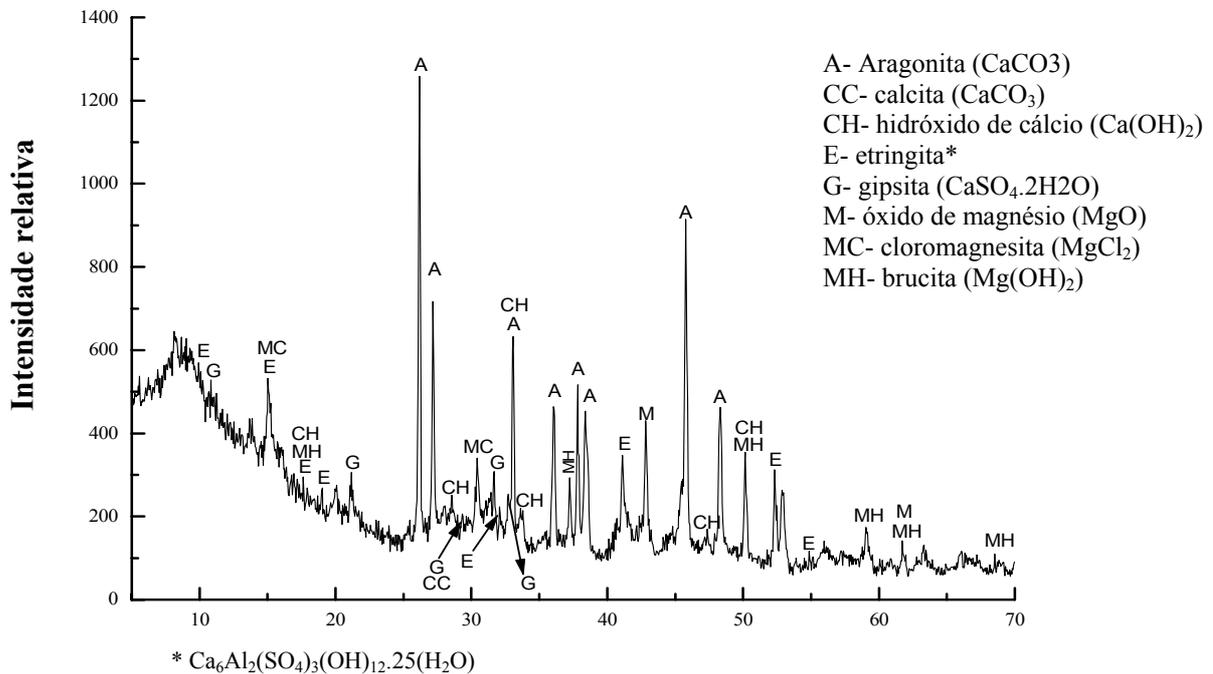


FIGURA 39 - Efeito da interação entre idade e ambiente sobre o módulo de elasticidade



## 20

**FIGURA 40** - Difração de raios-X da camada branca formada na superfície dos corpos-de-prova de argamassa imersos em água do mar

Analisando-se a Figura 40, os picos de maior intensidade foram identificados como aragonita, uma das formas alotrópicas do  $\text{CaCO}_3$ . Segundo Klein e Hurlbut Jr (1985), a aragonita é menos instável que a calcita sob condições atmosféricas normais, e de ocorrência menos comum.

Na amostra analisada não foi encontrado nenhum pico que identificasse o quartzo, como foi encontrado por O'Farrel (2000). Além dos compostos encontrados por este autor, foram identificados ainda: a calcita, hidróxido de cálcio, óxido de magnésio e cloromagnesita, e, com auxílio do JCPDS (1981), todos os picos encontram-se identificados no espectro da Figura 40.

A Figura 41 mostra o aspecto das superfícies dos corpos-de-prova submetidos aos diferentes ambientes. Observa-se a camada branca típica observada na superfície de todos os corpos-de-prova que foram imersos na água do mar sintética, independentemente da presença de fibras e da idade.

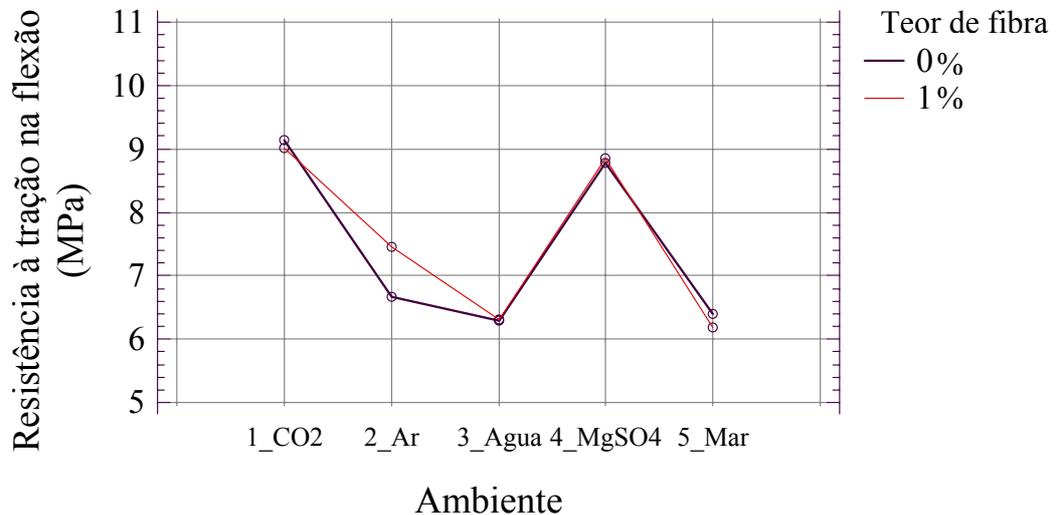


- 1- solução de  $MgSO_4$
- 2- água deionizada
- 3- água do mar sintética
- 4- ambiente de laboratório
- 5- ambiente com alta concentração de  $CO_2$

**FIGURA 41** - Aspecto da superfície dos corpos-de-prova expostos a diferentes ambientes

A Figura 42 mostra que o efeito da fibra não é significativo na resistência à tração na flexão, independentemente do ambiente de exposição, convergindo com as observações feitas por Jelidi (1991). Segundo o autor, o ensaio de tração na flexão, a resistência do compósito à primeira fissura é geralmente próxima à resistência do material sem reforço. Ao contrário, Johnston (2001) e Pelisser (2002) afirmam que há um aumento de resistência com adição de fibras.

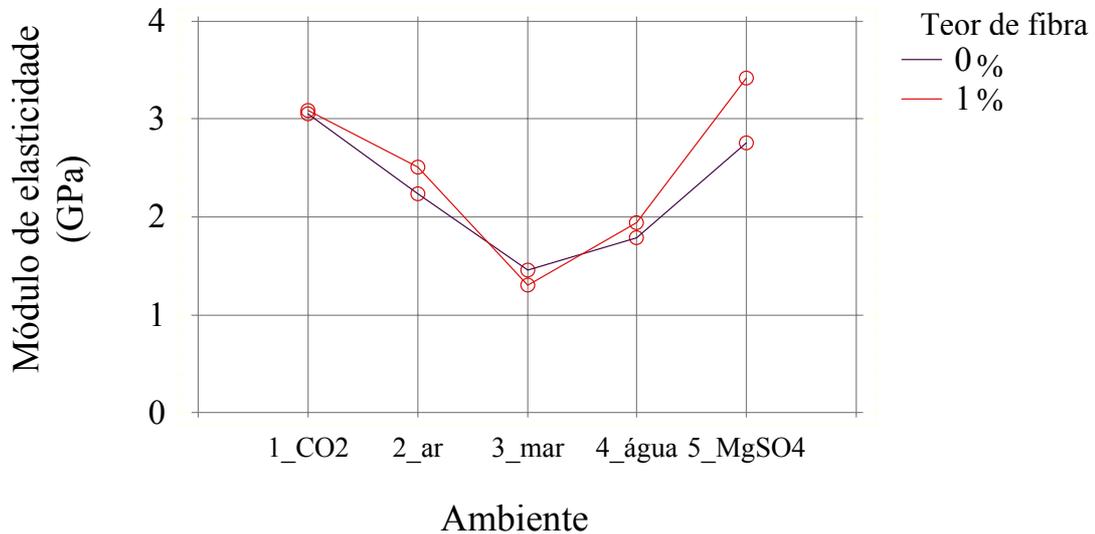
Mesmo não havendo efeito significativo da interação do teor de fibra com o ambiente na resistência à tração na flexão, observa-se na Figura 42, um aumento significativo para os corpos-de-prova com fibra que permaneceram em ambiente de laboratório, o que pode ser devido à maior profundidade de carbonatação com a presença das fibras de PET, conforme já comentado.



**FIGURA 42** - Efeito da interação entre ambiente e fibra sobre a resistência à tração na flexão

A interação ambiente e teor de fibra não foi um fator significativo no módulo de elasticidade. Porém, analisando a Figura 43, nota-se um aumento no módulo de elasticidade dos corpos-de-prova com fibras, que permaneceram em solução de  $MgSO_4$ . No entanto, através da comparação múltipla de médias este aumento não foi significativo, da mesma forma que para os demais ambientes.

De acordo com a literatura consultada, as fibras têm como papel principal, além de aumentar a tenacidade dos compósitos, proporcionar ductilidade com conseqüente diminuição do módulo de elasticidade, o que não foi observado nesta pesquisa, provavelmente devido à degradação das fibras de PET dentro da argamassa. O comportamento do compósito foi como o de um concreto convencional. Já Pelisser (2002) observou uma diminuição no módulo de elasticidade à compressão dos concretos com adição de fibras de PET, sendo a diminuição mais significativa para os teores mais elevados.

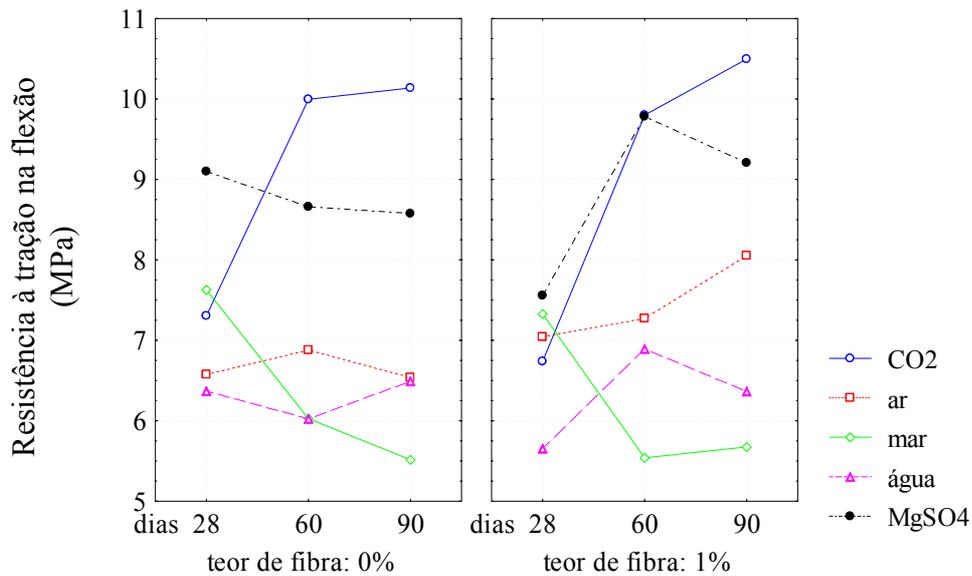


**FIGURA 43** - Efeito da interação entre ambiente e teor de fibra sobre o módulo de elasticidade

A Figura 44 mostra a influência da interação dos fatores ambiente, teor de fibra e idade na resistência à tração na flexão. Observa-se que o teor de fibras não influenciou de forma significativa as resistências dos corpos-de-prova. Através da comparação múltipla de médias, concluiu-se não haver diferença significativa entre as resistências dos corpos-de-prova mantidos nos diferentes ambientes, com avanço da idade.

Observa-se um aumento significativo da resistência, de 28 para 60 dias, para os corpos-de-prova que permaneceram em ambiente de  $\text{CO}_2$ , independentemente da presença da fibra. Há também um aumento da resistência em  $\text{MgSO}_4$  e uma diminuição significativa da resistência em água do mar sintética, ambos de 28 para 60 dias para os corpos-de-prova com fibra.

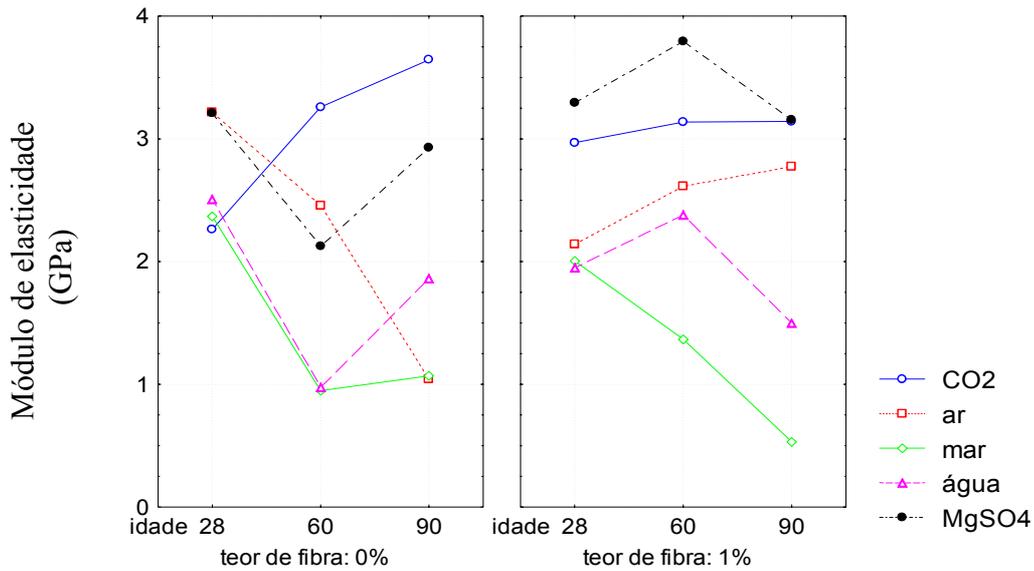
As resistências à tração na flexão dos corpos-de-prova sem fibra, aos 60 dias, em ambiente de laboratório são significativamente maiores que em água deionizada, devido a possível carbonatação dos corpos-de-prova que permaneceram em ambiente de laboratório e diminuição dos produtos de hidratação dos corpos-de-prova em água deionizada, mencionado anteriormente.



**FIGURA 44** - Interação ambiente, teor de fibra e idade na resistência á tração na flexão

Conforme Zheng (1995), resultados de pesquisa indicam que as fibras de poliéster propiciam um aumento no módulo de ruptura nas primeiras idades, mas os valores diminuem ou permanecem os mesmos nas idades mais avançadas. Este comportamento apenas foi observado, nesta pesquisa, (Figura 45) para os corpos-de-prova sem fibra expostos ao CO<sub>2</sub>, enquanto que, nos outros ambientes, não houve diferença significativa entre as médias. Nota-se, também, uma diminuição significativa do módulo de elasticidade dos corpos-de-prova sem fibra em água deionizada de 28 para 60 dias e um aumento em 90 dias, e uma diminuição do módulo para os corpos-de-prova com fibra em água do mar sintética, de 28 para 60 dias, devido à baixa resistência à tração na flexão alcançada neste ambiente.

Observa-se ainda, na Figura 45, que a presença da fibra diminuiu significativamente o módulo de elasticidade dos corpos-de-prova que permaneceram em água do mar sintética aos 90 dias de exposição comparado ao módulo de elasticidade dos corpos-de-prova sem fibra. Isto pode ter ocorrido devido à possibilidade da presença das fibras gerar vazios no interior da argamassa, facilitando, desta forma, a reação sulfática e, conseqüentemente, possível deterioração do material.



**FIGURA 45** - Interação ambiente, teor de fibra e idade no módulo de elasticidade

De acordo com o observado na presente pesquisa, e segundo Mehta e Monteiro (1994), a incorporação de fibras com volumes e tamanhos convenientes em concretos e argamassas não causa aumento considerável das resistências à tração e flexão. Entretanto, segundo os autores, há um melhor desempenho quanto ao comportamento pós-fissuração desses materiais e maior tenacidade.

Desta forma, para avaliar a tenacidade das argamassas com fibra e sem fibra, foi realizada uma análise estatística dos dados, por análise de variâncias (ANOVA) dos valores da área até a primeira fissura (Tabela 17) (comportamento pré-fissuração), e dos índices de tenacidade I5, I10 e I20 (Tabela 18, 19 e 20, respectivamente), demonstrando o comportamento pós-fissuração das argamassas com fibra. Os resultados individuais das áreas até a primeira fissura encontram-se nas Tabelas 26, 27 e 28 do Anexo 2 e, na Tabela 29, os índices I5, I10 e I20.

