



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**  
**CIVIL**

**FERNANDO PELISSER**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CONCRETO REFORÇADO COM**  
**FIBRAS DE POLIETILENO TEREFALATO (PET)**

**Florianópolis**  
**2002**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**  
**CIVIL**

**FERNANDO PELISSER**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CONCRETO REFORÇADO COM**  
**FIBRAS DE POLIETILENO TEREFALATO (PET)**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil.

Orientador: Philippe Jean Paul Gleize, Dr.

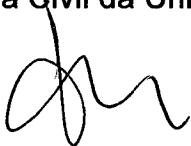
**Florianópolis**

**2002**

FERNANDO PELISSER

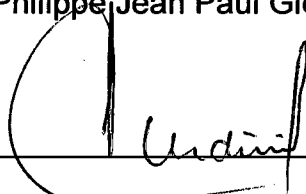
**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CONCRETO REFORÇADO COM  
FIBRAS DE POLIETILENO TEREFALATO (PET)**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e aprovada em 11/12/2002 em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.



---

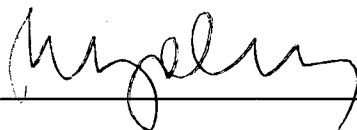
Prof. Dr. Philippe Jean Paul Gleize (Orientador)



---

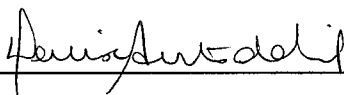
Prof. Dr. Jucilei Cordini - Coordenador do CPGEC

Comissão Examinadora:



---

Prof. Dr. Vanderley Moacyr John (USP)



---

Prof. Dr. Denise Antunes da Silva (UFSC)



---

Prof. Ph.D. Roberto Caldas de Andrade Pinto (UFSC)

**PELISSER, Fernando**

**Avaliação do Desempenho de Concreto Reforçado com Fibras de Polietileno Tereftalato (PET), UFSC, Florianópolis 2002.**

112p

Dissertação: Mestrado em Engenharia Civil (Construção Civil)

Orientador: Prof. Philippe Jean Paul Gleize, Dr.

1. Concreto 2. PET 3. CRF 4. Durabilidade

I. Universidade Federal de Santa Catarina

II. Título

**À minha Família,**

**pelo amor, dedicação e incentivo em todos os momentos da minha vida.**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, meu grande amigo, protetor e companheiro inseparável, que me deu forças para contornar todos os obstáculos e poder viver este momento.

Ao meu Pai, Paulo Antonio Pelisser, e minha Mãe, Nair Teresa Dinon Pelisser pela confiança, incentivo e apoio depositados em mim durante toda minha vida; e pelo amor, carinho e compreensão da minha ausência.

Ao meu orientador e amigo, Prof. Philippe J. P. Gleize pelo tempo dedicado na orientação deste trabalho, bem como na minha nova vida profissional.

A Prof. Denise Antunes da Silva pelo apoio e co-orientação deste trabalho. Agradeço pela oportunidade e pela confiança em mim depositada na realização deste projeto.

Ao Prof. Humberto Ramos Roman, pela atenção e incentivo para com a realização desta pesquisa.

A minha namorada Karin C. Santos pelo carinho e apoio em todos momentos.

A colega Andréa Betioli, pelo apoio, sugestões e dedicação que contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos Prof. Almir, Gihad, Rizzatti e Felix.

Aos meus novos colegas de trabalho Prof Evelise, Marcos Back e Marcos Bianchini, aos quais tive apoio completo para o término desta pesquisa.

Aos técnicos do laboratório Luiz, Renato e ao funcionário Roque, pela paciência e apoio.

A empresa Arteplas, pelo apoio financeiro que permitiu a realização deste trabalho.

Ao CNPq pelo apoio financeiro em alguns ensaios.

E a todos aqueles que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	iv
<b>LISTA DE TABELAS</b>	vii
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	ix
<b>RESUMO</b>	xi
<b>ABSTRACT</b>	xii
<b>CAPITULO 1</b>	
<b>1.INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
1.1 IMPORTÂNCIA.....	01
1.2 JUSTIFICATIVA.....	02
1.4 OBJETIVOS.....	03
<b>1.4.1 Objetivos Gerais.....</b>	<b>03</b>
<b>1.4.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>03</b>
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	04
<b>CAPITULO 2</b>	
<b>2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>05</b>
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS COM FIBRAS .....	05
2.2 MECANISMO DE REFORÇO DAS FIBRAS NO COMPÓSITO.....	06
2.3 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS.....	09
<b>2.3.1 Fibras de Polipropileno.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3.2 Fibras de Polietileno.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3.3 Fibras de Poliéster.....</b>	<b>11</b>
2.4 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRAS SINTÉTICAS.....	12
<b>2.4.1 Tenacidade.....</b>	<b>12</b>
<b>2.4.2 Resistência ao Impacto.....</b>	<b>22</b>

2.4.3 Retração do Concreto Reforçado com Fibras.....	23
2.5.4 Durabilidade do Concreto com Fibras .....	26
2.5.5 Aplicações do Concreto com Fibras.....	27
<b>CAPITULO 3</b>	
<b>3.PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>29</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	30
<b>3.1.1 Cimento.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1.2 Fibras.....</b>	<b>32</b>
<b>3.1.3 Aditivo.....</b>	<b>32</b>
<b>3.1.4 Agregados .....</b>	<b>32</b>
3.2 PRODUÇÃO, MOLDAGEM E CURA DO CONCRETO.....	35
3.3 ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	37
3.4 ENSAIOS FÍSICOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	37
<b>3.4.1 Ensaio de Absorção de Água por Imersão e Massa Específica.....</b>	<b>37</b>
<b>3.4.2. Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade.....</b>	<b>37</b>
3.5. ENSAIOS MECÂNICOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	38
<b>3.5.1 Resistência à Compressão Axial.....</b>	<b>38</b>
<b>3.5.2 Módulo de Deformação .....</b>	<b>38</b>
<b>3.5.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral.....</b>	<b>40</b>
<b>3.5.4 Resistência ao Impacto.....</b>	<b>40</b>
<b>3.5.5 Ensaio de Tração na Flexão e Tenacidade para Concreto Reforçado com Fibras.....</b>	<b>41</b>
3.6. AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE.....	44
<b>3.6.1 Ensaio de Medida de Profundidade de Carbonatação.....</b>	<b>45</b>
<b>3.6.2. Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.....</b>	<b>45</b>
3.7 ANALISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS.....	46
<b>CAPITULO 4</b>	
<b>4.APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>47</b>
4.1. ENSAIO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO – CONSISTÊNCIA.....	47
4.2. ENSAIOS FÍSICOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	50
<b>4.2.1. Absorção de Água por Imersão.....</b>	<b>50</b>



4.2.2. Massa Específica.....	51
4.2.3. Absorção de Água por Capilaridade.....	53
4.3. ENSAÍOS MECÂNICOS DO CONCRETO.....	55
4.3.1. Resistência à Compressão Axial.....	55
4.3.2. Módulo de Deformação.....	57
4.3.3. Resistência a Tração na Flexão.....	59
4.3.4. Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	62
4.3.5. Resistência ao Impacto.....	64
4.3.6. Ensaio de Tenacidade.....	69
4.4. ENSAIOS DE DURABILIDADE.....	80
4.4.1. Medida da Profundidade de Carbonatação.....	80
4.4.2. Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.....	81
<b>CAPITULO 5</b>	
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>83</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>86</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>93</b>
<b>ANEXO I – Resultados do Ensaio de Absorção de Água por Imersão.....</b>	<b>94</b>
<b>ANEXO II – Resultados do Ensaio de Massa Específica.....</b>	<b>95</b>
<b>ANEXO III – Resultados do Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade.....</b>	<b>96</b>
<b>ANEXO IV – Resultados da Resistência à Compressão Axial.....</b>	<b>99</b>
<b>ANEXO V – Resultados do Módulo de Deformação.....</b>	<b>100</b>
<b>ANEXO VI – Resultados da Resistência a Tração na Flexão.....</b>	<b>103</b>
<b>ANEXO VII – Resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral.....</b>	<b>104</b>
<b>ANEXO VIII – Resultados de Resistência ao Impacto.....</b>	<b>105</b>
<b>ANEXO IX – Gráficos do Ensaio de Tenacidade.....</b>	<b>108</b>
<b>ANEXO X – Tabelas para o Ensaio de Tenacidade.....</b>	<b>110</b>
<b>ANEXO XI – Ensaio de Profundidade de Carbonatação.....</b>	<b>112</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Disposição de arrancamento fibra/fissura.....	08
FIGURA 2 - Gráfico de medida de dos índices de tenacidade segundo ASTM-C.1018.....	16
FIGURA 3 - Instabilidade na medida de tenacidade para concreto reforçado com fibras.....	19
FIGURA 4 - Gráfico para medida de tenacidade segundo normas ACI-544.2R(1989)..	21
FIGURA 5 - Fibra de PET visualizada em MEV.....	31
FIGURA 6 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	33
FIGURA 7 - Curva granulométrica do agregado graúdo.....	35
FIGURA 8 - Aparato utilizado no ensaio de deformação.....	39
FIGURA 9 - Aparato utilizado para os ensaios de resistência ao impacto.....	40
FIGURA 10 - Ensaio de tração na flexão e tenacidade com leitura de deformação por lvdt's.....	42
FIGURA 11 - Ensaio de tração na flexão e tenacidade - aparecimento da primeira fissura.....	42
FIGURA 12 - Ensaio de tração na flexão e tenacidade - aumento da fissura e rompimento da amostra.....	43
FIGURA 13 - Ensaio de tração na flexão e tenacidade – aumenta fissura e as medidas de deformações sendo realizadas.....	43
FIGURA 14 - Ensaio de tração na flexão e tenacidade - ensaio finalizado pelo software quando ocorre deformação excessiva da amostra.....	44
FIGURA 15 - Medida da profundidade de carbonatação e/ou concreto carbonatado.....	45
FIGURA 16 - Abatimento do concreto com 0,05% de fibras de 15mm.....	48
FIGURA 17 - Abatimento do concreto com 0,30% de fibras de 15mm.....	48
FIGURA 18 - Gráfico de avaliação da consistência do concreto.....	49
FIGURA 19 - Superfície de resposta para a consistência do concreto com fibras.....	49

FIGURA 20 – Resultados dos ensaios de absorção de água por imersão.....	50
FIGURA 21 – Resultados dos ensaios de massa específica.....	52
FIGURA 22 – Resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade após 1 hora.....	53
FIGURA 23 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial.....	55
FIGURA 24 - Corpo-de-prova de concreto com 0,30% de fibras de 20mm após a ruptura.....	56
FIGURA 25 – Resultados dos ensaios de módulo de deformação.....	57
FIGURA 26 – Influência do volume de fibras no módulo de deformação.....	58
FIGURA 27 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão.....	59
FIGURA 28 - Influência do teor e comprimento das fibras na carga de ruptura à flexão aos 35 dias.....	59
FIGURA 29 - Influência do comprimento das fibras na resistência à tração na flexão..	60
FIGURA 30 – Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.....	62
FIGURA 31 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral (a) concreto com a adição de 0,30% de fibras de 20mm; (b) concreto sem fibras.....	63
FIGURA 32 – Resultados dos ensaios de resistência ao impacto.....	64
FIGURA 33 - Resultados dos ensaios de resistência ao impacto (p/ todos comprimentos).....	65
FIGURA 34 - Influência da idade do concreto na resistência ao impacto (para todos os volumes e comprimentos).....	65
FIGURA 35 - Fissuração da parte inferior do CRF de PET (20mm / 0,05%) após 11 golpes.....	66
FIGURA 36 - Rompimento do CRF de PET (20mm / 0,05%) após 15 golpes (a) parte inferior; (b) parte superior.....	67
FIGURA 37 - Fissuração da parte inferior do CRF de PET (20mm / 0,30%) após 10 golpes.....	67
FIGURA 38 - Rompimento do CRF de PET (20mm / 0,30%) após 26 golpes (a) parte inferior; (b) parte superior.....	68
FIGURA 39 - Rompimento do CRF de PET (20mm / 0,30%) após 40 golpes (a) parte inferior; (b) parte superior.....	68
FIGURA 40 – Gráfico dos ensaios de tenacidade para o concreto sem fibras.....	69

FIGURA 41 – Gráfico dos ensaios de tenacidade para o concreto com fibras de 10mm.....	70
FIGURA 42 – Gráfico dos ensaios de tenacidade para o concreto com fibras de 15mm.....	72
FIGURA 43 – Gráfico dos ensaios de tenacidade para o concreto com fibras de 20mm.....	72
FIGURA 44 - Gráfico dos ensaios de tenacidade para concretos com adição de fibras de nylon. (BALAGURU e SLATTUM, 1995).....	73
FIGURA 45 - Gráfico dos ensaios de tenacidade para concretos com adição de fibras de polipropileno. (BALAGURU e SLATTUM, 1995).....	74
FIGURA 46 - Gráfico dos ensaios de tenacidade para concretos com adição de fibras de poliéster. (BALAGURU e SLATTUM, 1995).....	74
FIGURA 47 - Gráfico das curvas médias carga/deflexão para o concreto com fibras aos 150 dias.....	77
FIGURA 48 - Gráfico das curvas médias carga/deflexão para o concreto com fibras aos 35 dias.....	77
FIGURA 49 - Gráfico dos valores totais de tenacidade para o CRF de PET aos 35 dias.....	78
FIGURA 50 - Medida de profundidade de carbonatação para concretos com fibras de PET.....	80
FIGURA 51 - Concreto com fibras em degradação em seu meio.....	81
FIGURA 52 - Fibra degradada / com filete central de aproximadamente 2 $\mu$ m.....	81
FIGURA 53 – Fibra de PET em processo de degradação.....	82
FIGURA 54 – Fibra de PET em processo de degradação – 365 dias.....	82

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Propriedades físicas das fibras poliméricas. (BALAGURU E SHAH, 1992 Apud ZHENG E FELDMAN,1995).....	10
TABELA 2 - Resumo de vários testes especificados para medida de tenacidade dos concretos reforçados com fibras. (GOPALARATNAM e GETTU, 1995).....	14
TABELA 3 - Estudos sobre o comportamento à retração dos compósitos reforçados com fibras de polipropileno. (TANESI e FIGUEIREDO, 1999).....	25
TABELA 4 – Caracterização química do cimento.....	30
TABELA 5 - Composição granulométrica do agregado miúdo.....	33
TABELA 6 - Composição granulométrica do agregado graúdo.....	34
TABELA 7 – Tipos de concretos.....	36
TABELA 8 - Ensaio de impacto comparado com as normas do ACI-544.2R (1989).....	40
TABELA 9 - Resultados dos ensaios de abatimento do tronco de cone.....	47
TABELA 10 - Valores da análise de variância para ensaios consistência do concreto	47
TABELA 11 - Valores de análise de variância para os ensaios de absorção de água por imersão.....	50
TABELA 12 – Valores da análise de variância para os ensaios de massa específica..	52
TABELA 13 - Valores da análise de variância para ensaios de absorção de água por capilaridade – após 1 horas.....	54
TABELA 14 – Valores de análise de variância para ensaios de resistência à compressão axial.....	56
TABELA 15 - Valores de análise de variância para os ensaios de modulo de deformação.....	58
TABELA 16 - Valores de análise de variância para os ensaios de resistência à tração na flexão.....	60
TABELA 17 - Valores da análise de variância para ensaios de resistência à tração por compressão diametral.....	62

TABELA 18 - Valores da análise de variância para os ensaios de resistência ao impacto.....	65
TABELA 19 – Índices de tenacidade para avaliar a durabilidade de concretos em idades avançadas. (BALAGURU e SLATTUM 1995).....	75
TABELA 20 - Índices dos ensaios de tenacidade aos 35 dias, segundo as normas ASTM-C.1018 e ACI-544.2R.....	75
TABELA 21 - Índices dos ensaios de tenacidade aos 150 dias, segundo as normas ASTM-C.1018 e ACI-544.2R.....	76
TABELA 22 – Índice dos ensaios de tenacidade para concretos com o máximo teor de fibras (0,30%) aos 35 dias, segundo normas ASTM-C.1018 e ACI-544.2R.....	78
TABELA 23 – Valores da análise de variância para os ensaios de tenacidade de CRF de PET aos 35 dias.....	79
TABELA 24 – Resultados da análise de variância para os ensaios de profundidade de carbonatação dos concretos com fibras de PET.....	80

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

PET	Polietileno Tereftalato
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Association for Testing and Materials
LVDT	Linear Variation Displacement Transducer
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
JSCE	Norma Japonesa
CMOD	Carregamento-CMOD (load-crack mouth opening displacement)
DSC	Differential Scanning Calorimetry
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
NBR	Normas Brasileiras
UR	Umidade Relativa do Ar
Edax	Energy Dispersive Analyses X-Ray
ARI	Alta Resistência Inicial
$l/d$	Relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra
$f_s$	Resistência de aderência fibra-matriz
$l$	Largura
$d_f$	Diâmetro da fibra
$d$	Largura, altura da viga
$f_t$	Resistência à tração da fibra
$\delta_i$	Área sob a curva carga x deflexão até a primeira fissura
$\delta$	Deflexão até a primeira fissura
$\mu$	Coefficiente de Poisson
$\sigma_n$	Tensão de 40% da carga de ruptura considerada para o módulo secante

$\epsilon_n$	Deformação específica correspondente a $\sigma_n$
$\epsilon_{0,5}$	Deformação específica correspondente à tensão de 0,5MPa
En	Módulo de deformação corda
I <sub>N</sub>	Índice de tenacidade
It	Índice de tenacidade total
R	Fator de força residual
C	Constante
L	Comprimento
P	Carregamento aplicado
E	Módulo de elasticidade do material
I	Momento de inércia da viga
L	Largura da viga



## RESUMO

Neste trabalho foram analisadas as propriedades dos concretos com a adição de baixos teores de fibras de polietileno tereftalato (PET), um poliéster utilizado na produção de garrafas e reciclado para a fabricação de cordas, sendo o seu estudo em concretos ainda não realizado. As fibras de PET foram adicionadas e estudadas no concreto no estado fresco e endurecido, em três comprimentos (10, 15 e 20mm), e três teores (0,05%, 0,18% e 0,30% em relação ao volume do concreto). Os concretos foram analisados nas idades de 35 e 150 dias. Os resultados dos ensaios mostraram que a adição de fibras provoca uma redução da trabalhabilidade do concreto no estado fresco. No estado endurecido, nota-se uma tendência de redução do módulo de deformação com o aumento do volume de fibras. Fibras mais longas causam um aumento da resistência à tração do concreto na flexão. Houve, também, um aumento da tenacidade e da resistência ao impacto aos 35 dias na presença das fibras. No entanto, esse efeito desaparece, devido a um processo de degradação das fibras na matriz do concreto. A degradação foi observada por análise de microscopia eletrônica de varredura. Em relação aos ensaios que avaliam a durabilidade dos concretos (absorção de água por capilaridade e profundidade de carbonatação), não foi verificada uma influência negativa das fibras sobre os concretos.

**Palavras-chave:** Concreto, PET, CRF, Durabilidade.

**ABSTRACT**

An experimental research investigation of the properties of polyethylene terephthalate (PET) fiber reinforced concrete (CRF) is reported. PET is a thermoplastic used in the production of bottles and is recycled for the production of string. The effect of amount of fibers (0,05, 0,18 and 0,30 percent by volume) and lengths of fibers (10, 15 and 20mm) were studied in the concrete in the fresh state and at the age of 35 and 150 days. The addition of fibers provokes a loss of the concrete workability. In the hardened state concrete showed a tendency of decrease of the elastic modulus with the increase of the volume of fibers and an increase of flexural strength with the increase of the length of the fibers. There was also an increase of toughness and impact resistance at the age of 35 days. However this gain is lost at the age of 150 days due to fibers embrittlement in the cement-alkali ambient. Scanning electron microscopy - SEM observations confirms the fibers degradation. In relation to tests that measured the concrete durability (capillary water absorption and carbonation depth), a negative influence of the fibers was not verified.

**Key-words:** Concrete, PET, FRC, Durability.

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. IMPORTÂNCIA

O concreto é um material frágil. Ele apresenta uma baixa resistência à tração, que o torna suscetível à fissuração, causando ao material problemas de durabilidade, e conduz a exemplos de deterioração de estruturas, particularmente quando sujeito a ambientes agressivos. (MASSICOTTE e BISCHOFF, 2000). O uso de fibras poliméricas tem se tornado atrativo para reforçar materiais como concretos e argamassas, especialmente nos últimos anos. (BENTUR e MINDESS, 1990; BALAGURU e SLATTUM, 1995). A adição de fibras tem a finalidade de evitar a fissuração ou a propagação de fissuras no concreto, levando a um aumento da sua tenacidade e resistência ao impacto. Baixos volumes (<1% em relação ao volume de concreto, MINDESS e BANTHIA, sd.), de fibras sintéticas adicionadas ao concreto minimizam problemas de fissuração por retração plástica e por secagem. (MASSICOTTE e BISCHOFF, 2000)

Para Banthia e Trottier (1995), o uso de concreto reforçado com fibras em várias aplicações na engenharia civil é indiscutível, e tem-se usado freqüentemente em lajes, concreto projetado, construções arquitetônicas, produtos pré-moldados, regiões sujeitas a abalos sísmicos, reparos, fundações, estruturas hidráulicas e muitas outras aplicações.

Esta pesquisa avaliou o desempenho de um concreto reforçado com baixos teores de fibras de polietileno tereftalato - PET, um poliéster reciclado a partir de garrafas para a fabricação de cordas. Um aspecto importante para a reciclagem do polímero PET é o desenvolvimento de novas aplicações. Uma delas é seu uso em concretos, sendo alternativa pouco ou ainda não estudada, podendo, com suas características, segundo Taylor (1994), substituir o emprego das fibras de polietileno, polipropileno e de amianto.

## 1.2. JUSTIFICATIVA

Vários tipos de fibras podem ser adicionadas no concreto, tais como fibras de aço, fibras de vidro, fibras sintéticas e fibras naturais. O concreto com a adição de diferentes tipos de fibras é atualmente utilizado em aplicações específicas como pavimentos, meios fios, pré-moldados, blocos de concreto e pistas de aeroportos. As principais mudanças observadas nas propriedades do concreto com a adição de fibras são a redução da retração plástica, o aumento da tenacidade, da ductilidade, da resistência ao impacto, e um possível aumento da resistência à tração.

As fibras utilizadas na presente pesquisa são de polietileno tereftalato (PET), um polímero 100% reciclável, integrante da família dos poliésteres, sendo este material utilizado de maneira mais freqüente na indústria de tecidos, cordas, embalagens, caixas para ovos, calotas para veículos, etc. O polietileno tereftalato começou a ser produzido no Brasil em 1993, e sua produção aumenta a cada ano. Também aumenta, no país, a prática de reciclagem deste material, que cresceu 34% de 1999 para 2000, sendo este o maior índice mundial (ECOCYCLE, 2002. <http://www.vrs.ecocycle.com>). Segundo Mezzari (2001), a fibra de poliéster é o tipo de fibra sintética mais produzida no Brasil, com cerca de 162,7 mil toneladas/ano, abrangendo 41,11% da produção total de fibras sintéticas e com um consumo de 45,74% do total de fibras.

Zheng e Feldman (1995), mostraram que a adição de 1% de fibras de poliéster em relação ao volume de concreto gera um aumento de 75% da resistência ao impacto, 9% da tenacidade, 7% da resistência à tração e 5% da resistência à compressão.

Para Johnston (1994), a durabilidade de fibras sintéticas, como o poliéster, em meio alcalino, é questionável. Alguns tipos de fibras, como as de PET, mostram deterioração, definida como a perda rápida de resistência da fibra no cimento, devido à sua hidrólise e dissolução em meio alcalino.

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. Objetivo Geral

O principal objetivo do trabalho é avaliar o desempenho do concreto contendo fibras de polietileno tereftalato – PET, em diferentes volumes e comprimentos, ao longo do tempo.

#### 1.3.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho, são:

- Avaliar o efeito do teor e comprimento das fibras de PET no comportamento do concreto no estado fresco;
- Avaliar o efeito do teor e comprimento das fibras de PET no comportamento do concreto no estado endurecido;
- Avaliar o efeito do teor e comprimento das fibras de PET na durabilidade do concreto;
- Avaliar a durabilidade das fibras no concreto.

#### 1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação é dividida em cinco capítulos, os quais têm a seguinte abordagem:

- Capítulo 2: revisão bibliográfica sobre o histórico da utilização de fibras em concretos, as principais propriedades modificadas nos concretos, aplicações e trabalhos já realizados sobre o concreto com adição de fibras;
- Capítulo 3: caracterização dos materiais, bem como toda a instrumentação e planejamento dos ensaios;
- Capítulo 4: apresentação e discussão dos resultados;
- Capítulo 5: conclusões finais e análise crítica do desempenho dos concretos reforçados com fibras de PET;

## CAPÍTULO 2

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No decorrer deste capítulo será apresentada uma breve revisão da literatura sobre os principais conceitos e definições de concretos reforçados com fibras e considerações relevantes para o entendimento da pesquisa.

#### 2.1. MATERIAIS COMPÓSITOS COM FIBRAS

Materiais Compósitos são a combinação de materiais para a obtenção de produtos com propriedades físicas e/ou mecânicas que os materiais sozinhos não possuem. Podem ser divididos em:

- i) compósitos de matriz carregada, como por exemplo: por partículas, por fibras curtas, compridas orientadas, e mistas por partículas e fibras;
- ii) compósitos de forma sanduíche de alma cheia, colméia ou alma ondulada.  
(KARSENTY, 1997)

Para John et al. (1997) os materiais fibrosos são constituídos por duas fases básicas: fibras e a matriz na qual as fibras estão embebidas. A função principal das fibras é servir de reforço mecânico, sendo normalmente o seu volume bem menor que o volume da matriz.

Segundo Mindess e Banthia (sd) em matrizes de cimento (concretos e argamassas), têm-se adicionado fibras em geral (aço, sintéticas, etc), caracterizando um material compósito, com propriedades resultantes de tenacidade, ductilidade e de resistência ao impacto superiores ao material de origem.

## 2.2. MECANISMO DE REFORÇO DAS FIBRAS NO COMPÓSITO

Para Taylor e Hannant (1994), é consenso que o maior potencial dos materiais compósitos fibrosos está no comportamento pós-fissuração, quando as fibras contribuem de forma mais efetiva na resistência do material, aumentando assim sua capacidade de absorção de energia.

Segundo Johnston (1994), as fibras em uma matriz cimentada podem, em geral, ter dois efeitos importantes. Primeiro, elas tendem a reforçar o compósito sobre todos os modos de carregamento que induzem tensões de tração, isto é, tração indireta, flexão e cisalhamento, e também melhoram a ductilidade e a tenacidade de uma matriz com características frágeis.

De acordo com John et al. (1997), no caso particular da indústria da construção civil, as matrizes mais empregadas são frágeis (rompem-se sem deformação plástica), notadamente pastas, argamassas e concretos de aglomerantes minerais. A adição fibras de alta resistência mecânica e módulo de elasticidade superiores aos da matriz permitem produzir compósitos com maior módulo de elasticidade e alta resistência à impactos. Já a adição de fibras de baixo módulo de elasticidade, como as vegetais, podem reduzir as propriedades estáticas (AGOPYAN, 1993 apud JOHN, 1997) mas sempre melhoram, significativamente, a resistência à cargas dinâmicas (impactos) e o comportamento pós-fissuração. As rupturas por cargas dinâmicas/impactos - solicitações muito breves e, via de regra, repetitivas - dependem muito da velocidade de propagação das fissuras e da energia despendida na sua formação. A presença de fibras diminui a velocidade de propagação das fissuras. Isto ocorre porque para uma fissura transpor uma fibra exige-se um trabalho adicional na deformação, como o arrancamento ou a ruptura desta fibra. O mesmo efeito é também responsável pelo surgimento de múltiplas fissuras, aumentando ainda mais a dissipação de energia. É por esta razão que os compósitos resistem melhor aos esforços de manuseio e uso que os materiais frágeis, mesmo eventualmente tendo uma resistência a tração e flexão inferiores que a matriz original.

Hannant (1994) acredita que as fibras mantêm as interfaces das fissuras juntas, beneficiando as propriedades mecânicas no estado pós-fissuração, ou seja, aumentando a ductilidade.



O efeito total de reforço proporcionado pelas fibras na matriz de cimento depende do número de fibras e da sua orientação em relação ao plano de fissura pela unidade de área. A resistência das fibras ao arrancamento é determinada por sua relação comprimento/diâmetro, seu tipo e sua textura. Taylor (1994) aborda os principais parâmetros relacionados ao desempenho dos materiais compósitos cimentados:

- *Volume de fibra.* Um alto volume de fibras proporciona um aumento da resistência pós-fissuração e menor comprimento das fissuras, desde que as fibras possam absorver as cargas adicionais causadas pelas fissuras;
- *Módulo de elasticidade da fibra.* Um alto valor do módulo de elasticidade causaria um efeito similar ao do volume de fibra, mas, na prática, quanto maior for o módulo de elasticidade, maior será a probabilidade de haver o arrancamento das fibras;
- *Aderência entre a fibra e a matriz.* As características de resistência, deformação e padrões de ruptura de uma grande variedade de compósitos cimentados reforçados com fibras dependem fundamentalmente da aderência fibra/matriz. Uma alta aderência entre a fibra e a matriz reduz o tamanho das fissuras;
- *Resistência da fibra.* Um aumento da resistência das fibras aumenta também a ductilidade do compósito, assumindo que não ocorra o rompimento das ligações de aderência;
- *Comprimento da fibra.* Quanto maior for o comprimento das fibras, menor será a possibilidade delas serem arrancadas. Para uma dada tensão de cisalhamento superficial aplicada à fibra, esta será mais bem utilizada se o seu comprimento for suficiente para permitir que a tensão cisalhante desenvolva uma tensão de tração igual a sua resistência à tração.

Taylor (1994) apresentou o equacionamento do equilíbrio de forças idealizado no momento em que a fibra é solicitada no compósito, como demonstra a figura 1. Torna-se evidente a importância não apenas do comprimento da fibra, mas também de seu diâmetro. A relação de aspecto  $l/d$  (comprimento/diâmetro), ou índice de forma, como é conhecido, é

proporcional ao quociente entre a resistência à tração da fibra e a resistência da aderência fibra/matriz, conforme a equação 2.1.

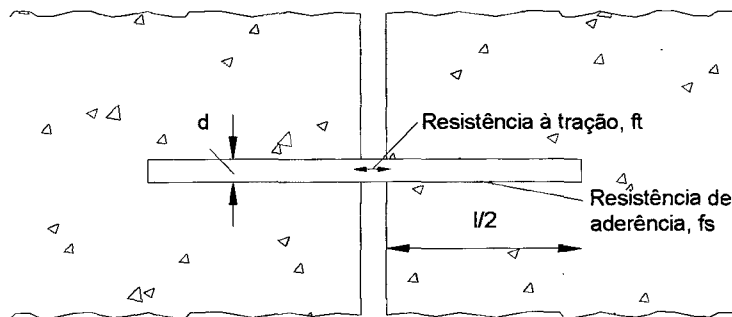


FIGURA 1 – Disposição de arrancamento fibra/fissura. (TAYLOR, 1994)

Resistência ao arrancamento das fibras:

$$f_t \times \pi d \times \frac{L}{2} = \pi \frac{d^2}{4} \times f_s$$

$$\frac{L}{d} = \frac{f_t}{2 f_s} \quad (2.1)$$

Onde:

d = diâmetro da fibra;

L = comprimento da fibra;

$f_t$  = resistência da fibra à tração;

$f_s$  = resistência de aderência da fibra.

