

**UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO
GRANDE DO SUL**

DETEC – DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRAS PET**

ANGELA GHISLENI CORÓ

Ijuí, RS, Dezembro de 2002.

ANGELA GHISLENI CORÓ

**INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRAS PET**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, do Departamento de Tecnologia da UNIJUI – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadores: Luciano Pivoto Specht

Luís Eduardo Modler

Ijuí, RS, Dezembro de 2002.

*Dedico este trabalho à minha
mãe, Selma. À ela a minha eterna
gratidão. Saudades.*

AGRADECIMENTOS

Aos laboratoristas Salete e Ivan, pela grande ajuda na realização dos ensaios.

À todos colegas que em algum momento participaram na realização dos ensaios da pesquisa, em especial Jakson, Rodrigo, Rejane, Geison, Marlon e César.

Aos orientadores Prof. Luís Eduardo e Prof. Luciano, pelo incentivo e auxílio na realização desta pesquisa.

À Concreteira PAIM, pela disponibilidade dos materiais.

Às amigas do “cortiço”, Bruna, Graci e Lú, pelas preciosas horas de lazer.

À minha querida família, meu pai Adir, minha mãe Selma (*in memoriam*), minhas irmãs Claudia e Marta, meu cunhado Celso, tia Tere e minha sobrinha Luísa, pelo incansável incentivo e confiança em mim depositados.

Ao meu amado noivo, Ednilson L. Zucolotto, pela compreensão, paciência e tantas palavras de motivação e carinho. Você foi fundamental para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	01
1.1 Delimitação do Tema.....	02
1.2 Formulação da Questão de Estudo.....	03
1.3 Definição dos Objetivos de Estudo.....	03
1.3.1 Objetivo Geral.....	03
1.3.2 Objetivos Específicos.....	03
1.4 Justificativa.....	04
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	05
2.1 O Concreto.....	05
2.1.1 Principais componentes do concreto.....	06
2.1.2 Tipos de Concreto.....	07
2.2 Fibras.....	08
2.2.1 Fibras Poliméricas.....	08
2.2.2 Fibras Metálicas.....	10
2.2.3 Fibras Vegetais.....	11
2.2.4 Fibras Minerais.....	12
2.3 Materiais Compósitos.....	13
2.4 Concreto Reforçado com Fibras.....	17
2.4.1 Importância.....	17
2.4.2 Propriedades do concreto.....	18

	II
2.5 Polietileno Tereftalato.....	20
2.5.1 Breve Histórico.....	21
2.5.2 Aspectos Químicos do PET.....	21
2.5.3 O Lixo PET.....	22
3. METODOLOGIA.....	25
3.1 Classificação do Estudo.....	25
3.2 Coleta de Dados.....	25
3.2.1 Matriz.....	25
3.2.2 Fibras PET.....	26
3.2.3 Matriz Experimental.....	27
3.2.4 Métodos de Ensaio.....	27
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	32
4.1 Resistência à Compressão Simples.....	32
4.2 Módulo de Elasticidade.....	34
4.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	35
4.4 Resistência à Flexão.....	37
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42
ANEXOS.....	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fibras de polipropileno.....	09
Figura 2.2 – Fibras metálicas.....	11
Figura 2.3 – Disposição fibra/fissura.....	16
Figura 3.1 – Fibras de Polietileno Tereftalato.....	27
Figura 3.2 – Ensaio de resistência à tração na flexão.....	31
Figura 4.1 – Resistência média à compressão em função dos comprimentos.....	33
Figura 4.2 – Resistência média à compressão em função dos teores.....	33
Figura 4.3 – Módulo de elasticidade médio em função dos comprimentos.....	34
Figura 4.4 – Módulo de elasticidade médio em função dos teores.....	35
Figura 4.5 – Resistência média à tração por compressão diametral em função dos comprimentos.....	36
Figura 4.6 – Resistência média à tração por compressão diametral em função dos teores.....	36
Figura 4.7 – Resistência média à flexão em função dos comprimentos.....	37
Figura 4.8 – Gráfico tensão-deformação no ensaio à flexão.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Características das matrizes utilizadas.....	26
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Variáveis e níveis estudados na pesquisa.....	27
---	----