**TABELA 17** - Análise de variância dos resultados da área até a primeira fissura

Fonte	Soma dos quadrados	GDL	Média dos quadrados	Teste F	Valor-p
<b>Efeitos principais</b>					
A: Ambiente	0,503449	4	0,125862	14,27	<b>0,0000</b>
B: Idade	0,0206065	2	0,0103032	1,17	0,3199
C: Fibra	0,0008908	1	0,0008908	0,10	0,7520
<b>Interações</b>					
AB	0,246358	8	0,0307947	3,49	<b>0,0031</b>
AC	0,036375	4	0,0090376	1,03	0,4013
BC	0,0351019	2	0,0175509	1,99	0,1482
ABC	0,0930966	8	0,0116371	1,32	0,2578
<b>Resíduo</b>	0,405592	46	0,0881722		
<b>Total(corrigido)</b>	1,33276	75			

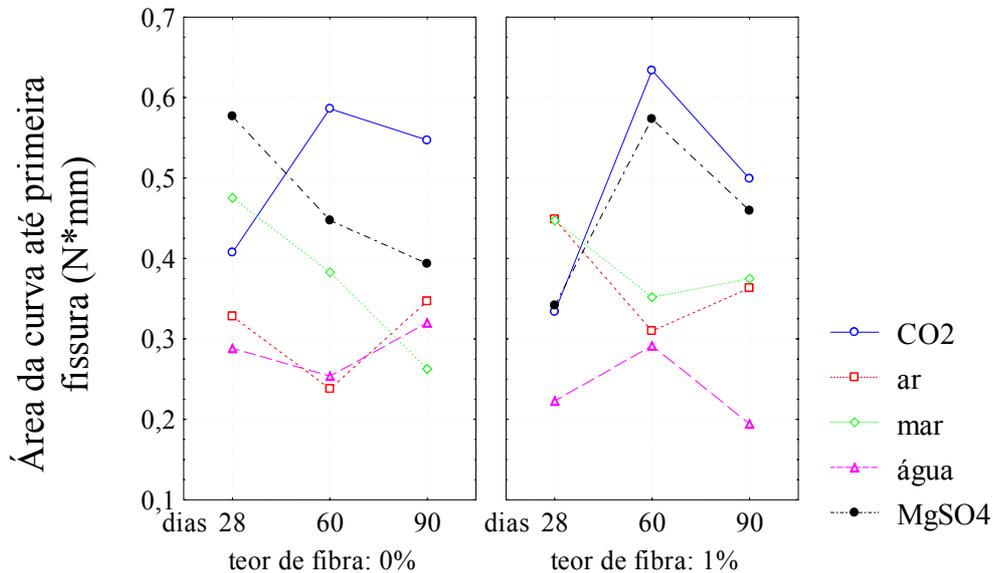
Todos os testes F foram baseados no erro residual da média dos quadrados

O fator principal ambiente exerce forte efeito sobre os resultados da área até a primeira fissura, apresentando efeito significativo mesmo considerando-se 1% de significância. A interação idade x ambiente também aparece como significativa (ou seja, o efeito da idade sobre a área depende do tipo de ambiente). Os demais fatores e interações não são significativos, considerando o nível de significância usualmente adotado (5% de significância).

Observando a Figura 46, nota-se um aumento significativo da área até a primeira fissura dos corpos-de-prova com e sem fibra em ambiente de CO<sub>2</sub>, de 28 para 60 dias. Este aumento ocorre devido à elevada resistência à tração na flexão alcançada, como se pode observar na Figura 44 e, Figura 81 do Anexo 3. Ao contrário, na água do mar sintética, onde as resistências à tração na flexão diminuíram com o tempo (Figura 44 e, Figura 85 do Anexo 3), ocorreu uma redução significativa desta área. Com relação às áreas dos corpos-de-prova sem fibra em MgSO<sub>4</sub>, nada se pode concluir, pois os valores não passaram no teste de normalidade, não permitindo, desta forma, a comparação entre as médias.

O aumento de fragilidade com o tempo dos corpos-de-prova com fibra que permaneceram em ambiente de MgSO<sub>4</sub> pode ser um indício da degradação mais intensa das fibras nestes corpos-de-prova do que nos demais. Observando a Figura 89 do Anexo 3, nota-se uma fragilidade no comportamento com avanço da idade. Isto pode ser explicado pela formação da camada protetora de brucita sobre o corpo-de-prova gerando, desta forma, um efeito de selagem no corpo-de-prova, impossibilitando a saída dos íons Ca<sup>2+</sup>, tornando o meio extremamente básico, agressivo às fibras de PET. Entretanto, para confirmação dessa hipótese, seria necessária a realização de novos ensaios com corpos-de-prova selados e imersos em solução de MgSO<sub>4</sub>.

Sobre os resultados dos corpos-de-prova com fibra para os outros ambientes nada se pode afirmar, pois as diferenças entre as médias não foram significativas.



**FIGURA 46** - Efeitos da interação ambiente, teor de fibra e idade sobre a área até a primeira fissura

Conforme Mehta e Monteiro (1994), o concreto convencional rompe repentinamente quando sua resistência última à flexão é atingida. Por outro lado, o concreto reforçado com fibras continua a resistir a cargas consideráveis, mesmo com deformações bem superiores às de ruptura do concreto convencional. Este comportamento também foi observado nesta pesquisa. Desta forma, um dos principais efeitos das fibras é a melhora da capacidade de deformação dos corpos-de-prova, devido ao aumento da capacidade de absorção de energia ou tenacidade. A tenacidade é caracterizada, em geral, pela área sob a curva *tensão x deformação*, ou sob parte dela. O aumento da ductilidade e da tenacidade pode ocorrer mesmo quando o aumento da resistência é mínimo.

Para avaliar a tenacidade das argamassas com fibra, foram calculados os índices de tenacidade I5, I10 e I20, as Tabelas 18, 19 e 20 apresentam a análise de variâncias destes índices, respectivamente.

**TABELA 18 - Análise de variância dos resultados Índice de Tenacidade I5**

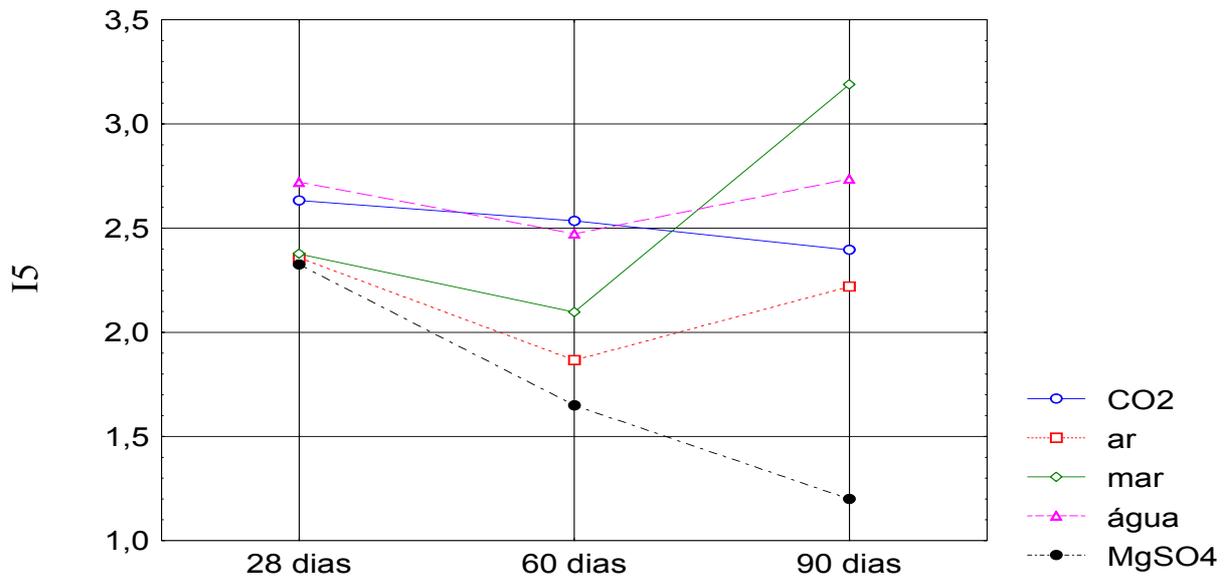
<b>Fonte</b>	<b>Soma dos quadrados</b>	<b>GDL</b>	<b>Média dos quadrados</b>	<b>Teste F</b>	<b>Valor-p</b>
<b>Efeitos principais</b>					
A: Ambiente	2,55333	4	0,638331	4,40	<b>0,0118</b>
B: Idade	0,810671	2	0,405335	2,79	0,0879
<b>Interações</b>					
AB	1,6384	8	0,2048	1,41	0,2579
<b>Resíduo</b>	2,61358	18	0,145199		
<b>Total(corrigido)</b>	<b>7,50809</b>	32			

Todos os testes F foram baseados no erro residual da média dos quadrados

O fator principal ambiente exerce forte efeito sobre os resultados do índice de tenacidade I5, apresentando efeito significativo a 1% de significância. A idade apresenta um efeito menor, que é significativo apenas a 10% de significância. A interação entre idade e ambiente não revela significância estatística.

A Figura 47 mostra a influência da interação entre idade e ambiente no índice de tenacidade I5. Nota-se que há uma tendência na diminuição do índice de tenacidade, com o avanço da idade, para os corpos-de-prova que permaneceram em solução de  $MgSO_4$  e  $CO_2$ , diminuição esta ocasionada pela degradação das fibras de PET em meio alcalino. Essa constatação converge com as conclusões que Jelidi (1991), Houget (1992) e Pelisser (2002) chegaram ao trabalhar com fibras de PET. Segundo Jelidi (1991) e Houget (1992), as fibras de PET sofrem fortes degradações químicas e físicas dentro de uma matriz cimentícia, ocasionando o desaparecimento total da ductilidade do compósito e que aos 90 dias de idade o compósito com este tipo de fibra apresenta comportamento similar ao concreto convencional. Entretanto, não fica descartada a possibilidade de a redução nos valores do índice I5 ter sido causada pela degradação da própria matriz cimentícia devida a uma reação sulfática, no caso dos corpos-de-prova expostos em solução de  $MgSO_4$ .

O elevado valor do índice de tenacidade I5, aos 90 dias, em água do mar sintética pode ser explicado pela variabilidade dos resultados (Tabela 29 do Anexo 2). No entanto, o comportamento dos índices nos ambientes de laboratório e água deionizada, nada se pode concluir, pois, as diferenças entre as médias não foram significativas.



**FIGURA 47** - Efeitos da interação idade e ambiente sobre o índice de tenacidade I5

A Tabela 19 indica que o fator principal ambiente exerce forte efeito sobre os resultados do índice de tenacidade I10, apresentando efeito significativo considerando-se 1% de significância. A idade e a interação idade x ambiente apresentam um efeito bem menor, que é significativo apenas a 15% de significância.

**TABELA 19** - Análise de variância dos resultados Índice de Tenacidade I10

Fonte	Soma dos quadrados	GDL	Média dos quadrados	Teste F	Valor-p
<b>Efeitos principais</b>					
A: Ambiente	10,5308	4	2,63269	7,11	<b>0,0011</b>
B: Idade	1,83647	2	0,918234	2,48	0,1104
<b>Interações</b>					
AB	5,20288	8	0,65036	1,76	0,1493
<b>Resíduo</b>	7,03308	19	0,370162		
<b>Total(corrigido)</b>	24,2655	33			

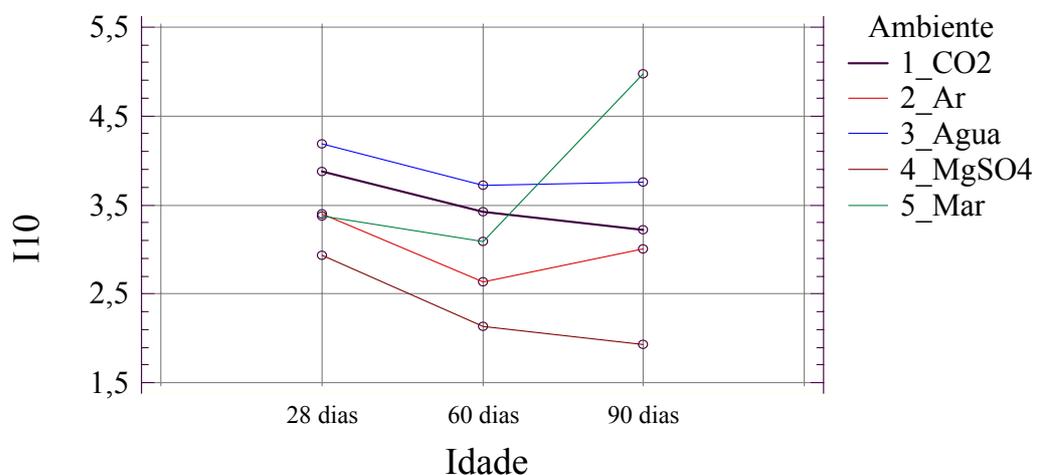
Todos os testes F foram baseados no erro residual da média dos quadrados

A Figura 48 mostra uma tendência na diminuição do índice de tenacidade I10, com o avanço da idade, para os corpos-de-prova que permaneceram em água deionizada, ambiente com alta concentração de CO<sub>2</sub> e solução de MgSO<sub>4</sub>, causada pela degradação das fibras de PET em meio alcalino. Já os corpos-de-prova expostos em ambiente de laboratório (ar) e água do mar sintética não apresentaram este comportamento.

No caso da água do mar, a tendência inesperada pode ser devido a uma variabilidade muito grande dos resultados aos 90 dias de idade (Tabela 29 do Anexo 2) o que pode ter

influenciado na análise ANOVA. Desta forma a análise de variância foi realizada novamente, desconsiderando os resultados dos corpos-de-prova submetidos a esse ambiente, o que permitiu concluir que a idade tem influência significativa no índice de tenacidade, confirmando ter ocorrido degradação da fibra com o passar do tempo.

Com relação aos corpos-de-prova que permaneceram em ambiente de laboratório, através da análise de comparação de médias, não se pode afirmar que houve um aumento no índice I10 de 60 para 90 dias, pois não há diferença significativa entre as médias.



**FIGURA 48** - Efeitos da interação idade e ambiente sobre o índice de tenacidade I10

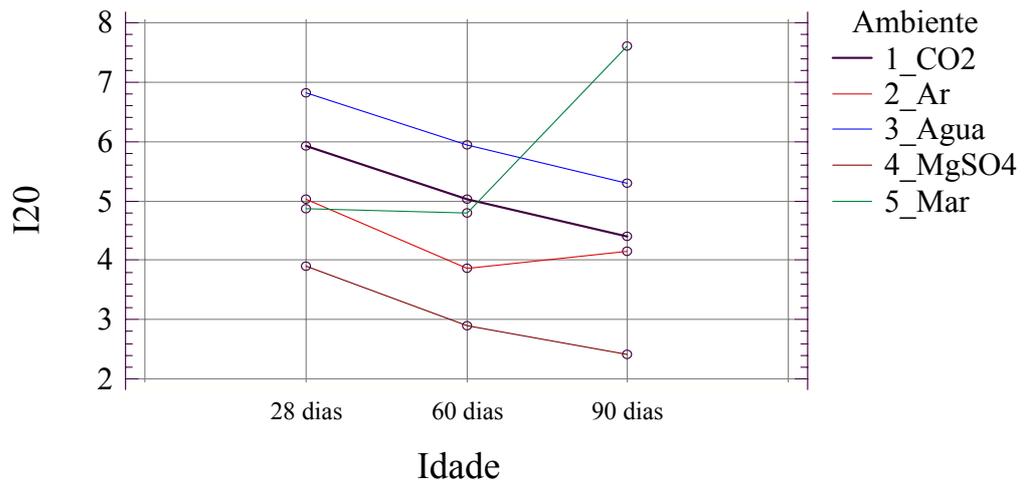
O fator principal ambiente exerce forte efeito sobre os resultados do índice de tenacidade I20, apresentando efeito significativo considerando-se 1%, como mostra a Tabela 20. A idade não apresenta efeito significativo, e a interação idade x ambiente apresenta um efeito bem menor, que é significativo apenas a 15% de significância.

**TABELA 20** - Análise de variância dos resultados Índice de Tenacidade I20

Fonte	Soma dos quadrados	GDL	Média dos quadrados	Teste F	Valor-p
<b>Efeitos principais</b>					
A: Ambiente	30,5537	4	7,63844	7,76	<b>0,0008</b>
B: Idade	3,61245	2	1,80622	1,84	0,1882
<b>Interações</b>					
AB	15,6915	8	1,96143	1,99	0,1069
<b>Resíduo</b>	17,7121	18	0,984004		
<b>Total(corrigido)</b>	66,7001	32			

Todos os testes F foram baseados no erro residual da média dos quadrados

As mesmas observações feitas para o índice de tenacidade I10 (Figura 48) são válidas para I20, reforçando que houve degradação das fibras de PET em matriz cimentícia devido à diminuição do índice de tenacidade I20 com o passar do tempo, como pode ser observado na Figura 49.