Em grande parte, a tecnologia dos materiais compósitos reforçados por fibras depende desta simples equação.

### 2.3. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

Um concreto contendo cimento hidráulico, água, agregados e fibras descontínuas, resulta num composto, denominado concreto reforçado com fibras – *CRF*. Têm sido produzidas para uso em concretos fibras de aço, vidro e polímeros orgânicos (ACI-544.1R, 1997). Também têm sido utilizadas no concreto, fibras de várias formas, tamanhos e tipos. (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

As fibras sintéticas, tais como fibras de polietileno, polipropileno, acrílicas, poli (vinil, álcool), poliamidas, aramida, poliéster e carbono tornaram-se mais atrativas para reforçar materiais cimentícios nos últimos anos (FOWLER, 1999). Elas são alternativas para substituir fibras de asbesto, aço e vidro. (ZHENG e FELDMAN, 1995)

De acordo com Êxodus 5: 6-7, os egípcios utilizaram fibras de asbestos para reforçar tijolos de barro. Há evidências de que este mesmo tipo de fibra tenha sido utilizado na construção civil para reforçar postes de argila há 5000 anos. (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Uma revisão cronológica das patentes mais antigas tratando de cimento e concreto reforçado com fibras é fornecido por Naaman em 1985 apud Gani (1997). Este inclui uma patente francesa de 1918, por Alfsen, na qual é descrita a utilização de fibras (ferro e madeira) para aumentar a resistência à tração do concreto e sugere-se que o desempenho poderia ser melhorado se a superfícies das fibras fossem mais rugosas ou as extremidades das fibras fossem encurvadas. Em 1926, foi registrada uma patente por Martin que descrevia o uso de arames de aço estendidos ou enrolados para reforçar o concreto. Em 1943, Constantinesco registrou uma patente na qual descrevia o uso de vários tipos de fibras de aço para aumentar a tenacidade do concreto, sugerindo aplicações para este material em pavimentos e em materiais submetidos ao impacto. (GANI, 1997).

O início do desenvolvimento de pesquisas sobre o comportamento de materiais reforçados com fibras, ocorreu em maior parte, a partir da década de 50 com a entrada das fibras de aço e vidro (BENTUR e MINDESS, 1990). No caso das fibras poliméricas, a primeira tentativa de emprego é de Goldfein, em 1965. As fibras poliméricas de maior emprego atualmente são as fibras de polipropileno. No entanto, outros tipos de fibras podem ser citados,

tais como: náilon, poliéster, polietileno, poliamida<sup>1</sup>. (TANESI e FIGUEIREDO, 1999)

### 2.3.1. Fibras de Polipropileno

As fibras de polipropileno têm uma grande flexibilidade e tenacidade, combinado com uma baixa densidade, e possibilita um aumento da resistência ao impacto dos materiais reforçados com esta fibra. O módulo de elasticidade é menor do que qualquer outra fibra semelhante utilizada. A resistência à tração é de aproximadamente 400 MPa, ou entre 310-760MPa conforme pode ser verificado na tabela 1. Fibras de polipropileno têm uma boa resistência de aderência com materiais à base de cimento, e são resistentes à maioria dos produtos químicos e aos álcalis (TAYLOR, 1994).

### 2.3.2. Fibras de Polietileno

Para Zheng e Feldman (1995), uma das vantagens das fibras de polietileno é de que elas podem ser produzidas com alto módulo de elasticidade, até 117 GPa. A durabilidade das fibras de polietileno é alta, comparada com fibras similares, e não sofrem variação volumétrica na presença da água. (HANNANT, 1994).

**TABELA 1** – Propriedades físicas das fibras poliméricas. (BALAGURU E SHAH, 1992 Apud ZHENG E FELDMAN, 1995).

Tipo de Fibra	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Última Elongação (%)
Acrílica	1,17	207-1000	14,6-19,6	7,5-50,0
Aramida I	1,44	3620	62	4,4
Aramida II (alto módulo)	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
Matriz de Cimento (para comparação) (Fonte: GANI, 1997)	2,5	3,7	10 - 45	0,02

<sup>1</sup> Fibra sintética de alto módulo (alcançando 130GPa), e comercialmente conhecida com o nome de Kevlar, Nomex, Technorac, Teijinconex and Twaron Fibras.

### **2.3.3 Fibras de Poliéster**

A aparência das fibras de poliéster é similar à das fibras de polipropileno, mas as primeiras são mais densas, mais rígidas e mais resistentes, conforme pode-se verificar na tabela 1. As fibras de poliéster podem ser usadas para as mesmas aplicações que as de polipropileno (TAYLOR, 1994). Para Johnston (1994), o uso de fibras de poliéster em baixos teores (0,1% em relação ao volume de concreto) é uma alternativa ao uso das fibras de polipropileno, quando se quer controlar a retração plástica. Observa-se que, para pequenos volumes, não é significativa a melhoria da resistência à tração e da tenacidade dos concretos.

Segundo Johnston (1994), a durabilidade de fibras sintéticas, como o poliéster, em meio alcalino é questionável. Alguns tipos de fibras, como as de PET, mostram deterioração, definida como a perda rápida de resistência da fibra no cimento, devido à sua hidrólise e dissolução em meio alcalino.

## 2.4. PROPRIEDADES DOS CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRAS SINTÉTICAS

### 2.4.1 Tenacidade

A tenacidade é definida genericamente como sendo a capacidade de absorção de energia de um material. (ACI-SP.142, 1994)

Segundo Mehta e Monteiro (1994), ao contrário do concreto convencional, um corpo de prova de concreto reforçado com fibras não rompe imediatamente após o início da primeira fissura: as fibras aumentam a energia de fratura, que é definida como tenacidade e é representada pela área sob a curva carga-deflexão.

Para Banthia e Trottier (1995) a maior vantagem do concreto reforçado com fibras é o aumento da capacidade de absorver energia após a fissuração. Mais especificamente para Bentur e Mindess (1990), fibras em concretos têm o efeito particular de melhorar a resistência do concreto sob carregamento dinâmico, não só para uma tensão de ruptura maior, mas também para uma capacidade de resistência maior após a fissuração.

Fibras de polipropileno têm sido adicionadas no concreto para melhorar propriedades como tenacidade, ductilidade e resistência ao impacto em aplicações como lajes, pisos industriais e meio-fios. O volume de fibras de polipropileno adicionadas ao concreto varia entre 0,05% e 0,30%, e estes valores relativamente baixos, evitam problemas de mistura e moldagem do concreto. (BAYASI e ZENG, 1993)

Alhozaimy *et. al.* (1996), ao estudar concretos reforçados com fibras de polipropileno, mostra um aumento da tenacidade proporcional ao aumento do volume de fibras. A eficiência das fibras no concreto também depende de seu comprimento e orientação. (HANNANT, 1994)

Zheng e Feldman (1995) mostraram que a adição de 1% de fibras de poliéster em relação ao volume de concreto gera um aumento de 75% da resistência ao impacto, 9% à tenacidade, 7% da resistência a tração e 5% da resistência a compressão.

A aplicação em concretos de fibras em geral, e de fibras de polipropileno em particular tem recentemente ganhado grande popularidade, principalmente para diminuir os efeitos negativos da retração e melhorar a tenacidade dos concretos. Os resultados também mostram que não há melhorias significativas na resistência à compressão. (SOROUSHIAN (b) et al., 1995)

Fibras também melhoram a resistência à fissuração dos concretos de alto desempenho, que, apesar de ser um material mais resistente e durável, é um material frágil e suscetível à fissuração. Esta tenacidade superior podem ajudar a minimizar problemas de durabilidade. (MASSICOTTE e BISCHOFF, 2000).

Porém, os métodos atuais para a medida de tenacidade em concretos têm causado grandes discussões (BANTHIA e TROTTIER, 1995), como se pode verificar a seguir.

### **Tenacidade – Método de Ensaio**

Tentativas para medir a tenacidade de CRF são realizadas através do diagrama de carga/deflexão. Porém, críticas a este método são realizadas em duas direções, concernentes ao desempenho do material representativo e à dificuldade de aplicação do teste de laboratório. (ZOLLO, 1997).

A tenacidade pode ser medida a partir de testes de compressão ou flexão, sendo os de flexão mais adequados. As normas, tais como ASTM-C.1018, JSCE-SF4 e ACI-544, utilizam índices para avaliar qualitativamente a tenacidade, a fim de obter dados comparativos para diferentes materiais (ACI-SP.142, 1994).

Essa diversidade de normas utilizadas é apresentada na tabela 2 onde são mostradas as especificidades de cada uma.

TABELA 2 - Resumo de vários testes especificados para medida de tenacidade dos concretos reforçados com fibras. (GOPALARATNAM e GETTU, 1995)

Referência	Forma e Carga	Dimensões dos corpos-de-prova	Parâmetros monitorados	Velocidade de deflexão e limite do teste	Medida de tenacidade	Outras medidas definidas
ACI 544 (antiga)	Flexão a 4 pontos, carregada no terço médio	b = d = 100mm L = 300mm S = 350mm	Carga total de deflexão no vão central	0,05 - 0,10mm/min. $\delta_t > 1,9\text{mm}$	Relação de energia absorvida até 1,9mm por energia na deflexão $\delta_f$	Resistência na primeira fissura
ACI 544	Flexão a 4 pontos, carregada no terço médio	b = d = 100mm L = 300mm S = 350mm	Carga total de deflexão no vão central	0,05 - 0,10mm/min. teste até ruptura completa	Relação de energia absorvida do CRF até ruptura por aquela do concreto convencional	-
Norma Espanhola UNE 83-510-89	Flexão a 4 pontos, carregada no terço médio	b/d < 1,5 L = 3d $s > 3d + 50\text{mm}$	Carga total de deflexão no vão central	1/1000 - 1/3000/min. $\delta_t > 1,1 (1/150)$ e $\delta_t > 1,1 (15,5\delta_f)$	Energia absorvida até a deformação de 1/150 Relação de energia absorvida até $15,5\delta_f$ para aquela até $\delta_f$	Resistência na primeira fissura
Normalização Francesa P 18-409	Flexão a 4 pontos, carregada no terço médio	b = d = 140mm L = 420mm S = 560mm	Carga total de deflexão no vão central (média)	0,25 ± 0,03mm/min. $\delta_t = 3\text{mm}$	Relação da carga na deflexão $\delta$ para carga $P_f$ ( $\delta = 0,7; 1,4; 2,8\text{mm}$ )	$P_f$ de acordo com um gráfico
ASTM C1018-92	Flexão a 4 pontos, carregada no terço médio	100 x 100 X 350mm com variações permitidas	Carga total de deflexão no vão central ou deflexão nos pontos de carga	0,05 - 0,10mm/min. $\delta_t > 5,5\delta_f$ maior limite quanto necessário	Relação da energia absorvida até $n\delta_f$ para aquela absorvida até $\delta_f$ (n = 3 e 5,5) Elevado n é chamado de fator de resistência residual	Resistência na primeira fissura, deflexão a prim. Fissura, energia absorvida até $\delta_f$ fator de resistência residual
CUR (Holanda) Recomendações	Flexão a 4 pontos, carregada no terço médio	b = d = 150mm L = 450mm S = 600mm	Carga total de deflexão no vão central	0,25 ± 0,04mm/min. $\delta_t = 3\text{mm}$	Energia absorvida até deflexão $\delta$ ( $\delta = 1,5; 3\text{mm}$ ) Resistência à flexão equivalente até deflexão $\delta$ . Relação da resist. à flexão equivalente pela resist. da 1ª fissura	Resistência na primeira fissura
DBV (Alemanha) Recomendações	Flexão a 4 pontos, carregada no terço médio	b = d = 150mm L = 600mm S = 700mm	Carga total de deflexão no vão central (média)	0,2mm/min. $\delta_t = 3,5\text{mm}$	Capacidade de suporte de carga equivalente até a deflexão $\delta_{\text{limite}} = (G_{\text{fibra}}/\delta)$ Resis. a flexão equivalente até a deflexão $\delta_{\text{limite}}$ .	Resistência na primeira fissura



EFNARC Especificações (Europa)	Viga carregada em três pontos	b = 125mm d = 75mm L = 450mm S = 600mm	Carga total de deflexão no vão central	0,05 ± 0,5mm/min. $\delta_t = 5\text{mm}$	Resis. residual até deflexões de 1mm e 3mm Parâmetros ASTM C1018 $I_{10}, I_{20}, I_{50}$ e $R_{10-20}, R_{20-50}$	Classificação da tenacidade baseado na energia absorvida, resis. a prim. Fissura, resis. flexão
	Punção no centro da placa	600 X 600mm 100mm de espessura dimensão da punção 100 X 100mm	Carga de deflexão no centro da placa	1,5mm/min. $\delta_t = 25\text{mm}$	Capacidade de absorção de energia até deflexão de 25mm	Primeira fissura e carga máxima Curva de energia de deformação Classificação de tenacidade baseado na energia absorvida
Norma Belga NBM B15-238	Viga carregada em três pontos	b = d = 150mm L = 3d 4d ≤ s ≤ 5d	Carga total de deflexão no vão central	0,07 ± 0,04mm/min. $p/\delta_t \leq 0,5\text{mm}$ 0,5 ± 0,2mm/min. $p/\delta > 0,5\text{mm}$ $\delta_t > 1/150$	Relação de carga na deflexão de 1/n até a carga de primeira fissura (n = 600, 450, 300, 150) Energia absorvida até a deflexão 1/n (n = 300, 150) Resistência a flexão equivalente até a deflexão 1/n (n = 300, 150)	Resistência na primeira fissura, resist. a flexão
Instituto de medidas do Japão JCI-SF4	Viga carregada em três pontos	b = d = 100mm para $1_f < 40\text{mm}$ b = d = 150mm para $1_f < 40\text{mm}$ L = 3d + 80mm	Carga total de deflexão no vão central ou deflexão nos pontos de carga	1/1500 – 1/3000/min.	Energia absorvida até a deflexão de 1/150 Resis. a flexão equivalente até a deflexão de 1/150	Resis. a flexão, relação de cargas $P^*_{\text{máx}} / P_{\text{máx}}$ $P^*_{\text{máx}}$ = máxima carga de recarregamento depois de descarregado até 0,9 $P^*_{\text{máx}}$ na região pós pico $P^*_{\text{máx}}$ = carga máxima
Associação do Concreto Norueguês NCA n. 7	Viga carregada em três pontos	b = 125mm d = 75mm L = 450mm S = 550mm	Carga total de deflexão no vão central	0,25 ± 0,05mm/min. $\delta_t = 5\text{mm}$	Resis. a flexão residual até deflexões de 1mm e 3mm	Classificação de tenacidade baseado na resis. residual a flexão, resis. a flexão

Onde:

b = largura

d = altura

l = largura de aplicação do carregamento

s = largura total

$\delta_f$  = deflexão até a primeira fissura

$\delta_t$  = deflexão total

Pl = carregamento limite para o teste

## - METODO PARA MEDIDA DA TENACIDADE SEGUNDO ASTM C 1018

A norma ASTM-C.1018 (Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete) recomenda que a tenacidade seja medida em teste de resistência à flexão com carregamento no terço médio da viga (10x10x30cm) carregada em quatro pontos, com um equipamento que opere com uma velocidade de deslocamento controlado (0,05 a 0,10 milímetros por minuto - para corpos de prova de 10x10x30cm), a fim de melhor identificar a região após a fissuração.

O método da ASTM-C.1018, segundo Banthia e Trottier (1995) determina a tenacidade através da relação de energia absorvida até a deflexão a primeira fissura ( $\delta$ ) para vigas de concreto, entre múltiplos desta deflexão até a primeira fissura, chamados de índices de tenacidade. Os índices de tenacidade são  $I_5$  ( $3,0 \times \delta$ ),  $I_{10}$  ( $5,5 \times \delta$ ),  $I_{20}$  ( $10,5 \times \delta$ ) e  $I_{30}$  ( $15,5 \times \delta$ ). E são calculados através da capacidade de absorção de energia múltipla da deflexão até a primeira fissura, em relação à energia absorvida até a deflexão na primeira fissura ( $\delta_i$ ), como pode ser visto na expressão 2.2 e na figura 2, expressa em termos gerais:

$$I_N = \frac{\text{Energia absorvida até um múltiplo da primeira fissura}}{\text{Energia absorvida até a primeira fissura}} \quad (2.2)$$

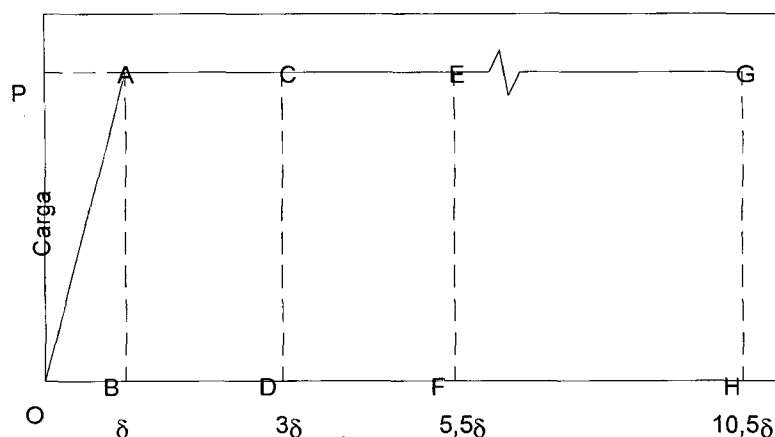


FIGURA 2 – Gráfico de medida dos índices de tenacidade segundo ASTM-C.1018

A resistência que permanece no material após a fissuração pode ser caracterizada também como fator de força residual ( $R$ ), derivado dos índices de tenacidade, e expresso geralmente em termos de  $R_{(M,N)}$ , conforme expressão 2.3, e, sendo  $N > M$  para este fator de força residual representado entre os índices de tenacidade  $I_M$  e  $I_N$ .

$$R_{M,N} = C (I_N - I_M) \quad (2.3)$$

Sendo  $C$  uma constante:

$$C = 100/(N-M) \quad (2.4)$$

Onde:

$R_{M,N}$  = índice de resistência residual ou relação de tenacidade entre os índices de tenacidade de referência  $I_N$  e  $I_M$ .

$I_N$  e  $I_M$  = índices de tenacidade.

Temos como por exemplo o cálculo de  $R_{5,10}$  e  $R_{10,30}$ , nas equações 2.5 e 2.6:

$$R_{5,10} = \frac{100}{10 - 5} (I_{10} - I_5) = 20(I_{10} - I_5) \quad (2.5)$$

$$R_{10,30} = \frac{100}{30 - 10} (I_{30} - I_{10}) = 5(I_{30} - I_{10}) \quad (2.6)$$

Segundo ASTM-C.1018 (1997) este valor de resistência residual ( $R_{M,N}$ ) será sempre 100 para um material elástico-plástico perfeito, tendo uma curva carga/deflexão, conforme figura 2.

Para Houget et. al. (1995), este valor de resistência residual representa um aspecto importante do desempenho do material ao nível da segurança e integridade da estrutura.

No entanto, para Banthia e Trottier (1995), preocupações surgem no sentido de que a tenacidade é baseada na curva carga x deflexão, e a precisa medida de deflexão é de grande importância. Dada a exigência de uma rigorosa medida de deflexão para calcular a tenacidade, muitos dados na literatura são inexatos. Os erros para as medidas de deflexão podem ser minimizados utilizando equipamento para a medida em ambos os lados da amostra, fazendo-se a

média.

A norma ASTM-C.1018 (1997), cita uma equação teórica para a medida de deflexão baseada nas características do material, e representada pela equação 2.7:

$$\delta = \left( \frac{23Pl^3}{1296EI} \right) \times \left[ 1 + \frac{216d^2(1+\mu)}{115l^2} \right] \quad (2.7)$$

onde:

$\delta$  = deflexão da viga;

P = carregamento aplicado;

E = módulo de elasticidade do material;

I = momento de inércia da viga;

l = largura da viga;

d = largura, altura da viga;

$\mu$  = coeficiente de Poisson, geralmente usado  $\mu=0,2$

A fórmula 2.7 pode ser utilizada para verificar possíveis medidas inexatas de deflexão.

## - PROBLEMAS DE INSTABILIDADE PÓS-PICO

A ocorrência do ponto de carga máxima, é também o ponto de instabilidade para a máquina de carregamento. A instabilidade ocorre pela súbita descarga e liberação de grandes quantidades de energia, sendo que os maiores problemas de instabilidade pós-pico ocorrem em concretos com baixos teores de fibras e em concretos de alta resistência (BANTHIA e TROTTIER, 1995). Para Houget et al. (1995) esta súbita descarga de energia pode ocorrer por uma série de fatores: rompimento da matriz, rompimento das fibras, deslocamento da interface fibra/matriz, energia elástica dissipada após o deslocamento, descolamento da fibra e cisalhamento das fibras que não estão perpendiculares à fissura.

Segundo Bantthia e Trottier (1995), pode-se visualizar, na figura 3, que um concreto reforçado com fibras de “menor eficiência” A, com um baixo volume de fibras, causa uma

instabilidade pós-pico de carga no concreto com uma queda súbita na deflexão durante a fissuração da viga. Isto pode ser visualizado mais precisamente com a queda de deflexão de 0,037mm no ponto A para 0,33 no ponto B. Esta instabilidade de pós-pico, mostrada na figura 3, causa uma imprecisão para o cálculo dos índices de tenacidade  $I_5$  e  $I_{10}$ .

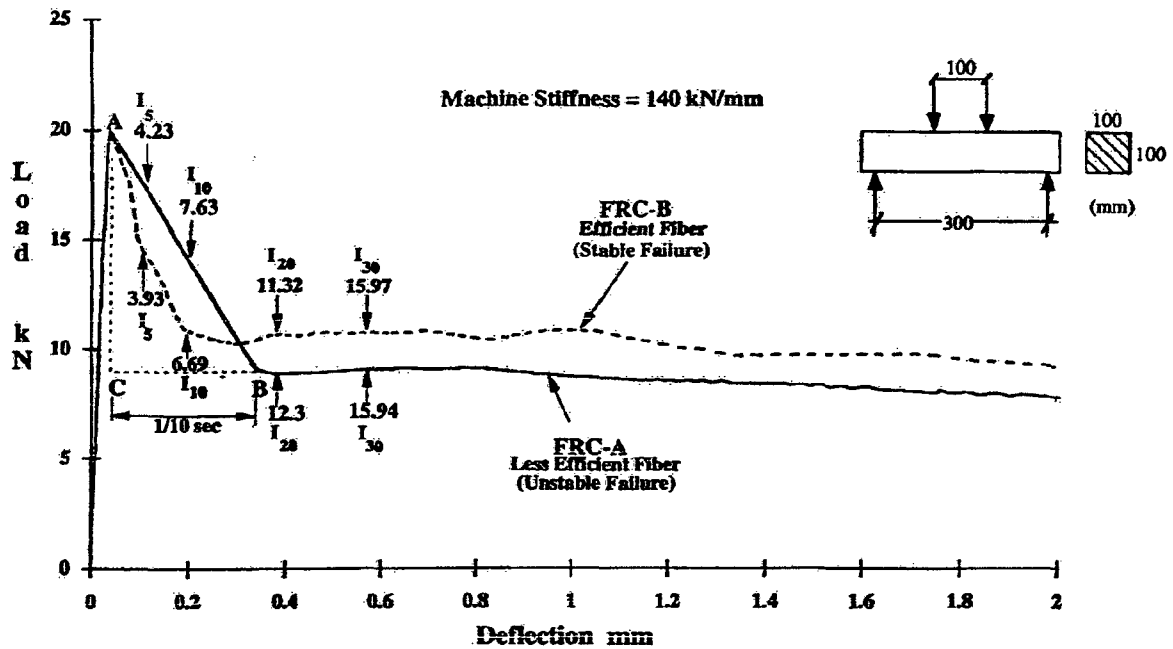


FIGURA 3 – Instabilidade na medida de tenacidade para concreto reforçado com fibras. (BANTHIA e TROTTIER, 1995)

Também para Chen et al. (1995) os índices de tenacidade  $I_5$  e  $I_{10}$  não são sensíveis o suficiente para determinar a diferença de tenacidade entre tipos diferentes de fibras (polipropileno e aço), apenas quando é usado  $I_{20}$ , mais especificamente  $I_{30}$  e  $I_{50}$  ( $25,5 \times \delta$ ), consegue-se sensibilidade de maior precisão nos resultados.

#### - PROBLEMAS DE LOCAÇÃO DA PRIMEIRA FISSURA

Para Gopalaratnam et al. (1991) a deflexão até a primeira fissura pode variar muito, dependendo do método usado para a medida de deflexão. Medidas inadequadas de deflexão podem estar associadas: a) deformação elástica e inelástica devidas ao local de amassamento da amostra sob carregamento; b) deformação elástica e inelástica no equipamento de ensaio (suporte para os medidores de deflexão, cutelos de aço para a aplicação do carregamento) sob

carregamento.

A deflexão até a primeira fissura também depende da capacidade de carregamento da viga, que também é afetada pelo tamanho da amostra, volume e tipo de fibra. (GOPALARATNAM et al. 1991. HOUGET, et al. 1995)

Segundo Gopalaratnam et al. (1991), provocar uma fenda no centro da viga na sua parte inferior a fim de propiciar e localizar a primeira fissura, é, para medida da deflexão, menos propensa a erros. Este tipo de viga sob carregamento-CMOD (load-crack mouth opening displacement) tem o objetivo de medir a tenacidade de concretos reforçados com fibras com uma maior precisão. No entanto, mais pesquisas são necessárias para estudar a viabilidade de seu uso.

#### - METODO PARA MEDIDA DA TENACIDADE SEGUNDO ACI-544.2R (1989)

A medida de tenacidade para o concreto reforçado com fibras segundo a ACI-544.2R (1989), é realizada através de um valor total, representado como a relação entre a curva carga/deflexão (até que o carregamento chegue a zero) de um CRF em relação à curva carga/deflexão de um concreto de referência sem a adição de fibras, de acordo com a expressão 2.8:

$$I_t = \frac{\text{Área sob a curva OCG no CRF (até que o carregamento chegue zero)}}{\text{Área sob a curva OAL no Concreto sem fibras (até que o carregamento chegue zero)}} \quad (2.8)$$

Pode ser melhor visualizado na figura 4:

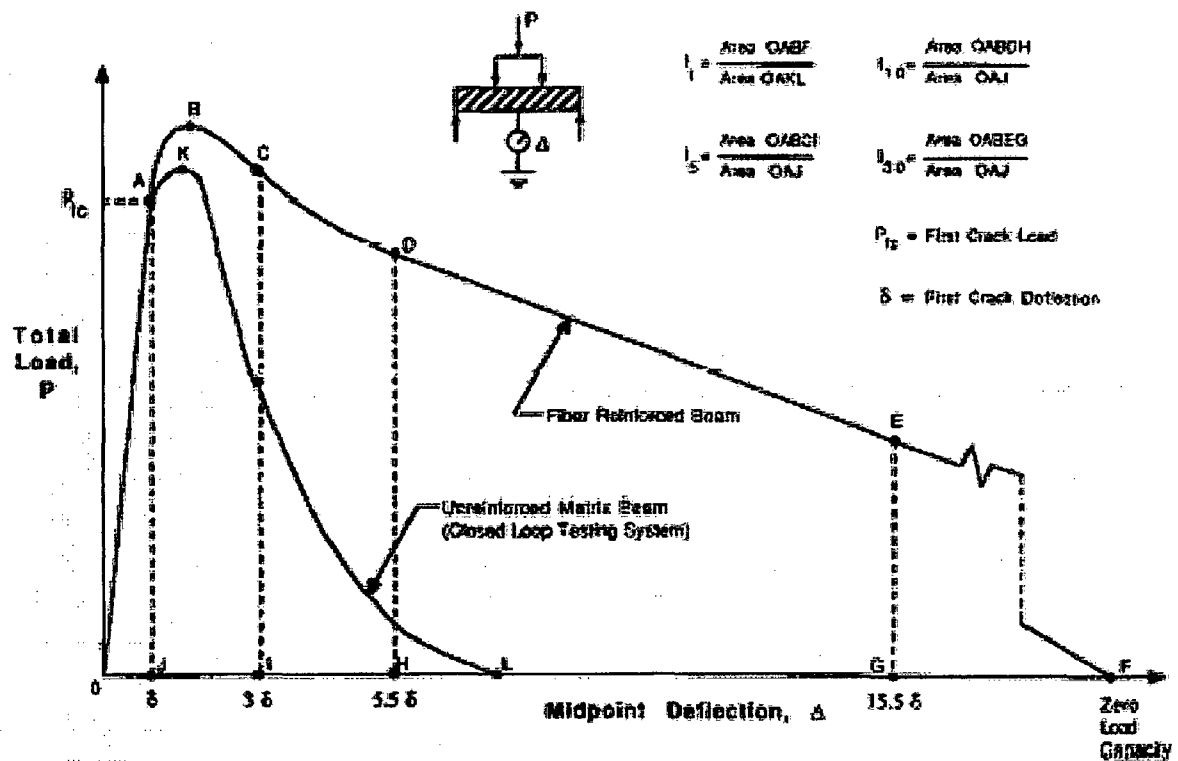


FIGURA 4 – Gráfico para medida de tenacidade segundo a norma ACI-544.2R(1989).

Segundo Almeida (1999) as vantagens atribuídas a este índice são que além de ser adimensional, ele representa o relativo aumento da capacidade de absorção de energia devido à utilização de fibras no concreto convencional. Outro aspecto está ligado ao fato de que o índice de tenacidade total ( $I_t$ ) diminui a influência de certos fatores que são:

- Relação dimensão / vão;
- Configuração de carga;
- Tipo de controle de teste;
- Velocidade de carga.

Entretanto, este método sofre críticas no que diz respeito ao fato de não ser possível confeccionar vigas idênticas de concreto. Além disso, para alguns compósitos, como por exemplo nos reforçados com fibras de vidro, quando carregados, algumas vezes demoram a alcançar o ponto de carga zero, por suportarem grandes deflexões. (BALAGURU E SHAH, 1992 apud ALMEIDA, 1999)

### **2.4.2 Resistência ao Impacto**

O aumento da resistência de impacto é um dos principais atributos dos concretos reforçados com fibras. (ACI-544.2R, 1989)

A interpretação dos resultados de medida de resistência ao impacto em materiais à base de cimento e concretos com adição de fibras é complexa devido à variabilidade contida nos diferentes tipos de testes existentes. É necessário o desenvolvimento de um teste preciso capaz de melhor representar as características do material. (ACI-SP.155, 1995)

Segundo a ACI-544.2R (1989), vários tipos de testes têm sido usados para medir a resistência ao impacto dos concretos. Eles podem ser classificados de acordo com o mecanismo de impacto utilizado, tais como: com o auxílio de um pêndulo, por repetições de golpes sucessivos com peso, com o lançamento de projéteis (armas de fogo), ou ainda com a utilização de explosivos.