RESUMO

Com o aumento do custo dos materiais de construção, com a redução da disponibilidade de materiais naturais e novas exigências e limitações impostas nas construções é imperativo que os engenheiros e pesquisadores busquem materiais que possam desenvolver boa performance com custo relativamente baixo e que acarretem benefícios à natureza. A incorporação aleatória de fibras em materiais cimentados ou cerâmicos têm comprovado a eficiência desta técnica na melhoria das propriedades mecânicas do material, principalmente no que se refere ao controle de fissuração, ao aumento da capacidade de carga pós-ruptura e ao aumento da durabilidade e tenacidade do material cimentado. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo geral contribuir para uma melhor compreensão do comportamento mecânico de matrizes de concreto de cimento Portland, reforçadas com fibras PET (polietileno tereftalato) de diferentes comprimentos, distribuídas aleatoriamente, sob condições de carregamento estático. Visou, ainda, estabelecer uma relação entre as propriedades individuais das matrizes e das fibras e o comportamento mecânico dos compósitos fibrosos, através da avaliação da influência dos fatores porcentagem e comprimento de fibra nas seguintes variáveis de resposta: resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e resistência à tração na flexão. Após estes estudos, concluiu-se que a principal melhora no desempenho de concretos reforçados com fibras se dá no pós-pico da sollicitação, pois o material continua admitindo carga mesmo após atingir a sua tensão máxima de ruptura. Esta propriedade torna este tipo de concreto um material muito propício, por exemplo, a execução de pavimentos e cabeça de estacas. Avaliou-se, também, que as fibras PET podem ser adicionadas à concretos de baixo desempenho, diminuindo o seu custo e ajudando a solucionar um grave problema ambiental relacionado à grande quantidade existente de garrafas PET nas ruas e nos lixões.

1. INTRODUÇÃO

O concreto é, até hoje, o material estrutural mais utilizado dentro da construção civil. Desde a nossa habitação, pontes, estradas, escolas, barragens, fábricas até os altos edifícios erguidos para bater novos recordes de altura. Embora existam muitas técnicas estruturais novas, que podem superar alguns aspectos da utilização do concreto, como redução do tempo de construção, de desperdícios de material e, conseqüentemente, de custos, este material continua presente na maioria das obras, não apenas como estrutura, mas com diversas outras finalidades, que vão desde pisos até painéis de vedação.

O concreto é composto basicamente pela mistura de cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo, água e eventualmente adições ou aditivos químicos, composto e adensado de forma a não reter quantidade de ar acima daquela incorporada intencionalmente.

Deve-se salientar que a escolha deste material em grande parte das obras não significa necessariamente que a construção é uma técnica que não acompanha a evolução da tecnologia, que cada dia lança no mercado novos materiais. O concreto foi, com o passar dos anos, aperfeiçoado. Estudos envolvendo as propriedades deste material são lançados freqüentemente, confirmando a tese de que avanço tecnológico não é apenas sinônimo de descoberta de novos materiais, mas também melhoria de materiais já conhecidos.

Pesquisas envolvendo o estudo de reforço de materiais de construção, destacando gesso, concretos e argamassas de cimento Portland e solos coesivos e granulares tem envolvido diversos tipos de fibras, desde seu processo de fabricação: composição química e física, características mecânicas e de resistência a meios agressivos,

etc. Pode-se citar alguns tipos das fibras utilizada como elemento de reforço em materiais compósitos fibrosos baseado em matrizes cerâmicas: fibras poliméricas (de polipropileno, poliéster, polietileno e de poliamida Kevlar), fibras metálicas de aço, fibras vegetais, fibras minerais (de vidro, de carbono e de asbesto). No entanto, não foram encontrados estudos de compósitos fibrosos de materiais cerâmicos com Poli Etileno Tereftalate, mais conhecido como fibras PET, no qual se dará o principal tema da pesquisa.