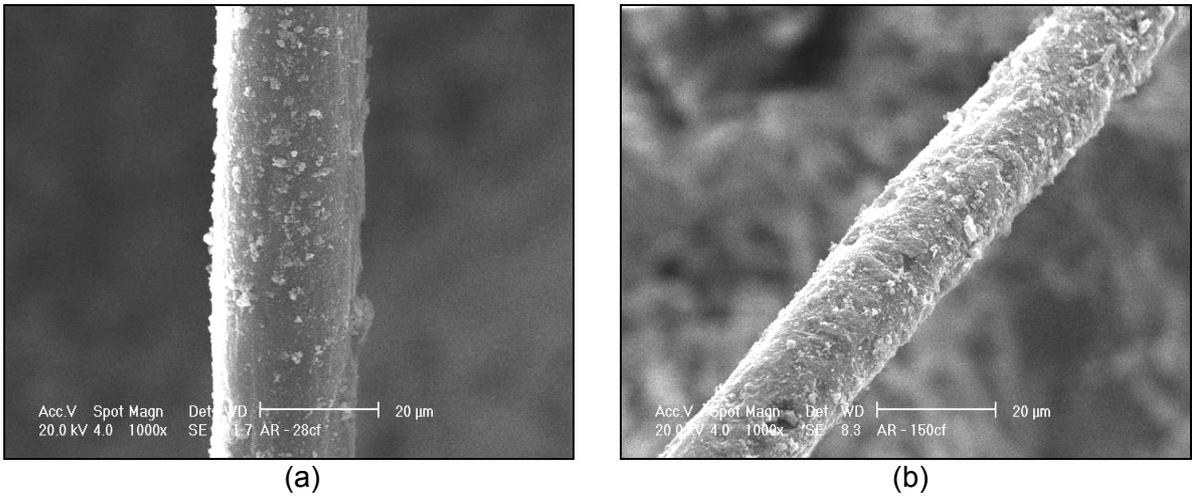
**FIGURA 49** - Efeitos da interação idade e ambiente sobre o índice de tenacidade I20

Os resultados desta pesquisa convergem com os resultados de Balaguru e Slattum (1995), que realizaram testes acelerados de durabilidade em meio alcalino com alguns tipos de fibra e concluíram que as fibras de poliéster têm sua tenacidade diminuída com o passar do tempo, assim como observado nesta pesquisa, para todos os índices de tenacidade.

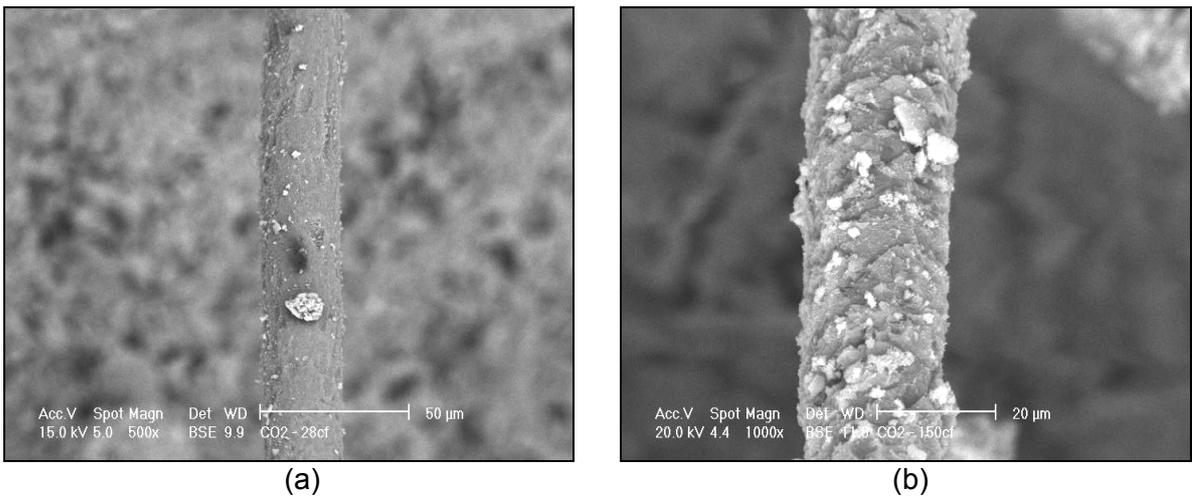
Pelisser (2002) trabalhou com diferentes teores de fibras de PET no concreto e obteve o maior valor de tenacidade para os teores máximos de fibras aos 35 dias de idade. Este valor diminuiu bruscamente aos 150 dias de idade, o que pode ser explicado pela degradação da fibra no interior do concreto.

### 5.2.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

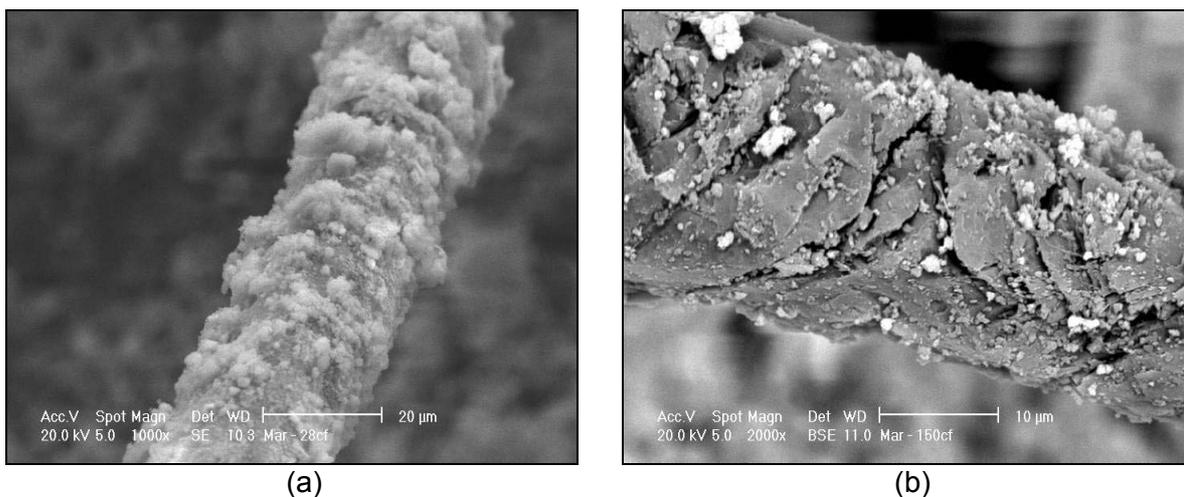
As Figuras 50, 51 e 52 mostram imagens das fibras que permaneceram no interior de argamassas expostas ao ambiente de laboratório, à água do mar sintética e em ambiente com alta concentração de CO<sub>2</sub>, respectivamente, por 28 e 150 dias. Observa-se que houve alterações na textura superficial das fibras em todas as amostras analisadas, indicando que houve degradação parcial, independentemente do ambiente de exposição dos corpos-de-prova.



**FIGURA 50** - Aspecto da fibra de PET em argamassa expostas por 28 (a) e 150 (b) dias ao ambiente de laboratório

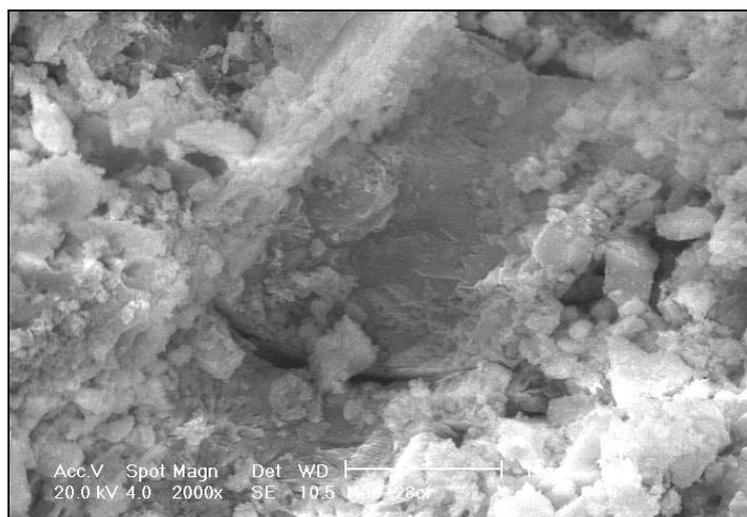


**FIGURA 51** - Aspecto da fibra de PET em argamassa expostas por 28 (a) e 150 (b) dias a ambiente com alta concentração de CO<sub>2</sub>

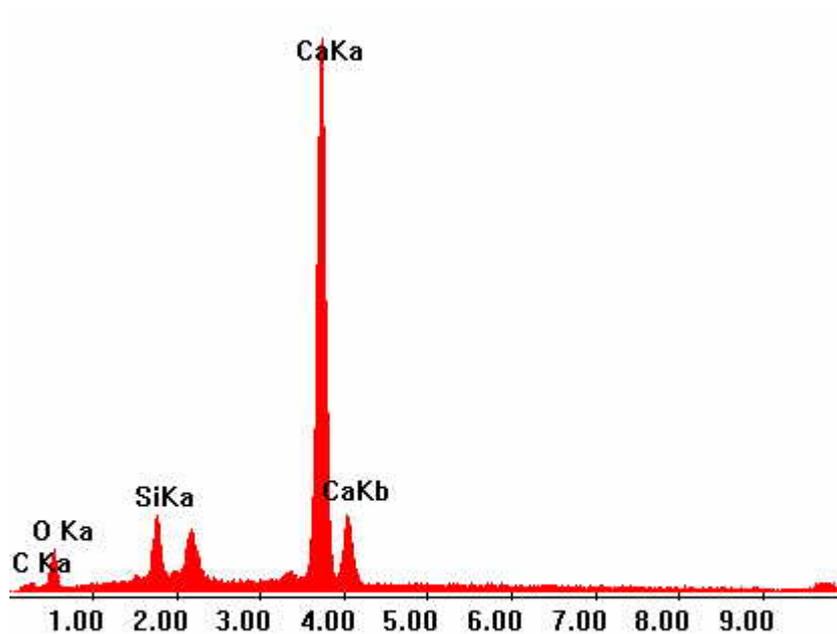


**FIGURA 52** - Aspecto da fibra de PET em argamassa submersa por 28 (a) e 150 (b) dias em água do mar sintética

A Figura 53 mostra um vazio anteriormente ocupado pela fibra em amostra de argamassa que permaneceu imersa em água do mar sintética por 28 dias. Observou-se, por meio de análise química realizada no local que pode ter havido uma interação fibra-meio indicada pela presença de carbono no espectro, como mostra a Figura 54. Entretanto, o carbono detectado pode pertencer unicamente aos carbonatos adicionados intencionalmente ao cimento na sua fabricação ou à carbonatação da amostra durante seu manuseio e armazenagem.



**FIGURA 53** - Vazio deixado pela degradação da fibra e os produtos de reação da mesma com o meio- 28 dias em água do mar sintética



**FIGURA 54** - Análise química do vazio deixado pela degradação da fibra e os produtos de reação da mesma com o meio- 28 dias em água do mar sintética

## 6 CONCLUSÃO

Os ensaios de durabilidade mostraram que as fibras de PET sofrem degradação em solução aquosa de ácido sulfúrico, de hidróxido de cálcio e também em solução de Lawrence, que simula a água de poro de argamassas e concretos. Entretanto, a maior intensidade de degradação das fibras após 150 dias de exposição ocorreu em solução de ácido sulfúrico, onde as mesmas sofreram mudanças estruturais expressivas e intensa desagregação. Nas soluções de Lawrence e de hidróxido de cálcio, a degradação foi de baixa intensidade, mesmo sob temperaturas da ordem de 50°C. Nesses casos, foram observadas alterações na textura superficial das fibras e formação de aglomerados. A espectroscopia no infravermelho não apontou mudanças expressivas na estrutura molecular das fibras submetidas a essas soluções agressivas.

Apesar de não ter sido detectada degradação apreciável das fibras imersas nas soluções de Lawrence e de hidróxido de cálcio, a microscopia eletrônica de varredura revelou que as fibras sofreram degradação intensa no interior dos corpos-de-prova de argamassa e concreto. Algumas das fibras analisadas chegaram a sofrer desagregação completa, deixando vazios na matriz cimentícia, apesar da formação de produtos de reação. Isso evidencia que o ambiente de exposição das fibras no interior das argamassas e concretos é mais agressivo do que a água de poro idealizada.

Foi testada, também, a influência das fibras de PET na durabilidade de argamassas de cimento e areia submetidas a diversos ambientes agressivos. Os resultados estatísticos mostraram que as fibras praticamente não influenciam o desempenho das argamassas à tração, à compressão, à tração na flexão e módulo de elasticidade, independentemente do ambiente de exposição.

Em ambiente com alta concentração de CO<sub>2</sub>, a fibra influenciou de forma positiva no aumento da resistência à compressão axial dos corpos-de-prova não curados, devido ao possível aumento da porosidade da argamassa e conseqüente aumento da profundidade de carbonatação, resultando na densificação da estrutura. Nas outras propriedades avaliadas não houve influência das fibras de PET no interior das argamassas expostas a este ambiente. Os índices de tenacidade I5, I10 e I20 apresentam uma tendência em diminuir com o avanço da idade, devido à degradação das fibras em matriz cimentícia exposta a este ambiente.

Os corpos-de-prova imersos em água deionizada não tiveram nenhuma influência das fibras de PET nas propriedades mecânicas avaliadas nesta pesquisa. Porém, cabe destacar que as fibras melhoraram as resistências à compressão dos corpos-de-prova curados expostos em

ambiente de laboratório em relação aos que permaneceram em água deionizada, para todas as idades. Este fenômeno pode ser explicado de duas formas: pela carbonatação, com conseqüente aumento da resistência dos corpos-de-prova em ambiente de laboratório e/ou o deslocamento dos íons  $\text{Ca}^{2+}$  do interior da argamassa para a solução de água deionizada, que são fundamentais na formação dos produtos de hidratação. Para tração por compressão diametral, este aumento ocorreu apenas nas idades de 90 e 150 dias de exposição.

As argamassas com fibra mantidas em água do mar sintética tiveram suas resistências à compressão superiores àquelas sem fibra, provavelmente pela fibra amenizar a fissuração da argamassa proveniente da expansão dos produtos resultantes da reação sulfática. A presença da fibra nos corpos-de-prova imersos neste ambiente diminuiu significativamente o módulo de elasticidade das argamassas aos 90 dias em relação aos corpos-de-prova sem fibra, devido à possibilidade da fibra gerar vazios no interior da argamassa, facilitando a reação sulfática. Contraditória a afirmação anterior, desta forma, há necessidade de realizar ensaios para comprovar uma das hipóteses levantadas.

Neste ambiente, os índices de tenacidade apresentaram uma grande variabilidade dos resultados, principalmente aos 150 dias, impossibilitando qualquer conclusão.

A presença das fibras de PET nos corpos-de-prova imersos em solução de  $\text{MgSO}_4$ , influenciou apenas o aumento da resistência à tração por compressão diametral dos corpos-de-prova curados durante 14 dias em água com cal.

Os índices de tenacidade I5, I10 e I20, para todos os ambientes exceto ambiente de laboratório e água do mar sintética, possuem uma tendência em diminuir com o avanço da idade, concluindo-se, desta forma, que provavelmente ocorre degradação das fibras de PET em matrizes cimentícias em curto espaço de tempo (alguns meses), independentemente do ambiente de exposição.

A suscetibilidade da fibra de PET à degradação limita sua utilização em argamassas e concretos correntes. A melhoria nas propriedades desses materiais no estado endurecido devido à presença das fibras (tenacidade e resistência ao impacto), é perdida, dessa forma, em alguns meses.

As fibras poderiam melhorar algumas características desses materiais no estado fresco, aumentando sua coesão e plasticidade, e reduzindo a um mínimo a possibilidade de ocorrência de fissuração por retração plástica e por retração por secagem. Por conseqüência, tem-se menor permeabilidade e maior durabilidade.

Perante o exposto, o uso das fibras de PET pode ser admitido e mesmo vantajoso nos seguintes casos:

- Peças de concreto que serão submetidas à flexão e impacto unicamente nas primeiras idades, quando as fibras ainda apresentam nível baixo de degradação, e que não serão expostas, quando em serviço, a ambientes agressivos, tendo em vista o aumento da permeabilidade que ocorre com a degradação das fibras.

- Lajes ou contrapisos de concreto em que se queira evitar fissuração nas primeiras idades. Da mesma forma, não devem ser expostas a ambientes agressivos ao longo da sua vida útil.