Khaled et al. (2001), que analisaram concreto de alto desempenho reforçado por fibras de aço, com três relações comprimento/diâmetro (60, 75 e 83) e quatro teores de fibras (0,5, 1, 1,5 e 2%), constataram um aumento da resistência ao impacto tanto para o aumento do teor de fibras como em relação ao comprimento/diâmetro. Por exemplo, a resistência ao impacto dos concretos com 2% de fibras de aço e com uma relação L/d de 83 teve um aumento de 74 vezes em relação ao concreto de referência, sem a adição de fibras.

Toutanji et al. (1998) mostraram que a resistência ao impacto é elevada pelo aumento do volume de fibras de polipropileno (0, 0,1, 0,3 e 0,5%). Mas também se verifica um aumento significativo da resistência ao impacto com a adição de sílica ativa (0, 5 e 10%) junto com as fibras, sendo que o melhor desempenho referente à resistência ao impacto foi obtido com a adição de 0,5% de fibras de polipropileno de 19mm, e de 10% de sílica ativa. Este resultado pode ser explicado pela melhor distribuição das fibras na matriz cimentícia pela adição de sílica ativa.



Também para Alhozaimy (1996), concretos com adição de fibras de 19mm de polipropileno com o volume de 0,30%, juntamente com a adição de 10% de cinza volante, escória de alto forno ou sílica ativa, aumentam a resistência ao impacto até a primeira fissura em 151%, 78% e 91% respectivamente, e até o rompimento em 202, 145 e 164%.

### **2.4.3. Retração do Concreto Reforçado com Fibras**

A retração plástica é a retração por perda de água da pasta, argamassa ou concreto no estado fresco, que ocorre antes da pega do cimento, quando as partículas sólidas dispõem de mobilidade umas em relação às outras. A diminuição de volume do sistema corresponde ao volume de água perdido. A retração no estado endurecido ou por secagem é a retração em pasta, argamassa ou concreto após a pega do cimento. A retração no estado endurecido depende do tamanho e do tipo do vazio que perde água, da forma como a água está ligada às superfícies sólidas da pasta endurecida: se livre, se adsorvida nas paredes internas de sua estrutura, se entre as camadas do silicato de cálcio hidratado, e se combinada quimicamente. Considera-se que a magnitude da retração total da pasta endurecida depende diretamente do grau de dificuldade encontrado para a remoção da água e das propriedades mecânicas do composto. A formação do esqueleto rígido e o aumento de sua resistência mecânica com o tempo fazem, no entanto, com que a diminuição de volume do sistema não corresponda ao volume de água perdido para o meio. (BASTOS, 2001)

Para Soroushian (a) et al. (1995), defeitos podem ser causados no concreto através de retração plástica e por secagem, através de fissuração, aumentando a permeabilidade dos concretos, e diminuindo a durabilidade do material. A fissuração por retração plástica aumenta a rede de vazios permeáveis, expondo maiores áreas superficiais dos concretos aos agentes ambientais, reduzindo sua vida útil.

As principais vantagens de se utilizar fibras no concreto, segundo Wang et al. (2000) são a redução da retração e da fissuração na retração. Um baixo volume de fibras sintéticas (como 0,1% de fibras de polipropileno, por exemplo) é frequentemente usado para reduzir a fissuração por retração plástica nos concretos. Também para Soroushian (a) et al. (1995), as

fibras de polipropileno tornaram-se recentemente populares para reforçar concretos, principalmente a fim de reduzir a fissuração por retração plástica. O trabalho conclui que adição de 0,1% (em volume ao volume de concreto) de fibras de polipropileno de 13 e 19mm reduziram significativamente a área total de fissuras por retração plástica.

Entretanto, segundo Tanesi e Figueiredo (1999), a comparação dos concretos reforçados com fibras de polipropileno em relação aos concretos convencionais quanto aos efeitos da retração são variáveis, como pode ser observado na tabela 3. Enquanto que em alguns estudos as fibras parecem não desempenhar nenhuma contribuição na diminuição da retração (SWAMY e STRAVIRDES, 1979; GRZYBOWSKY e SHAH, 1990; KOVLER et al., 1992; SARIGAPHUTI et al., 1993 apud TANESI e FIGUEIREDO, 1999), em outros estudos (ZOLLO, 1984; PADRON e ZOLLO, 1990 apud TANESI e FIGUEIREDO 1999) as fibras parecem ter contribuído significativamente para a redução da retração. Tais diferenças, podem ser atribuídas à dosagem da matriz, características geométricas e teor de fibras, à granulometria do agregado gráudo, geometria dos corpos-de-prova e à metodologia de ensaio. (TANESI e FIGUEIREDO, 1999)

TABELA 3 – Estudos sobre o comportamento à retração dos compósitos reforçados com fibras de polipropileno. (TANESI e FIGUEIREDO, 1999)

	SWAMY, ATAVRIDES (1979)	ZOLLO (1984)	GRZYBOWSKY, SHAH (1990)	PADRON, ZOLLO (1990)		KOVLER et al. (1992)	SARIGA PHUTI et al. (1993)
Tipo de ensaio	Prismas de 102x102x508 mm	Prismas de 38,1x76,2x457,9mm UR:40% T:38°C	ASTM C197	Placa quadrada de 90mm de aresta e 12mm de espessura. No centro da placa foi colocado um anel metálico de 114,3mm de diâmetro	Placa quadrada de 90mm de aresta e 25mm de espessura. No centro da placa foi colocado um anel metálico de 139,7mm de diâmetro	Prismas de 40x40x500mm UR:65% T:20°C	ASTM C197 UR:40% T:0°C
Tipo de Fibra	Não especificado	Fibrilado	Fibrilado	Fibrilado	Fibrilado	Fibrilado	Fibrilado
Comprimento	50,8mm	10mm	19mm	19mm	19mm	25,4mm	11mm
Teor de Fibras (em volume)	2%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,3%	Não especificado
Dosagem matriz	Argamassa 1:1,8	Concreto 1:2,68:2,69	Concreto 1:2:2	Argamassa 1:2	Concreto 1:2:3	Não especificado	Concreto 1:2:2
Substituição de cimento por sílica ativa	30%	-	-	-	-	Não especificado	-
Dimensão máxima característica do agregado graúdo	-	9	9	-	905mm	6mm	9mm
Relação água/aglomerante	0,42	0,65	0,50	0,65	0,65	0,57	0,50
Aditivo redutor de água	280mg por 50Kg de cimento	-	-	-	-	Não especificado	-
Idade do ensaio	Aproximadamente 40 dias	2,5 horas	Aproximadamente 40 dias	16 horas		24 horas	42 dias
Redução da retração	10%	75%	10%	32%	48%	Aproximadamente 10%	0%

#### **2.4.4. A Durabilidade de Fibras no Concreto**

A degradação de fibras no ambiente alcalino do cimento hidratado é um problema conhecido. Para Mehta e Monteiro (1994) fibras de vidro comuns não podem ser utilizadas em argamassas ou concretos de cimento Portland, por causa do ataque químico pelos álcalis do cimento. Fibras de vidro com zircônia e outras fibras de vidro resistentes aos álcalis possuem melhor desempenho em meios alcalinos, mas mesmo estas apresentam uma degradação gradual com o passar do tempo; analogamente à maioria das fibras naturais e alguns polímeros sintéticos apresentam problemas de durabilidade.

Para Hannant (1994); Mindess e Banthia (SD); Wang et al. (1987), as fibras de polietileno e polipropileno têm uma excelente resistência aos álcalis do cimento. Sendo as de polipropileno duráveis sob várias condições de exposição por períodos de até 10 anos, e em testes acelerados representando até 30 anos, não mostraram nenhum problema de deterioração. Porém, de acordo com Wang et al. (1987) fibras acrílicas, de poliéster e de aramida não são resistentes aos álcalis fortes, no entanto dados na literatura sobre a durabilidade e estabilidade do poliéster em meio ao cimento é insuficiente e inconsistente. Por exemplo, Jakel (1975) apud Wang et al. (1987) obteve sucesso em utilizar fibras de poliéster em materiais a base de cimento portland, mas a ACI-544.1R (1997) conclui que fibras de poliéster não apresentam desempenho para reforçar materiais a base de cimento portland, por causa de sua degradação em meio ao cimento.

Também para Jelidi et. al. apud Jonhston (1994) a durabilidade do poliéster em meio ao cimento é questionável e controverso. A hidrólise e dissolução do polietileno tereftalato (PET), na presença de substâncias alcalinas do cimento é um problema.

#### **2.4.5. Aplicações do Concreto com Fibras**

É consenso para pesquisadores Hannant (1994); Balaguru e Slattum (1995); Bentur e Mindess (1990); Gopalaratnam et al. (1995); Zollo (1997), que a utilização de CRF em estruturas sujeitas a carregamento dinâmico, como em pavimentos, e, segundo Banthia e Trottier (1995) o uso de concreto reforçado com fibras em várias aplicações da engenharia civil é necessário, e têm sido frequentemente utilizado em lajes, concreto projetado, produtos pré-moldados, reparos, fundações, estruturas hidráulicas e muitas outras aplicações.

Para Mehta e Monteiro (1994) o primeiro uso estrutural do concreto reforçado com fibras de aço foi em 1971, na produção de painéis desmontáveis para a garagem do estacionamento do aeroporto de Heathrow, em Londres. O concreto continha 3% em peso de fibras de aço estiradas a frio, com 0,25mm de diâmetro por 25mm de comprimento. Após 5 anos de uso, as placas não apresentavam nenhum sinal de fissuração.

Gani (1997) cita algumas aplicações dos concretos reforçados com fibras:

- Na manufatura de painéis laminados de cimento, em que o volume de fibras está normalmente em volta de 5%, e elas atuam para aumentar a resistência à tração e a tenacidade;
- Em componentes que devem suportar altas cargas de impacto, por exemplo, estacas pré-moldadas, que são cravadas no solo por bate-estaca;
- Nos casos em que a fratura ou fissuração do material precisa ser controlada, por exemplo, pistas de aviação, revestimentos de rodovias etc;

Mehta e Monteiro (1994), citam ensaios em que foi avaliado o efeito de fibras de aço (em volume de 2%) para reforçar a pista de aeroporto destinada a resistir trem de carga de aeronaves de 13600 Kg/roda. O ensaio comparou o comportamento de placas de concreto de 150mm de espessura reforçado com fibras, com placas de concreto simples de 250mm. No primeiro caso, a primeira fissura apareceu após 350 carregamentos, e no concreto simples após 40 carregamentos. Enquanto o concreto simples foi considerado completamente destruído com

950 carregamentos, o pavimento de concreto reforçado com fibras, com finas fissuras, permanecia utilizável após 8735 carregamentos.

## CAPÍTULO 3

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O principal objetivo do programa experimental, é instrumentar os ensaios, a fim de avaliar o comportamento do concreto com a adição de fibras de polietileno tereftalato – PET. O programa experimental foi dividido de acordo com as variáveis da seguinte forma:

- Teor de fibras adicionadas (em relação ao volume de concreto): variável 1, dividida em três níveis de 0,05; 0,18 e 0,30% (o que equivale a 0,64, 2,25 e 3,90 Kg de fibras por m<sup>3</sup> de concreto); com o objetivo de verificar o efeito do teor de fibras nos CRF. Estudos preliminares mostraram que a adição máxima foi de 0,30% em relação ao volume de concreto; acima deste teor, o concreto apresenta problemas de homogeneidade e trabalhabilidade. Quanto aos demais teores, foram escolhidos intervalos iguais;
- Comprimento das fibras adicionadas no concreto: variável 2, dividida em três níveis de 10, 15 e 20mm; com o objetivo de verificar o efeito do comprimento das fibras nos CRF. Optando-se pelos comprimentos utilizados em pesquisas com CRF de poliéster (BALAGURU e SLATTUM, 1995), como também aos comprimentos comerciais das fibras de PET disponíveis no mercado;
- Idade dos concretos: variável 3, dividida em dois níveis, que são as idades de 35 e 150 dias. Idades escolhidas para poder observar o possível processo de degradação das fibras no concreto;
- Concreto de referência: concreto sem a adição de fibras para comparação com os demais.

### 3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 3.1.1. Cimento

- Tipo: CP V – ARI
- Marca: ITAMBÉ

Ensaio Físicos e Químicos do Cimento de acordo com o fabricante:

- Finura na Peneira ABNT N°200: 0,19%
- Blaine: 4,118 cm<sup>2</sup>/g
- Massa Específica: 3g/cm<sup>3</sup>
- Tempo de Pega: Início 2h 47min  
Término 3h 43min
- Resistência à Compressão:
  - 22,6 MPa – 1 dia
  - 34,7 MPa – 3 dias
  - 40,1 MPa – 7 dias
  - 50,0 MPa – 28 dias

**TABELA 4 – Caracterização química do cimento**

Elementos	Composição em % de massa
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,39
SiO <sub>2</sub>	18,71
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,47
CaO	60,11
MgO	5,13
SO <sub>3</sub>	3,12
Perda ao Fogo	3,42
Resíduo Insolúvel	0,87
CaO Livre	1,66
Equivalente Alcalino	0,60

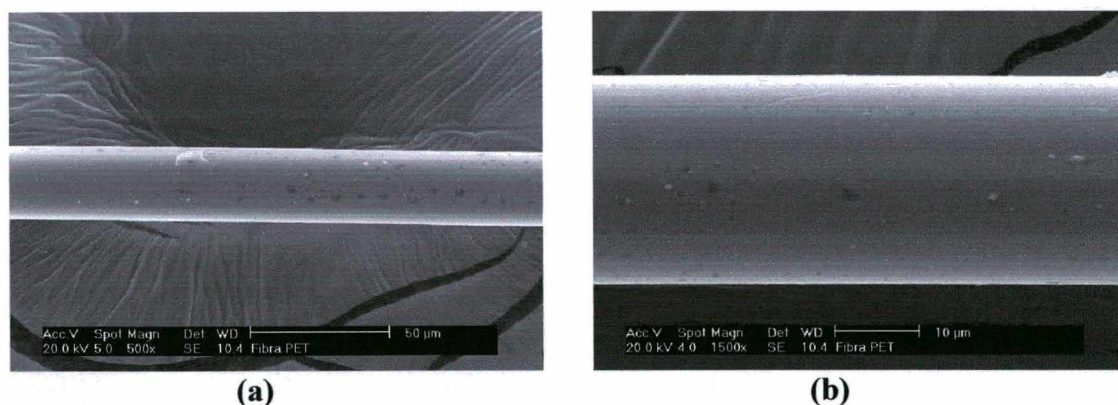


### 3.1.2. Fibras

As fibras utilizadas no concreto são fibras orgânicas de poliéster, mais especificamente de polietileno tereftalato (PET), tipo monofilamentos, e com as seguintes características, segundo Betioli (2003, a defender):

- Densidade: 1,3311 g/cm<sup>3</sup> (multipicnometro);
- Absorção de Água: 3,29% (9 semanas com UR constante de 75%);
- Temperatura de Transição Vítrea: 62°C (DSC);
- Temperatura de Fusão: 252,82 °C (DSC);

A figura 5 mostra o aspecto da fibra de PET, observadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV).



**FIGURA 5** – Fibras de PET visualizada em MEV

Através do MEV pode-se observar que a textura das fibras é lisa, com seção transversal de forma circular, e que o diâmetro das fibras varia de 25 a 30  $\mu\text{m}$ . Pode-se calcular o fator de forma da fibra, que é a relação entre seu comprimento e o seu diâmetro, e valem 364, 545 e 727 para as fibras de 10, 15 e 20mm respectivamente.

### **3.1.3. Aditivo**

O aditivo utilizado foi o plastificante redutor de água para concreto MASTERMIX 396N da MBT (Máster Builders Technologies). Foi utilizado o teor de 0,6% de aditivo em relação ao peso de cimento, teor que está dentro da faixa recomendada pelo fabricante, que é de 0,2 a 0,8%. As principais características físico-químicas do aditivo informados pelo fabricante, são:

- Densidade:  $1,22 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$
- PH:  $9 \pm 1$
- Teor de sólidos: 40 a 45%
- Composição Básica: Resíduo de Melamina – Formaldeído

### **3.1.4. Agregados**

#### a) Agregado Miúdo

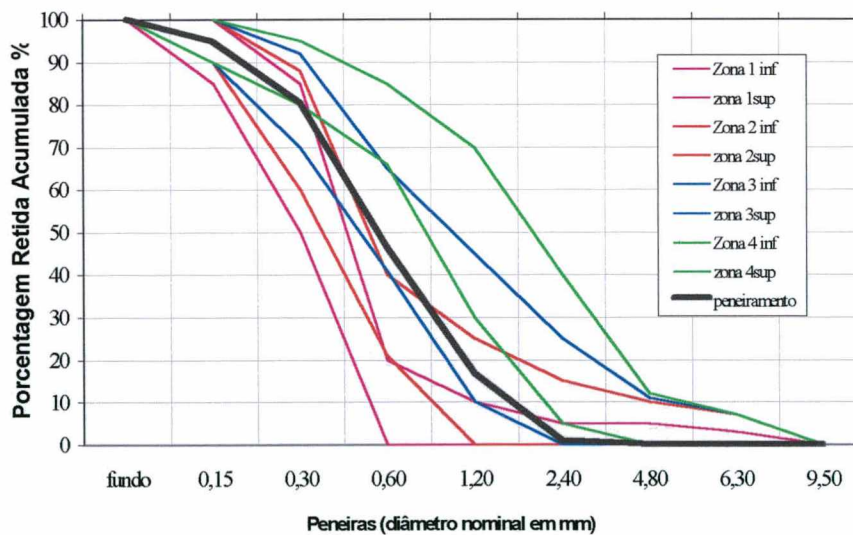
As propriedades físicas da areia utilizada são as seguintes:

- Massa Unitária:  $1,409 \text{ Kg/dm}^3$
- Massa Específica:  $2,600 \text{ Kg/dm}^3$
- Módulo de Finura: 2,4
- Diâmetro Máximo: 2,4mm

A tabela 5 apresenta os resultados do ensaio de granulometria da areia, sendo classificada de acordo com a norma NBR-7217(1987), como areia média (zona 3), como mostra a figura 6.

**TABELA 5** – Composição granulométrica do agregado miúdo

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA AREIA (NBR-7217/1987)							
PENEIRAS		1ª Determinação		2ª Determinação		% Retida Média	% Retida Acumulada
Nº	mm	Peso Retido (g)	% Retida	Peso Retido (g)	% Retida		
3/8"	9,5	-	-	-	-	-	
1/4"	6,5	-	-	-	-	-	
4	4,8	-	-	-	-	-	
8	2,4	11,28	1,37	2,97	0,50	0,9	0,9
16	1,2	130,13	15,84	101,07	15,75	15,8	16,7
30	0,6	242,32	29,50	191,51	29,84	29,7	46,4
50	0,3	283,62	34,53	214,54	33,43	34,0	80,4
100	0,15	117,52	14,31	93,22	14,53	14,4	94,8
Fundo	< 0,15	36,52	4,45	38,42	5,99	5,2	
TOTAL		821,4	100,0	641,7	100,0	100,0	239,2
DIÂMETRO MÁXIMO: 2,4mm				MÓDULO DE FINURA: 2,4			



**FIGURA 6** – Curva granulométrica da areia.

## b) Agregado Graúdo

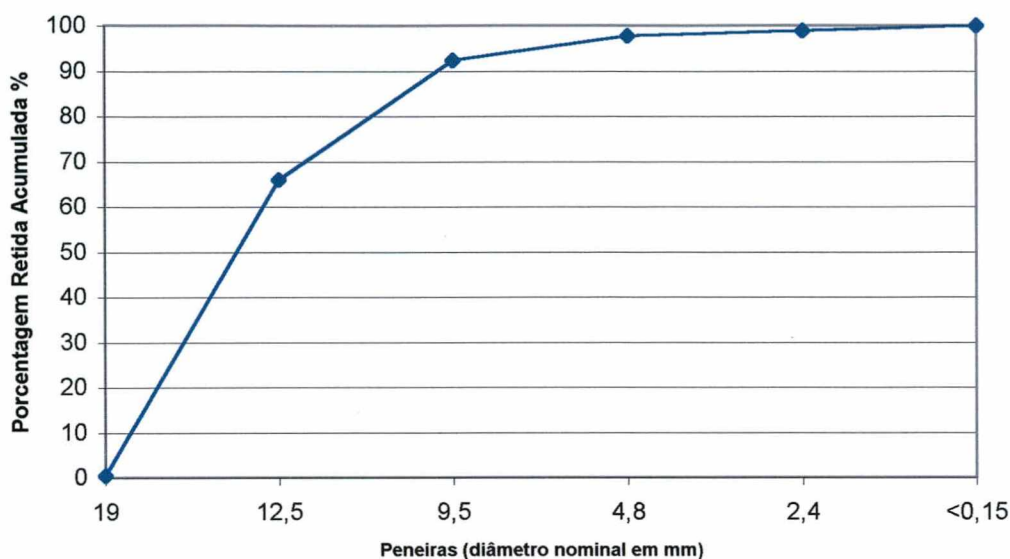
As características físicas do agregado graúdo são as seguintes:

- Massa Específica: 2,643 Kg/dm<sup>3</sup>
- Massa Unitária: 1,439 Kg/dm<sup>3</sup>
- Diâmetro Máximo: 19mm
- Módulo de Finura: 6,889

A tabela 6 apresenta os resultados dos ensaios de granulometria do agregado graúdo, e na figura 7 é mostrada a sua curva granulométrica.

**TABELA 6 – Composição granulométrica do agregado graúdo.**

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA NBR-7217/1987								
PENEIRAS		1º Determinação		2º Determinação		% Retida Média	% Retida Acumulada	
Nº	mm	Peso Retido (g)	% Retida	Peso Retido (g)	% Retida			
3''	76	-	-	-	-	-		
2 ½''	64	-	-	-	-	-		
2''	50	-	-	-	-	-		
1 ½''	38	-	-	-	-	-		
1 ¼''	32	-	-	-	-	-		
1''	25	-	-	-	-	-		
¾''	19	21,1	0,3	43,5	0,5	0,4	0,4	
½''	12,5	4319,5	64,4	5806,8	66,5	65,5		65,9
3/8''	9,5	1805,5	26,9	2266,0	25,9	26,4	92,3	
¼''	6,5							
4	4,8	391,5	5,8	437,0	5,0	5,4	97,7	
8	2,4	88,4	1,3	100,3	1,1	1,2	98,9	
16	1,2						98,9	
30	0,6						98,9	
50	0,3						98,9	
100	0,15						98,9	
Fundo	< 0,15	77,5	1,2	82,0	1,0	1,1		
TOTAL		6703,5	100	8735,6		100	684,9	
DIÂMETRO MÁXIMO: 19mm				MÓDULO DE FINURA: 6,85				



**FIGURA 7** – Curva granulométrica do agregado graúdo.

Este agregado é classificado como brita 1, de acordo com a norma técnica NBR-7217(1987).

### 3.2. PRODUÇÃO, MOLDAGEM E CURA DO CONCRETO

As dosagens de concreto foram realizadas obedecendo à metodologia de dosagem de concreto do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (HELENE e TERZIAN, 1992).

Durante a dosagem, a determinação do teor de argamassa é uma das fases mais importantes, pois é o que determina a adequabilidade de lançamento do concreto. A falta de argamassa na mistura tem como conseqüências falhas de concretagem, o excesso proporciona um concreto de boa aparência, mas aumenta seu custo por metro cúbico, bem como o risco de fissuração por retração plástica. Dá-se ênfase a este aspecto a fim de misturar com eficiência as fibras PET com um teor de argamassa e uma trabalhabilidade adequada.

Os concretos utilizados obedeceram à proporção dos materiais 1:2,30:2,70:0,62 (cimento:areia:brita:relação água/aglomerante) em massa de materiais secos, para um teor de argamassa de 55%, um consumo de cimento de 343 Kg/m<sup>3</sup>, e uma massa específica de 2350Kg/m<sup>3</sup>. O aditivo foi adicionado em todos os concretos com fibras.

Pode-se verificar na tabela 7 as dosagens de concreto produzidas.

**TABELA 7 – Tipos de concretos**

Tipo de Dosagem / Materiais empregados	Fibras PET Adicionadas			Demais Componentes do Concreto				
	Comprimento (mm)	Volume (%)	Peso (g/m <sup>3</sup> )	Cimento (Kg/m <sup>3</sup> )	Areia (Kg/m <sup>3</sup> )	Brita (Kg/m <sup>3</sup> )	Água (Kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (Kg/m <sup>3</sup> )
<b>Dosagem 1</b>	-	-	-	342,7	788,2	925,3	212,5	-
<b>Dosagem 2</b>	10	0,05	642,6	342,7	788,2	925,3	212,5	2,056
<b>Dosagem 3</b>	10	0,18	2248,7	342,7	788,2	925,3	212,5	2,056
<b>Dosagem 4</b>	10	0,30	3855,3	342,7	788,2	925,3	212,5	2,056
<b>Dosagem 5</b>	15	0,05	642,6	342,7	788,2	925,3	212,5	2,056
<b>Dosagem 6</b>	15	0,18	2248,7	342,7	788,2	925,3	212,5	2,056
<b>Dosagem 7</b>	15	0,30	3855,3	342,7	788,2	925,3	212,5	2,056
<b>Dosagem 8</b>	20	0,05	642,6	342,7	788,2	925,3	212,5	2,056
<b>Dosagem 9</b>	20	0,18	2248,7	342,7	788,2	925,3	212,5	2,056
<b>Dosagem 10</b>	20	0,30	3855,3	342,7	788,2	925,3	212,5	2,056

A partir de ensaios preliminares foram testados vários métodos de colocação dos materiais em betoneira, para melhor misturar as fibras. A seqüência mais adequada para melhor misturar os materiais, obedeceu a seguinte ordem:

- 1° → colocação do agregado graúdo;
- 2° → adição de 80% da água misturada com aditivo;
- 3° → adição cimento;
- 4° → adição do agregado miúdo e restante da água;
- 5° → fibras dispersas manualmente na mistura;

O tempo médio para colocação dos materiais em betoneira foi de dois minutos, mais três minutos para homogeneização da mistura, com um total de cinco minutos para colocação e mistura dos materiais.

Observado também durante a mistura dos materiais, a dificuldade de misturar as fibras de PET, limitando a um teor máximo de 0,30% no concreto, mesmo com a utilização de aditivos, e, ainda proporcionando uma grande perda de abatimento em relação aos concretos com um menor teor de fibras.

Após a produção do concreto foram moldados corpos de prova prismáticos (15X15X50cm) e cilíndricos (10X22cm) de acordo com a norma NBR-5738 (1994). Foram moldados 30 corpos-de-prova cilíndricos e 6 corpos-de-prova prismáticos para cada combinação de variáveis, ou seja, para cada dosagem de concreto. Os corpos-de-prova cilíndricos foram desmoldados após 1 dia e colocados na cura por imersão em água com cal durante 35 e 150 dias. Os corpos-de-prova prismáticos foram desmoldados após 2 dias e após seguiram o mesmo procedimento das amostras cilíndricas.

### 3.3. ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

#### **Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone**

O ensaio de determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone, foi realizado após a mistura do concreto de acordo com a norma NBR-7223/1994.

### 3.4. ENSAIOS FÍSICOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

#### **3.4.1. Ensaio de Absorção de Água por Imersão e Massa Específica**

Os ensaios de determinação da absorção de água por imersão e de massa específica foram realizados como um método indireto de avaliar a porosidade do concreto, a fim de verificar uma possível incorporação de ar durante a mistura dos concretos com adição de fibras. O ensaio foi realizado segundo as normas brasileiras NBR-9778 (1987), onde foram ensaiados 3 corpos-de-prova cilíndricos (10x22cm) para cada dosagem, apenas não sendo realizadas as pesagens intermediárias para amostra imersa em água em 24 horas e 48 horas, realizando-se apenas as pesagens após 72 horas, uma vez que as leituras intermediárias não são importantes para a determinação do valor final destes índices.

#### **3.4.2. Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade**

Os ensaios de absorção de água por capilaridade foram realizados a fim de estimar o efeito da adição de fibras de PET na porosidade e na durabilidade dos concretos. O ensaio foi

realizado segundo a norma NBR-9779 (1995), que mede a velocidade de absorção de água por sucção capilar do concreto não saturado em contato com a água. Entretanto empregou-se corpos-de-prova obtidos por serragem dos cilíndricos de 10x22 (diâmetro x altura em cm). Cada cilindro gerou 3 corpos-de-prova de 10x7 (diâmetro x altura em cm), que foram colocados em estufa a  $80^{\circ}\text{C}\pm 2$  até constância de massa. Após o resfriamento foi impermeabilizada a sua superfície lateral, a fim de restringir a área de absorção, evitar a evaporação pelas faces laterais e forçar o caminho para ascensão capilar, deixando-se secar em dissecador com sílica gel (LORENZETTI et al., 2001). Após foi realizado o ensaio com tempos de medida de 15min, 30min, 45min, 1h, 2h, 4h, 24h e 48h, onde a cada tempo de medida os corpos-de-prova eram retirados do recipiente (corpo-de-prova imerso em filme de água), enxugados, pesados e recolocados, em seguida, dentro do recipiente.

### 3.5. ENSAIOS MECÂNICOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Os ensaios mecânicos foram realizados a fim de caracterizar as propriedades dos CRF de PET quanto à resistência à compressão, à tração, a deformação, à resistência ao impacto e tenacidade.

#### 3.5.1. Resistência à Compressão Axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados de acordo com a norma NBR-5739 (1994). Foram ensaiados 3 corpos-de-prova cilíndricos para cada dosagem, que tiveram sua superfície regularizada com serra de disco diamantado e posteriormente capeados com pasta de cimento. Os ensaios foram realizados em prensa servo-controlada de marca Shimadzu.