1.1. Delimitação do Tema

Com o propósito de obter informações fundamentais à compreensão do comportamento de concretos de cimento Portland reforçados com fibras metálicas de aço e poliméricas de polipropileno distribuídas aleatoriamente, foi realizado um conjunto de ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, resistência à tração na flexão e deformação. Os resultados destes ensaios servirão de base para a determinação da composição do composto fibroso com PET, como comprimento e teores desta fibra utilizados nas misturas.

Os ensaios realizados com o composto fibroso de concreto e fibras PET serão os mesmos executados com as fibras de aço e polipropileno.

Não foram realizados estudos nos materiais componentes da matriz desta pesquisa, uma vez que estes foram caracterizados no LEC - Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUI, alguns meses antes do início da pesquisa.

Da mesma forma, os traços utilizados são provenientes de um estudo de dosagem desenvolvido no LEC para uma usina de concreto da cidade de Ijuí. Tomou-se como critério de escolha dos traços seu volume de produção naquela usina.

1.2. Formulação da Questão de Estudo

Qual o comportamento mecânico de matrizes de concreto de cimento Portland reforçadas com teores variáveis e de diferentes comprimentos de fibras PET, distribuídas aleatoriamente, sob condições de carregamento estático?

1.3. Definição dos Objetivos de Estudo

1.3.1 Objetivo Geral – Com o intuito de contribuir para uma melhor compreensão dos materiais cerâmicos cimentados reforçados com fibras, através da busca de relação entre as propriedades individuais das matrizes e das fibras e o comportamento mecânico dos compósitos fibrosos, este trabalho tem como objetivo geral estudar o comportamento mecânico de matrizes de concreto de cimento Portland, reforçadas com fibras PET de diferentes comprimentos, distribuídas aleatoriamente, sob condições de carregamento estático.

1.3.2 Objetivo Específico - O objetivo específico desta pesquisa é avaliar a influência dos fatores teor e comprimento das fibras PET em um material cerâmico compósito, através de ensaios de resistência à compressão simples com medição de deformação, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão. Além disso, se buscará, através das características do material compósito, as suas possíveis utilizações dentro da construção civil.

Outro importante objetivo da pesquisa é encontrar alternativas que auxiliem a resolução do grave problema ambiental que representa o lixo proveniente das embalagens plásticas de PET.

1.4. Justificativa

A notável crise econômica que vem atingindo o mundo , aliada à crescente preocupação com o meio ambiente, que cada vez apresenta sinais mais evidentes da sua degradação, tem exigido atitudes que busquem amenizar este quadro. Convertendo a situação para a construção civil, sabe-se que o alto custo dos materiais utilizados nesta área e a diminuição da disponibilidade de materiais naturais têm contribuído para um déficit habitacional e de infra estrutura alarmante. Frente a isso, é imperativo que engenheiros e pesquisadores busquem materiais que possam desenvolver boa performance com custo relativamente baixo e que favoreçam a preservação da natureza.

Dentro desta busca por materiais novos e ecologicamente corretos para a construção, tem-se destacado a utilização de fibras como material de reforço no concreto. A incorporação aleatória de fibras em materiais cimentados ou cerâmicos têm comprovado a eficiência desta técnica na melhoria das propriedades mecânicas do material, principalmente no que se refere ao controle de fissuração, ao aumento da capacidade de carga pós-ruptura e ao aumento da durabilidade e tenacidade do material cimentado.