- Outra aplicação possível para as fibras de PET é na confecção de argamassas de cimento, cal e areia, ou cimento, areia e incorporador de ar. Entretanto, sua utilização em argamassas de revestimento e em argamassas de assentamento de alvenaria somente pode ser recomendada a partir da realização de testes de desempenho específicos.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de aprofundar as pesquisas referentes ao tema abordado no presente trabalho, sugere-se para trabalhos futuros:

- a avaliação, ao longo do tempo, do desempenho de argamassas de revestimento, de cimento, cal e areia com fibras de PET;
- o estudo da retração plástica e fissuração inicial de argamassas de revestimento com fibras de PET;
- a avaliação da durabilidade das fibras de PET em argamassas de gesso e seu desempenho mecânico;
- a avaliação de métodos de tratamento superficial das fibras de PET para reduzir a intensidade de degradação em matriz cimentícia;
- o estudo do efeito de adições na degradação das fibras de PET em materiais à base de cimento Portland.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

1. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **State-of-the-art report on fibre reinforced concrete**, ACI 544.IR- 96, Manual of concrete practice. Farmington Hills, 1998. CD-ROM.
2. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3822**. Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers. 1996.
3. \_\_\_\_\_. **ASTM C1018**. Standard Test Method of Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading). 1994.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**. Cimento Portland- Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
5. \_\_\_\_\_. **NBR 7217**. Agregados- determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.
6. \_\_\_\_\_. **NBR 7219**. Agregado- Determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro, 1987.
7. \_\_\_\_\_. **NBR 7220**. Agregados- Determinação de impurezas orgânicas e húmicas. Rio de Janeiro, 1987.
8. \_\_\_\_\_. **NBR 7222**. Argamassa e concreto- Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
9. \_\_\_\_\_. **NBR 7251**. Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.
10. \_\_\_\_\_. **NBR 13279**. Argamassa para assentamento de paredes e revestimentos de paredes e tetos- Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1995.
11. \_\_\_\_\_. **NB 1**. Projeto de Estruturas de Concreto- texto concluído da revisão da NB 1. Rio de Janeiro, 2001. CD-ROM.
12. BALAGURU P.; SLATTUM, K. Test Methods for Durability of Polymeric Fibers in Concrete and UV Light Exposure. Testing of Fiber Reinforced Concrete, AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Detroit, Michigan, Ed. D. J. Stevens, et.al. p. 115-136, 1995.
13. BASTOS, P. K. X. **Propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento**. 2001. 190f.. Tese (Doutorado em Engenharia)-Escola Politécnica da USP, São Paulo.
14. BAUER, E; CORTEZ, I. M. M. Compósitos à base de fibras sintéticas em argamassas para revestimento na prevenção da fissuração. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de

- Argamassas, 4., Brasília (DF), 2001. **Anais...**Brasília: UnB-PECC/ANTAC, 2001. p 89-100.
15. BELLAMY, L. J. **The Infrared Spectra of Complex Molecules**. 3 ed. New York: Chapman and Hall Ltd, 1986. 433 p.
  16. BELIE, N.; DEBRUYCKERE, M.; NIEUWENBURG, D.; BLAERE, B. Concrete Attack by Feed Acids: Accelerated Tests to Compare Different Concrete Compositions and Technologies. **ACI Materials Journal**. v. 94, n. 6, p 546-554, nov./dez. 1997.
  17. BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 1.ed. England: Elsevier Science Publishers Ltd, 1990. 449 p.
  18. CAPEL, B. **La composition de l'eau de mer naturelle et artificielle**. Disponível em: < [www.mars.reefkeepers.net/Articles/EauDeMer.html](http://www.mars.reefkeepers.net/Articles/EauDeMer.html) >. Acesso em: 28 agosto 2001.
  19. CHEN *et al.*. Comparative Toughness Testing of Fiber Reinforced Concrete. **Testing of Fiber Reinforced Concrete**. Editors D. J. Stevens, *et al.* p.p 41-75, 1995.
  20. CHEN, P.; CHUNG, D. D. L. A Comparative Study of Concretes Reinforced with Carbon, Polyethylene, and Steel Fibers and Their Improvement by Latex Addition. **ACI Materials Journal**. v. 93, n. 2, p. 129-133. mar./abr. 1996.
  21. EAST, G. C.; RAHMAN, M. Effect of applied stress on the alkaline hydrolysis of geotextile poly(ethylene terephthalate). Part 1: room temperature. **Polymer**, v. 40. p. 2281-2288. 1999.
  22. FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço**. São Paulo: EPUSP, 2000. 69 p. (Série Boletim Técnico BT/PCC/260).
  23. GANI, M. S. J. **Cement and Concrete**. New York: Editora Chapman & May, 1997, 112p.
  24. GODOY, E.H. e BARROS, M.M.S.B. Propostas de interesse das argamassas. In: III Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. **Anais...** Vitória: PECC/ANTAC, 1999, p.p 159-167.
  25. GRIFFITHS, R.; BALL, A. An assessment of the properties and degradation behavior of glass-fibre-reinforced polyester polymer concrete. **Composites Science and Tecnology**. n. 60, p. 2747-2753, 2000.
  26. HOLLAND, B. J.; HAY, J. N. The Thermal degradation of PET and analogous polyesters measured by thermal analysis-Fourier Transform Infrared Spectroscopy. **Polymer**, n. 43, p. 1835-1847, 2002.

27. JCPDS. **Powder Diffraction File Search Manual for Common Phases**. Pennsylvania: International Center for Diffraction Data, 1981.
28. JELIDI, A. **Conception d'un materiau composite a matrice cimentaire renforcee par des fibres de polyester**. 1991. 170f.. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais)-Devant L'Institut National des Sciences Appliquees de Lyon, França.
29. JENQ, Y. S.; SHAH, S. P. Crack Propagation in Fiber-Reinforced Concrete. **Journal of Structure Engineering**, v. 112, n. 1, p. 19-35, jan. 1986.
30. JOHN, V. M.; AGOPYAN, V.; PRADO, T. A. Durabilidade de compósitos de cimento e fibras vegetais. In: Seminário Internacional de Materiais Componentes e Estruturas, 3º, 1997, **Anais...**São Paulo, SP. 1997.
31. JOHNSTON, C. D. **Fiber-reinforced cements and concretes**. Canada: V. M. Malhotra, 2001. Vol. 3. 364 p.
32. JÚNIOR, N. O. P. **Análise do desempenho de concretos incorporando baixos teores de fibras de polipropileno, nylon e poliéster**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2001, 47 p. (Relatório de Ensaios Tecnológicos).
33. KLEIN, C.; HURLBUT, C. S. Jr. **Manual of Mineralogy**. New York: John Wiley & Sons, Inc. 21ª ed. 1985. 681 p.
34. KOENIG, J. L. **ACS Professional Reference Book**. Washington, Dc: American Chemical Society, 1992.
35. KURTZ, S.; BALAGURU, P. Postcrack creep of polymeric fiber-reinforced concrete in flexure. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 183-190, 1999.
36. MANDEL, J. A.; WEI, S.; SAID, S. Studies of the Properties of the Fiber-Matrix Interface in Steel Fiber Reinforced Mortar. **ACI Materials Journal**. p. 101-109, mar./abr. 1987.
37. MARIKUNTE, S.; SOROUSHIAN, P. Statistical Evolution of Long-Term Durability Characteristics of Cellulose Fiber Reinforced Cement Composites. **ACI Materials Journal**. v. 91, n. 6, p. 607-616, nov./dez. 1994.
38. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estruturas, Propriedades e Materiais**. 1 ed. São Paulo: Pini, 1994. 573p.
39. NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2 ed. São Paulo: Pini, 1997. 828p.
40. O'FARREL; M. W. S.; SABIR B.B. Resistance to chemical attack of ground brick-PC mortar. Part II. Synthetic seawater. **Cement and Concrete Research**. v. 30, p. 757-765, 2000.

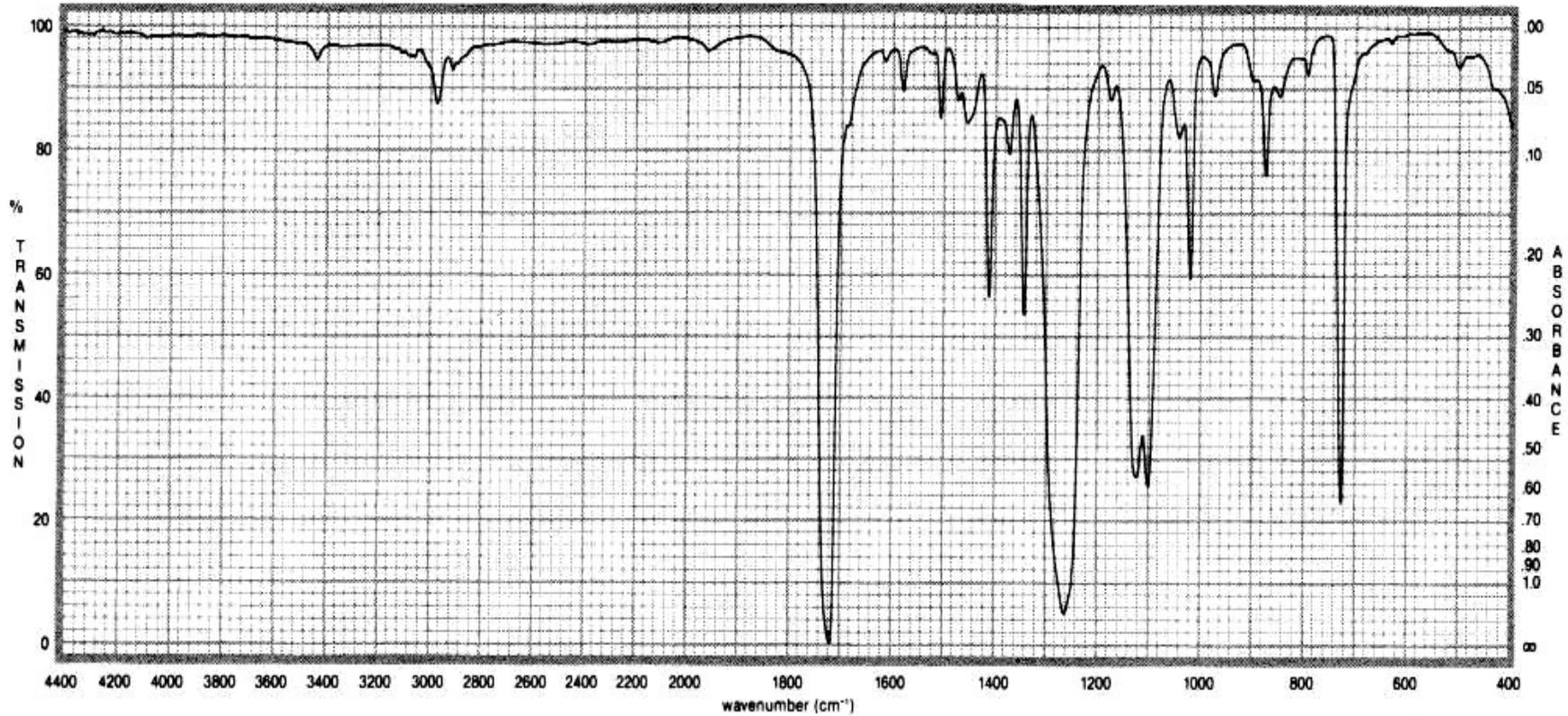
41. OLIVEIRA, C. T. A. **Água do poro de pastas de cimento de escória**. 2000. 241f.. Tese (Doutorado em Engenharia)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
42. OLIVEIRA, M. L. L. **Influência da adição de fibras de polipropileno em argamassas**. 2001. 150f.. Dissertação (Mestrado em Construção Civil)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
43. PACIONICK, S. Curso de Ciência e Engenharia dos Materiais. Disponível em: < [www.dcm.puc-rio.br/Cursos/CEMAT/sld139.htm](http://www.dcm.puc-rio.br/Cursos/CEMAT/sld139.htm) >. Acesso em: 4 dezembro 2002.
44. PELISSER, F. **Avaliação do desempenho de concreto reforçado com fibras de polietileno tereftalato**. 2002. Dissertação (Mestrado em Construção Civil)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
45. SEGRE, N.; TONELLA, E.; JOEKES, I. Evaluation of the stability of polypropylene fibers in environments aggressive to cement-based materials. **Cement and Concrete Research**. v. 28, n. 1, p. 75-81. 1998.
46. SILVA, D. A. **Efeitos dos polímeros HEC e EVA na microestrutura de pastas de cimento Portland**. 2001. 241f.. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
47. SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica**. 1994. 143f.. Dissertação (Mestrado em Construção)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
48. SILVA, M. Projeto lixo seletivo. Disponível em: <[www.marcelosilva.com.br](http://www.marcelosilva.com.br)>. Acesso em: 21 março 2002.
49. SILVERSTEIN, R. M.; BASSLER, G. C.; MORRILL, T. C. **Spectrometric Identification of Organic Compounds**, 5. ed. Canada: John Wiley & Sons, Inc, 1991. 419 p.
50. SPROUSE, J. F. **Sprouse Collection of Infrared Spectra. Book I: Polymers**. Pennsylvania: Sprouse Scientific Systemms, Inc, 1987.
51. SWAMY, R. N. *Fibre Reinforcement of Cement and Concrete*. Evaluation of Fibre Reinforced Cement Based Composites. **Matériaux et Constructions**. v. 8, n. 45, p. 235-254. [197-].
52. TANESI, J.; FIGUEIREDO, A. D. **Fissuração por retração em concretos reforçados com fibras de polipropileno**. São Paulo: EPUSP, 1999. 25 p.(Série Boletim Técnico BT/PCC/239).

53. TOLÊDO FILHO, R. D. e SANJUÁN, M. A. Effect of low modulus sisal and polypropylene fibre on the free and restrained shrinkage of mortars at early age. **Cement and Concrete Research**. v. 29, p. 1597-1604. 1999.
54. UFBA, UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA. Disciplina: Tecnologia dos Polímeros. Disponível em: < [www.deq.eng.ufba.br/polimeros/propriedades.html](http://www.deq.eng.ufba.br/polimeros/propriedades.html) >. Acesso em: 21 março 2002.
55. HOUGET, V. **Etude dès caracteristiques mecaniques et physico-chimiques de composites ciments-fibres organiques**. 1992. 237f.. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais)- Devant L'Institut National des Sciences Appliquees de Lyon, França.
56. WANG Y., BACKER S.; LI V. C. An experimental study of synthetic fibre reinforced cementitious composites. **Journal of Materials Science**. V. 22, p. 4281-4291. 1987.
57. WANG Y.; ZUREICK, A.; CHO, B. Properties of fibre reinforced concrete using recycled fibres from carpet industrial waste. **Journal of Materials Science**. v. 29, p. 4191-4199. 1994.
58. WANG, Y.; WU, H.C.; LI, V. C. Concrete Reinforcement with Recycled Fibers. **Journal of Materials in Civil Engineering**. p. 314-319. 2000.
59. ZHANG, J.; STANG, H.; LI, V. C. Fatigue life prediction of fiber reinforced concrete under flexural load. **International Journal of Fatigue**. v. 21, p. 1033-1049. 1999.
60. ZHENG, Z.; FELDMAN, D. Synthetic fibre-reinforced concrete. **Progress in Polymer Science**. v. 20, p. 185-210. 1995.

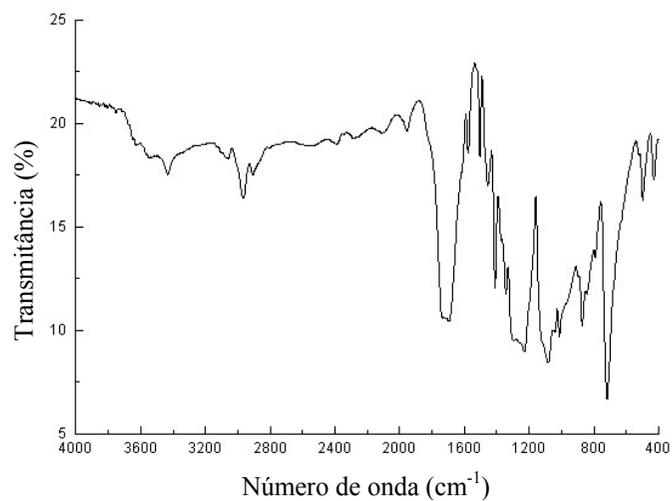
## ***ANEXO 1***

**POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE)**

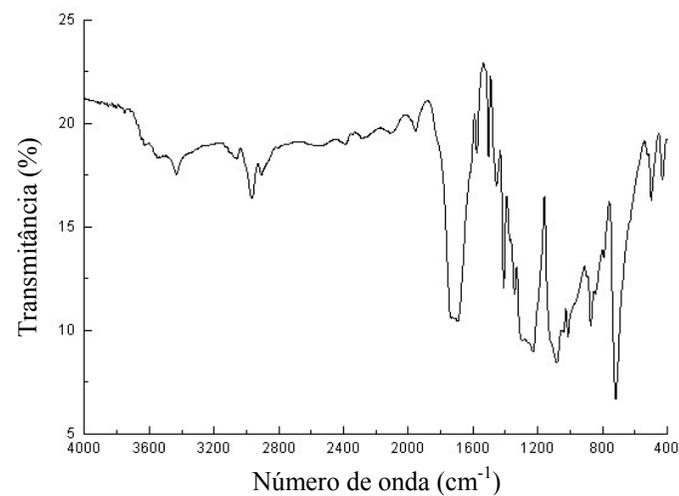
SYNONYMS: POLY(OXYETHYLENEOXYTEREPHTHALOYL)

CAS #: 25038-59-9  
SOURCE: Scientific Polymer Products, Inc.  
SP2 #: 418**FIGURA 55** - Espectro de infravermelho de PET sem nenhum processo de reutilização