#### 3.5.2. Módulo de Deformação

Os ensaios de módulo de deformação do concreto foram determinados de acordo com a NBR-8522 (1985), utilizando o plano de carga III, e calculando o módulo de deformação corda, a uma carga referente a 40% da carga de ruptura, segundo a equação 3.1:



$$E_n = \frac{\sigma_n - \sigma_{0,5}}{\varepsilon_n - \varepsilon_{0,5}} \quad (3.1)$$

onde:

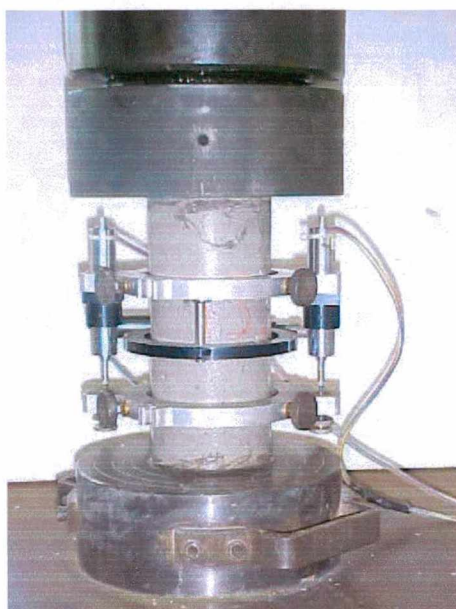
$E_n$  = módulo de deformação corda correspondente à inclinação da reta unindo os pontos do diagrama tensão-deformação relativos às tensões na deformação de  $50\mu\text{m}$  e uma tensão  $n$ , correspondente a uma porcentagem da carga de ruptura (40). Recomenda-se deslocar a linha base em 50 microdeformações para corrigir a leve concavidade que normalmente é observada no início da curva tensão-deformação. (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

$\sigma_n$  = tensão de 40% da carga de ruptura considerada para o módulo.

$\varepsilon_n$  = deformação específica correspondente a  $\sigma_n$ .

$\varepsilon_{0,5}$  = deformação específica correspondente a  $50\mu\text{m}$  e uma tensão correspondente.

As amostras sofreram carregamento constante sem o tempo de parada recomendado pela norma para leituras de deformação, uma vez que a leitura de deformação específica foi realizada por 2 transdutores LVDT (Linear Voltage Differential Transducer - tipo DT10SP), conforme figura 8, com uma capacidade de leitura mínima de  $0,0025\text{mm}$ , realizando 40 leituras por segundo. A aquisição dos dados foi realizada por computador que opera o equipamento (prensa Shimadzu) utilizando software próprio. Foram ensaiados 3 corpos-de-prova para cada dosagem, que tiveram sua superfície regularizada com serra de disco diamantado e posteriormente capeados com pasta de cimento. Os ensaios foram realizados em prensa servo-controlada de marca Shimadzu.



**FIGURA 8** – Aparato utilizado no ensaio de deformação

### 3.5.3. Resistência à Tração por Compressão Diametral

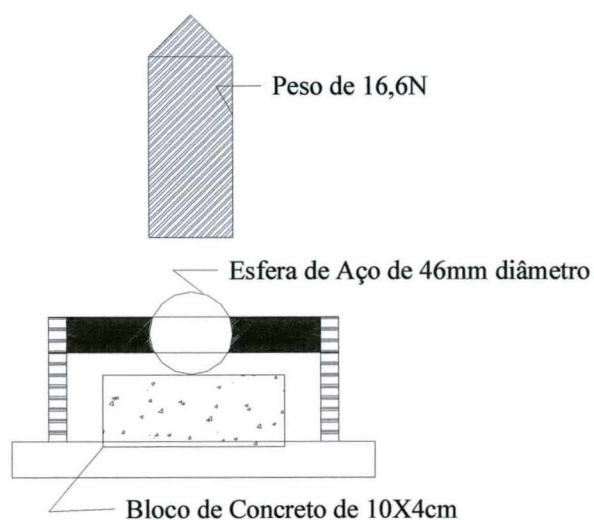
Os ensaios de tração por compressão diametral foram realizados de acordo com a NBR-7222 (1983), afim de medir um possível aumento da resistência à tração dos CRF. Foram ensaiados 3 corpos-de-prova cilíndricos para cada dosagem.

### 3.5.4. Resistência ao Impacto

O teste de impacto foi baseado no procedimento indicado pelo Comitê 544 do ACI, conforme texto da “Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete” (ACI-544.2R, 1989), e utilizou um peso para causar impacto por golpes sucessivos no corpo-de-prova de concreto. Anotou-se o número de golpes necessário até o aparecimento da primeira fissura e, posteriormente, até o rompimento. O ensaio de impacto sofreu apenas modificações dimensionais (redução de 1/3) em relação à norma norte americana (ACI-544.2R, 1989), conforme a tabela 8 e figura 9.

**TABELA 8** – Ensaio de impacto comparado com as normas do ACI-544.2R (1989)

	ACI-544.2R-1989 (recomendado)	Teste impacto realizado
Peso de impacto	4,54Kg	1,66Kg
Altura de queda	457mm	300mm
Amostra de concreto	152 x 63,5 mm	100mm x 40mm
Esfera de aço	63,5mm	46mm



**FIGURA 9** – Aparato utilizado para os ensaios de resistência ao impacto

As modificações no ensaio de resistência ao impacto foram realizadas por haver somente amostras de concretos moldadas para a idade de ensaio com diâmetro de 10 centímetros.

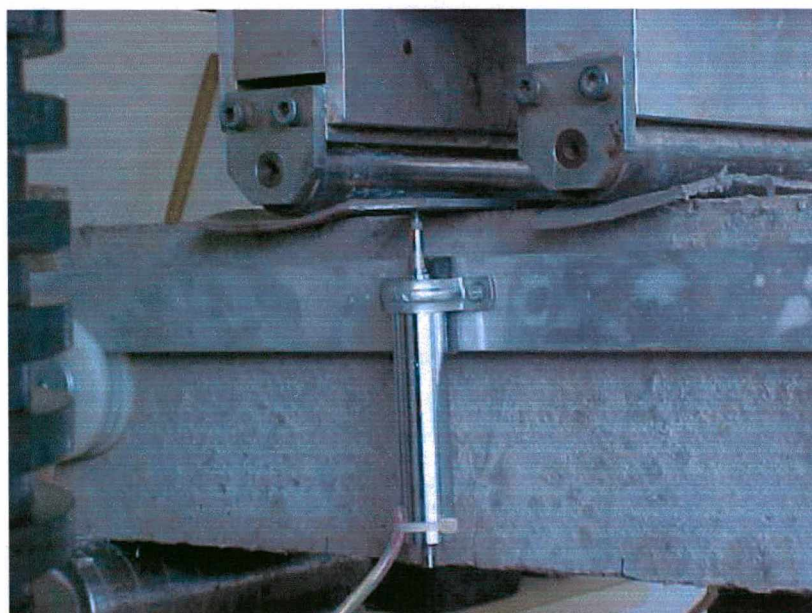
### 3.5.5. Ensaio de Tração na Flexão e Tenacidade para Concreto Reforçado com Fibras

Os ensaios de tração na flexão foram realizados segundo a NBR-MB.3483 (1991), utilizando-se um carregamento com deslocamento controlado de 0,6mm/minuto, para se adequar à norma de ensaio para tenacidade de CRF da ASTM-C.1018.

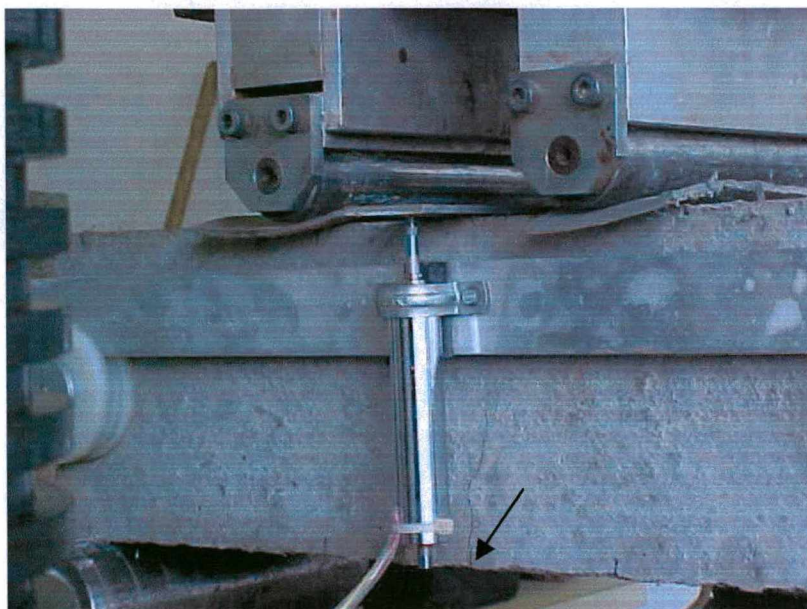
Juntamente com este ensaio foi avaliada a tenacidade, utilizando como referência a norma ASTM-C.1018 (1997) (Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete), que recomenda um equipamento de medida da deflexão no meio do vão do corpo-de-prova prismático, que é carregado em quatro pontos no seu terço médio. A norma recomenda que o ensaio seja realizado sob deslocamento controlado de 0,05mm a 0,10mm/minuto (para amostras de 10x10x30), para permitir a identificação da região de pós-fissuração no gráfico que correlaciona a carga à deflexão. A norma ASTM-C.1018 recomenda o uso de corpos-de-prova prismáticos de 10x10x30cm, mas foi utilizada a dimensão de 15x15x50cm que obedece a NBR-MB.3483 (1991).

O ensaio de tração na flexão e tenacidade de corpos-de-prova prismáticos foi realizado numa prensa de marca Shimadzu, com a capacidade de carga de 200ton e precisão de 0,04KN. A velocidade de carregamento, com deslocamento controlado, foi de 0,6 mm/min. Para as leituras de deslocamento, ou deflexão no meio do vão, foram utilizados dois transdutores LVDT (Linear Voltage Differential Transducer - tipo DT10SP), com uma capacidade de leitura mínima de 0,0025mm, realizando 40 leituras por segundo. A aquisição dos dados foi realizada por computador que opera o equipamento (prensa Shimadzu) utilizando software próprio.

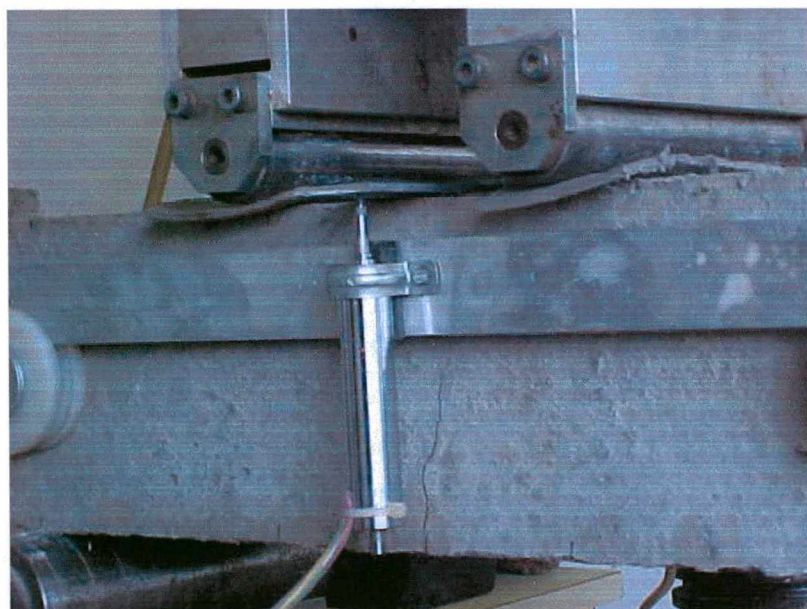
As figuras 10 a 14 mostram uma seqüência de fotos do ensaio de tração na flexão e de tenacidade, para o concreto com a adição de 0,30% de fibras de PET com 20mm de comprimento, sendo que os resultados deste ensaio serão discutidos no próximo capítulo.



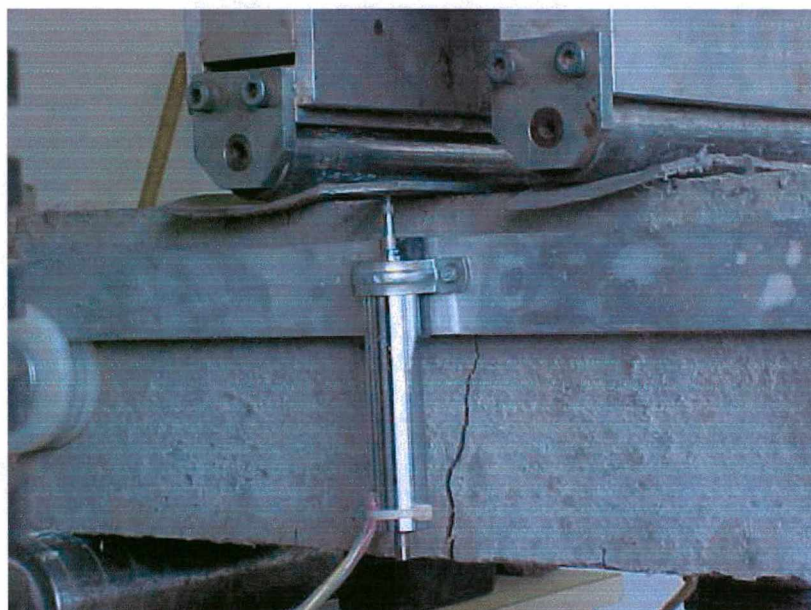
**FIGURA 10** – Ensaio de tração na flexão e tenacidade com leitura de deformação por lvdt's



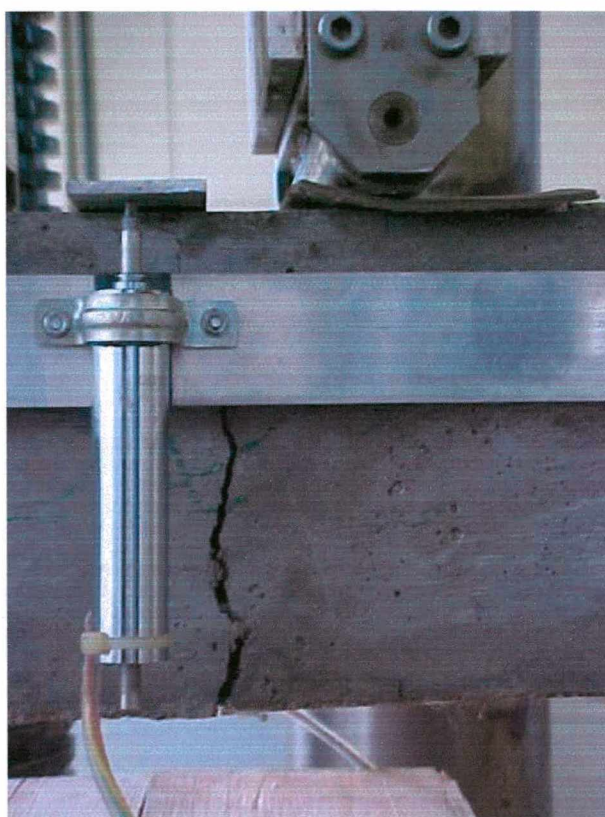
**FIGURA 11** – Ensaio de tração na flexão e tenacidade - aparecimento da primeira fissura



**FIGURA 12** – Ensaio de tração na flexão e tenacidade - aumento da fissura e rompimento da amostra



**FIGURA 13** – Ensaio de tração na flexão e tenacidade – aumenta fissura e as medidas de deformações sendo realizadas



**FIGURA 14** – Ensaio de tração na flexão e tenacidade - ensaio finalizado pelo software quando ocorre deformação excessiva da amostra

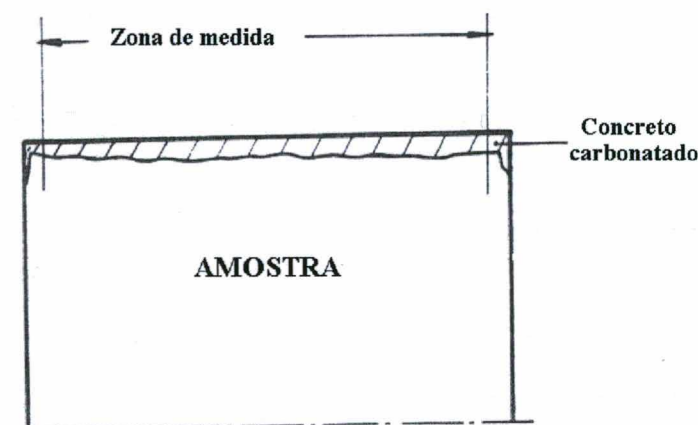
### 3.6. AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE

A influência do comprimento e do teor de fibras de PET na durabilidade dos concretos pode ser avaliada através de medidas. A reação do gás carbônico da atmosfera com os produtos de hidratação do cimento começa pela superfície livre do concreto e propaga-se por difusão, nos poros, até o interior. Esta reação de carbonatação, consumindo hidróxido de cálcio reduz o pH da pasta de cimento a valores insuficiente para passivação da armadura. Quando PH cai para valores inferiores a 10, segundo Helene et. al. (1995), inicia-se o processo de corrosão de armaduras, por sua despassivação, o que irá determinar a vida útil da estrutura.

Já a partir de observações no microscópio eletrônico de varredura, busca-se avaliar a degradação das fibras de PET no meio alcalino do concreto.

#### 3.6.1. Ensaio de Medida de Profundidade de Carbonatação

Para avaliar a profundidade de carbonatação, os corpos-de-prova cilíndricos (10x22) foram curados durante 28 dias e deixados em ambiente de laboratório durante 11 meses, e, posteriormente foram rompidos por compressão diametral. A profundidade de carbonatação foi então medida por pulverização de solução de fenolftaleína na superfície de ruptura. A fenolftaleína vai colorir o concreto não carbonatado ( $\text{pH} > 10$ ) em rosa, enquanto que nas partes do concreto carbonatado, ela fica incolor, colocando em evidência uma frente de carbonatação, conforme o esquema da figura 15:



**FIGURA 15** - Medida da profundidade de carbonatação e/ou concreto carbonatado

A profundidade de carbonatação foi medida em todas as arestas do corpo-de-prova a cada 4 centímetro, num total de 5 leituras para cada lado da amostra. O valor adotado como sendo a espessura carbonatada foi a média dos valores medidos.

### **3.6.2. Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV**

Para verificação do processo de degradação das fibras foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura modelo XL30, da marca Philips.

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 exposição a ambientes agressivos.

As amostras analisadas foram de concretos com 0,30% de fibras de 20mm, observadas nas idades de 150 dias e de 1 ano. Os corpos-de-prova foram serrados para a obtenção da amostras, que depois de secas, foram recobertas por uma fina película de ouro (material condutor), para serem analisadas no MEV.

### **3.7. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS**

Os resultados numéricos, ressaltando mais uma vez a sua divisão de 2 variáveis em 3 níveis (variável 1 = teor de fibras = 0,05; 0,18 e 0,30% / variável 2 = comprimento de fibras = 10. 15 e 20mm) e 1 variável em dois níveis (variável 3 = idade do concreto = 35 e 150 dias). Os efeitos do teor e do comprimento de fibras nas propriedades do concreto foram analisadas com 3 replicações para cada combinação, e submetidas à análise estatística através de análise de variância (ANOVA), com um nível de significância de 95%.



## CAPITULO 4

### 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 4.1. ENSAIO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO - CONSISTÊNCIA

Observa-se na tabela 9 uma redução da consistência do concreto com adição de fibras de PET.

**TABELA 9** – Resultados dos ensaios de abatimento do tronco de cone.

	Fibras PET		Abatimento em (mm)			Condições Climáticas		
	Comprimento (mm)	Volume (%)	Betoneira1	Betoneira2	Média	Temp. em °C	UR (%)	Clima
<b>Refer.</b>	-	-	100	95	97,5	23	-	Sol
<b>Varição de Fibras</b>	<b>10</b>	0,05	180	175	177,5	23	-	Sol
		0,18	80	80	80	25	61	Sol
		0,30	60	60	60	25	61	Sol
	<b>15</b>	0,05	170	170	170	25	76	Sol
		0,18	50	60	55	24	75	Sol
		0,30	40	45	42,5	25	76	Sol
	<b>20</b>	0,05	155	155	155	26	76	Sol
		0,18	70	70	70	25	84	Chuva
		0,30	45	50	47,5	25	88	Chuva

A análise estatística dos resultados mostrou, que tanto o volume de fibras quanto o comprimento das fibras são significativos para a redução da consistência do concreto, como pode ser verificado na tabela 10.

**TABELA 10** – Valores da análise de variância para ensaios consistência do concreto

Fontes de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	Estatística F	Estatística p
Comprimento (1) Linear+quadrático	12140,11	2	6070,056	624,3486	<b>0,000000</b>
Volume (2) Linear+quadrático	16301,78	2	8150,889	838,3771	<b>0,000000</b>
(1) x (2)	22265,22	4	5566,306	572,5343	<b>0,000000</b>
Erro	87,50	9	9,722		
Total Soma dos quadrados	50794,61	17			

Verifica-se que o maior efeito da redução da consistência do concreto ocorre pela incorporação de um volume maior de fibras, como se pode observar nas figuras 16, 17 e 18. A perda de consistência acontece pelo grande número de fibras incorporadas na matriz de concreto, pois mesmo o volume adicionado não sendo elevado, seu diâmetro de  $28\mu\text{m}$  possibilita uma grande quantidade de fibras.



**FIGURA 16** – Abatimento do concreto com 0,05% de fibras de 15mm



**FIGURA 17** – Abatimento do concreto com 0,30% de fibras de 15mm

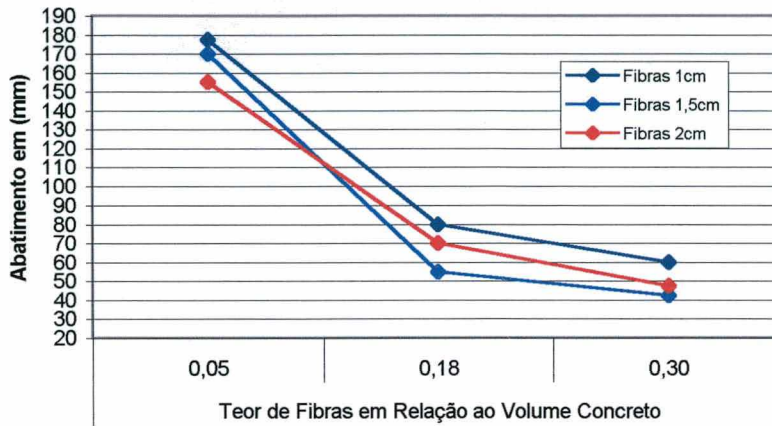


FIGURA 18 – Gráfico de avaliação da consistência do concreto

A redução da consistência é menos influenciada pelo índice de aspecto (ou no caso específico de fibras com mesmo diâmetro, pelo comprimento) ou comprimento das fibras, como se pode observar na figura 18.

Contudo nota-se uma perda de consistência maior das fibras de 15mm (volumes de 0,18 e 0,30%), em relação às de 20mm. Esta diferença pode ser explicada pela umidade relativa superior correspondente aos dias chuvosos na moldagem de concreto. Na figura 19 pode ser visualizada a superfície de resposta para a perda de abatimento dos concretos.

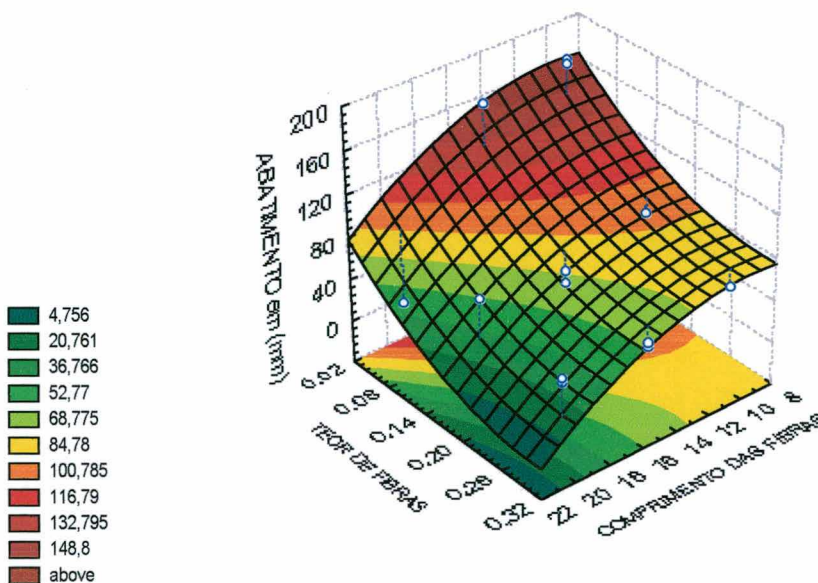
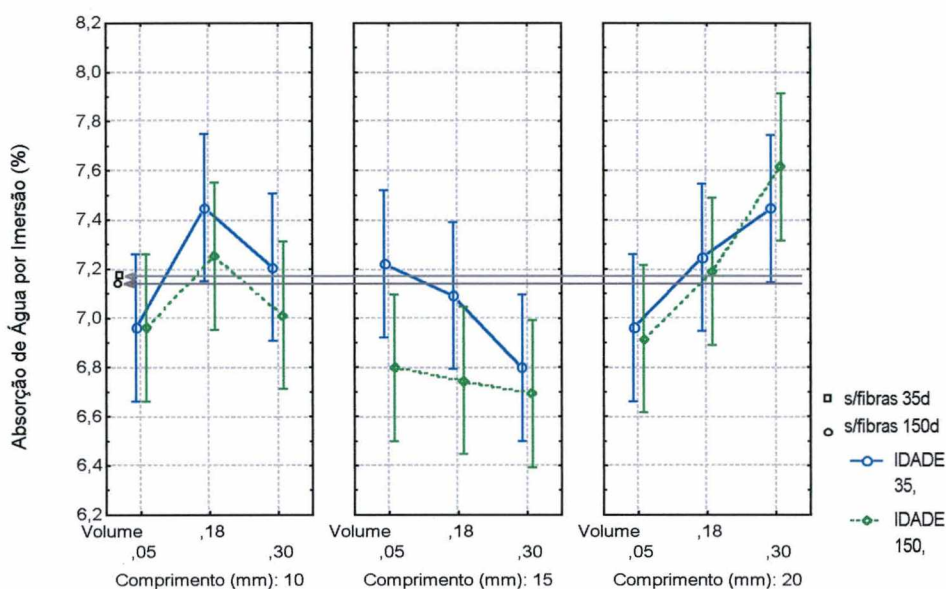


FIGURA 19 – Superfície de resposta para a consistência do concreto com fibras

## 4.2. ENSAÍOS FÍSICOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

### 4.2.1. Absorção de Água por Imersão

O ensaio de absorção de água por imersão, permite medir a porosidade aberta do concreto, e seus resultados são mostrados na figura 20.



**FIGURA 20** – Resultados dos ensaios de absorção de água por imersão

Em análise estatística realizada todas as variáveis mostram-se significativas, de acordo com a tabela 11. No entanto, pode-se observar na figura 20, que as fibras de 10 e 15mm em todos teores têm pequena influência na absorção de água por imersão.

**TABELA 11** – Valores de análise de variância para os ensaios de absorção de água por imersão

Fontes de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	Estatística F	Estatística p
Comprimento (1)	1,105106	2	,552553	14,16702	<b>,000022</b>
Linear+quadrático					
Volume (2)	,384782	2	,192391	4,93275	<b>,012167</b>
Linear+quadrático					
Idade - Linear (3)	,238403	1	,238403	6,11245	<b>,017774</b>
(1) * (2)	1,348340	4	,337085	8,64258	<b>,000040</b>
(1) * (3)	,221101	2	,110550	2,83442	<b>,070599</b>
(2) * (3)	,058156	2	,029078	,74554	,480955
Erro	1,560112	40	,039003		
Total Soma dos quadrados	4,915999	53			

Com relação à idade, as alterações também foram pequenas, provavelmente pela utilização de um cimento tipo CP-V, sendo um cimento mais finamente moído e alcançando desta forma um alto grau de hidratação aos 35 dias, deixando poucas reservas de hidratação para idades posteriores.

No entanto, o efeito mais expressivo da absorção de água por imersão ocorre nos concretos com as fibras mais compridas (20mm), onde se pode observar o aumento da absorção conforme se aumenta o volume de fibras, como se pode visualizar na figura 20. Este efeito possivelmente foi ocasionado por uma incorporação de ar maior pelas fibras mais compridas, de 20mm, durante a mistura. Nota-se também uma absorção de água superior para as fibras de 20mm com a adição de 0,30% aos 150 dias em relação aos 35 dias, podendo ser um indício de degradação das fibras de PET.

Este efeito de aumento de permeabilidade de CRF também foi observado por Toutanji (1998) que ao pesquisar a adição de 0,5% de fibras de polipropileno de 12,7 e 19mm em concretos, constatou que a maior permeabilidade ocorreu nas fibras de 19mm, e este fato foi atribuído ao aumento de ar incorporado no concreto com a dispersão das fibras na matriz.

#### **4.2.2. Massa Específica**

A figura 21 mostram os resultados do ensaio de massa específica dos concretos com adição de fibras de PET.

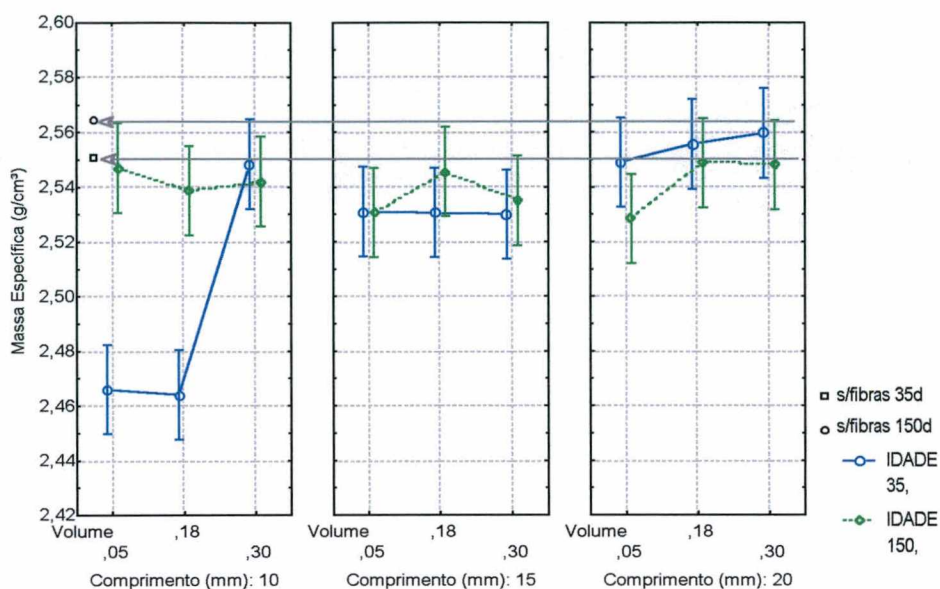


FIGURA 21 – Resultados dos ensaios de massa específica

Embora em análise estatística realizada todas as variáveis (volume, comprimento e idade) mostraram-se significativas, conforme tabela 12. Estes valores são muito próximos, como pode-se observar na figura 21, e através dos quais não consegue-se observar influência das fibras na massa específica do concreto em ambas idades.