A escolha da fibra PET como elemento de reforço da matriz concreto fundamenta-se, principalmente, por tratar-se de um material 100% reciclável, de baixo custo, e abundante no meio. O PET é utilizado, principalmente, nas garrafas e embalagens para refrigerantes, tratando-se, assim, de um lixo urbano local, que pode causar grandes problemas à natureza se não possuir um fim adequado. Assim, a utilização destas fibras na construção seria uma excelente solução local para um resíduo urbano local.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O Concreto

Segundo o CEMBUREAU (*apud* Aïtcin, 2000, p.651), o material mais largamente utilizado na construção é o concreto, normalmente composto de cimento Portland, areia, pedra e água. Entre os anos de 1990 e 1995 foram produzidas mais de um milhão de toneladas de cimento a cada ano. Considerando que utiliza-se uma média de 250 Kg de cimento para cada metro cúbico de concreto, pode-se estimar que mais de 4,4 bilhões de metros cúbicos foram produzidos a cada ano desse período. Como um metro cúbico de concreto tem massa de cerca de 2,5 toneladas, esses 4,4 bilhões de metros cúbicos de concreto têm massa de cerca de 11 bilhões de toneladas, ou seja, mais de 2 toneladas de concreto por pessoa por ano. Somente a água doce foi mais largamente usada durante o mesmo período de tempo.

Segundo Mehta e Monteiro (1994, p.02) existem algumas razões para esse ápice do concreto. Primeiramente, o fato de este ser um material de excelente resistência à água, ao contrário da madeira e do aço comum, tornando-o ideal para estruturas destinadas a controlar, estocar e transportar água.

Outra razão é a facilidade que alguns elementos estruturais podem ser construídos, diversificando formas e tamanhos. Isto porque o concreto fresco possui consistência plástica, o que permite o material fluir nas formas pré-fabricadas, retiradas após o endurecimento do concreto.

A terceira razão para a popularidade do concreto na construção é o fato de este ser, normalmente, o material mais barato e mais facilmente disponível no canteiro de obras. Os principais componentes do concreto, o cimento Portland e os agregados, são relativamente baratos e comumente disponíveis na maior parte do mundo.

Outro item que Mehta e Monteiro (1994, p.05) citam entre as razões da preferência deste material na construção, e que mostra-se muito relevante frente as considerações atuais sobre economia de energia e conservação de recursos naturais, é o fato do concreto requer consideravelmente menor energia na sua produção, se comparado com a maioria dos outros materiais de engenharia, além da grande quantidade de restos industriais que podem ser reciclados no concreto, substituindo o material cimentante ou os agregados.

2.1.1 Principais Componentes do Concreto

“Concreto é um material composto que consiste essencialmente de um meio contínuo aglomerante, dentro do qual estão mergulhadas partículas ou fragmentos de agregado.”
(MEHTA e MONTEIRO, 1994, p.08).

Segundo Petrucci (1998), entende-se por agregado o material granular sem forma e volume definidos, de dimensões e propriedades adequadas para o uso em obras de engenharia. A Norma NBR 7211 classifica como agregado graúdo aquelas partículas que possuem diâmetro maior que 4,80 mm (peneira no. 4), e agregado miúdo àquelas inferiores a 4,80 mm, porém maiores que 0,75 mm (peneira 200). (ABNT, 1983)

O agregado miúdo que faz parte dos principais componentes do concreto é a areia, resultante da desintegração natural e da abrasão de rochas ou processamento de rochas arenosas friáveis. Já o agregado graúdo é, normalmente, a pedra britada, que trata-se do produto resultante da britagem industrial de rochas, seixos rolados ou pedras arredondadas graúdas. (MEHTA e MONTEIRO, 1994, p.09).

Ainda segundo Mehta e Monteiro (1994, p.09), o cimento é um material finamente pulverizado, que sozinho não é aglomerante, mas desenvolve propriedades ligantes, como resultado da hidratação. É o material mais importante que constitui o concreto, pois sua resistência e durabilidade dependerão diretamente da quantidade, qualidade e do tipo deste elemento.

A água, como citado anteriormente, é responsável pelas propriedades aglomerantes do cimento. São as reações de hidratação do cimento que vão permitir a ligação entre os diferentes componentes do concreto.