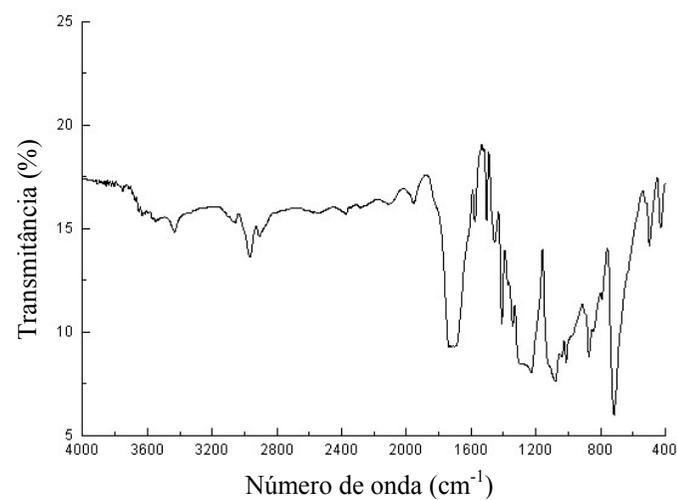
Fonte: SPROUSE, 1987



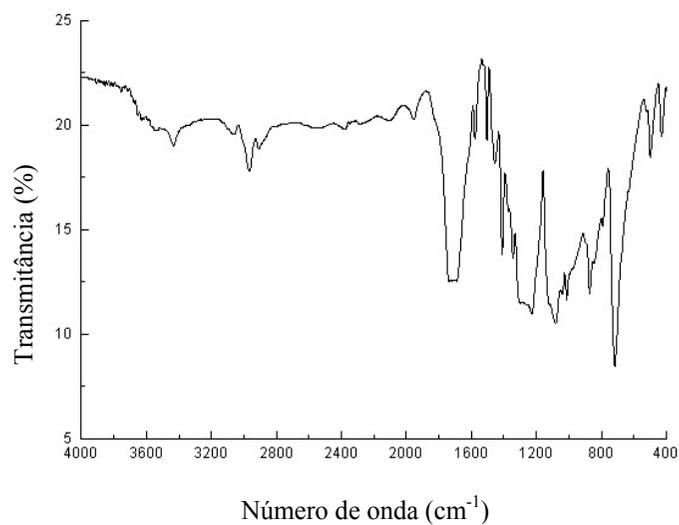
**FIGURA 56** - Infravermelho das fibras de PET imersas em água deionizada a 5°C durante 150 dias



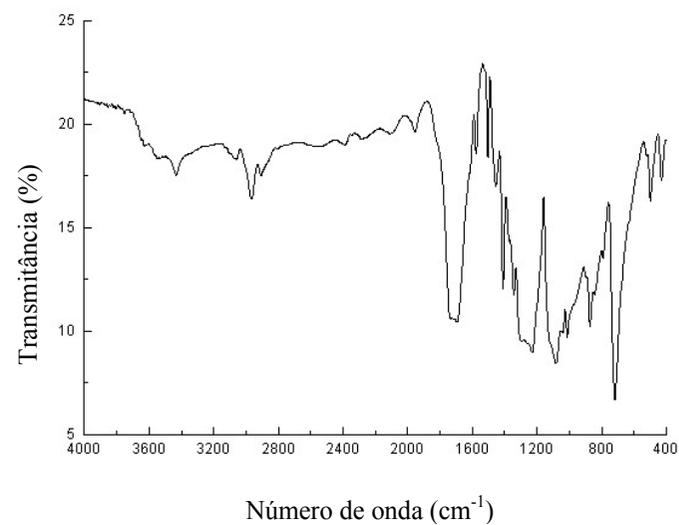
**FIGURA 57** - Infravermelho das fibras de PET imersas em água deionizada a 25°C durante 150 dias



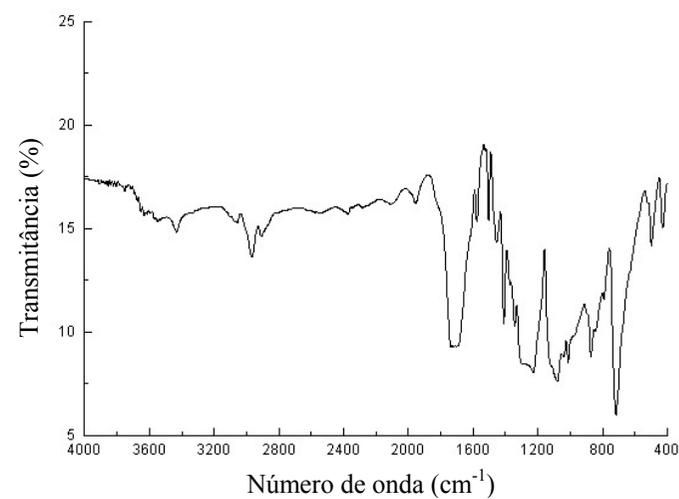
**FIGURA 58** - Infravermelho das fibras de PET imersas em água deionizada a 50°C durante 150 dias



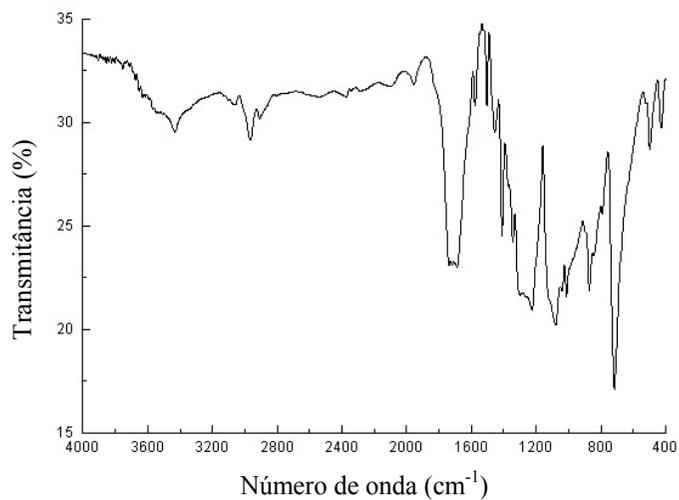
**FIGURA 59** - Infravermelho das fibras de PET imersas em ácido sulfúrico à 0,1 M a 5°C durante 150 dias



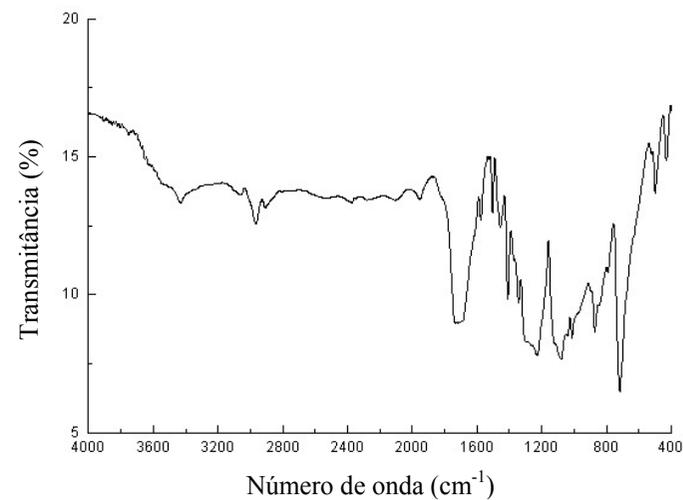
**FIGURA 60** - Infravermelho das fibras de PET imersas em ácido sulfúrico à 0,1 M a 25°C durante 150 dias



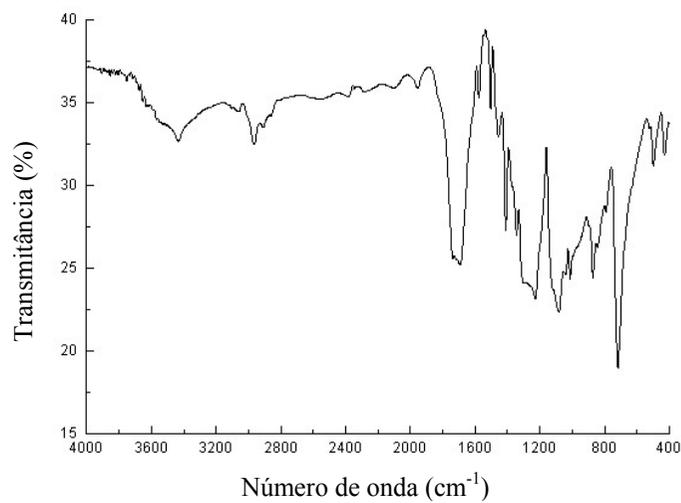
**FIGURA 61** - Infravermelho das fibras de PET imersas em ácido sulfúrico à 0,1 M a 50°C durante 150 dias



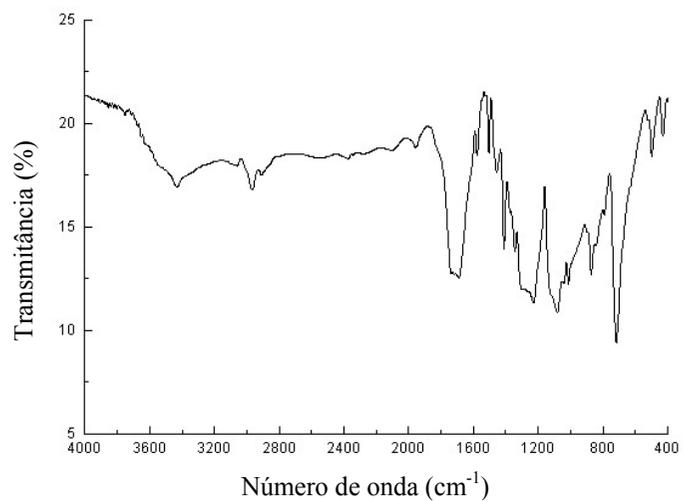
**FIGURA 62** - Infravermelho das fibras de PET imersas em ácido sulfúrico à 1 M a 5°C durante 150 dias



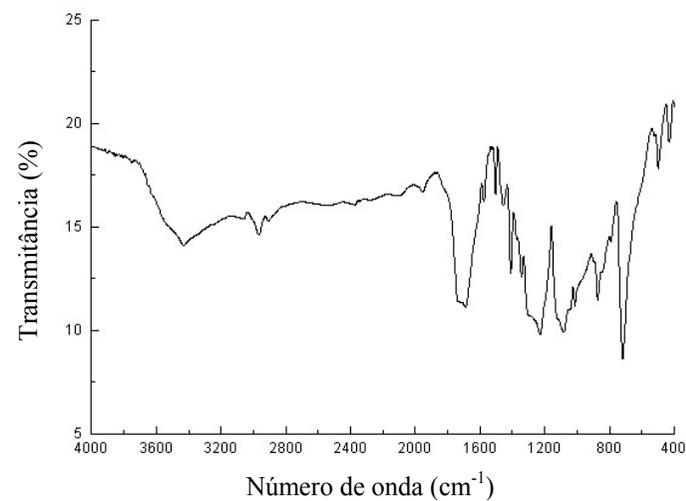
**FIGURA 63** - Infravermelho das fibras de PET imersas em ácido sulfúrico à 1 M a 25°C durante 150 dias



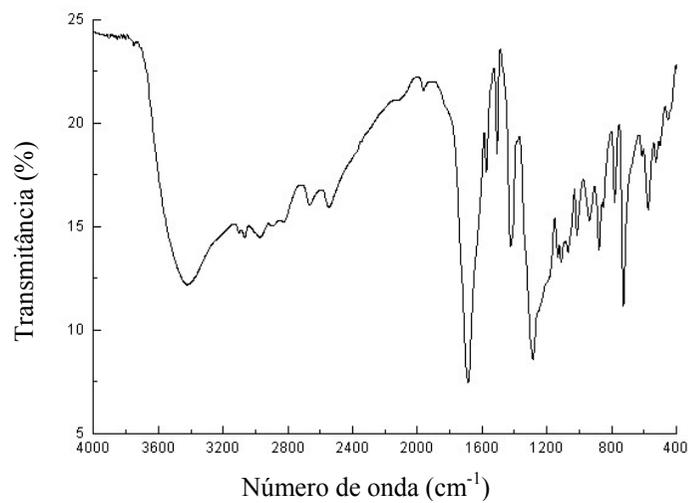
**FIGURA 64** - Infravermelho das fibras de PET imersas em ácido sulfúrico à 1 M a 50°C durante 150 dias



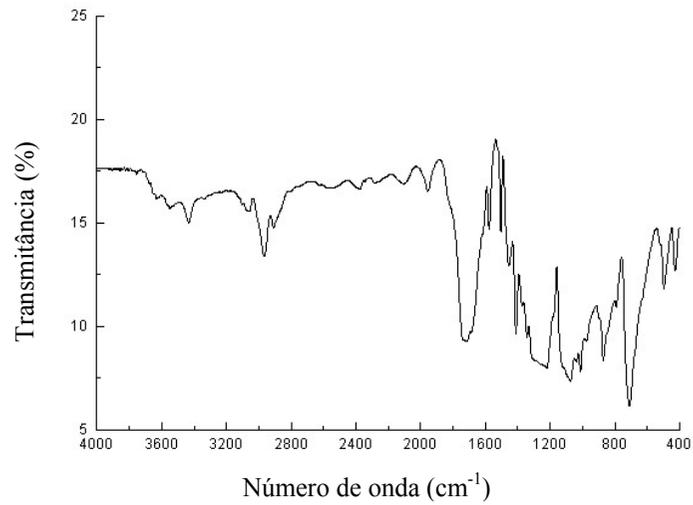
**FIGURA 65** - Infravermelho das fibras de PET imersas em ácido sulfúrico à 10 M a 5°C durante 150 dias



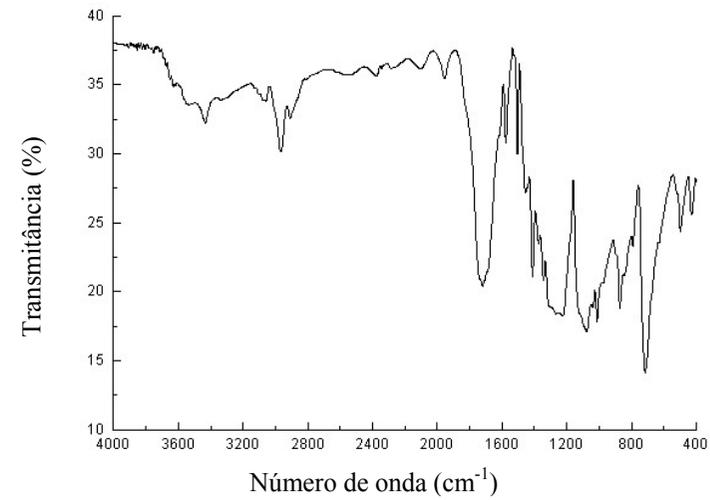
**FIGURA 66** - Infravermelho das fibras de PET imersas em ácido sulfúrico à 10 M a 25°C durante 150 dias



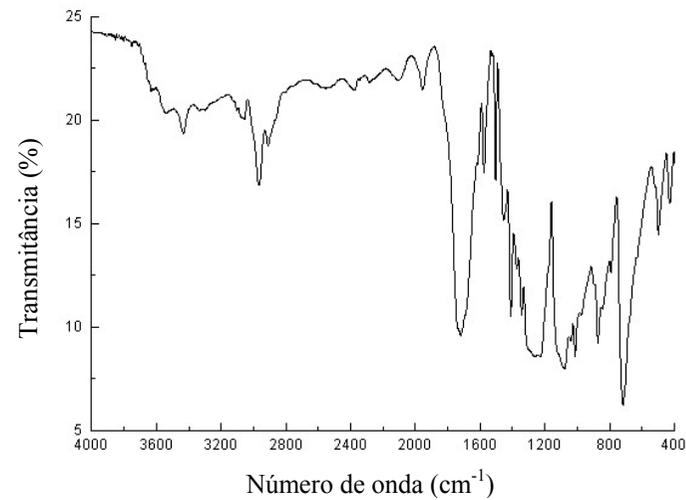
**FIGURA 67** - Infravermelho das fibras de PET imersas em ácido sulfúrico à 10 M a 50°C durante 150 dias



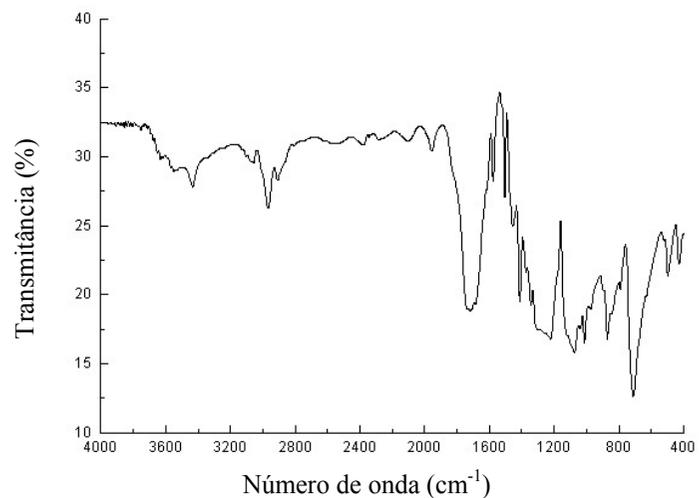
**FIGURA 68** - Infravermelho das fibras de PET imersas em  $\text{Ca(OH)}_2$  a  $5^\circ\text{C}$  durante 150 dias



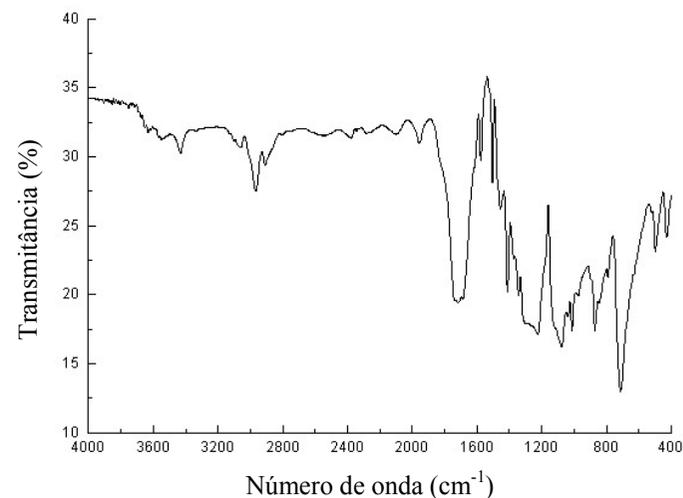
**FIGURA 69** - Infravermelho das fibras de PET imersas em  $\text{Ca(OH)}_2$  a  $25^\circ\text{C}$  durante 150 dias