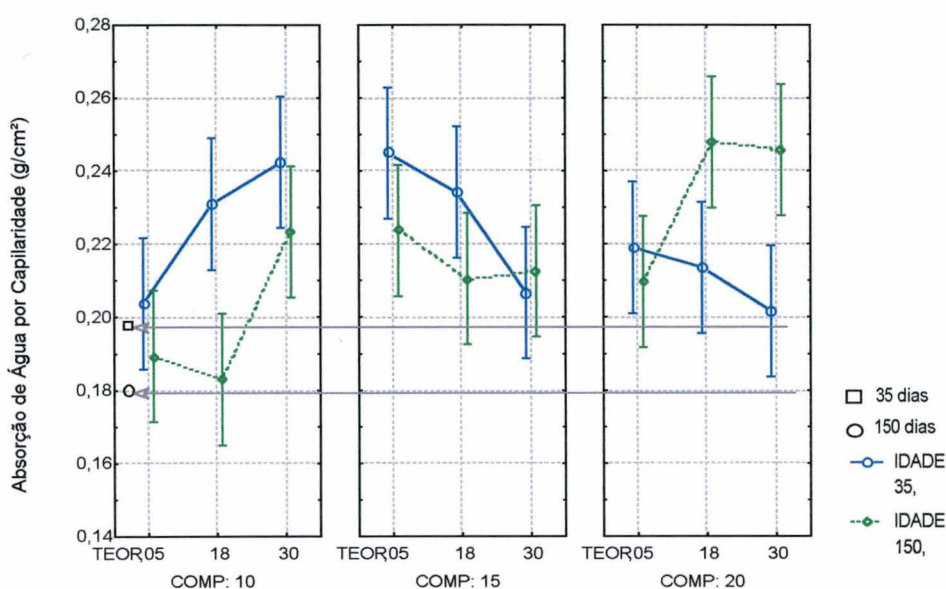
TABELA 12 – Valores da análise de variância para os ensaios de massa específica

Fontes de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	Estatística F	Estatística p
Comprimento (1)					
Linear+quadrático	,008412	2	,004206	21,46664	<b>,000000</b>
Volume (2)					
Linear+quadrático	,003275	2	,001637	8,35705	<b>,000928</b>
Idade - Linear (3)	,002802	1	,002802	14,30167	<b>,000510</b>
(1) * (2)	,004619	4	,001155	5,89326	<b>,000796</b>
(1) * (3)	,009315	2	,004657	23,77009	<b>,000000</b>
(2) * (3)	,002499	2	,001250	6,37740	<b>,003944</b>
Erro	,007838	40	,000196		
Total Soma dos quadrados	,038760	53			

Pode-se observar na figura 21, que os valores médios da massa específica para o concreto com fibras de 10mm nos teores de 0,05 e 0,18% apresentam uma variação em relação aos demais, embora não sejam valores espúrios.

### 4.2.3. Absorção de Água por Capilaridade

Os ensaios de absorção de água por capilaridade após 1 hora têm como finalidade avaliar a porosidade capilar dos concretos nos poros de dimensões que vão de 50nm a 1 $\mu$ m (MEHTA e MONTEIRO 1994), e seus resultados são mostrados na figura 22 para os concretos com adição de fibras de PET.



**FIGURA 22** – Resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade após 1 hora<sup>1</sup>

Embora em análise estatística realizada, nenhuma das variáveis analisadas nos ensaios de absorção de água por capilaridade mostraram-se significativas, conforme pode ser observado na tabela 13, possivelmente pelo baixo teor de fibras adicionadas nos concretos. Contudo pode-se verificar algumas tendências de comportamento isoladas, como por exemplo, para as fibras de 15 e 20mm, na figura 22, verifica-se uma tendência de redução da absorção de água por capilaridade conforme se aumenta o volume de fibras, resultados esses que podem ser comparados aos obtidos por Paulon et al. (2000) que ao estudarem concretos com fibras de polipropileno, nylon e poliéster, aos 28 dias, observaram que as fibras de polipropileno (de 12mm) adicionadas com teor de 900g/m<sup>3</sup>, apresentaram o melhor desempenho, com a redução a absorção de água por capilaridade de 20% em relação ao concreto sem a adição de fibras.

<sup>1</sup> os valores de todas as amostras (para absorção de água após 1 hora e 24 horas), bem como as curvas de absorção de água por capilaridade podem ser encontrados no anexo III

**TABELA 13** – Valores da análise de variância para ensaios de absorção de água por capilaridade – após 1 horas

Fontes de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	Estatística F	Estatística p
Comprimento (1) Linear+quadrático	,001309	2	,000654	2,75696	,075564
Volume (2) Linear+quadrático	,000466	2	,000233	,98092	,383805
Idade - Linear (3)	,000437	1	,000437	1,84063	,182485
(1) * (2)	,006349	4	,001587	6,68666	<b>,000322</b>
(1) * (3)	,006032	2	,003016	12,70584	<b>,000053</b>
(2) * (3)	,001747	2	,000873	3,67910	<b>,034143</b>
Erro	,009495	40	,000237		
Total Soma dos quadrados	,025835	52			

Um outro resultado isolado que pode ser analisado na figura 22 é para as fibras de 20mm, onde se observa uma redução de absorção de água conforme se aumenta o volume de fibras na idade de 35 dias, no entanto na idade de 150 dias, a absorção de água aumenta conforme aumento o volume de fibras, resultados estes que podem ter sido ocasionados pela possível degradação das fibras de PET.



### 4.3. ENSAIOS MECÂNICOS DO CONCRETO

#### 4.3.1. Resistência à Compressão Axial

É consenso, para a maioria dos pesquisadores que estudaram a adição de baixos volumes de fibras sintéticas no concreto, a pouca ou nenhuma influência na sua resistência à compressão axial. (ALHOZAIMY, 1996; BENTUR e MINDESS; 1990. GOPALARATNAM. et. al. 1991; HANNANT, 1994; JOHNSTON, 1994).

Os concretos com adição de fibras PET nos volumes de 0,05, 0,18 e 0,30% e nos comprimentos de 10, 15 e 20mm não sofreram mudanças significativas na resistência à compressão, como pode ser verificado na figura 23. Na análise estatística, de acordo com a tabela 14, a análise de variância mostrou que apenas a idade é significativa.

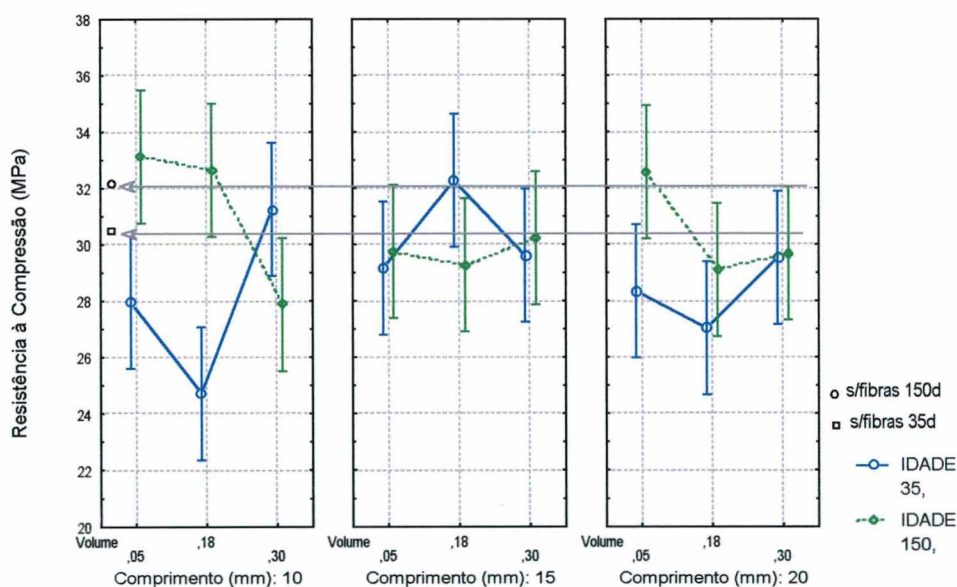


FIGURA 23 – Resultados dos ensaios de resistência a compressão axial

**TABELA 14** – Valores de análise de variância para ensaios de resistência à compressão axial

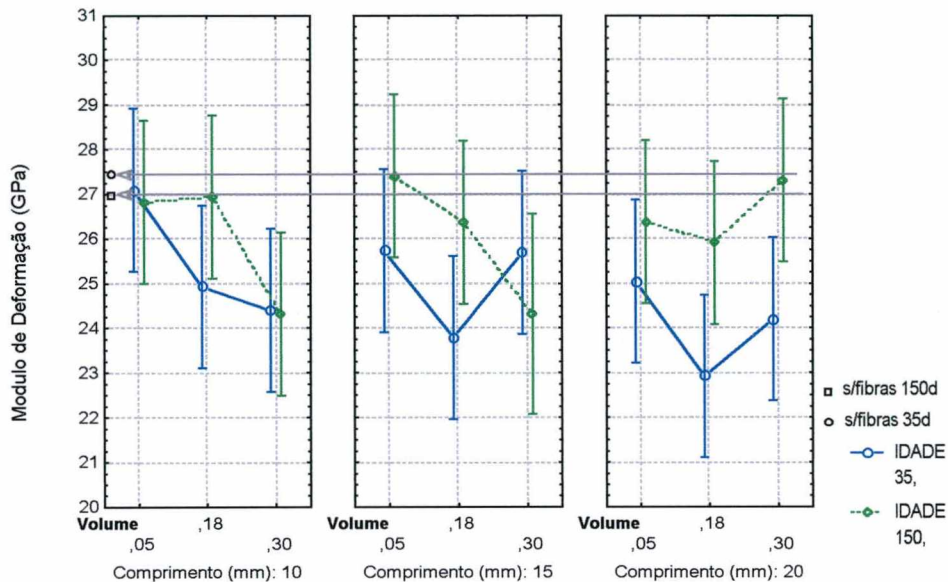
Fontes de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	Estatística F	Estatística p
Comprimento (1) Linear+quadrático	4,2302	2	2,11508	,516867	,600315
Volume (2) Linear+quadrático	8,6091	2	4,30457	1,051918	,358729
Idade - Linear(3)	34,2726	1	34,2726	8,375280	<b>,006131</b>
(1) * (2)	24,5856	4	6,14640	1,502011	,219908
(1) * (3)	35,1793	2	17,58965	4,298426	<b>,020372</b>
(2) * (3)	43,0564	2	21,52821	5,260901	<b>,009367</b>
Erro	163,6846	40	9,722		
Total Soma dos quadrados	313,6178	53	4,09211		

Um aspecto a ser levado em consideração para estes ensaios de resistência à compressão, é que o concreto com a adição de fibras em volumes máximos, rompe sem que haja separação completa da matriz de concreto, como se pode observar na figura 24, podendo em alguns corpos-de-prova resistir ao carregamento após o rompimento, caracterizando uma tendência de ruptura de maneira mais dúctil.

**FIGURA 24** – Corpo-de-prova de concreto com 0,30% de fibras de 20mm após a ruptura

### 4.3.2. Módulo de Deformação

O módulo de deformação mostra, nos concretos com adição de fibras PET, uma tendência de redução com o aumento do volume de fibras, conforme pode ser verificado na figura 25.



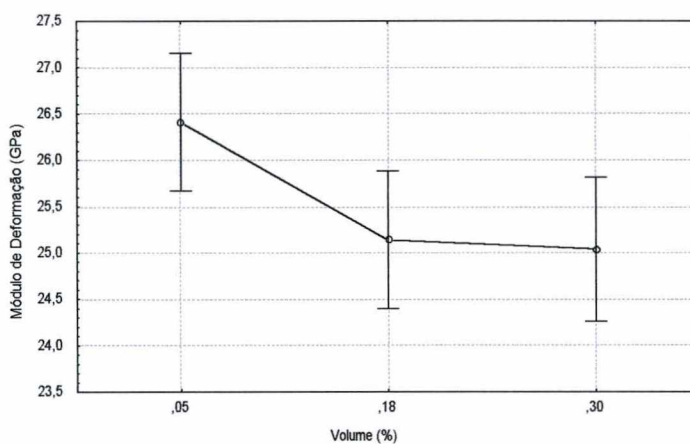
**FIGURA 25** - Resultados dos ensaios do módulo de deformação

Segundo Mehta e Monteiro (1994), o módulo de deformação é afetado principalmente pela porosidade dos concretos. Sendo assim, os fatores que afetam a porosidade do agregado, da matriz da pasta de cimento e da zona de transição serão importantes para determinar o comportamento elástico do compósito.

Em análise estatística realizada, constatou-se que apenas o teor de fibras e a idade do concreto mostraram efeito significativo nos resultados, como pode ser verificado na tabela 15, e figura 26.

**TABELA 15** – Valores de análise de variância para os ensaios de módulo de deformação

Fontes de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	Estatística F	Estatística P
Comprimento (1)	1,9582	2	,97909	,46283	,632912
Linear+quadrático					
Volume (2)	19,8386	2	9,91929	4,68900	<b>,014967</b>
Linear+quadrático					
Idade - Linear (3)	24,6200	1	24,62000	11,63827	<b>,001517</b>
(1) * (2)	15,6992	4	3,92480	1,85531	,137850
(1) * (3)	8,8379	2	4,41897	2,08892	,137459
(2) * (3)	8,9964	2	4,49820	2,12637	,132890
Erro	82,5020	39	2,11544		
Total Soma dos quadrados	163,4864	52			

**FIGURA 26** – Influência do volume de fibras no módulo de deformação

A redução do módulo de deformação pode ter sido ocasionada por um aumento de porosidade no concreto com a mistura de fibras de PET. Esta tendência do aumento da porosidade foi verificada também nos ensaios de absorção de água e absorção de água por capilaridade.

### 4.3.3. Resistência à Tração na Flexão

Para os ensaios de tração na flexão de concretos com adição de fibras de PET, obteve-se resultados de acordo com a figura 27 e 28.

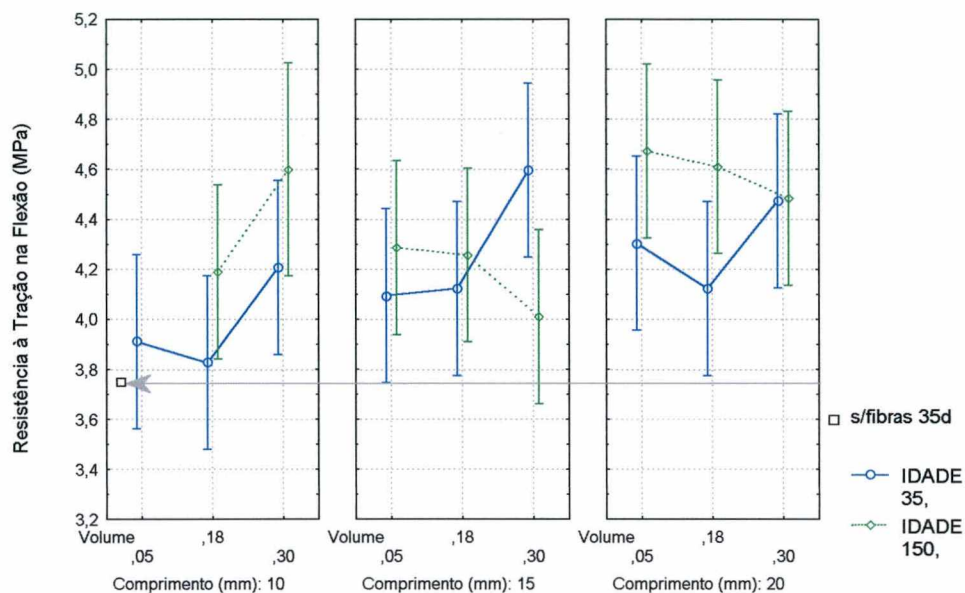


FIGURA 27 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão

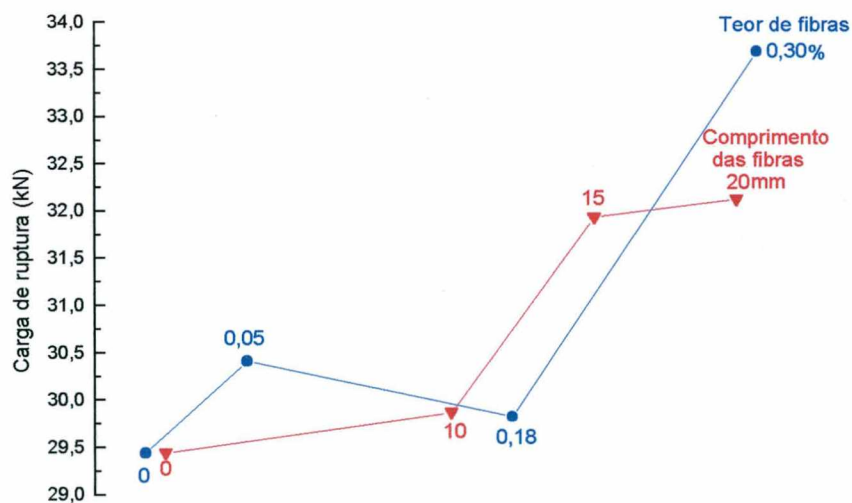


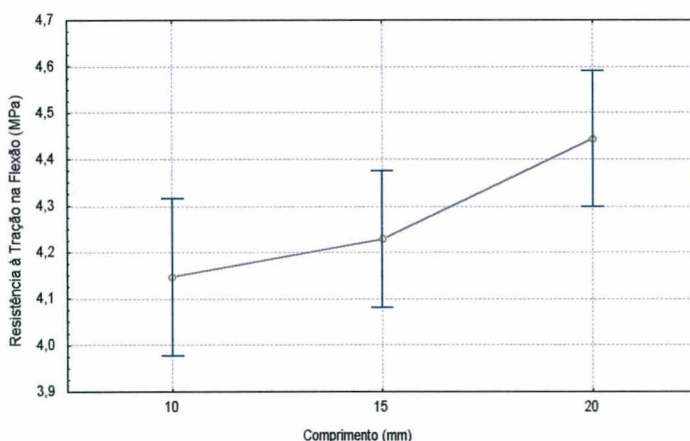
FIGURA 28 – Influência do teor e comprimento das fibras na carga de ruptura à flexão dos concretos aos 35 dias

Pode-se verificar, a partir da análise das figuras 27 e 28, que em todas as dosagens de concreto com fibras obteve-se resultados de resistência à tração na flexão superior ao concreto sem a adição de fibras. No entanto em análise estatística realizada o aumento do volume de fibras não é significativo para aumento de resistência à tração, como pode ser verificado na tabela 16, porém podemos observar que o aumento da resistência à tração na flexão ocorre com o aumento do comprimento das fibras de PET, conforme nota-se na tabela 16 e figura 29.

Analisando-se o concreto com adição de 0,30% de fibras de 20mm na idade de 35 dias, houve um aumento de 20% na resistência à tração na flexão em relação ao concreto sem fibras, provocado por uma resistência à propagação das fissuras na matriz de concreto com a adição das fibras de PET.

**TABELA 16** – Valores de análise de variância para os ensaios de resistência à tração na flexão

Fontes de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	Estatística F	Estatística p
Comprimento (1) Linear+quadrático	,725170	2	,362585	3,801927	<b>,030572</b>
Volume (2) Linear+quadrático	,326148	2	,163074	1,709934	,193524
Idade - Linear (3)	,375181	1	,375181	3,934007	,054043
(1) * (2)	,086484	1	,086484	,906843	,346534
(1) * (3)	,004713	1	,004713	,049416	,825186
(2) * (3)	,283319	1	,283319	2,970777	,092316
Erro	3,910117	41	,095369		
Total Soma dos quadrados	6,000600	49			



**FIGURA 29** – Influência do comprimento das fibras na resistência à tração na flexão

Nota-se também, de acordo com a figura 29, que há um aumento de 8% na resistência à tração na flexão para as fibras de 20mm em relação às de 10mm.

O aumento da resistência à tração na flexão, é explicado por Bentur e Mindess (1990) que, ao estudar concretos com fibras sintéticas (fibras de polipropileno), observaram um aumento efetivo na resistência à flexão nos concretos. Os autores atribuíram este aumento de resistência à maior resistência à fissuração do concreto reforçado com fibras. Zheng e Feldman (1995), em seus ensaios constataram que a adição em volume de 1% de fibras de poliéster aumentou em até 7% a resistência a flexão dos concretos. Já Alhozaimy et al. (1996), ao estudarem a adição de fibras de polipropileno de 19mm com volume de 0,30%, não verificaram nenhum efeito significativo na resistência à flexão dos concretos. A mesma conclusão obteve Wang et al. (2000) ao estudar concretos com fibras de nylon de 19,1mm com o volume de aproximadamente 0,13%.

Embora em alguns estudos não se consiga avaliar o aumento da resistência à tração do concreto com adição de fibras em geral, ou pela quantidade de fibras adicionadas, pelo seu comprimento, índice de aspecto, tipo de fibra ou materiais utilizados, de uma maneira geral as fibras segundo John (1997) diminuem a velocidade de propagação das fissuras, isto ocorre porque para uma fissura transpor uma fibra exige-se um trabalho adicional na deformação, como o arrancamento ou a ruptura desta fibra. O mesmo efeito é também responsável pelo surgimento de múltiplas fissuras, aumentando ainda mais a dissipação de energia. É por esta razão que os compósitos resistem melhor aos esforços de manuseio e uso que os materiais frágeis.

### 4.3.4. Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral foram semelhantes aos valores de resistência à tração na flexão, que variaram entre 3 e 5 MPa. Nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, obteve-se valores pouco inferiores, variando entre 3 e 4 MPa, conforme se pode verificar na figura 30.

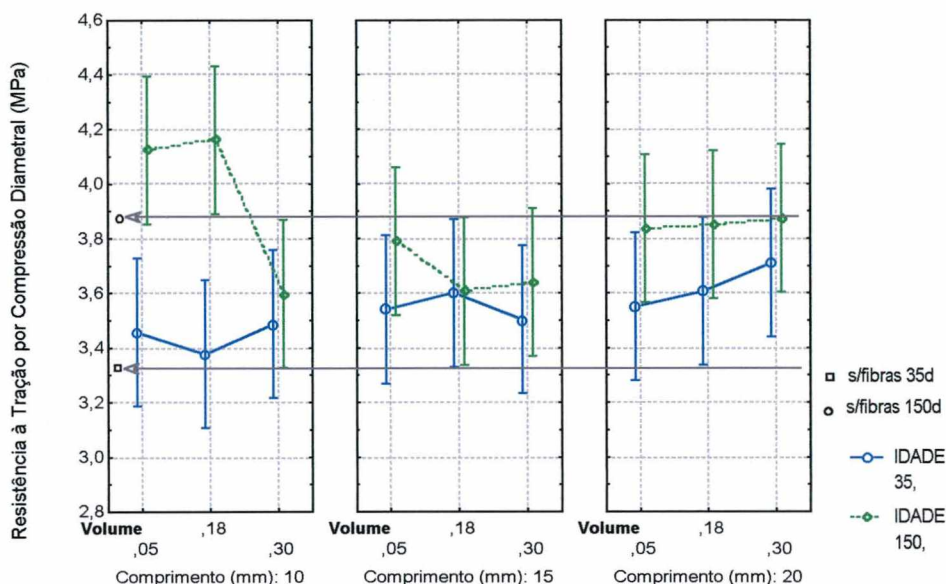


FIGURA 30 – Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral

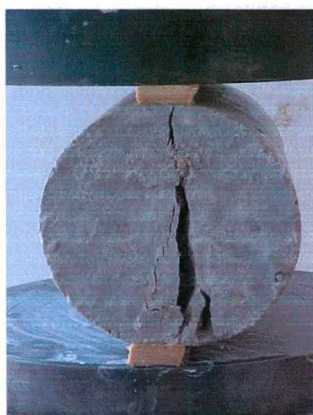
Este ensaio apresenta uma grande variabilidade, e, mesmo obtendo valores de resistência geralmente superiores para o concreto com fibras em relação ao sem fibras, não se pode concluir de maneira significativa que a adição de fibras influencia na resistência à tração por compressão diametral, como pode-se verificar na tabela 17, sendo que apenas a idade mostra-se significativa.

TABELA 17 – Valores da análise de variância para ensaios de resistência à tração por compressão diametral

Fontes de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	Estatística F	Estatística p
Comprimento (1)	,146548	2	,073274	1,36017	,268229
Linear+quadrático					
Volume (2)	,066381	2	,033191	,61611	,545086
Linear+quadrático					
Idade - Linear (3)	1,167474	1	1,167474	21,67154	<b>,000035</b>
(1) * (2)	,217496	4	,054374	1,00933	,414112
(1) * (3)	,367037	2	,183519	3,40661	,043036
(2) * (3)	,174470	2	,087235	1,61933	,210745
Erro	2,154852	40	,053871		
Total Soma dos quadrados	4,294259	53			



Pode-se também verificar visualmente, na figura 31.a, o rompimento de maneira mais dúctil de um concreto com a adição de 0,30% de fibras de 20mm sem haver quebra completa da amostra (mesmo após conclusão do ensaio), em comparação à ruptura frágil do concreto sem a adição de fibras, como mostra a figura 31.b.



(a)



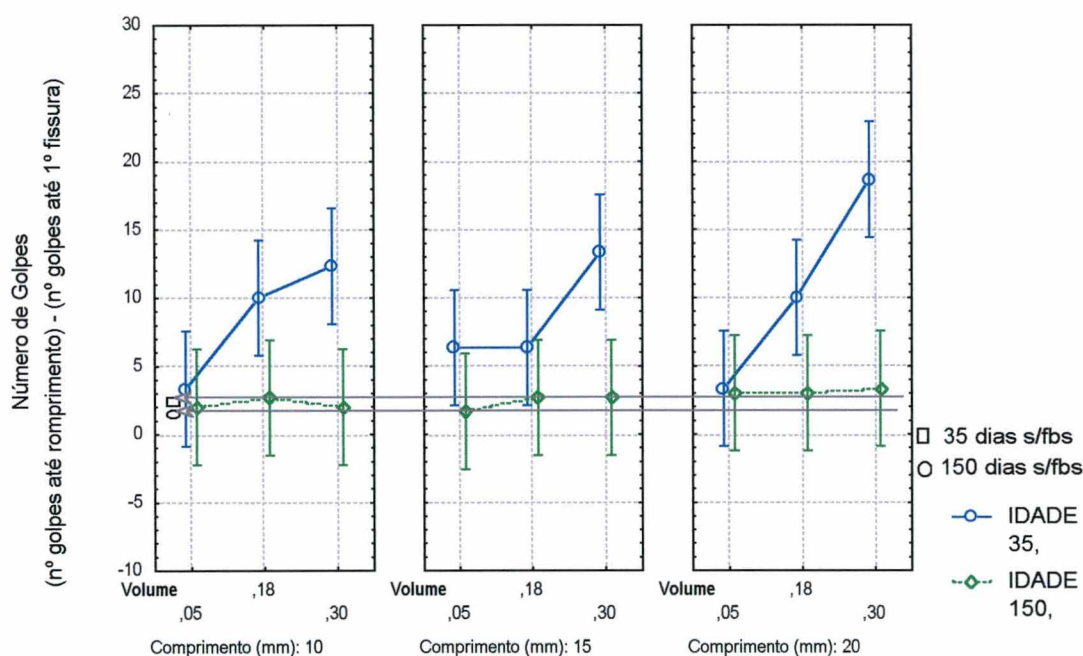
(b)

**FIGURA 31** – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral (a) concreto com a adição de 0,30% de fibras de 20mm; (b) concreto sem fibras

### 4.3.5. Resistência ao Impacto

Os ensaios de resistência ao impacto foram realizados a partir de uma adaptação das recomendações do comitê do ACI-544.2R (1989), utilizando o método de ensaio com golpes sucessivos até o aparecimento da primeira fissura, e posteriormente até a ruptura do material, conforme descrito no item 3.5.4.

A figura 32 mostra a resistência ao impacto para os concretos com adição de fibras de PET.

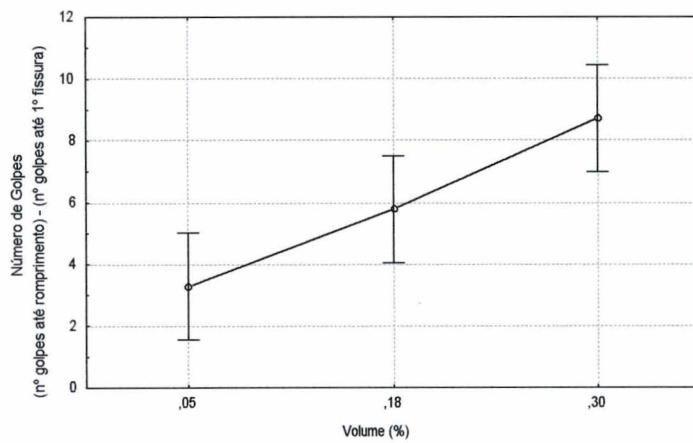


**FIGURA 32** – Resultados dos ensaios de resistência ao impacto

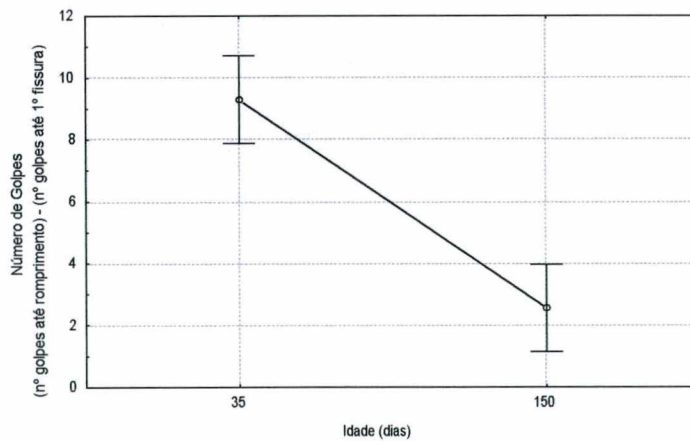
Pode-se verificar um aumento da resistência ao impacto, em relação ao concreto de referência aos 35 dias, de 10%, 233% e 533% para os volumes de 0,05, 0,18 e 0,30% de fibras de 20mm respectivamente. Em análise estatística realizada, conforme tabela 18, nota-se que apenas o volume e a idade das fibras mostram-se significativas, e pode-se observar seu efeito isolado nas figuras 33 e 34 respectivamente.