2.1.2 Tipos de Concreto

Leonhardt e Mönnig (1977, p.03) classificam o concreto endurecido de acordo com a sua massa específica nas seguintes categorias:

- Concreto pesado: $\rho = 2,8$ à $5,0 \text{ t/m}^3$
- Concreto normal: $\rho = 2,0$ à $2,8 \text{ t/m}^3$
- Concreto leve
 - concreto leve estrutural: $\rho = 1,2$ à $2,0 \text{ t/m}^3$
 - concreto leve para isolamento térmico: $\rho = 0,7$ à $1,6 \text{ t/m}^3$

Mehta e Monteiro (1994, p.10) também classificam o concreto quanto à resistência à compressão, salientando que este tipo de classificação é predominante na Europa e em muitos outros países, mas não é utilizada nos Estados Unidos.

- Concreto de baixa resistência: resistência à compressão menor que 20 MPa.
- Concreto de resistência moderada: resistência de compressão de 20 a 40 MPa.
- Concreto de alta resistência: resistência à compressão superior a 40 MPa.

2.2 Fibras

Segundo Specht (2000, p.27), existem diversos tipos de fibras envolvendo o estudo de reforços de materiais da construção, como o gesso, o concreto, a argamassa e solos. A seguir, serão apresentados alguns tipos de fibras utilizados como elemento de reforço de matrizes cerâmicas, dividindo-as segundo o seu material de origem: polímeros, metais, vegetais e minerais.

2.2.1 Fibras Poliméricas

a) fibras de polipropileno

As fibras de polipropileno são constituídas de um material polimérico chamado termoplástico, que consiste em uma série de longas cadeias de moléculas polimerizadas. Todas as cadeias são separadas e podem deslizar uma sobre as outras. (HOLLAWAY *apud* SPECHT, 2000, p.28).

Esta característica explica a grande flexibilidade e tenacidade das fibras de polipropileno e é responsável pelo considerável aumento da resistência ao impacto aos materiais a que é incorporada. O módulo de elasticidade é menor do que qualquer outra fibra comumente utilizada, aproximadamente 8 GPa, tornando-a não recomendada para ser utilizada com a finalidade de aumentar a resistência de pré-fissuração ou rigidez dos materiais. A resistência à tração é de aproximadamente 400 Mpa. Estas fibras são resistentes a uma variedade de produtos químicos e aos álcalis. (TAYLOR *apud* SPECHT, 2000, p.28).



Figura 2.1– Fibras de polipropileno

Comercialmente, as fibras de polipropileno podem ser encontradas na forma de monofilamentos e fibriladas. As fibriladas apresentam-se como uma malha de finos filamentos de seção retangular. A estrutura em malha de fibras de polipropileno fibrilado promove um aumento de adesão entre a fibra e a matriz, devido a um efeito de intertravamento. As fibras chamadas de monofilamentos consistem em fios cortados em comprimento padrão.

b) fibras de poliéster

A aparência das fibras de poliéster é similar às fibras de polipropileno, porém são mais densas, mais rígidas e mais resistentes, justificando a sua melhor desempenho (Taylor, *apud* Specht, 2000, p.29). O poliéster mais conhecido é o polietileno tereftalato, utilizado como material de constituição das garrafas plásticas tipo “PET”, e que será o material utilizado como elemento de reforço no material compósito na presente pesquisa. Assim, se fará um estudo mais aprofundado deste tipo de fibra.

c) fibras de polietileno

As fibras de polietileno com peso molecular normal possuem baixo módulo de elasticidade e de aderência à matriz e são altamente resistentes aos álcalis. Assim, estudos desenvolvendo fibras de polietileno com alta densidade estão buscando uma melhor performance deste material quanto à sua aderência com a matriz. Comercialmente, assim como as fibras de polipropileno, são encontradas na forma de monofilamentos picados ou malhas contínua (HANNANT *apud* SPECHT, 2000, p.29).