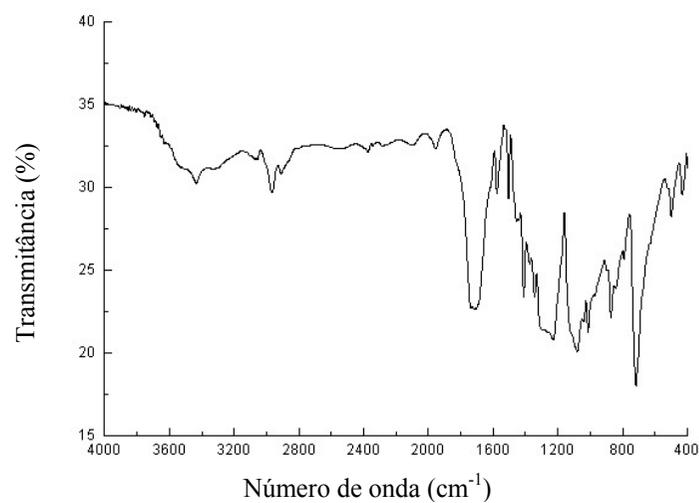
**FIGURA 70** - Infravermelho das fibras de PET imersas em  $\text{Ca(OH)}_2$  a  $50^\circ\text{C}$  durante 150 dias



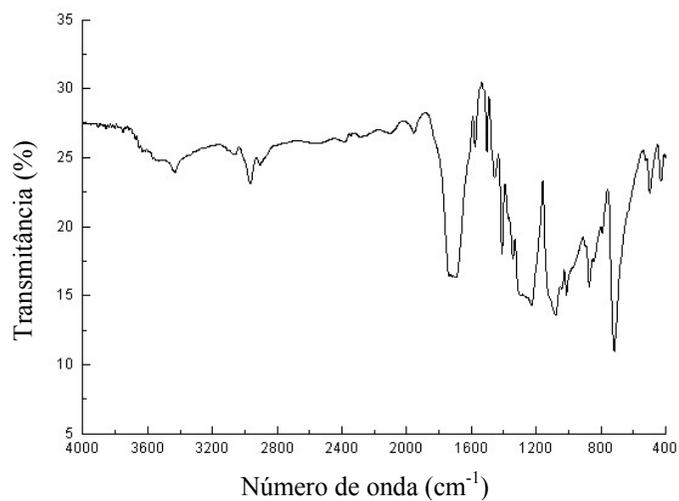
**FIGURA 71** - Infravermelho das fibras de PET imersas em solução de Lawrence a 5°C durante 150 dias



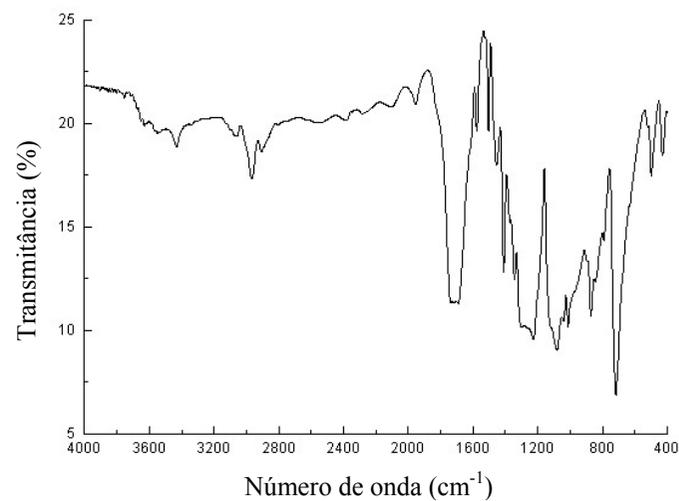
**FIGURA 72** - Infravermelho das fibras de PET imersas em solução de Lawrence a 25°C durante 150 dias



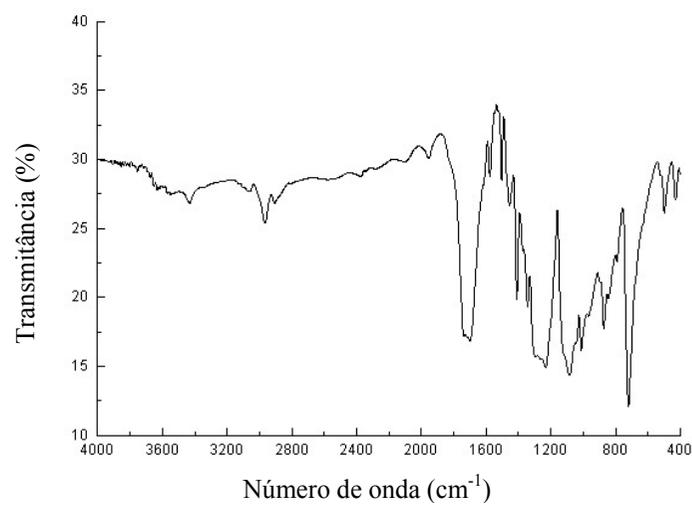
**FIGURA 73** - Infravermelho das fibras de PET imersas em solução de Lawrence a 50°C durante 150 dias



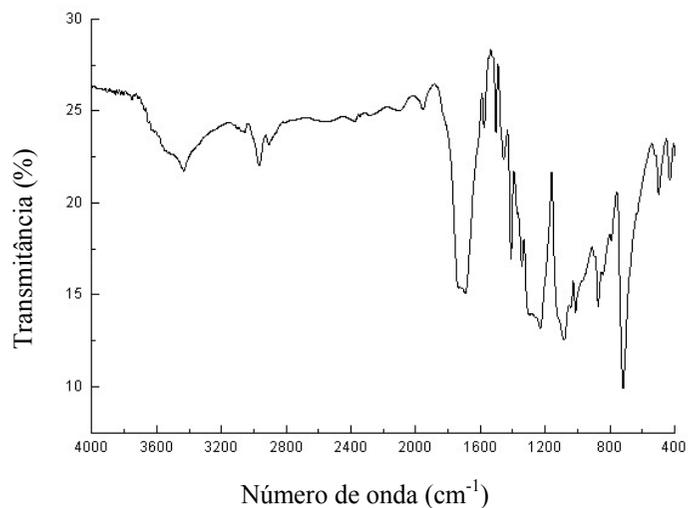
**FIGURA 74** - Infravermelho das fibras de PET imersas em NaOH a 0,1M a 5°C durante 150 dias



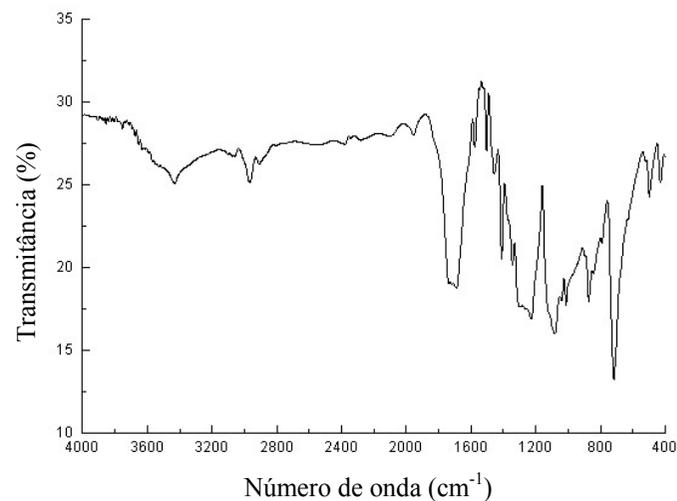
**FIGURA 75** - Infravermelho das fibras de PET imersas em NaOH a 0,1 M a 25°C durante 150 dias



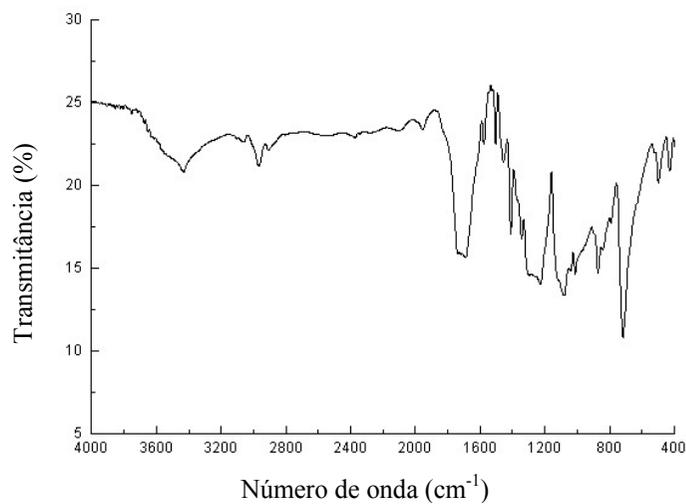
**FIGURA 76** - Infravermelho das fibras de PET imersas em NaOH a 0,1M a 50°C durante 150 dias



**FIGURA 77** - Infravermelho das fibras de PET imersas em água do mar sintética a 5°C durante 150 dias



**FIGURA 78** - Infravermelho das fibras de PET imersas em água do mar sintética a 25°C durante 150 dias



**FIGURA 79** - Infravermelho das fibras de PET imersas em água do mar sintética a 50°C durante 150 dias

***ANEXO 2***

**TABELA 21** - Resultados de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral dos corpos-de-prova em ambiente com alta concentração

curado					não curado				
ambiente	idade	teor de fibra	axial (MPa)	diametral (MPa)	ambiente	idade	teor de fibra	axial (MPa)	diametral (MPa)
CO <sub>2</sub>	28 dias	0,5%	33,130	2,956	CO <sub>2</sub>	28 dias	0,5%	31,70	3,80
			37,586	3,425				33,69	2,96
			34,785	3,675				35,45	3,82
			36,389	4,102				32,47	2,91
		0%	33,639	4,031			0%	34,45	4,22
			37,484	4,326				35,24	2,89
			33,843	4,972				34,15	4,28
			39,623	4,787				31,58	3,69
	90 dias	0,5%	35,167	2,944	CO <sub>2</sub>	90 dias	0,5%	41,02	4,63
			39,572	4,456				41,35	4,74
			33,308	4,411				43,98*	4,65
			40,846	3,746				41,69	3,58*
		0%	41,457	4,179			0%	47,49	3,73
			41,100	2,982				40,92	4,95
			40,718	3,356				40,13	4,35
			43,392	4,044				37,61	4,00
	150 dias	0,5%	44,920	3,731	CO <sub>2</sub>	150 dias	0,5%	54,09	5,04
			40,133*	4,377				51,69	5,65
			46,448	4,972				51,69	4,32
			46,117	3,444				47,92	5,12
		0%	44,818	5,411			0%	47,82	5,49
			46,626	3,667				48,94	4,94
			46,906	5,214				45,99	4,84
			48,740	3,253				45,17	4,50

\*Valores espúrios

TABELA 22 - Resultados de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral dos corpos-de-prova em ambiente de laboratório

curado					não curado				
ambiente	idade	teor de fibra	axial (MPa)	diametral (MPa)	ambiente	idade	teor de fibra	axial (MPa)	diametral (MPa)
Ar	28 dias	0,5%	33,766	4,255	Ar	28 dias	0,5%	27,884	3,810
			33,868	2,758*				27,757	3,114
			33,053	4,265				26,203	4,268
			34,479	4,507				29,004	4,085
		0%	33,333	3,748			0%	26,738	3,142
			35,880*	3,820				28,826	3,186
			33,384	3,020*				28,062	2,292
			32,697	3,754				28,470	2,307
	90 dias	0,5%	36,415	3,372		90 dias	0,5%	32,977	3,372
			35,829	3,448				31,856	3,807
			31,780*	4,306				31,373	3,440
			36,338	4,107				32,977	2,979
		0%	28,342	3,766			0%	31,627	4,408
			32,671	4,380				29,921	3,832
			35,141	3,420				32,391	3,282
			34,377	3,675				32,875	3,636
	150 dias	0,5%	32,315	5,176		150 dias	0,5%	33,537	4,119
			40,489	5,233				32,901	4,615
			35,294	5,870				35,549	2,687
			33,766	4,934				34,530	4,259
		0%	36,771	4,947			0%	33,792	4,953
			32,875	3,482				32,850	4,997
			36,058	4,316				34,454	2,948
			38,503	4,756				37,459	3,387

TABELA 23 - Resultados de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral dos corpos-de-prova em água do mar sintética

curado					não curado				
ambiente	idade	teor de fibra	axial (MPa)	diametral (MPa)	ambiente	idade	teor de fibra	axial (MPa)	diametral (MPa)
Mar	28 dias	0,5%	31,093	3,616	Mar	28 dias	0,5%	28,088	2,796
			30,787	3,970				28,342	3,007
			31,958	2,872				27,757	3,147
			31,220	2,091				27,171	2,580
		0%	30,099	3,741			0%	28,419	2,750
			28,648	3,575				27,451	2,730
			29,616	3,980				28,622	3,188
			28,877	2,707				26,967	3,919
	90 dias	0,5%	28,393	3,619		90 dias	0,5%	27,451	3,288
			29,157	3,193				27,833	2,485
			29,259	3,147				28,368	4,059
			27,477	4,008				28,037	2,984
		0%	30,278	3,053			0%	26,840	3,532
			29,157	3,613				28,088	3,519
			29,870	3,728				29,004	3,547
			28,291	3,843				28,903	3,389*
	150 dias	0,5%	28,368	3,139		150 dias	0,5%	29,539	2,946
			29,972	3,249				29,361	3,349
			28,139	1,897*				30,634	2,549
			27,477	3,002				28,750	2,391
		0%	24,344	2,737			0%	26,305	3,081
			25,541	3,253				27,757	2,559
			27,604	3,470				26,763	3,170
			26,280	3,323				26,494	2,566

\* Valores espúrios

**TABELA 24** - Resultados de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral dos corpos-de-prova em água deionizada

curado					não curado				
ambiente	idade	teor de fibra	axial (MPa)	diametral (MPa)	ambiente	idade	teor de fibra	axial (MPa)	diametral (MPa)
água	28 dias	0,5%	32,340*	4,074	água	28 dias	0,5%	30,583	3,478
			30,787	4,347				29,335	3,135
			30,914	3,458				29,845	3,397
			30,889	2,534				29,361	3,203
		0%	30,532	3,155			0%	29,386	2,893
			32,544	2,760				31,347	3,443
			32,519	3,677				29,106	3,799
			32,595	3,545				26,814	2,376
	90 dias	0,5%	31,602	3,035		90 dias	0,5%	31,067	3,494
			32,646	2,470				32,722	2,786
			26,738*	3,015				32,289	2,732
			32,009	3,211				33,537	3,955
		0%	32,340	3,624			0%	32,162	3,613
			32,238	2,870				32,620	4,186
			29,819	3,112				30,278	3,237
			30,150	3,830				33,181	3,677
	150 dias	0,5%	33,766	3,463		150 dias	0,5%	33,741	1,658
			32,340	2,040				35,625	2,799
			34,097	3,091				37,102	3,664
			27,858	3,975				34,938	3,338
		0%	30,609	3,762			0%	35,931	3,896
			32,951	2,788				33,486	3,189
			31,525	3,425				33,435	2,406
			32,417	2,935				31,831	3,228

\*Valores espúrios

TABELA 25 - Resultado de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral dos corpos-de-prova em MgSO<sub>4</sub>

curado					não curado				
ambiente	idade	teor de fibra	axial (MPa)	diametral (MPa)	ambiente	idade	teor de fibra	axial (MPa)	diametral (MPa)
MgSO <sub>4</sub>	28 dias	0,5%	30,125	2,475	MgSO <sub>4</sub>	28 dias	0,5%	29,743	2,722
			30,660	2,149				28,215	2,674
			31,602	3,792				30,711	3,960
			29,234	3,667				28,826	3,428
		0%	31,322	3,025*			0%	28,368	3,112
			30,150	4,174				30,991	3,140
			30,812	3,680				30,227	3,766
			30,176	4,408				29,870	3,563
	90 dias	0,5%	33,359	2,860		90 dias	0,5%	31,347	3,259
			30,023*	3,389				31,984	4,199
			33,079	3,379				32,213	2,330
			33,614	3,405				32,748	3,484
		0%	31,856	2,827			0%	30,711	2,862
			34,887	3,428				31,220	3,158
			30,278	2,569				31,984	3,084
			32,544	3,524				30,023	3,079
	150 dias	0,5%	25,719	2,768		150 dias	0,5%	34,632	2,350
			29,972	3,147				35,422	3,535
			34,912	2,809				34,174	3,636
			30,558	-				32,722	2,704
		0%	33,639	2,922*			0%	31,474	3,094
			33,079	2,394				32,137	3,037
			32,977	2,521				30,761	3,317
			32,213	2,419				31,907	3,310