**TABELA 18** – Valores da análise de variância para os ensaios de resistência ao impacto

Fontes de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	Estatística F	Estatística p
Comprimento (1) Linear+quadrático	25,148	2	12,5741	1,38656	,261686
Volume (2) Linear+quadrático	267,370	2	133,6852	14,74168	<b>,000016</b>
Idade - Linear (3)	613,407	1	613,4074	67,64141	<b>,000000</b>
(1) * (2)	43,852	4	10,9630	1,20890	,322120
(1) * (3)	4,481	2	2,2407	,24709	,782254
(2) * (3)	228,704	2	114,3519	12,60976	<b>,000057</b>
Erro	362,741	40	9,0685		
Total Soma dos quadrados		53			



**FIGURA 33** - Influência do volume de fibras na resistência ao impacto (p/ todos comprimentos)



**FIGURA 34** - Influência da idade do concreto na resistência ao impacto (para todos os volumes e comprimentos)

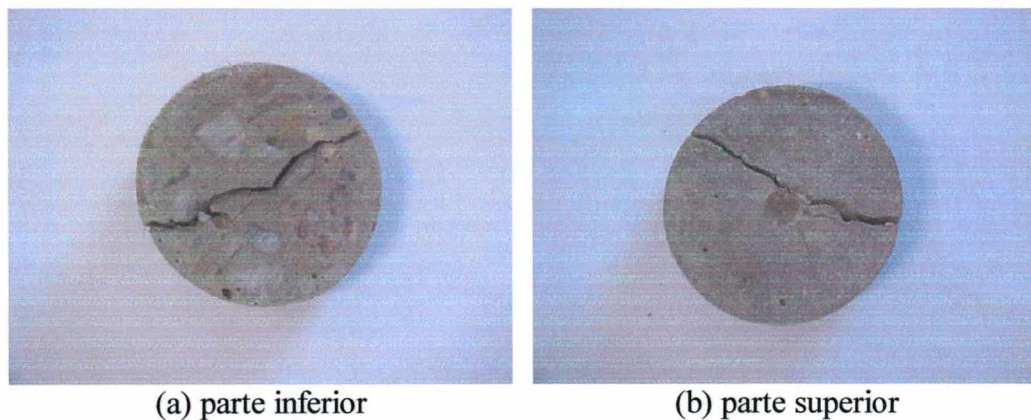
Estes resultados de aumento de resistência ao impacto, podem ser comparados aos resultados obtidos por Toutanji et al. (1998), que mostraram o aumento da resistência ao impacto pelo aumento da quantidade de fibras de polipropileno (12,7 e 19mm) nos volumes de 0,1%, 0,3% e 0,5%. Como também em estudos realizados por Alhozayme et al. (1996), foi observado que a adição de fibras de polipropileno de 19mm com volumes de 0,05, 0,10, 0,20 e 0,30% aumentou a resistência ao impacto até a ruptura em 42%, 62%, 171% e 90%, respectivamente em relação ao concreto sem fibras.

Com relação à perda de resistência ao impacto na idade de 150 dias, em relação aos 35 dias, os concretos com todos os teores e comprimentos de fibras, comportaram-se como o concreto de referência sem fibras. Este efeito é atribuído a um processo de degradação das fibras de PET, observado também nos ensaios de tenacidade e na visualização das fibras, mostrados em 4.3.6 e 4.4.2 respectivamente.

Os resultados acima foram observados durante o ensaio de resistência ao impacto, no qual o comportamento dos concretos com e sem adição de fibras é distinto. Primeiramente, pode-se visualizar na figura 35, um concreto com um baixíssimo volume de fibras fissurado na sua parte inferior (em relação ao local de aplicação da carga) após 11 golpes, e, posteriormente seu rompimento completo, conforme figura 36, na parte inferior e superior após 15 golpes.



**FIGURA 35** – Fissuração da parte inferior do CRF de PET (20mm / 0,05%) após 11 golpes

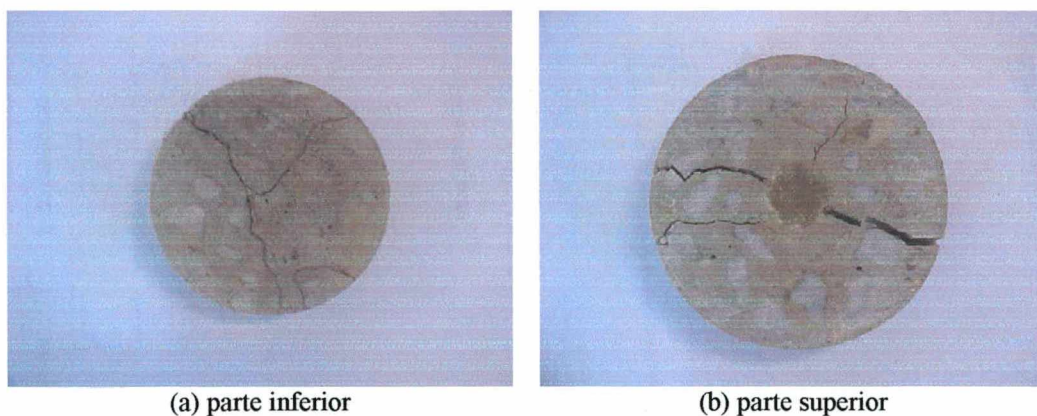


**FIGURA 36** - Rompimento do CRF de PET (20mm / 0,05%) após 15 golpes (a) parte inferior; (b) parte superior

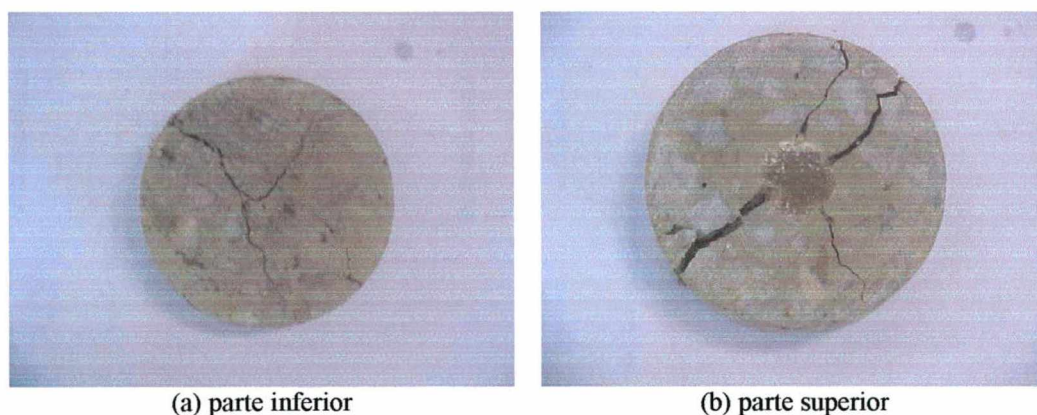
Na figura 37 pode-se observar o aparecimento da primeira fissura na parte inferior de um concreto com 0,30% de fibras de 20mm, após 10 golpes. Após na figura 38 pode-se observar o rompimento praticamente completo após 26 golpes, sendo que a amostra ainda resiste ao impacto até 40 golpes, conforme figura 39, não rompendo completamente, mesmo com grandes fissuras.



**FIGURA 37** – Fissuração da parte inferior do CRF de PET (20mm / 0,30%) após 10 golpes



**FIGURA 38** – Rompimento do CRF de PET (20mm / 0,30%) após 26 golpes (a) parte inferior; (b) parte superior



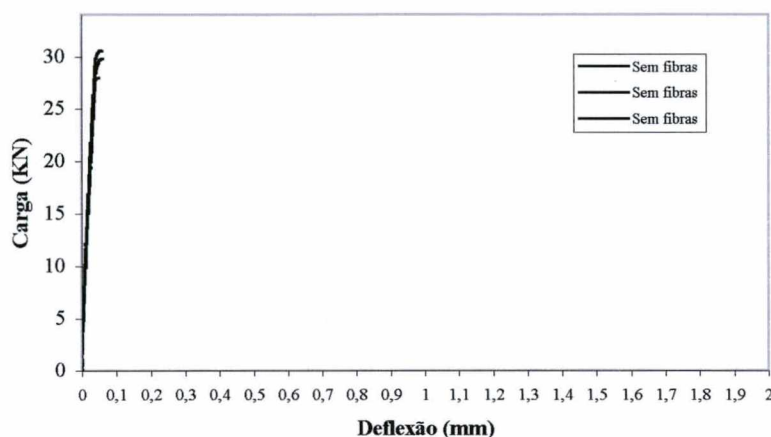
**FIGURA 39** – Rompimento do CRF de PET (20mm / 0,30%) após 40 golpes (a) parte inferior; (b) parte superior

No entanto, pode-se constatar que os ensaios de resistência ao impacto apresentaram uma grande variabilidade, chegando a um coeficiente de variação de até 58%. Porém estes resultados podem ser considerados coerentes para este tipo de ensaio, pois segundo Nataraja et al. (1999), ao avaliar concretos reforçados com fibras de aço, utilizando um total de 15 amostras por dosagem, chegou a um coeficiente de variação de 51,1%.

Um aspecto importante nos ensaios de resistência ao impacto, que pode ter influenciado no coeficiente de variação, é de que, na redução do aparato para ensaio, conforme 3.5.4, a amostra de concreto utilizada tornou-se mais espessa, porém os materiais utilizados para fabricação dos concretos não, fato relevante apenas para o agregado graúdo, de dimensão máxima de 19mm colocado em uma amostra de 46mm, não respeitando a uma dimensão máxima de 1/3 do tamanho do corpo-de-prova. Contudo, este problema seria mais relevante se não tivesse sido possível conseguir realizar medidas comparativas de resistência ao impacto.

#### 4.3.6. Ensaio de Tenacidade

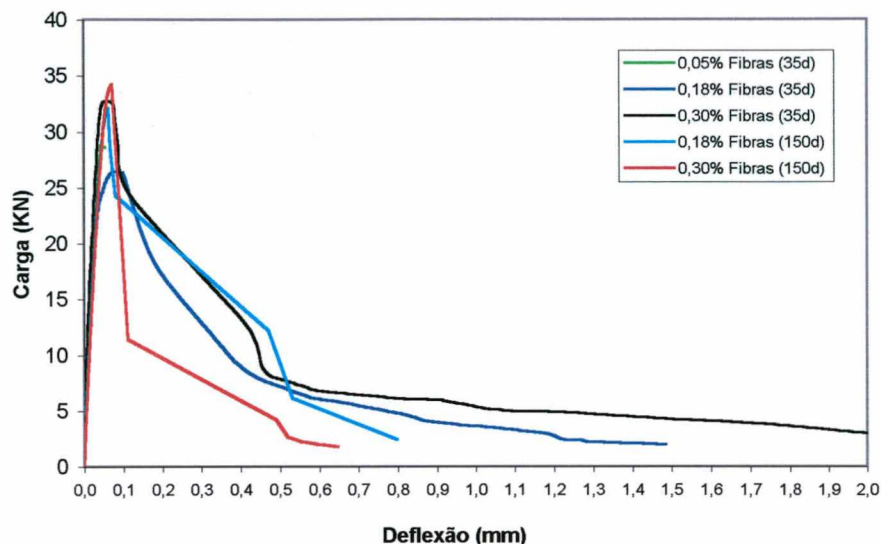
A figura 40 representa a carga (KN) em função da deflexão (mm) para o concreto sem fibras. A tenacidade é representada pela medida de área interna a esta curva.



**FIGURA 40** – Gráfico dos ensaios de tenacidade para o concreto sem fibras

Neste caso, pode-se verificar que o concreto rompe de maneira brusca após a primeira fissura. Tal comportamento é esperado considerando-se a matriz frágil de concreto.

A figura 41 representa a curva de tenacidade média (carga/deflexão) para os concretos com adição de fibras de PET de 10mm, com os volumes de 0,05, 0,18 e 0,30%, nas idades de 35 e 150 dias. As curvas individuais para os ensaios de tenacidade encontram-se no anexo IX.



**FIGURA 41** – Gráfico dos ensaios de tenacidade para o concreto com fibras de 10mm

Pode-se verificar, na figura 41, uma tenacidade maior do concreto com 0,30% de fibras em relação ao de 0,18%, na idade de 35 dias. Também se observa uma resistência à fissuração maior, ou seja, a tenacidade maior dos concretos aos 35 dias em relação aos com 150 dias. O concreto com a adição de 0,05% de fibras mantém o comportamento frágil, semelhante a um concreto sem fibras.

A partir da curva carga-deflexão pode-se calcular os índices de tenacidade, segundo as normas ASTM-C.1018 (1997) e ACI-544.2R (1989). A norma ASTM-C.1018 (1997) divide a tenacidade de acordo com os seguintes índices:

- 1) primeira fissura ( $\delta_i$ ) = área sob a curva carga x deflexão até a primeira fissura;
- 2)  $I_5$  = área sob a curva carga x deflexão até 3,0 vezes a  $\delta$  dividido pela  $\delta_i$ ;
- 3)  $I_{10}$  = área sob a curva carga x deflexão até 5,5 vezes a  $\delta$  dividido pela  $\delta_i$ ;
- 4)  $I_{20}$  = área sob a curva carga x deflexão até 10,5 vezes a  $\delta$  dividido pela  $\delta_i$ ;
- 5)  $I_{30}$  = área sob a curva carga x deflexão até 15,5 vezes a  $\delta$  dividido pela  $\delta_i$ ;

onde:  $\delta$  = deflexão até a primeira fissura em (mm);

$\delta_i$  = área sob a curva carga x deflexão até a primeira fissura.

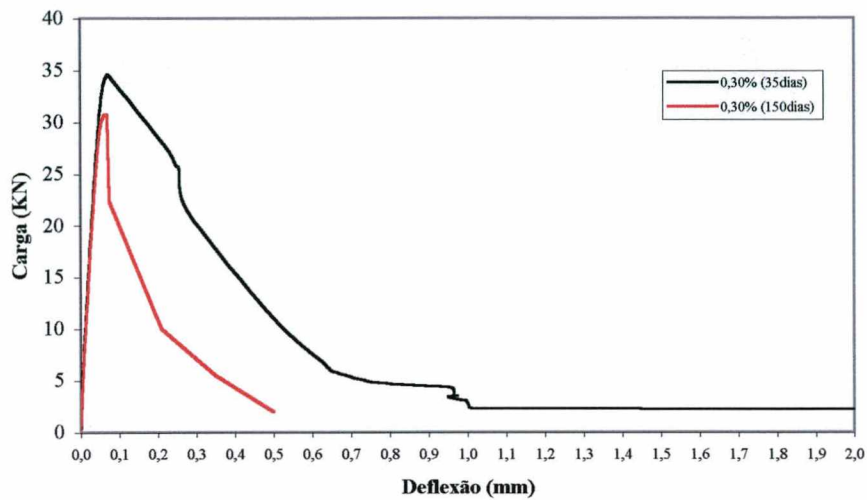


O índice de tenacidade  $I_{30}$  é similar ao índice total de tenacidade proposto pela ACI-544.2R (1989), a não ser pelo fato de que leva em consideração a área sob a curva carga x deflexão até o carregamento chegar a zero de um concreto com fibras, dividido pela área sob a curva carga/deflexão de um concreto de referência sem a adição de fibras, eliminando uma possibilidade de variabilidade que é a locação da primeira fissura. (GOPALARATNAM et al. 1991)

Pode-se constatar, na figura 41, que apenas os concretos com adição de 0,18 e 0,30% de fibras aos 35 dias de idade mostraram uma resistência à fissuração (com deflexões superiores a 0,7mm), sendo que estas deformações iniciais após a primeira fissura, causam segundo Banthia e Trottier (1995), uma imprecisão para o cálculo dos índices de tenacidade  $I_5$ ,  $I_{10}$  e até mesmo  $I_{20}$ , pois a ocorrência da ruptura após o ponto de carga máxima, é também o ponto de maior instabilidade para o equipamento de carregamento. A instabilidade pós-pico é devida à súbita descarga e liberação de grandes quantidades de energia, e é mais acentuada para concretos com baixos teores de fibras e concretos de alta resistência. Conclui-se que as medidas de tenacidade a deformações maiores, equivalentes ao  $I_{30}$ , ou índice total segundo ACI-544.2R, são mais significativos e sujeitos a menores imprecisões.

Em relação aos concretos com adição de fibras de 10mm aos 150 dias, comparando aos 35 dias, para um volume máximo de fibras, houve uma queda significativa de tenacidade, ocasionada provavelmente por um processo de degradação da fibra, observado por MEV (ver 4.4.1).

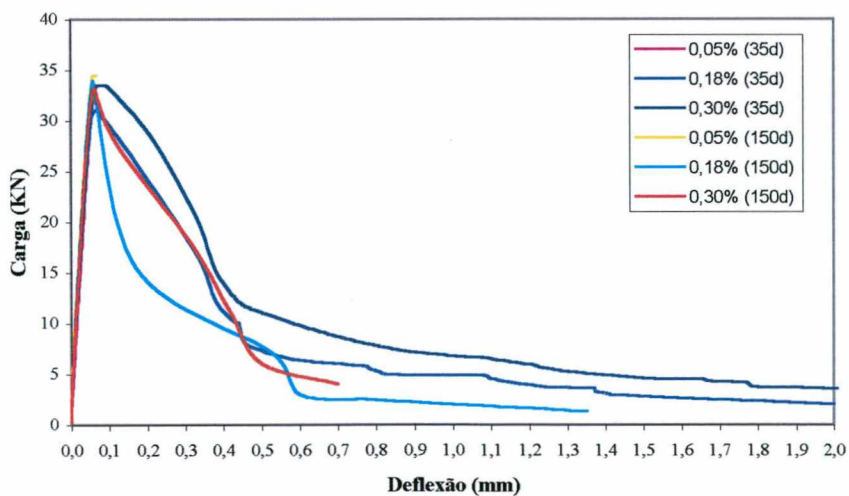
Pode-se observar comportamento semelhante para as fibras de 15mm, na figura 42.



**FIGURA 42** – Gráfico dos ensaios de tenacidade para o concreto com fibras de 15mm

Na figura 42, pode-se observar, através de curvas médias, que a maior tenacidade é obtida para os concretos com o teor máximo de fibras aos 35 dias de idade, não tendo sido possível à obtenção das curvas carga/deflexão pela ruptura frágil dos concretos com 0,05 e 0,18% de fibras nas idades de 35 e 150 dias.

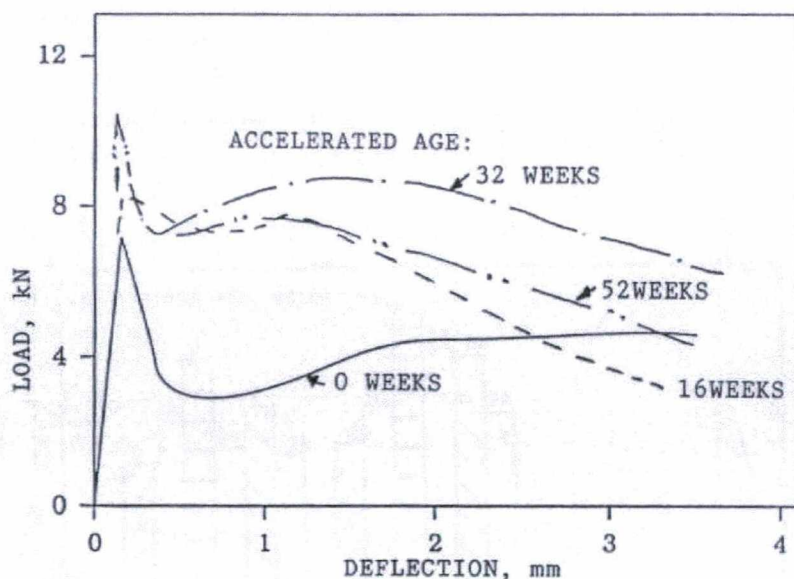
A figura 43 mostra o gráfico carga/deflexão para os concretos com adição de fibras de PET de 20mm, com os volumes de 0,05, 0,18 e 0,30%, e nas idades de 35 e 150 dias.



**FIGURA 43** – Gráfico dos ensaios de tenacidade para o concreto com fibras de 20mm

De acordo com a figura 43, a resistência à fissuração ou tenacidade é melhorada conforme aumento do volume de fibras, e pode-se verificar, também, uma perda de tenacidade na idade de 150 dias. Esta perda de características mecânicas das fibras pode ser explicada por um processo de degradação das fibras PET de poliéster já observadas por Balaguru e Slattum (1995), que pesquisaram fibras de poliéster, polipropileno e nylon de 19mm (com  $4,75\text{Kg/m}^3$ ) em testes acelerados de durabilidade (até 52 semanas) em meio alcalino do cimento.

Balaguru e Slattum (1995) observaram, através de ensaios de tenacidade segundo as normas ASTM-C.1018, que a partir da adição de  $4,75\text{Kg/m}^3$  dos três tipos de fibras, houve um aumento da tenacidade aos 28 dias, e que as fibras de nylon e polipropileno são duráveis em meio alcalino do concreto em idades avançadas, como se pode visualizar nos diagramas de carga/deflexão nas figuras 44 e 45 para fibras de nylon e polipropileno, respectivamente. Apenas as fibras de poliéster diminuem a tenacidade com a idade, conforme se pode verificar na figura 46.



**FIGURA 44** – Gráfico dos ensaios de tenacidade para concretos com adição de fibras de nylon. (BALAGURU e SLATTUM, 1995)

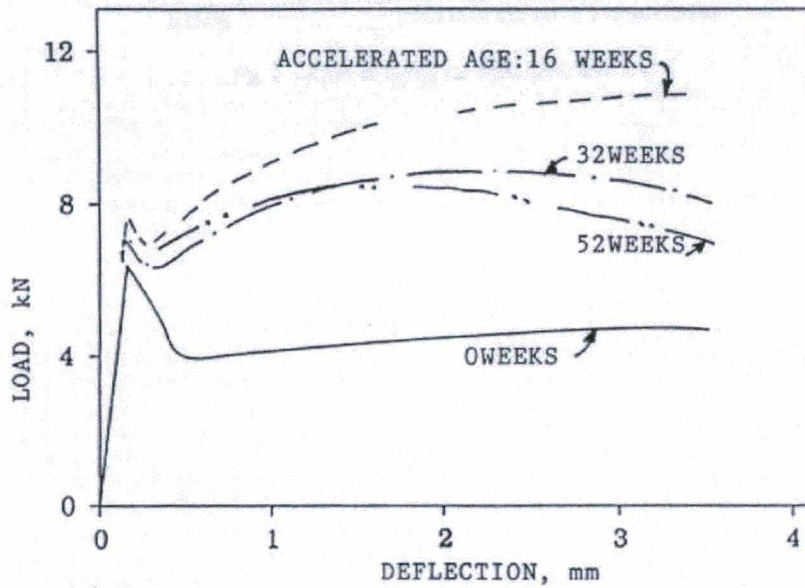


FIGURA 45 – Gráfico dos ensaios de tenacidade para concretos com adição de fibras de polipropileno. (BALAGURU e SLATTUM, 1995)

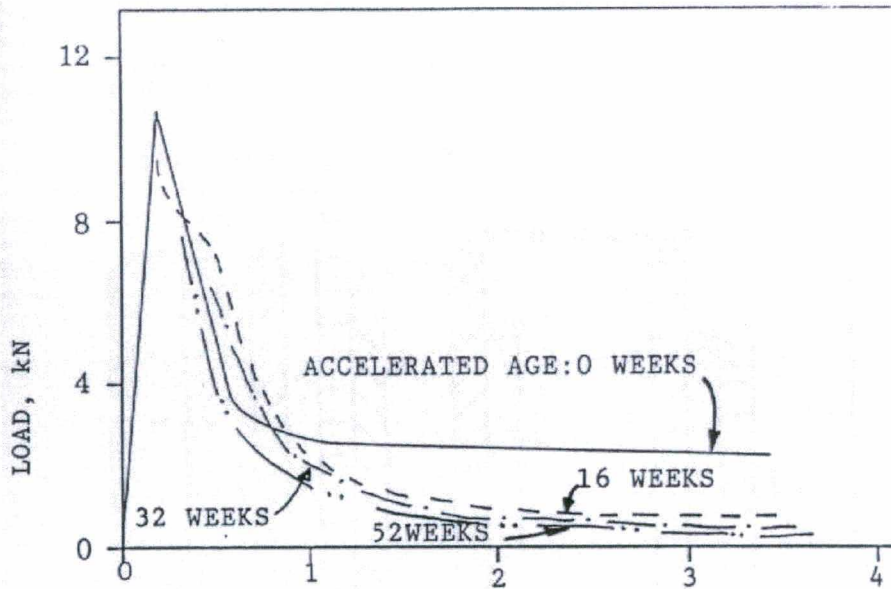


FIGURA 46 – Gráfico dos ensaios de tenacidade para concretos com adição de fibras de poliéster. (BALAGURU e SLATTUM, 1995)

O índice de tenacidade  $I_{30}$ , obtido por Balaguru e Slattum (1995), correspondente a 0 semanas após a cura de 28 dias para as fibras de poliéster ( $I_{30}=10,1$ ), como pode-se verificar na tabela 19. Estes índices podem ser comparados às fibras de PET aos 35 dias da presente pesquisa, em que se obteve índice semelhante, de 8,73, de acordo com a tabela 20.

**TABELA 19** – Índices de tenacidade para avaliar a durabilidade de concretos em idades avançadas. (BALAGURU e SLATTUM 1995)

Índice de Tenacidade	Tipos de Fibras	Idade em semanas (após a cura de 28dias)					
		0	4	8	16	32	52
$I_{30}$	Nylon 6	16,4	15,8	38,9	27,0	27,90	20,8
	Polipropileno	20,7	24,6	38,2	36,1	32,6	31,1
	Poliéster	10,1	10,9	7,5	7,8	9,7	7,4
	PET 20mm (0,30%) (PELISSER,2002)	8,73	-	-	-	-	-
	PET 15mm (0,30%) (PELISSER,2002)	8,49	-	-	-	-	-

**TABELA 20** – Índices dos ensaios de tenacidade aos 35 dias, segundo as normas ASTM-C.1018 e ACI-544.2R

	Fibras PET		Índices de Tenacidade – 35dias										
	Com. (mm)	Volume (%)	Carga (KN)	Deflexão até 1° fissura (mm)	Área sob curva até 1° Fissura (N.m)	$I_5$	$I_{10}$	$I_{20}$	$I_{30}$	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$	$R_{20,30}$	$I_{TOT}$ ACI
Ref.	-	-	29,43	0,0560	1,14	-	-	-	-	-	-	-	-
Comprimento das Fibras	10	0,05	28,59	0,0560	1,23	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,18	30,06	0,0575	1,25	2,90	4,24	5,74	6,46	26,80	15,00	3,6	10,06
		0,30	32,73	0,0540	1,22	4,13	5,42	8,29	10,16	25,80	28,75	9,33	14,61
	15	0,05	30,85	0,0575	1,21	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,18	30,14	0,0550	1,22	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,30	34,80	0,0733	1,80	6,12	6,58	7,20	<b>8,49</b>	9,07	6,20	6,48	14,06
	20	0,05	31,78	0,0667	1,27	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,18	31,05	0,0675	1,48	5,74	6,58	8,27	9,38	13,47	13,87	5,58	12,33
		0,30	33,52	0,0742	2,00	4,40	5,06	7,23	<b>8,73</b>	13,20	21,67	7,52	15,27

Nas tabelas 20 e 21 estão os índices de tenacidade medidos para os ensaios aos 35 e 150 dias respectivamente, segundo as normas ASTM-C.1018 e ACI-544.2R.

TABELA 21 – Índices dos ensaios de tenacidade aos 150 dias, segundo as normas ASTM-C.1018 e ACI-544.2R

	Fibras PET		Índices de Tenacidade – 150 dias										
	Com. (mm)	Volume (%)	Carga (KN)	Deflexão até 1º fissura (mm)	Área sob curva até 1º Fissura (N.m)	I <sub>5</sub>	I <sub>10</sub>	I <sub>20</sub>	I <sub>30</sub>	R <sub>5,10</sub>	R <sub>10,20</sub>	R <sub>20,30</sub>	I <sub>TOT</sub> ACI
Ref.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Comprimento das Fibras	10	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,18	32,12	0,0658	1,50	3,27	5,87	7,96	-	51,93	20,97	-	-
		0,30	32,78	0,0725	1,54	2,88	4,59	6,26	-	34,20	16,70	-	-
	15	0,05	32,58	0,0600	1,48	2,50	4,19	-	-	33,80	36,95	-	-
		0,18	34,94	0,0625	1,30	2,85	4,45	-	-	32,00	34,30	-	-
		0,30	30,86	0,0650	1,39	2,33	3,30	4,76	-	19,40	14,55	4,30	-
	20	0,05	34,17	0,0638	1,42	2,09	3,28	-	-	21,00	-	-	-
		0,18	35,38	0,0675	1,50	3,25	5,33	6,50	7,38	41,60	11,70	4,43	-
		0,30	33,31	0,0658	1,44	3,20	5,54	7,41	-	46,73	15,60	-	-

De acordo com o gráfico das curvas carga/deflexão, pode-se obter também os índices residuais de tenacidade ( $R_{10,20}$ ,  $R_{20,30}$ ), resultantes de uma energia residual após o rompimento ou pico de carga no concreto, conforme pode-se verificar na tabela 20 e 21. Os índices de força residual têm uma grande variabilidade, mas nota-se que seus valores variam entre 3,60 a 9,33 em média para  $R_{20,30}$ , mostrando índices baixos de força residual, que segundo Houget et al. (1995), caracterizam um material frágil.

Com relação à tenacidade para as fibras aos 150 dias obteve-se valor fora da instabilidade pós-pico, apenas para concretos com fibras de 20mm, de acordo com a figura 47, não sendo possível o cálculo da tenacidade. Esta inexistência de diagramas carga/deflexão fora da instabilidade pós-pico, foi provavelmente ocasionada por um processo de degradação das fibras PET em meio alcalino do concreto (JOHNSTON, 1994. BALAGURU e SLATTUM, 1995).

Desta forma, foram analisados estatisticamente apenas os valores de tenacidade para concretos com máximo teor de fibras, e na idade de 35 dias, de acordo com a figura 48 e tabela 22.

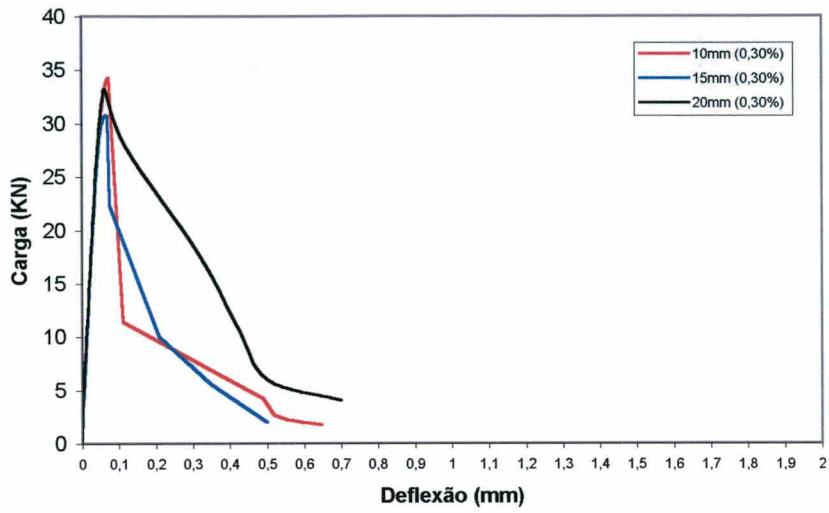


FIGURA 47 – Gráfico das curvas médias carga/deflexão para o concreto com fibras aos 150 dias.