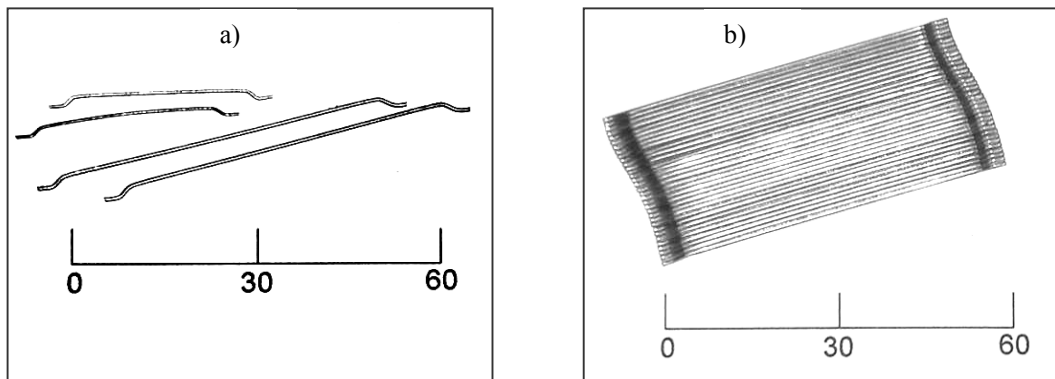
d) fibras de poliamida (kevlar)

“É a fibra orgânica comercial de maior sucesso e recebeu o nome comercial de Kevlar. As fibras kevlar são constituídas de um polímero denominado de poliamida.” (SPECHT, 2000, p. 29).

Comercialmente, existem dois tipos de fibras de poliamida: Kevlar 29, com resistência mecânica aproximada de 3000 MPa e módulo de elasticidade intermediário de 64 GPa; e a Kevlar 49, com um alto módulo de elasticidade da ordem de 300 GPa e resistência mecânica igual a da Kevlar 29. A Kevlar 49 é a preferida pela melhor performance conferida aos materiais compósitos fibrosos. (HOLLAWAY *apud* SPECHT, 2000, p.30).

2.2.2 Fibras Metálicas

As fibras metálicas mais utilizadas são as de aço. A resistência a tração é de aproximadamente 1100 MPa e o módulo de elasticidade de 200 GPa. A ruptura do compósito está normalmente associada ao arrancamento da fibra e não à sua ruptura. (SPECHT, 2000, p.30).



*Figura 2.2 – Fibras Metálicas (a) fibras de 30mm e 60mm;
 (b) fibras de 60mm na forma de feixes prontos para utilização
 Nota: Escala em milímetros*

Existe uma grande variedade de formas e tamanhos de fibras de aço. Fibras de aço redondas tem diâmetros na faixa de 0,25 a 0,75 mm. Fibras de aço achatadas tem seção transversal variando de 0,15 a 0,4 mm de espessura, por 0,25 a 0,9 mm de largura. Fibras de aço onduladas e deformadas são disponíveis tanto onduladas em todo comprimento, quanto somente nas extremidades. Para facilitar o manuseio e a mistura, também são encontradas fibras coladas em feixes, com cola solúvel em água. (MEHTA E MONTEIRO, 1994, p.437).

2.2.3 Fibras Vegetais

Segundo Mehta e Monteiro (1994, p.434) em Exodus 5:6 pode-se verificar que os egípcios usavam a palha para reforçar tijolos de barro, evidenciando o uso desta fibra como reforço de compostos há milênios.

O maior problema relacionado ao reforço de compostos com este tipo de material é o fato destas fibras serem degradadas pela ação de fungos e microorganismos facilmente. A produção de materiais de cimento Portland comum reforçadas com fibras vegetais não teve sucesso devido à rápida degradação dos compostos ocasionada

pela elevada alcalinidade da água presente nos poros da matriz do cimento. (SPECHT, 2000, p.30).

Conforme Specht (2000, p.31), as fibras vegetais utilizadas em materiais compósitos podem ser bambu, juta, capim elefante, coco, piaçava, linho, cana-de-açúcar, sisal, malva e bananeira.