\*Valores espúrios

**TABELA 26** - Resultados de resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e área até a primeira fissura dos corpos-de-prova expostos em ambiente com alta concentração de CO<sub>2</sub> e laboratório

ambiente	idade	teor de fibra	res. tração na flexão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	área até a 1ª fissura (N*mm)
CO <sub>2</sub>	28 dias	1%	6,237	3,312	0,279
			7,240	2,65	0,388
		0%	7,070	1,913	0,451
			7,650	2,71	0,417
			7,190	2,168	0,354
	60 dias	1%	10,370	2,913	0,6824
			9,230	3,363	0,585
		0%	10,450	3,525	0,577
			9,540	2,99	0,595
	90 dias	1%	11,100	2,913	0,566
			9,760	3,287	0,355
			10,630	3,225	0,576
		0%	9,500	3,5	0,522
			11,000	3,88	0,597
			9,910		0,522

ambiente	idade	teor de fibra	res. tração na flexão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	área até a 1ª fissura (N*mm)
Ar	28 dias	1%	7,460	1,85	0,566
			6,630	2,43	0,331
		0%	6,960	3,99	0,369
			6,190	2,44	0,287
	60 dias	1%	6,764	1,75	0,406
			8,265	3,48	0,377
		0%	6,780		0,147
			7,035	3,188	0,145
			6,720	1,725	2,55
	90 dias	1%	7,770	3,75	0,287
			8,330	1,8	0,439
		0%	6,680	1,073	0,2153
			6,690	1,015	0,285

**TABELA 27** - Resultados de resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e área até a primeira fissura dos corpos-de-prova expostos em água do mar e água deionizada

ambiente	idade	teor de fibra	res. tração na flexão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	área até a 1ª fissura (N*mm)	ambiente	idade	teor de fibra	res. tração na flexão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	área até a 1ª fissura (N*mm)
Mar	28 dias	1%	7,530	1,9	0,58	água	28 dias	1%	5,416	1,975	0,243
			7,126	2,113	0,315				5,890	1,925	0,203
		0%	7,990	1,65	0,597			0%	6,034	2,246	0,315
			7,630	3,088	0,439				6,456	2,461	0,301
									6,620	2,813	0,25
	60 dias	1%	5,270	1,8	0,263		60 dias	1%	6,950	2,6	0,33
			5,240	1,46	0,335				7,380	2,042	0,272
			6,110	0,84	0,458				6,350	2,5	0,274
		0%	5,660	0,823	0,384			0%	6,360	0,988	0,236
			5,910	1,124	0,355				5,930	0,97	0,269
			6,510	0,9	0,41				5,784		0,257
	90 dias	1%	5,380	0,475	0,337		90 dias	1%	6,780	1,025	0,267
			5,970	0,588	0,413				5,950	1,975	0,123
		0%	5,750	1,013	0,27			0%	5,970	2,00	0,28
			5,340	1,124	0,285				7,010	1,725	0,36
			5,460		0,233						

**TABELA 28** - Resultados de resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e área até a primeira fissura dos corpos-de-prova expostos em MgSO<sub>4</sub>

ambiente	idade	teor de fibra	res. tração na flexão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	área até a 1ª fissura (N*mm)
MgSO <sub>4</sub>	28 dias	1%	7,120	3,313	0,31
			7,990	3,275	0,373
		0%	8,500	4,2	0,581
			9,930	2,843	0,563
			8,870	2,595	0,586
	60 dias	1%	9,720	2,525	0,595
			9,840	5,063	0,552
		0%	9,810	1,853	0,487
			8,180	3,012	0,4
			7,990	1,506	0,455
	90 dias	1%	9,620	2,215	0,465
			9,100	2,89	0,168
			8,900	4,363	0,454
		0%	8,810	4,287	0,3
			8,000	2,05	0,35
			8,920	2,45	0,53

**TABELA 29** - Resultados dos índices de tenacidade I5, I10 e I20 dos corpos-de-prova nos diferentes ambientes de exposição

ambiente	idade	I5	I10	I20
CO <sub>2</sub>	28 dias	2,165	3,259	5,319
		3,100	4,500	6,52
	60 dias	2,655	3,370	4,72
		2,415	3,470	5,345
	90 dias	2,690	3,550	4,78
		2,099	2,930	4,156
		2,397	3,163	4,27

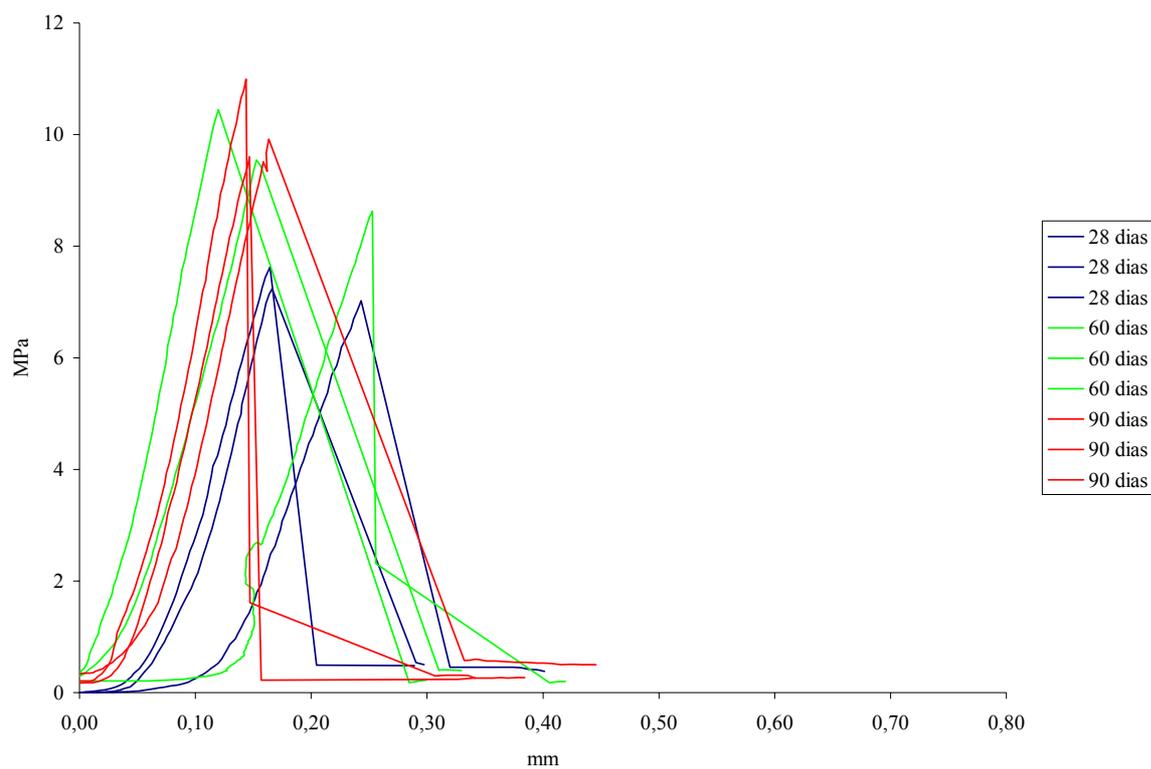
ambiente	idade	I5	I10	I20
Ar	28 dias	2,456	3,47	4,96
		2,26	3,327	5,09
	60 dias	1,686	2,04	2,84
		1,97	2,84	4,44
		1,943	3,01	4,33
	90 dias	2,15	2,95	4,175
		2,29	3,07	4,11

ambiente	idade	I5	I10	I20
Mar	28 dias	1,922	2,67	3,67
		2,83	4,08	6,07
	60 dias	2,35	3,28	4,9
		2,17	3,43	5,77
		1,77	2,56	3,71
	90 dias	3,78	6,01	8,95
		2,6	3,93	6,26

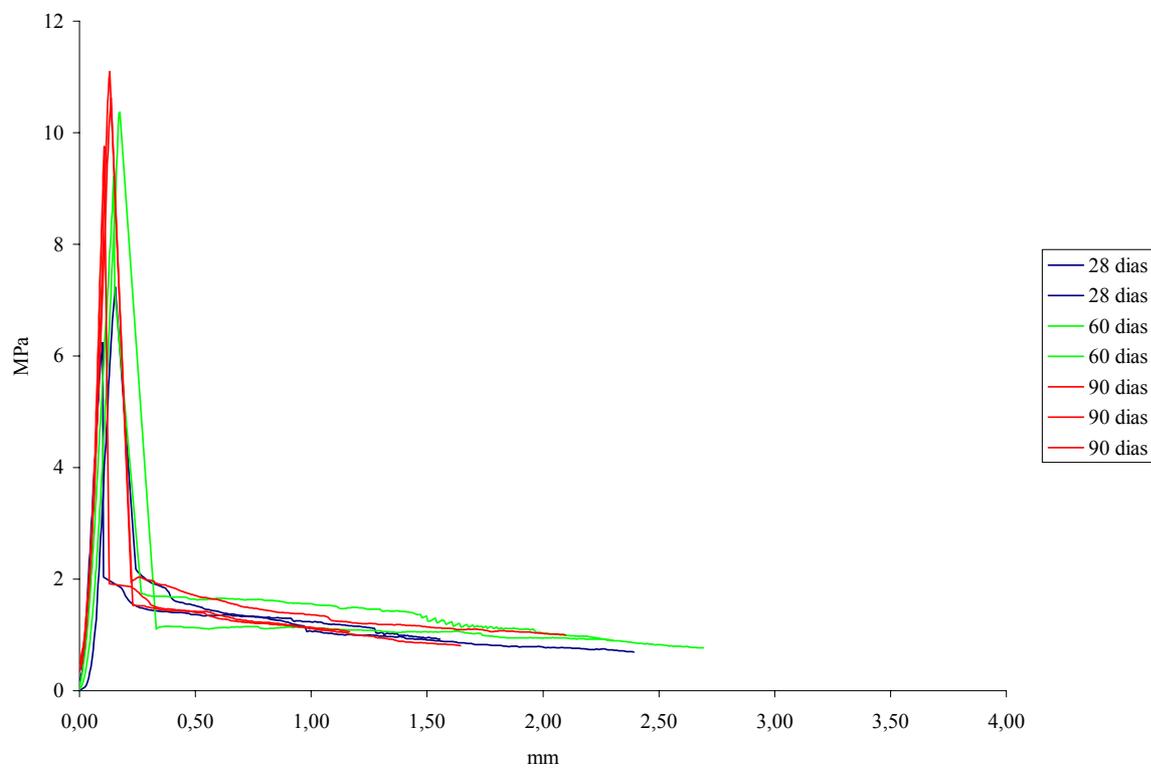
ambiente	idade	I5	I10	I20
água	28 dias	2,72	4,16	6,72
		2,72	4,21	6,91
	60 dias	1,94	2,83	4,27
		2,85	4,5	7,5
		2,63	3,84	6,05
	90 dias	2,48	3,41	4,68
		2,99	4,1	5,9

ambiente	idade	I5	I10	I20
MgSO <sub>4</sub>	28 dias	2,31	2,79	3,57
		2,34	3,07	4,23
	60 dias	1,77	2,14	2,65
		1,53	2,12	3,13
	90 dias	1,5	2,27	-
		0,9	1,6	2,42

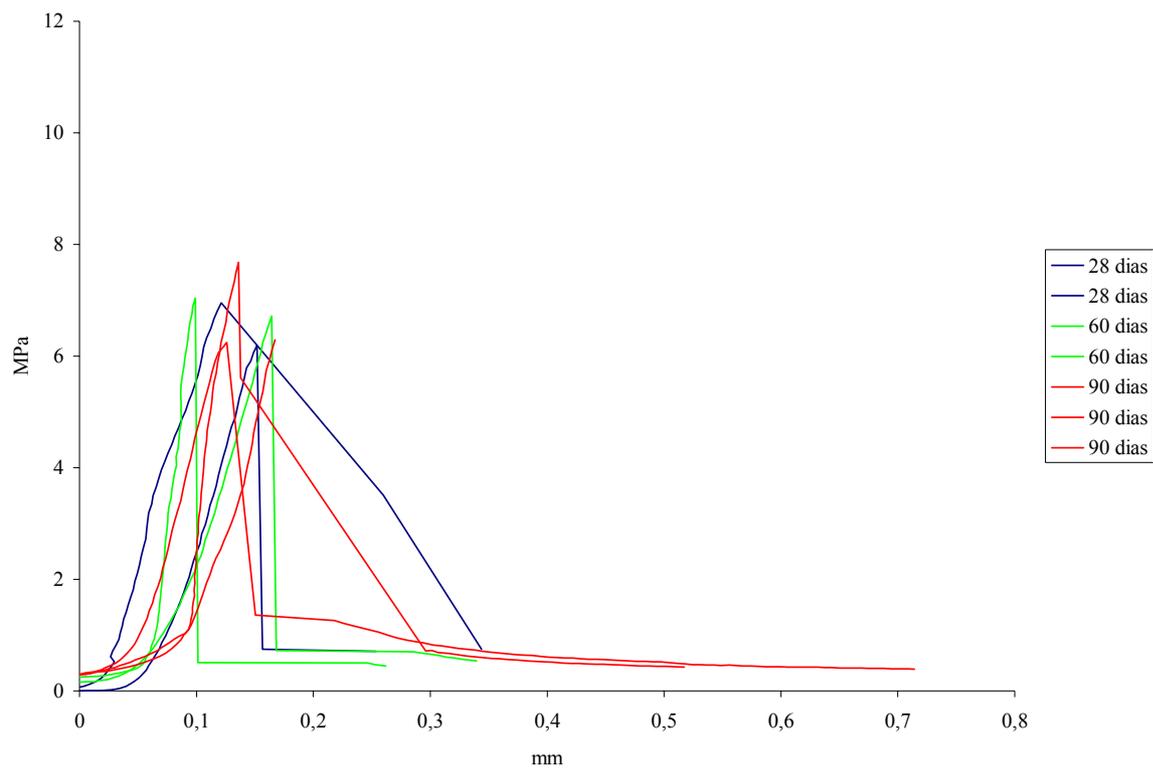
***ANEXO 3***



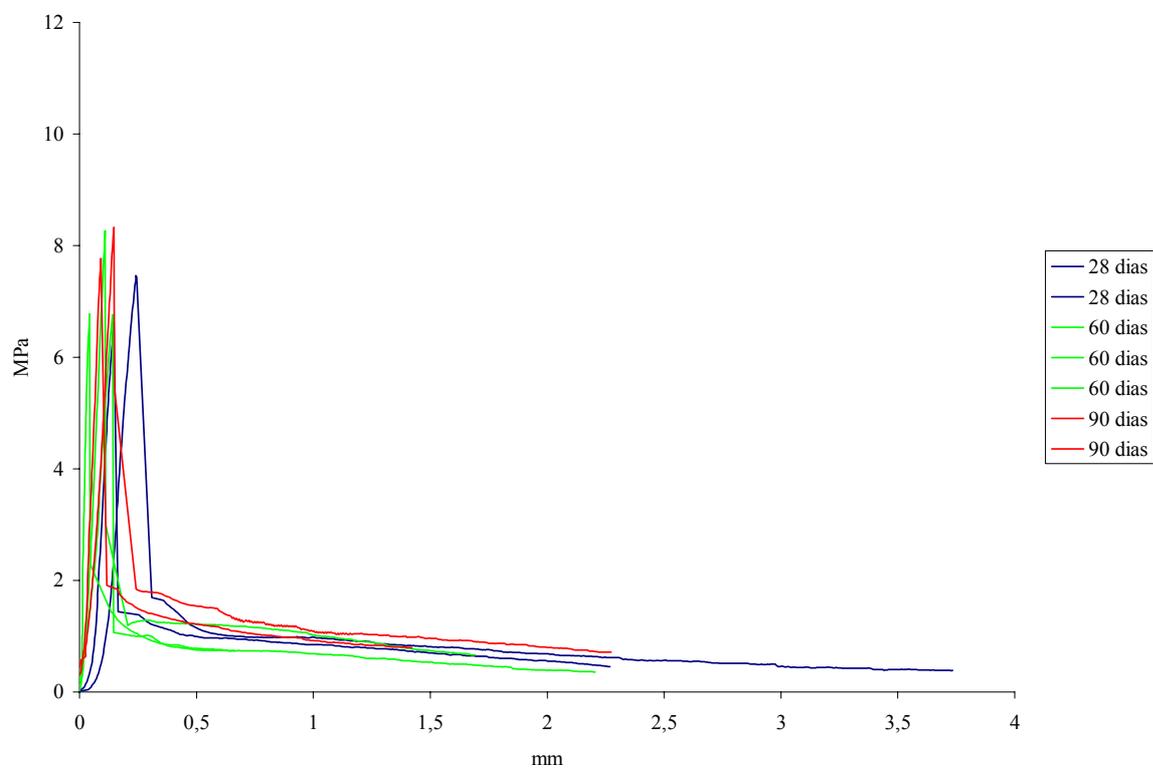
**FIGURA 80** - Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova sem fibra em ambiente com alta concentração de CO<sub>2</sub>