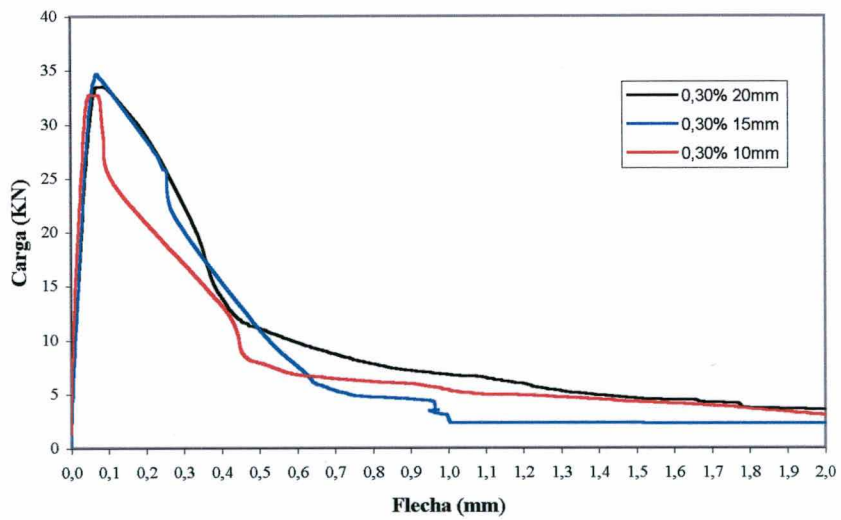
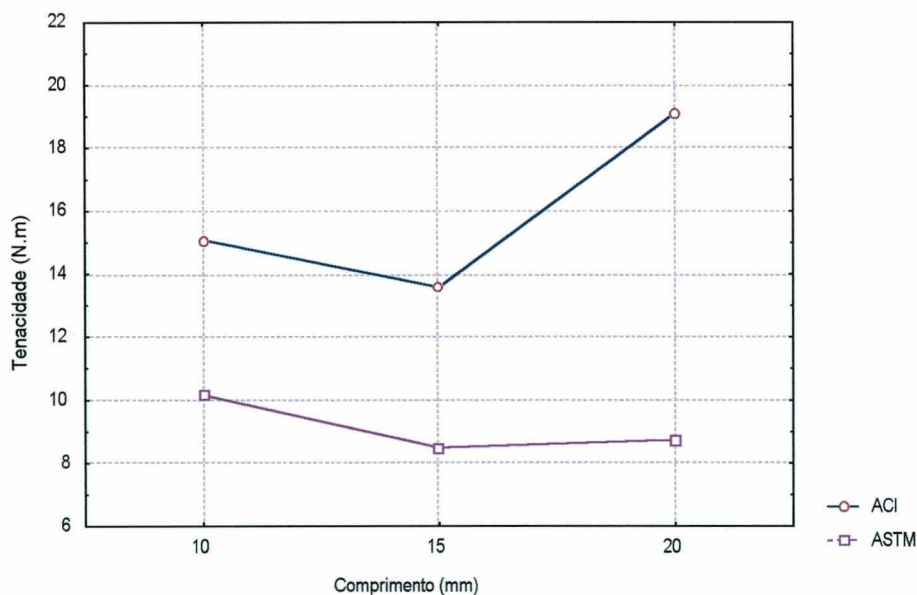


FIGURA 48 – Gráfico das curvas médias carga/deflexão para o concreto com fibras aos 35 dias.

**TABELA 22** – Índice dos ensaios de tenacidade para concretos com o máximo teor de fibras (0,30%) aos 35 dias, segundo normas ASTM-C.1018 e ACI-544.2R

	Fibras PET		Índices de Tenacidade – 35dias						
	Comprimento (mm)	Volume (%)	1fissura área (KN.mm)	1 fissura deflexão (mm)	Deflexão total (mm)	Área (KN.mm)	Carga Final (KN)	I 30 (ASTM1018)	Itotal (ACI)
Refer.	-	-	1,14	0,0575	-	-	-	-	-
Comprimento Fibras	10	0,30	1,32	0,0525	3,72	18,65	3,72	10,49	16,36
		0,30	1,12	0,0575	2,74	15,71	2,17	9,82	13,78
		0,30	-	-	-	-	-	-	-
	15	0,30	1,97	0,0775	1,96	20,11	2,77	9,09	16,18
		0,30	1,68	0,0675	1,48	15,39	2,14	9,15	13,50
		0,30	1,74	0,0750	1,42	12,59	3,28	7,24	11,04
	20	0,30	2,12	0,0700	4,50	23,75	1,92	8,03	18,29
		0,30	1,87	0,0750	3,37	23,60	1,94	9,36	20,70
		0,30	2,01	0,0775	2,55	20,92	2,55	8,80	18,35

A seguir pode-se verificar, na figura 49 a tenacidade total média calculada segundo as normas ASTM-C.1018 e ACI-544.2R. Na tabela 23 pode-se constatar os valores da análise estatística dos dados apresentados na tabela 22.



**FIGURA 49** – Gráfico dos valores totais de tenacidade para o CRF de PET aos 35 dias.



**TABELA 23** – Valores da análise de variância para os ensaios de tenacidade de CRF de PET aos 35 dias

Fontes de Variação	Quadrados Médios Efeito	Quadrados Médios Erro	Estatística F	Estatística p
ACI-544.2R	24,64008	3,387356	7,274134	<b>,024896</b>
ASTM-C.1018	2,42389	,579053	4,185950	,072763

Pode-se constatar na tabela 23 o efeito significativo do comprimento das fibras na tenacidade dos concretos, calculados de acordo com as recomendações do comitê ACI-544.2R(1989). Diante disto pode-se verificar na figura 49, uma tenacidade superior do CRF de 20mm em relação ao concreto com a adição de fibras de 10 e 15mm (calculado segundo as normas ACI-544.2R).

No entanto para o cálculo de tenacidade utilizando as normas ASTM-C.1018 (1997) para o índice de tenacidade  $I_{30}$ , não se verificou o efeito do comprimento das fibras na tenacidade dos concretos, como se pode observar na tabela 23, embora tenha um valor estatístico muito próximo do significativo. Este efeito não significativo foi ocasionado por uma energia até a primeira fissura maior para os concretos com fibras de PET de maior comprimento, minimizando assim os valores totais de tenacidade. Este efeito pode ser eliminado com o cálculo de tenacidade de acordo com as recomendações do comitê do ACI-544.2R(1989), no qual é usado como valor de referência de energia até a primeira fissura, de um concreto sem fibras.

Observado o volume de fibras, obteve-se um índice de tenacidade superior para os concretos com o volume de 0,30% de fibras de PET. Para os concretos sem fibras ou com um baixo volume de fibras adicionadas de 0,05% e 0,18%, não foram possíveis medir todos índices de tenacidade (2 amostras com índices de tenacidade fora da instabilidade de pós-pico para as fibras de 20mm e 1 valor para as fibras de 10mm), ou poderiam ser considerados como zero.

## CAPÍTULO 5

### 1. CONCLUSÃO

As principais conclusões desta pesquisa sobre o desempenho dos concretos com adição de fibras de PET são:

- Nota-se uma perda de consistência do concreto tanto pelo aumento do volume de fibras, como também uma redução menos expressiva, quando é aumentado o comprimento das fibras;
- Constatou-se um aumento da absorção de água por imersão e na absorção de água por capilaridade para as fibras de 20mm quando se aumenta o volume de fibras. Sendo também importante observar a absorção de água por imersão e por capilaridade são superiores para as fibras de 20mm com o volume 0,30% na idade de 150 dias em relação aos 35 dias.
- Com relação aos ensaios mecânicos de resistência a compressão axial e resistência à tração por compressão diametral, não houve diferença significativa para os concretos com adição de fibras em relação ao concreto sem fibras em ambas idades. Em relação ao módulo de deformação, notou-se uma tendência significativa de diminuição com o aumento do volume de fibras. Notou-se também um aumento na resistência à tração na flexão dos concretos quando se aumenta o comprimento das fibras.
- Houve um aumento significativo da tenacidade e da resistência ao impacto, principalmente para os concretos com o máximo volume (0,30%) de fibras mais compridas (20mm) aos 35 dias. Esta melhora no desempenho foi perdido aos 150 dias, devido ao processo de degradação das fibras no meio alcalino do concreto. O

processo de degradação das fibras foi constatado tanto com a perda de resistência ao impacto, redução da tenacidade, e também pelas análises em microscópio eletrônico de varredura.

- Os ensaios de medida de profundidade de carbonatação, na idade de 1 ano, não indicaram que as fibras influenciam os resultados e, provavelmente, não influenciam na durabilidade do concreto.

Foi verificado nesta pesquisa, que avaliou o desempenho do concreto com adição de fibras de polietileno tereftalato - PET que os maiores ganhos de resistência à fissuração propiciado pelas fibras de PET, como resistência ao impacto e aumento da tenacidade, na idade de 35 dias, foram perdidos na idade de 150 dias devido a um processo de degradação das fibras de PET.

No entanto, mesmo com o processo de degradação das fibras de PET no concreto, podem ainda ser utilizadas e avaliadas em teores mínimos (0,1% em relação ao volume de concreto) para reduzir a fissuração por retração plástica de concretos e argamassas, e, provavelmente sem prejuízos posteriores ao material devido a sua degradação. Pode-se utilizar também as fibras de PET para reforços de diferentes materiais poliméricos, ou no caso de concretos e argamassas com utilização de cimentos não alcalinos. E limita-se o uso de fibras de PET para reforçar materiais a base de cimento portland.

## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Avaliar o comportamento das fibras PET no concreto em relação à retração plástica e por secagem;
- Estudar o desempenho de outros tipos de fibras sintéticas, como as de polipropileno, nylon, etc; que são mais duráveis em meio alcalino do concreto;
- Pesquisar o comportamento do concreto quando nele adicionado o volume máximo de outros tipos de fibras sintéticas;
- Estudo e criação de um método brasileiro para avaliar a tenacidade dos concretos reforçados com fibras;
- Estudar a viabilidade de uso de fibras de PET em cimento não alcalino.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, M. O. **Estudo da Tenacidade e Proposta de Nova Configuração do Ensaio de Flexão em Placas para os Concretos Reforçados com Fibras de Aço.** 1999. 191p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- ALHOZAIMY, A. M., SOROUSHIAN, F., MIRZA, F. Mechanical Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete and the Effects of Pozzolanic Materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 18. 1996. p. 85-92.
- ACI-544.1R - State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete. **American Concrete Institute.** 1997. 66p.
- ACI-544.2R - Measurement of properties of fiber reinforced concrete. **American Concrete Institute.** 1989. 12p.
- ACI-SP.142 - Fiber Reinforced Concrete – Developments and Innovations. **American Concrete Institute.** 1994. 317p.
- ACI-SP.155 - Testing of Fiber Reinforced Concrete. **American Concrete Institute.** 1995. 253p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Determinação da resistência a tração na flexão em corpos de prova prismáticos: MB-3483.** Rio de Janeiro, 1991. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica: NBR-9778.** Rio de Janeiro, 1987. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade: NBR-9779.** Rio de Janeiro, 1995. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassas e Concretos – Determinação da resistência a tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos: NBR-7222.** Rio de Janeiro, 1983. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão / deformação: NBR-8522.** Rio de Janeiro, 1984. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos: NBR-5739.** Rio de Janeiro, 1994. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone. NBR-7223.** Rio de Janeiro, 1994. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto: NBR-5738.** Rio de Janeiro, 1994. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Determinação da composição granulométrica: NBR-7217.** Rio de Janeiro, 1987. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária: NBR-7261.** Rio de Janeiro, 1982. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman: NBR-9776.** Rio de Janeiro, 1987. 3p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo: NBR-9937**. Rio de Janeiro, 1987. 6p.
- ASTM. **Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete: ASTM-C.1018**. 1997. 8p.
- BALAGURU, P. SLATTUM, K. Test Methods for Durability of Polymeric Fibers in Concrete and UV Light Exposure. **ACI-SP.155, 6**. Detroit. 1995. p. 115-136.
- BANTHIA, N. TROTTIER, J. Test Methods for Flexural Toughness Characterization of Fiber Reinforced Concrete: Some Concerns and a Proposition. **ACI Materials Journal**, v. **92**, No. **1**. 1995. p. 48-57.
- BASTOS, P. **Retração e Desenvolvimento de Propriedades Mecânicas de Argamassas Mistas de Revestimento**. 2001. 172p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- BAYASI, Z. ZENG, J. Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete. **ACI Materials Journal**, v. **90**, No. **6**. 1993. p. 605-610.
- BENTUR, A. MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. London. Elsever. 1990. 448p.
- BETIOLI, A. **Degradação de Fibras de PET (polietileno tereftalato) em Materiais à Base de Cimento Portland**. A defender (2003). Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- CHEN, L. MINDESS, S. MORGAN, D. R. SHAH, C. D. JOHNSTON, C. D. PIGEON, M. Comparative Toughness Testing of Fiber Reinforced Concrete. **ACI-SP.155-v3**. Detroit. 1995. p. 41-75.

- ECOCYCLE. On line: **Ecocycle reciclagem**. Disponível em <<http://vrs.ecocycle.com>> Acesso em: 10 de fevereiro de 2002.
- FOWLER, D. W. Polymers in concrete: a vision for the 21 st century. **Cement and Concrete Composites** **21**. 1999. p. 449-452.
- GANI, M.S.J. **Cement and Concrete**. 1. ed. London: Chapman & Hall, 1997. 212p.
- GOPALARATNAM, V.S. SHAH, S.P. BATSON, G.P. CRISWELL, M. E. RAMAKRISHNAN, V. WECHARATANA, M. Fracture Toughness of Fiber Reinforced Concrete. **ACI Material Journal**, **V.88, No.4**. 1991. p. 339-353.
- GOPALARATNAM, V.S. SHAH, GETTU, R. On the Characterization of Flexural Toughness in Fiber Reinforced Concretes. **Cement and Concrete Composites**, **17**. 1995. p. 239-254.
- HANNANT, D.J. Fibre-reinforced cements and concretes. **Construction Materials**; their nature and behaviour. 2ed. London. 1994. p. 359-403.
- HELENE, P. TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: PINI. 1992. 349p.
- HELENE, P. R. L. MITIDIERI FILHO, C. V. THOMAS, E. Influência do tipo do cimento e da relação água/cimento na carbonatação do concreto: estimativa da vida útil de projeto. **37º REIBRAC**, São Paulo, IBRACON, 1995. 13p.
- HOUGET, V. AMBROISE, J. PERA, J. Propriétés mécaniques de composites ciment-fibres organiques. **Materials and Structures** **28**. 1995. p. 220-229.
- 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.



- JOHN, V. M. AGOPYAN, V. PRADO T. A. **Durabilidade de Compósitos de Cimentos e Fibras Vegetais**. Departamento de Engenharia e Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. São Paulo. Ed. Engenharia Civil. 1997. 11p.
- JOHNSTON, C. D. **Fibre-reinforced cement and concrete**. In: V. M. MALHORTA. *Advances in concrete technology*. 2ed. Ottawa. 1994. p. 603-673.
- KARSENTY, Gérard. **La Fabrication du bâtiment 1**. Édition Eyrolles. Paris. 1997. 545p.
- KHALED, M. OZGUR, E. TAHIR, C. Relationship between impact energy and compression toughness energy of high-strength fiber-reinforced concrete. **Materials Letters** 47. 2001. p. 297-304.
- LORENZETTI, U. V. FREDEL, M. C. GLEIZE, P. J. P. Avaliação da Eficiência dos Procedimentos de Cura na Durabilidade do Concreto: Resistência à Compressão, Perda de Água e Absorção de Água por Capilaridade. **II Workshop sobre Durabilidade das Construções**. 2001. p. 115-127.
- MASSICOTTE, B. BISCHOFF, P. H. **Fibre Reinforced Concretes: A Structural Perspective - (FRC) BEFIB' 2000**. RILEM. Lyon, France. 2000. p. 193-202.
- MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estruturas, Propriedades e Materiais**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1994. 573p.
- MEZZARI, L. J. **Capacitação Tecnológica através da relação com fornecedores de fibras sintéticas: estudo de caso de uma empresa têxtil de SC**. 2001. 142p. Dissertação (Mestrado em Economia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- MINDESS, S; BANTHIA, N. **Fiber Reinforced Cementitious Composites: Current Practice and Future Prospects**. Sd. p. 417-446.

- NATAJARA, M.C., DHANG, N., GUPTA, A.P. Statistical variations in impact resistance of steel fiber-reinforced concrete subjected to drop weight test. **Cement and Concrete Research** 29. 1999. p. 986-995.
- PAULON, V. A. PINTO, N. J. CESTARI, D. J. Adição de Fibras Orgânicas no Concreto. **42ºIBRACON**. Fortaleza, 2000.
- SILVA, D. A. **Efeitos dos Polímeros HEC e EVA na Microestrutura de Pastas de Cimento Portland**. 2001. 241p. (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- SOROUSHIAN, P. MIRZA, F. ALHOZAIMY, A. M. (a) Plastic Shrinkage Cracking of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete. **ACI Materials Journal**, V.92, No.5, 1995. p. 553-560.
- SOROUSHIAN, F., MIRZA, F. ALHOZAIMY, A. M. (b) Permeability Characteristics of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete. **ACI Materials Journal**, V.92, No.3, 1995. p. 291-295.
- TANESI, J. FIGUEIREDO, A. D. **Fissuração por Retração em Concretos Reforçados com Fibras de Polipropileno (CRFP)**. Boletim Técnico da USP BT/PCC/239. São Paulo, 1999.
- TAYLOR, G. D. **Materials in Construction**. London: Longman Scientific & Technical, 2ed, 1994. 284p.
- TOUTANJI, H. MCNEIL, S. BAYASI, Z. Chloride permeability and impact resistance of polypropylene-fiber-reinforced silica fume concrete. **Cement and Concrete Composites** 28. 1998. p. 961-968.
- WANG, Y. BACKER S. LI V. C. An experimental study of synthetic fibre reinforced cementitious composites. **Journal of Materials Science** 22. 1987. p. 4281-4291.

WANG, Y. WU, H. C. LI V. C. Concrete Reinforcement With Recycled Fibers. **Journal of Materials in Civil Engineering** v. 12. n. 4. 2000. p. 314-319.

ZOLLO, R. Z. Fiber-reinforced Concrete: an Overview after 30 years of Development. **Cement and Concrete Composites** 19. 1997. p. 107-122.

ZHENG, Z. e FELDMAN, D. Synthetic fibre-reinforced concrete. **Prog. Polym. Vol. 20**. 1995. p. 185-210.

**ANEXOS**

## ANEXO I – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

## Absorção de Água por Imersão

		Fibras PET		Absorção (%)			Estatística			
		Comprimento (mm)	Volume (%)	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio Padrão	Coef. Varia.	
35 dias	Ref	-	-	7,146	7,152	7,322	7,21	0,10	1,38	
	Variação de Fibras	10	0,05	6,662	7,057	7,159	6,96	0,26	3,78	
			0,18	7,359	7,534	7,454	7,45	0,09	1,18	
			0,30	7,360	7,113	7,147	7,21	0,13	1,85	
		15	0,05	7,274	7,055	7,329	7,22	0,14	2,01	
			0,18	6,958	7,189	7,126	7,09	0,12	1,69	
			0,30	6,724	6,795	6,872	6,80	0,07	1,08	
		20	0,05	6,703	6,986	7,190	6,96	0,24	3,51	
			0,18	7,121	7,163	7,456	7,25	0,18	2,52	
			0,30	7,303	7,767	7,263	7,44	0,28	3,76	
	150 dias	Ref	-	-	7,110	7,214	7,261	7,20	0,08	1,07
		Variação de Fibras	10	0,05	7,014	7,029	6,837	6,96	0,11	1,53
0,18				7,679	7,057	7,019	7,25	0,37	5,11	
0,30				7,099	7,183	6,755	7,01	0,23	3,24	
15			0,05	6,659	7,008	6,725	6,80	0,19	2,73	
			0,18	6,675	6,693	6,870	6,75	0,11	1,60	
			0,30	7,018	6,528	6,528	6,69	0,28	4,23	
20			0,05	6,854	6,950	6,941	6,91	0,05	0,76	
			0,18	6,965	7,361	7,244	7,19	0,20	2,83	
			0,30	7,478	7,865	7,497	7,61	0,22	2,86	

## ANEXO II – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MASSA ESPECÍFICA

## Massa Específica

		Fibras PET		Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )			Estatística			
		Comprimento (mm)	Volume (%)	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio Padrão	Coef. Varia.	
35 dias	Ref	-	-	2,552	2,557	2,551	2,554	0,003	0,128	
	Variação de Fibras	10	0,05	2,479	2,474	2,445	2,466	0,018	0,742	
			0,18	2,449	2,457	2,486	2,464	0,019	0,790	
			0,30	2,550	2,546	2,549	2,548	0,002	0,077	
	15	0,05	2,534	2,540	2,519	2,531	0,011	0,434		
		0,18	2,529	2,529	2,534	2,531	0,003	0,131		
		0,30	2,533	2,530	2,527	2,530	0,003	0,118		
	20	0,05	2,556	2,548	2,543	2,549	0,007	0,263		
		0,18	2,557	2,559	2,551	2,556	0,004	0,154		
		0,30	2,558	2,557	2,564	2,560	0,004	0,159		
	150 dias	Ref	-	-	2,571	2,562	2,561	2,565	0,006	0,230
		Variação de Fibras	10	0,05	2,543	2,555	2,543	2,547	0,007	0,272
0,18				2,530	2,534	2,552	2,538	0,012	0,464	
0,30				2,536	2,548	2,542	2,542	0,006	0,231	
15		0,05	2,521	2,527	2,544	2,530	0,012	0,468		
		0,18	2,550	2,546	2,541	2,546	0,004	0,174		
		0,30	2,530	2,536	2,539	2,535	0,004	0,171		
20		0,05	2,536	2,523	2,526	2,528	0,007	0,276		
		0,18	2,551	2,548	2,547	2,549	0,002	0,083		
		0,30	2,551	2,539	2,554	2,548	0,008	0,318		

### ANEXO III – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

#### Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade – após 1 hora

		Fibras PET		Absorção (g/cm <sup>2</sup> ) / 1hr			Estatística			
		Comprimento (mm)	Volume (%)	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio Padrão	Coef. Varia.	
35 dias	Ref	-	-	0,196	0,225	0,157	0,193	0,035	17,907	
	Variação de Fibras	10	0,05	0,202	0,234	0,174	0,204	0,030	14,697	
			0,18	0,243	0,239	0,210	0,231	0,018	7,844	
			0,30	0,255	0,237	0,236	0,242	0,011	4,406	
		15	0,05	0,269	0,276	0,292	0,279	0,012	4,185	
			0,18	0,242	0,230		0,236	0,008	3,431	
			0,30	0,196	0,199	0,225	0,207	0,016	7,849	
		20	0,05	0,223	0,218	0,216	0,219	0,003	1,538	
			0,18	0,201	0,219	0,220	0,213	0,011	5,002	
			0,30	0,191	0,192	0,222	0,202	0,017	8,575	
	150 dias	Ref	-	-	0,152	0,202	0,180	0,178	0,026	14,344
		Variação de Fibras	10	0,05	0,201	0,172	0,195	0,189	0,015	8,137
0,18				0,169	0,180	0,200	0,183	0,016	8,506	
0,30				0,236	0,211	0,223	0,223	0,012	5,421	
15			0,05	0,227	0,229	0,215	0,224	0,007	3,336	
			0,18	0,196	0,201	0,234	0,211	0,021	9,852	
			0,30	0,222	0,206	0,210	0,213	0,008	3,740	
20			0,05	0,216	0,204	0,209	0,210	0,006	3,057	
			0,18	0,239	0,255	0,250	0,248	0,008	3,139	
			0,30	0,239	0,247	0,251	0,246	0,006	2,374	

Tabela 5 – Valores da Análise de Variância (ANOVA) para Absorção de Água por Capilaridade – após 1 hora

Fontes de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	Estatística F	Estatística p
Comprimento (1) Linear+quadrático	,001309	2	,000654	2,75696	,075564
Volume (2) Linear+quadrático	,000466	2	,000233	,98092	,383805
Idade - Linear (3)	,000437	1	,000437	1,84063	,182485
(1) * (2)	,006349	4	,001587	6,68666	<b>,000322</b>
(1) * (3)	,006032	2	,003016	12,70584	<b>,000053</b>
(2) * (3)	,001747	2	,000873	3,67910	<b>,034143</b>
Erro	,009495	40	,000237		
Total Soma dos quadrados	,025835	52			

## Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade – após 24horas

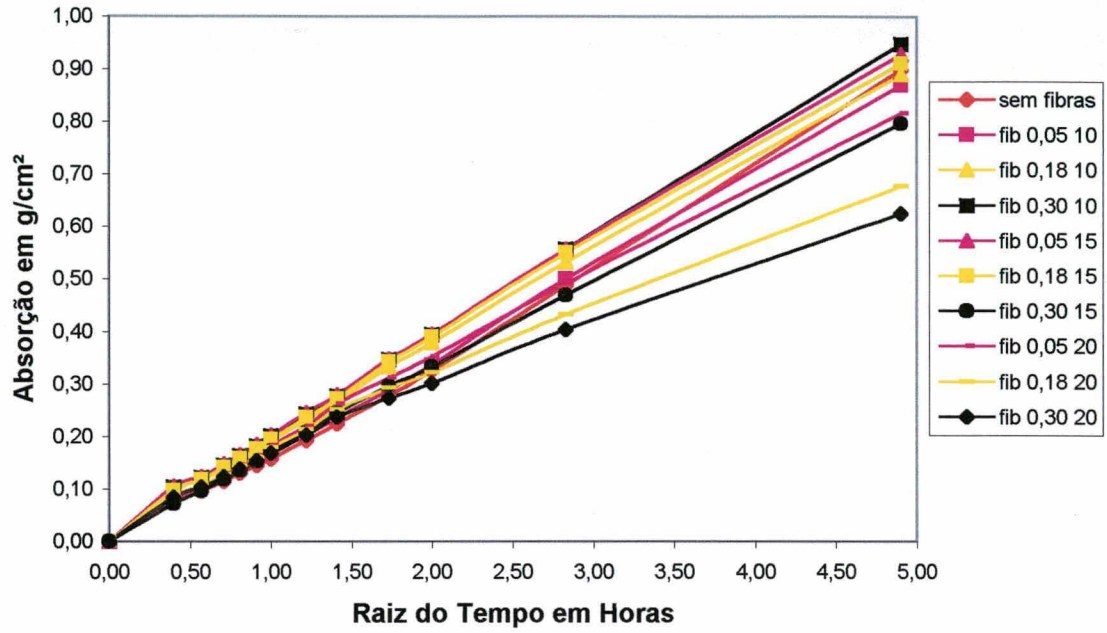
		Fibras PET		Absorção (g/cm <sup>2</sup> ) / 24hrs			Estatística			
		Comprimento (mm)	Volume (%)	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio Padrão	Coef. Varia.	
35 dias	Ref	-	-	0,913	0,889	0,895	0,899	0,012	1,389	
	Variação de Fibras	10	0,05	0,857	0,926	0,825	0,869	0,052	5,938	
			0,18	0,933	0,893	0,847	0,891	0,043	4,830	
			0,30	0,977	0,940	0,927	0,948	0,026	2,737	
		15	0,05	0,927	0,917	0,940	0,928	0,012	1,243	
			0,18	0,945	0,879		0,912	0,047	5,117	
			0,30	0,768	0,845	0,777	0,797	0,042	5,284	
	20	0,05	0,802	0,838	0,810	0,817	0,019	2,315		
		0,18	0,620	0,691	0,720	0,677	0,051	7,600		
		0,30	0,611	0,607	0,656	0,625	0,027	4,356		
	150 dias	Ref	-	-	0,766	0,802	0,724	0,764	0,039	5,110
		Variação de Fibras	10	0,05	0,663	0,633	0,593	0,630	0,035	5,577
0,18				0,574	0,592	0,644	0,603	0,036	6,025	
0,30				0,909	0,842	0,793	0,848	0,058	6,867	
15			0,05	0,840	0,922	0,926	0,896	0,049	5,417	
			0,18	0,851	0,868	0,811	0,843	0,029	3,470	
			0,30	0,727	0,727	0,707	0,720	0,012	1,603	
20		0,05	0,709	0,676	0,691	0,692	0,017	2,388		
		0,18	0,839	0,859	0,810	0,836	0,025	2,947		
		0,30	0,733	0,798	0,814	0,782	0,043	5,488		

Tabela 6 - Valores da Análise de Variância (ANOVA) para Absorção de Água por Capilaridade – após 24horas

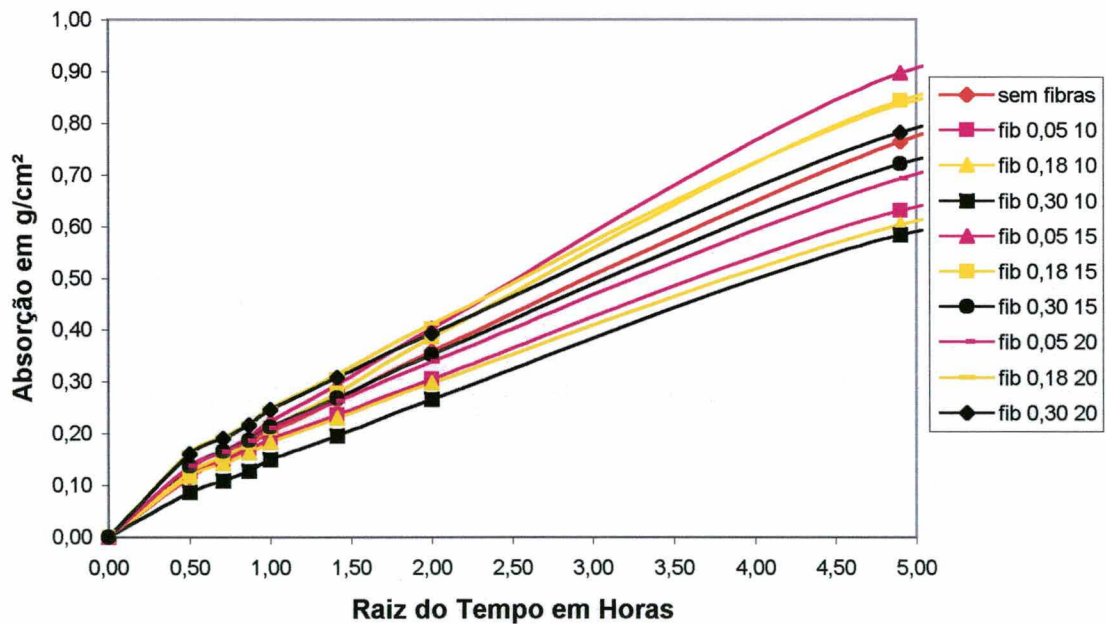
Fontes de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	Estatística F	Estatística p
Comprimento (1) Linear+quadrático	,107305	2	,053652	17,10002	<b>,000005</b>
Volume (2) Linear+quadrático	,003231	2	,001616	,51494	,601544
Idade - Linear (3)	,060564	1	,060564	19,30275	<b>,000083</b>
(1) * (2)	,173709	4	,043427	13,84108	<b>,000000</b>
(1) * (3)	,168160	2	,084080	26,79787	<b>,000000</b>
(2) * (3)	,035588	2	,017794	5,67121	<b>,006887</b>



Absorção de Água por Capilaridade / 24horas - 35 dias



Absorção de Água por Capilaridade / 24horas - 150 dias



## ANEXO IV – RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

## Resistência a Compressão Axial

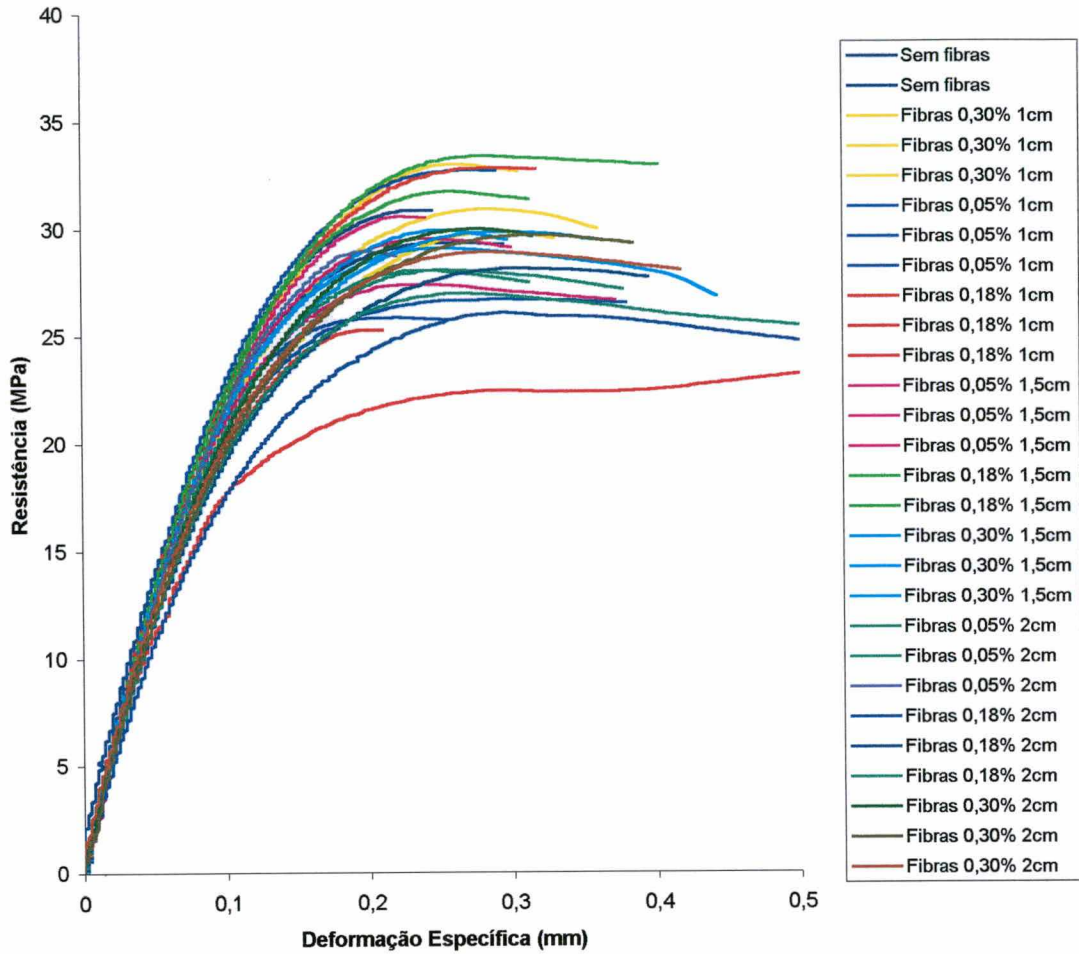
		Fibras PET		Resistência (MPa)			Estatística		
		Comprimento (mm)	Volume (%)	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio Padrão	Coef. Varia.
35 dias	Ref	-	-	30,86	29,28	32,1	30,75	1,4	4,60
	Variação de Fibras	10	0,05	25,82	26,67	31,38	27,96	3,0	10,71
			0,18	23,55	25,28	25,34	24,72	1,0	4,11
			0,30	29,84	30,88	33	31,24	1,6	5,16
	15	0,05	27,37	29,54	30,56	29,16	1,6	5,59	
		0,18	31,70	31,70	33,40	32,27	0,98	3,04	
		0,30	29,92	29,86	29,09	29,62	0,46	1,56	
	20	0,05	28,07	28,07	28,90	28,35	0,48	1,69	
		0,18	26,04	28,14	26,93	27,04	1,05	3,90	
		0,30	29,98	29,67	28,90	29,52	0,56	1,88	
150 dias	Ref	-	-	32,28	31,89	32,53	32,23	0,32	1,00
	Variação de Fibras	10	0,05	32,79	34,17	32,34	33,10	0,95	2,88
			0,18	33,74	32,15	32,02	32,64	0,96	2,93
			0,30	29,51	26,61	27,5	27,87	1,49	5,33
	15	0,05	29,73	28,84	30,69	29,75	0,93	3,11	
		0,18	30,30	29,73	27,76	29,26	1,33	4,55	
		0,30	28,90	31,07	30,69	30,22	1,16	3,83	
	20	0,05	32,72	32,28	32,72	32,57	0,25	0,78	
		0,18	30,88	30,69	25,72	29,10	2,93	10,06	
		0,30	31,83	29,48	27,76	29,69	2,04	6,88	

## ANEXO V – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

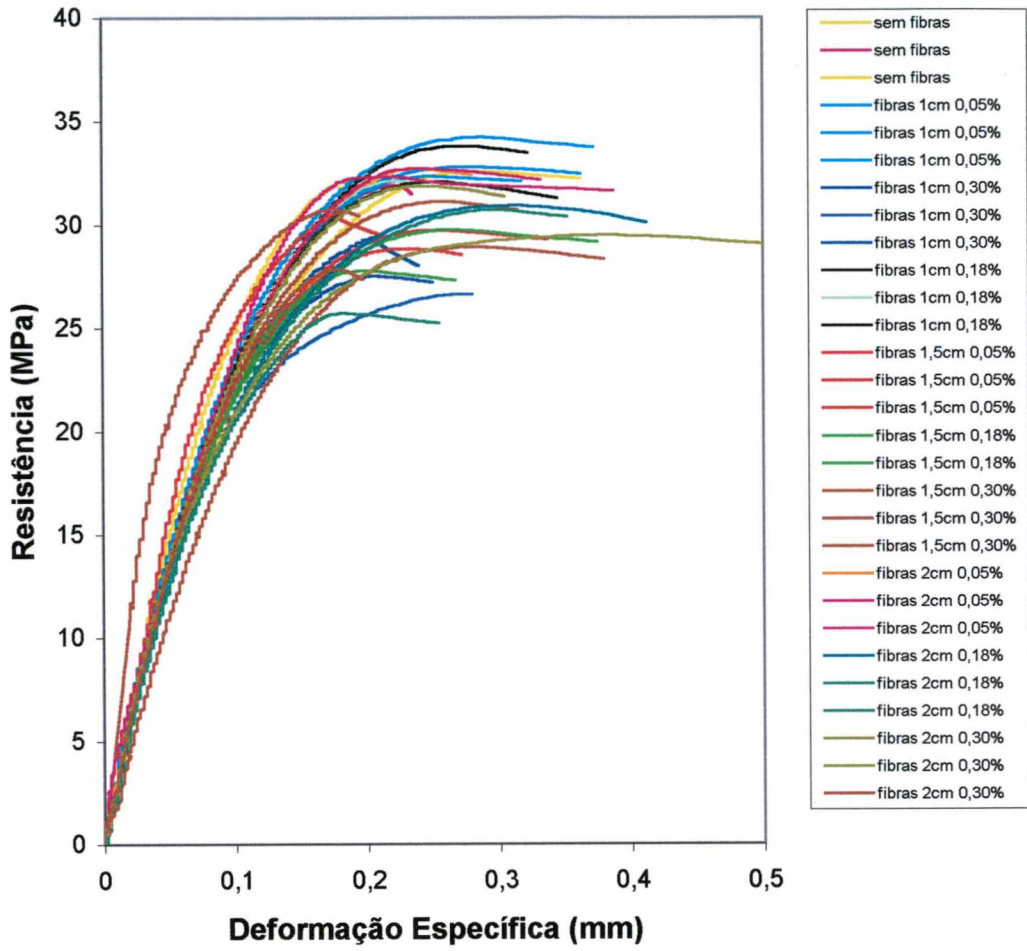
## Módulo de Deformação

		Fibras PET		Módulo Deformação (GPa)			Estatística		
		Comprimento (mm)	Volume (%)	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio Padrão	Coef. Varia.
35 dias	Ref	-	-	24,93	29,90		27,42	3,51	12,80
	Variação de Fibras	10	0,05	26,21	27,11	27,95	27,09	0,87	3,22
			0,18	22,30	25,63	25,35	24,43	1,85	7,57
			0,30	24,08	24,95	24,17	24,40	0,48	1,97
		15	0,05	24,58	26,63	25,98	25,73	1,04	4,06
			0,18	25,64	21,18	24,55	23,79	2,32	9,77
			0,30	25,48	25,43	26,16	25,69	0,41	1,59
	20	0,05	25,24	23,84	26,07	25,05	1,13	4,50	
		0,18	22,04	23,90	22,82	22,92	0,94	4,09	
		0,30	22,98	23,93	25,68	24,20	1,36	5,64	
150 dias	Ref	-	-	29,20	27,24	25,02	27,15	2,09	7,70
	Variação de Fibras	10	0,05	26,56	27,72	26,18	26,82	0,80	2,99
			0,18	25,99	27,47	27,35	26,94	0,82	3,04
			0,30	26,60	25,36	21,00	24,32	2,94	12,09
		15	0,05	26,80	25,97	29,44	27,40	1,81	6,61
			0,18	27,34	26,80	24,95	26,37	1,25	4,76
			0,30	22,12	26,51		24,31	3,10	12,76
	20	0,05	26,50	26,13	26,50	26,38	0,21	0,81	
		0,18	24,95	24,79	27,97	25,90	1,79	6,90	
		0,30	27,18	28,23	26,51	27,31	0,87	3,17	

Módulo de Deformação - 35 dias



Módulo de Deformação - 150dias



**ANEXO VI – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO**

**Resistência à tração na flexão**

		Fibras PET		Resistência tração (MPa)			Estatística		
		Comprimento (mm)	Volume (%)	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio Padrão	Coef. Varia.
35 dias	Ref	-	-	3,77	3,70	3,77	3,75	0,04	1,09
	Variação de Fibras	10	0,05	4,13	3,49	4,11	3,91	0,36	9,24
			0,18	4,21	-	3,44	3,83	0,54	14,12
			0,30	4,46	4,06	4,10	4,20	0,22	5,29
	15	0,05	3,86	4,34	4,08	4,09	0,24	5,88	
		0,18	4,34	3,61	4,42	4,12	0,44	10,77	
		0,30	4,70	4,49	4,60	4,60	0,10	2,27	
	20	0,05	4,15	4,28	4,48	4,30	0,17	3,87	
		0,18	3,84	4,40	4,13	4,12	0,28	6,76	
		0,30	4,24	4,40	4,78	4,47	0,28	6,18	
150 dias	Ref	-	-	-	-	-	-	-	
	Variação de Fibras	10	0,05	-	-	-	-	-	-
			0,18	4,37	4,24	3,96	4,19	0,21	4,91
			0,30	-	4,43	4,77	4,60	0,24	5,25
	15	0,05	3,91	4,63	4,32	4,29	0,36	8,41	
		0,18	4,04	4,85	3,88	4,26	0,52	12,17	
		0,30	3,87	4,41	3,75	4,01	0,35	8,83	
	20	0,05	4,83	4,79	4,40	4,67	0,24	5,13	
		0,18	4,41	4,72	4,70	4,61	0,17	3,78	
		0,30	4,47	4,49	4,49	4,48	0,01	0,32	

## ANEXO VII – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

### Resistência à tração por compressão diametral

		Fibras PET		Resistência tração (MPa)			Estatística			
		Comprimento (mm)	Volume (%)	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio Padrão	Coef. Varia.	
<b>35 dias</b>	<b>Ref</b>	-	-	3,59	3,17	3,35	3,37	0,21	6,21	
	<b>Varição de Fibras</b>	<b>10</b>	0,05	3,46	3,73	3,18	3,46	0,28	7,99	
			0,18	3,05	3,70	3,38	3,38	0,32	9,60	
			0,30	3,38	3,61	3,47	3,49	0,12	3,44	
		<b>15</b>	0,05	3,32	3,58	3,72	3,54	0,20	5,77	
			0,18	3,97	3,57	3,26	3,60	0,36	9,87	
			0,30	3,50	3,57	3,44	3,50	0,06	1,82	
	<b>20</b>	0,05	3,32	3,76	3,57	3,55	0,22	6,18		
		0,18	3,65	3,52	3,65	3,61	0,07	1,99		
		0,30	3,81	3,65	3,67	3,71	0,09	2,41		
	<b>150 dias</b>	<b>Ref</b>	-	-	3,75	3,83	4,14	3,91	0,21	5,25
		<b>Varição de Fibras</b>	<b>10</b>	0,05	4,21	4,09	4,07	4,12	0,08	1,86
0,18				4,08	4,18	4,22	4,16	0,07	1,78	
0,30				3,65	3,78	3,36	3,60	0,22	6,05	
<b>15</b>			0,05	4,04	3,87	3,46	3,79	0,30	7,88	
			0,18	3,69	3,70	3,43	3,61	0,15	4,22	
			0,30	3,77	3,64	3,51	3,64	0,13	3,62	
<b>20</b>		0,05	3,37	4,26	3,88	3,83	0,45	11,67		
		0,18	3,90	4,11	3,54	3,85	0,28	7,38		
		0,30	4,01	3,63	3,98	3,88	0,21	5,42		

## ANEXO VIII – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO

## Resistência ao Impacto – Diferença entre a 1 fissura e ruptura

		Fibras PET		Amostras (nº golpes)			Estatística		
		Comprimento (mm)	Volume (%)	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio Padrão	Coef. Varia.
35 dias	Ref	-	-	3,0	3,0	3,0	3,00	0,0	0,00
	Variação de Fibras	10	0,05	2,0	4,0	4,0	3,33	1,2	34,64
			0,18	12,0	8,0	10,0	10,00	2,0	20,00
			0,30	10,0	14,0	13,0	12,33	2,1	16,88
	15	0,05	6,0	6,0	7,0	6,33	0,6	9,12	
		0,18	7,0	6,0	6,0	6,33	0,58	9,12	
		0,30	17,0	8,0	15,0	13,33	4,73	35,44	
	20	0,05	3,0	4,0	3,0	3,33	0,58	17,32	
		0,18	11,0	11,0	8,0	10,00	1,73	17,32	
		0,30	17,0	9,0	30,0	18,67	10,60	56,78	
150 dias	Ref	-	-	2,0	2,0	1,0	1,67	0,6	34,64
	Variação de Fibras	10	0,05	2,0	2,0	2,0	2,00	0,0	0,00
			0,18	4,0	2,0	2,0	2,67	1,2	43,30
			0,30	1,0	2,0	3,0	2,00	1,0	50,00
	15	0,05	2,0	1,0	2,0	1,67	0,6	34,64	
		0,18	2,0	2,0	4,0	2,67	1,15	43,30	
		0,30	3,0	2,0	3,0	2,67	0,58	21,65	
	20	0,05	3,0	2,0	4,0	3,00	1,00	33,33	
		0,18	2,0	5,0	2,0	3,00	1,73	57,74	
		0,30	4,0	4,0	2,0	3,33	1,15	34,64	



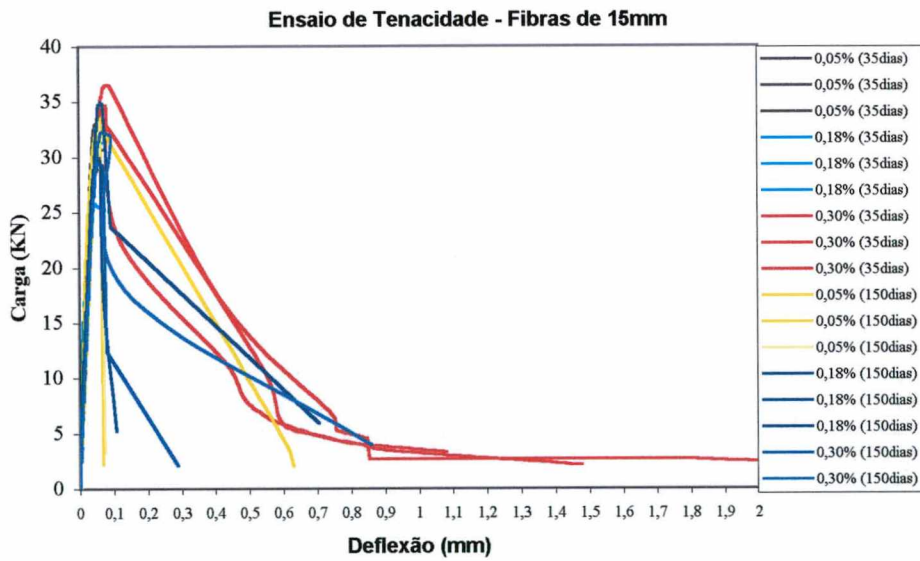
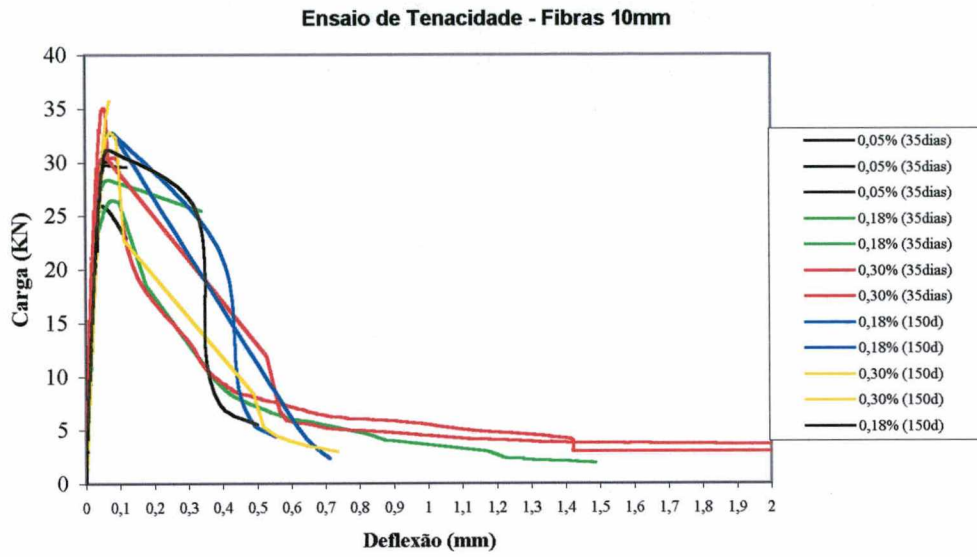
## Resistência ao Impacto até a primeira fissura

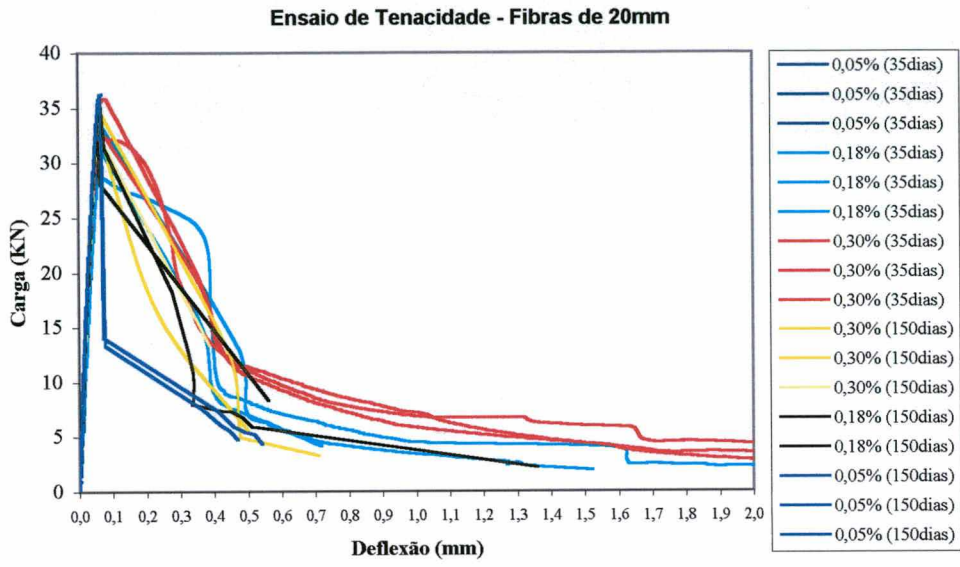
		Fibras PET		Amostras (nºgolpes)			Estatística			
		Comprimento (mm)	Volume (%)	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio Padrão	Coef. Varia.	
35 dias	Ref	-	-	9,0	11,0	10,0	10,00	1,0	10,00	
	Variação de Fibras	10	0,05	3,0	3,0	4,0	3,33	0,6	17,32	
			0,18	12,0	4,0	3,0	6,33	4,9	77,89	
			0,30	5,0	6,0	4,0	5,00	1,0	20,00	
		15	0,05	4,0	4,0	5,0	4,33	0,6	13,32	
			0,18	5,0	4,0	11,0	6,67	3,79	56,79	
			0,30	17,0	10,0	13,0	13,33	3,51	26,34	
		20	0,05	8,0	11,0	12,0	10,33	2,08	20,15	
			0,18	16,0	15,0	13,0	14,67	1,53	10,41	
			0,30	3,0	10,0	10,0	7,67	4,04	52,71	
	150 dias	Ref	-	-	9,0	9,0	8,0	8,67	0,6	6,66
		Variação de Fibras	10	0,05	14,0	16,0	27,0	19,00	7,0	36,84
0,18				9,0	10,0	7,0	8,67	1,5	17,63	
0,30				5,0	5,0	6,0	5,33	0,6	10,83	
15			0,05	21,0	15,0	10,0	15,33	5,5	35,92	
			0,18	7,0	8,0	8,0	7,67	0,58	7,53	
			0,30	19,0	6,0	7,0	10,67	7,23	67,82	
20			0,05	15,0	18,0	36,0	23,00	11,36	49,38	
			0,18	7,0	17,0	17,0	13,67	5,77	42,25	
			0,30	10,0	10,0	8,0	9,33	1,15	12,37	

## Resistência ao Impacto até o rompimento

		Fibras PET		Amostras (nº golpes)			Estatística		
		Comprimento (mm)	Volume (%)	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio Padrão	Coef. Varia.
35 dias	Ref	-	-	12,0	14,0	13,0	13,00	1,0	7,69
	Variação de Fibras	10	0,05	5,0	7,0	8,0	6,67	1,5	22,91
			0,18	24,0	12,0	13,0	16,33	6,7	40,77
			0,30	15,0	20,0	17,0	17,33	2,5	14,52
		15	0,05	10,0	10,0	12,0	10,67	1,2	10,83
			0,18	12,0	10,0	17,0	13,00	3,61	27,74
			0,30	34,0	18,0	28,0	26,67	8,08	30,31
		20	0,05	11,0	15,0	15,0	13,67	2,31	16,90
			0,18	27,0	26,0	21,0	24,67	3,21	13,03
			0,30	20,0	19,0	40,0	26,33	11,85	44,99
150 dias	Ref	-	-	11,0	11,0	9,0	10,33	1,2	11,17
	Variação de Fibras	10	0,05	16,0	18,0	29,0	21,00	7,0	33,33
			0,18	13,0	12,0	9,0	11,33	2,1	18,37
			0,30	6,0	7,0	9,0	7,33	1,5	20,83
		15	0,05	23,0	16,0	12,0	17,00	5,6	32,75
			0,18	9,0	10,0	12,0	10,33	1,53	14,78
			0,30	22,0	8,0	10,0	13,33	7,57	56,79
		20	0,05	18,0	20,0	40,0	26,00	12,17	46,79
			0,18	9,0	22,0	19,0	16,67	6,81	40,84
			0,30	14,0	14,0	10,0	12,67	2,31	18,23

ANEXO IX – GRÁFICOS DO ENSAIO DE TENACIDADE





## ANEXO X – TABELAS PARA O ENSAIO DE TENACIDADE

Tabela 1 – Valores do ensaio de Tenacidade aos 35 dias

	Fibras PET		Índices de Tenacidade – 35dias										
	Com. (mm)	Volume (%)	Carga (KN)	1 fis deflexão (mm)	1 fis área (N.m)	I <sub>5</sub>	I <sub>10</sub>	I <sub>20</sub>	I <sub>30</sub>	R <sub>5,10</sub>	R <sub>10,20</sub>	R <sub>20,30</sub>	I <sub>TOT</sub> ACI
Ref.	-	-	27,92	0,0500	0,92	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	29,82	0,0625	1,28	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	30,56	0,0550	1,22	-	-	-	-	-	-	-	-
Comprimento das Fibras	10	0,05	30,06	0,0575	1,25	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,05	25,98	0,0500	1,02	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,05	29,72	0,0600	1,43	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,18	28,28	0,0600	1,08	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,18	26,44	0,0775	1,69	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,18	30,06	0,0575	1,25	2,90	4,24	5,74	6,46	26,80	15,00	3,6	10,06
		0,30	35,04	0,0550	1,32	2,80	5,00	8,99	10,49	44,00	39,90	7,50	16,36
		0,30	30,42	0,0525	1,12	5,45	5,83	7,59	9,82	7,60	17,60	11,15	13,78
	0,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15	0,05	28,86	0,0600	1,23	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,05	33,00	0,0525	1,26	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,05	30,68	0,0600	1,14	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,18	33,20	0,0600	1,42	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,18	31,38	0,0625	1,36	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,18	25,84	0,0425	0,87	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,30	36,48	0,0775	1,97	6,44	7,55	7,74	9,09	22,20	1,90	6,75	16,18
		0,30	33,22	0,0675	1,68	7,17	7,25	7,78	9,15	1,60	5,30	6,85	13,50
	0,30	34,70	0,0750	1,74	4,76	4,93	6,07	7,24	3,40	11,40	5,85	11,04	
	20	0,05	31,36	0,0650	1,35	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,05	31,48	0,0700	1,27	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,05	32,50	0,0650	1,19	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,18	28,70	0,0700	1,44	5,71	6,70	8,50	10,71	9,90	9,00	11,05	13,54
		0,18	33,30	0,0675	1,52	7,18	7,21	8,64	9,39	0,30	14,30	3,75	13,00
		0,18	31,14	0,0650	1,48	4,32	5,83	7,66	8,05	30,20	18,30	1,95	10,45
		0,30	32,22	0,0700	2,12	3,30	4,52	6,21	8,03	24,4	16,90	9,10	18,29
		0,30	32,48	0,0750	1,87	4,96	5,29	8,40	9,36	6,60	31,10	4,80	20,70
	0,30	35,86	0,0775	2,01	4,94	5,37	7,07	8,80	8,60	17,00	8,65	18,35	

Tabela 2 – Valores do ensaio de Tenacidade aos 150 dias

	Fibras PET		Índices de Tenacidade – 150 dias											
	Com. (mm)	Volume (%)	Carga (KN)	1 fis deflexão (mm)	1 fis área (N.m)	I <sub>5</sub>	I <sub>10</sub>	I <sub>20</sub>	I <sub>30</sub>	R <sub>5,10</sub>	R <sub>10,20</sub>	R <sub>20,30</sub>	I <sub>TOT</sub> ACI	
Ref.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Comprimento das Fibras	10	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		0,18	32,72	0,0675	1,59	2,71	4,75	7,94	-	40,80	31,90	-	-	
		0,18	31,16	0,0675	1,57	3,41	6,11	7,00	-	54,00	8,90	-	-	
		0,18	32,48	0,0625	1,34	3,69	6,74	8,95	-	61,00	22,10	-	-	
		0,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,30	32,78	0,0725	1,54	2,88	4,59	6,26	-	34,20	16,70	-	-	
		0,30	35,68	0,0725	1,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15	0,05	32,58	0,0600	1,48	2,50	4,19	7,89	-	33,80	36,95	-	-	
		0,05	33,56	0,0650	1,26	-	-	-	-	-	-	-	-	
		0,05	33,16	0,0600	1,35	-	-	-	-	-	-	-	-	
		0,18	29,92	0,0600	1,21	-	-	-	-	-	-	-	-	
		0,18	34,94	0,0625	1,30	2,85	4,45	7,88	-	32,00	34,30	-	-	
		0,18	28,60	0,0500	0,93	-	-	-	-	-	-	-	-	
		0,30	29,42	0,0600	1,26	1,92	2,56	3,00	3,60	12,80	4,40	3,00	-	
		0,30	32,30	0,0700	1,52	2,74	4,04	6,51	7,63	26,00	24,70	5,60	-	
		0,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	20	0,05	35,98	0,0675	1,58	1,96	3,10	-	-	22,80	-	-	-	
		0,05	36,26	0,0700	1,63	-	-	-	-	-	-	-	-	
		0,05	32,36	0,0600	1,26	2,22	3,45	-	-	19,20	-	-	-	
		0,18	33,26	0,0575	1,30	2,69	4,76	-	-	47,40	-	-	-	
		0,18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		0,18	35,38	0,0675	1,50	3,25	5,33	6,50	7,38	41,60	11,70	4,43	-	
		0,30	33,18	0,0625	1,40	3,23	4,88	-	-	33,00	-	-	-	
		0,30	34,38	0,0700	1,57	3,12	5,85	7,41	-	54,60	15,60	-	-	
		0,30	32,38	0,0650	1,36	3,25	5,88	-	-	52,60	-	-	-	

## ANEXO XI – ENSAIO DE CARBONATAÇÃO

Tabela 1 – Carbonatação do Concreto com Fibras PET

	Fibras PET		Medidas de Carbonatação (mm) em concretos com 1 ano em laboratório											
	Comprimento (mm)	Volume (%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	Desvio Padrão
Refer.	-	-	2,10	3,30	3,30	3,30	2,70	2,30	2,20	2,00	2,90	3,00	2,71	0,52
Variação de Fibras	10	0,05	3,30	3,50	2,30	2,40	2,50	4,00	2,90	3,00	2,90	2,90	2,97	0,52
		0,18	2,90	2,70	1,90	2,20	2,50	3,00	3,00	2,20	2,80	2,50	2,57	0,38
		0,30	2,50	2,00	2,80	2,30	2,20	2,90	2,50	2,20	3,00	2,10	2,45	0,35
	15	0,05	4,30	2,30	2,50	2,20	2,20	2,70	2,50	2,70	2,00	2,00	2,54	0,67
		0,18	2,80	2,50	3,70	6,10	2,60	2,90	2,00	3,00	3,10	2,90	3,16	1,12
		0,30	2,70	2,80	2,00	3,30	3,00	2,30	2,40	1,90	2,00	1,70	2,41	0,53
	20	0,05	2,50	2,20	2,60	2,40	2,40	2,40	3,00	2,50	2,10	2,10	2,42	0,27
		0,18	3,33	3,30	2,40	3,00	2,90	3,30	2,90	3,00	2,80	2,80	2,97	0,29
		0,30	2,10	3,30	3,30	3,30	2,70	2,30	2,20	2,00	2,90	3,00	2,71	0,52