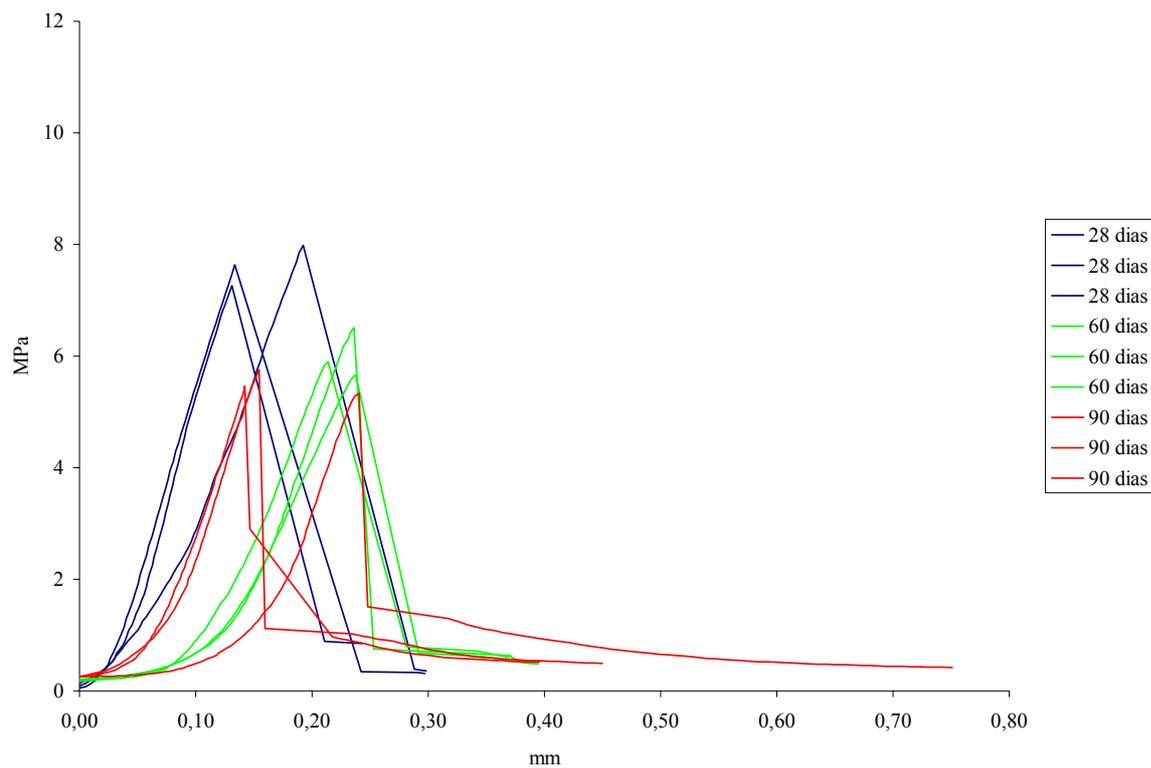
**FIGURA 81** - Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova com fibra em ambiente com alta concentração de CO<sub>2</sub>



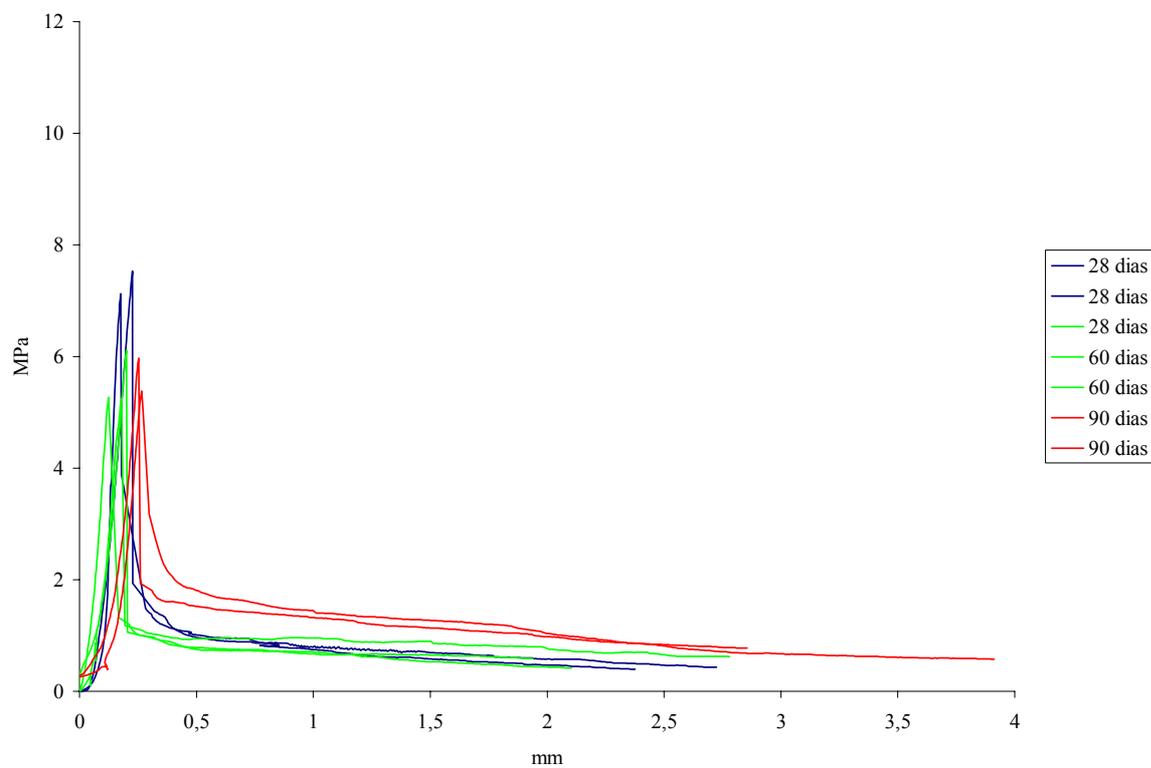
**FIGURA 82** - Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova sem fibra em ambiente de laboratório



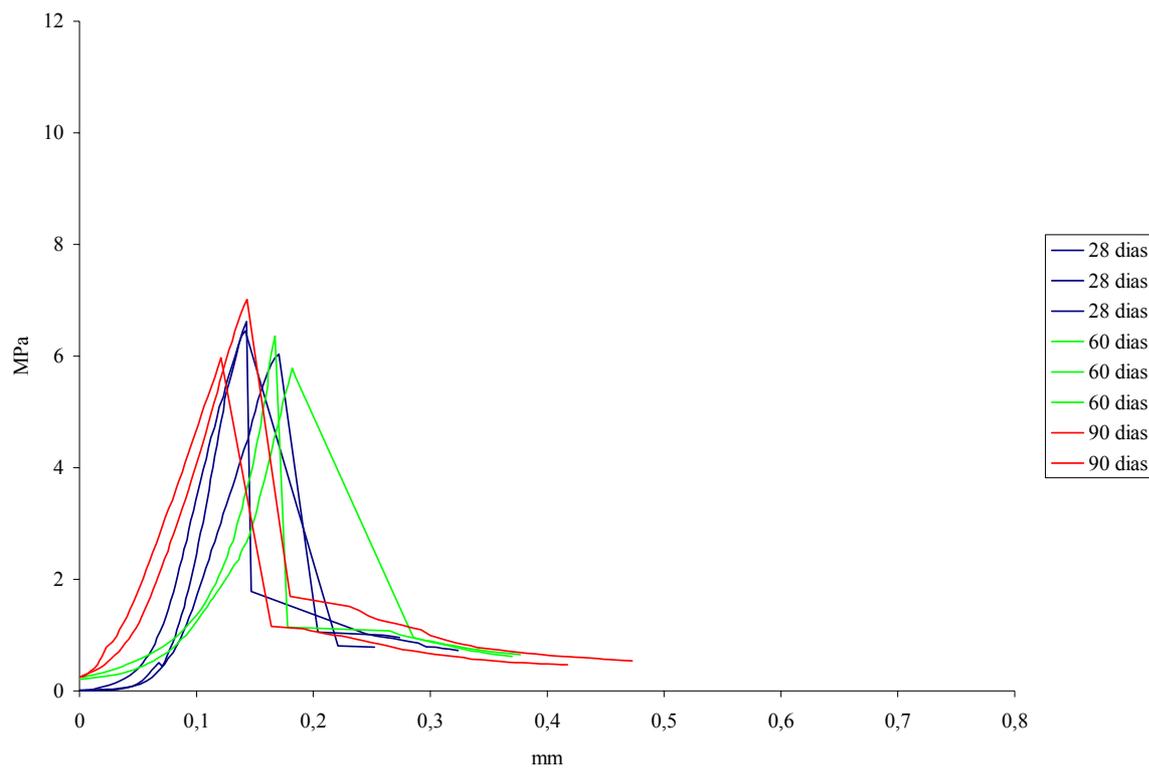
**FIGURA 83** - Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova com fibra em ambiente de laboratório



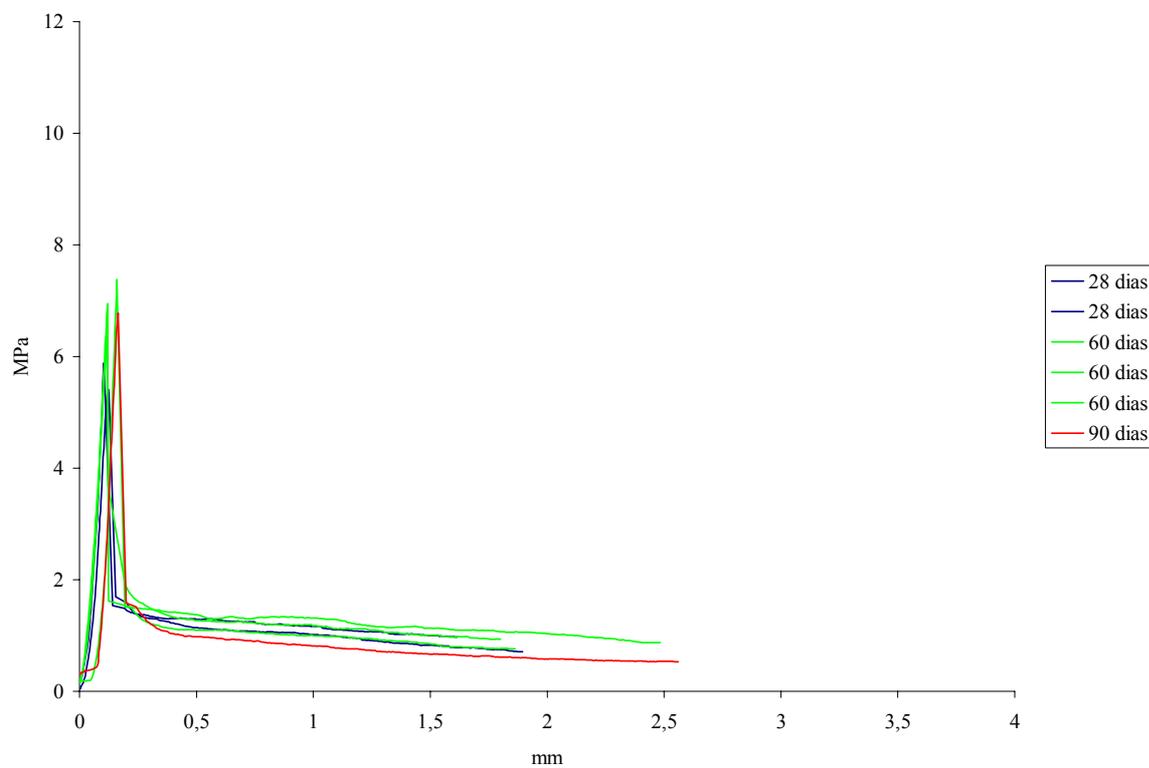
**FIGURA 84** - Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova sem fibra em água do mar sintética



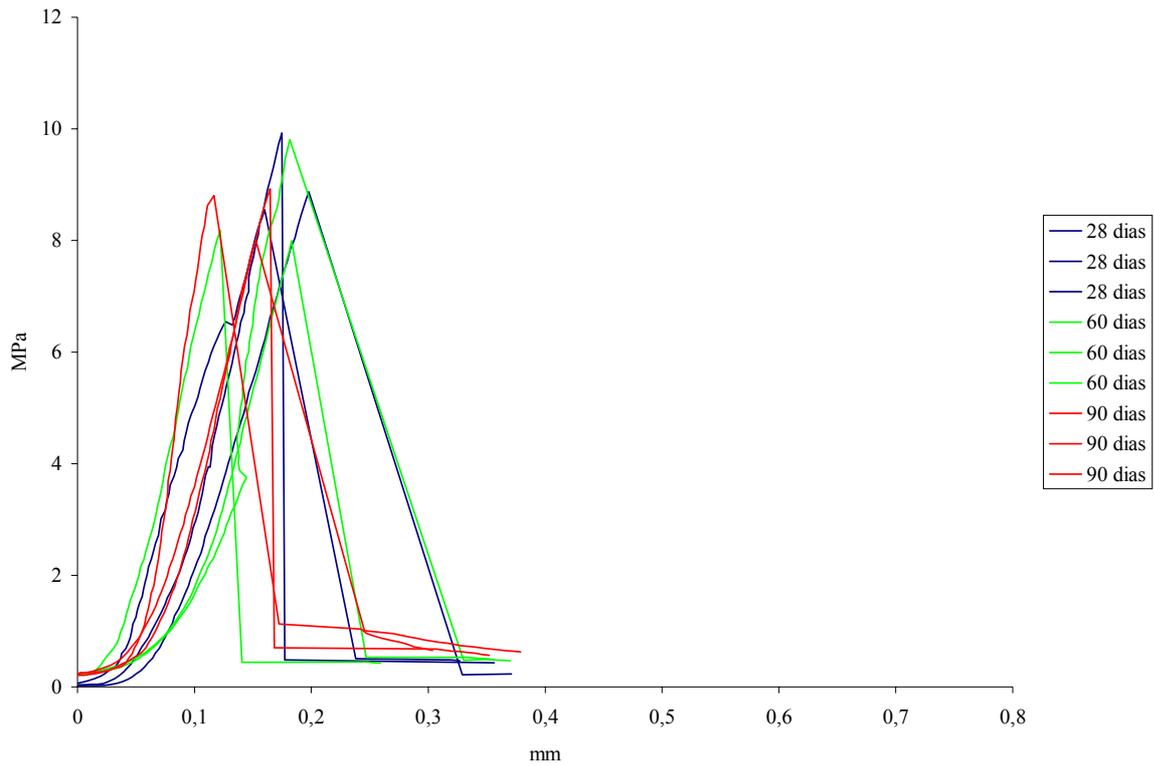
**FIGURA 85** - Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova com fibra em água do mar sintética



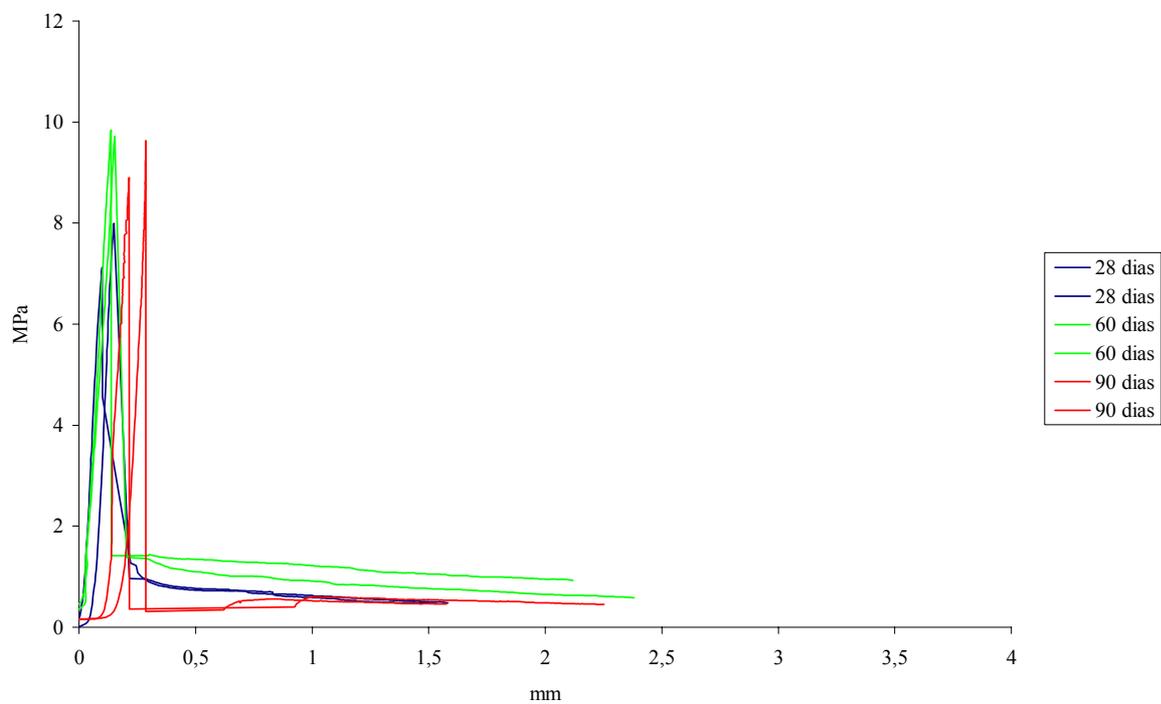
**FIGURA 86** - Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova sem fibra em água deionizada



**FIGURA 87** - Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova com fibra em água deionizada



**FIGURA 88** - Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova sem fibra em  $MgSO_4$



**FIGURA 89** - Gráfico tensão x deformação dos corpos-de-prova com fibra em  $MgSO_4$