2.2.4 Fibras Minerais

a) fibras de vidro

As fibras de vidro são geralmente manufaturadas na forma de “cachos”, ou seja, fios compostos de centenas de filamentos individuais, geralmente diâmetros na ordem de 10 μ m (Taylor *apud* Specht, 2000, p.31). Como o vidro comum não tem resistência ao ataque químico da pasta de cimento Portland, foram desenvolvidas fibras de vidro resistentes ao álcalis, com melhor durabilidade. (MEHTA E MONTEIRO, 1994, p.438).

b) fibras de carbono

Specht (2000, p.31) afirma que estes materiais, baseados na resistência das ligações carbono-carbono e na leveza do átomo de carbono, são os mais novos e promissores no desenvolvimento de materiais compósitos.

As fibras têm de 5 μ m a 10 μ m de diâmetro e são formadas por agrupamentos contendo de 1 ou 2 até 20 mil filamento. (HIGGINS *apud* SPECHT, 2000, p.31).

As fibras de carbono são divididas em duas categoria: fibras de alta resistência, com resistência a tração em torno de 2400 MPa e módulo de elasticidade de

240 GPa; e fibras de alto módulo de elasticidade, com resistência a tração de 2100 MPa e módulo de 420 GPa. Com resistências desta ordem, torna-se de suma importância que a resistência de ligação com a matriz também seja alta, a fim de impedir o arrancamento destas fibras do compósito. (TAYLOR *apud* SPECHT, 2000, p.31).

c) fibras de asbesto (amianto)

É uma fibra natural, por isso seu uso é mais tradicional que os outros tipos de fibras. Possuem uma resistência média à tração de 1000 MPa (quanto menores as fibras, maior a resistência esperada) e módulo de elasticidade de 160 GPa. O diâmetro é muito pequeno, aproximadamente 1 μm . este pode ser um dos fatores que explica a excelente aderência das fibras com a matriz cimentada. (TAYLOR *apud* SPECHT, 2000, p32).

2.3 Materiais Compósitos

Budinski *apud* Specht (2000, p.07) define materiais compósitos como a misturas de dois ou mais materiais diferentes com características inferiores ao do material resultante. São, portanto, constituídos por duas fases: a matriz (resinas epóxi, concretos, silicones, argamassas, etc.) e o elemento de reforço (fibras, papéis, aço, asbesto, mica, etc.). Budinski *apud* Specht (2000, p.08) ainda afirma que os materiais compósitos mais importantes são combinações de polímeros e materiais cerâmicos - na categoria “materiais cerâmicos” estão inclusos todos os materiais baseados em cimento Portland: solo-cimento, argamassas e concretos, por possuírem características semelhantes tais como alta rigidez, fragilidade e baixa resistência à tração.

Higgins *apud* Specht (2000, p.08), classifica os materiais compósitos em dois grandes grupos: os materiais compósitos particulados, nos quais são adicionados à matriz algum material em forma de partícula, e os materiais compósitos

fibrosos, os quais são considerados mais importantes pelo autor e que serão enfatizados no presente trabalho.

As cerâmicas são um tipo de material com grande utilização na engenharia civil, devido, principalmente, ao seu baixo custo. Apesar da alta resistência à compressão e grande rigidez, são frágeis e apresentam baixa resistência à tração e à flexão devido às fissuras microscópicas geralmente presentes em sua estrutura.(SPECHT, 2000, p.08).

Para Modler et al. (2002, p.02) o maior potencial dos materiais compósitos fibrosos está no estado pós-fissuração, onde as fibras contribuem de forma mais efetiva na resistência do material, aumentando assim a capacidade de absorção de energia do material. Isto se deve ao fato de que a deformação necessária para causar fissuras na matriz cimentada é muito inferior à elongação das fibras. As fibras, geralmente, têm menor módulo de elasticidade que a matriz cimentada e, portanto, pouco ou nenhum aumento de tensão de fissuração é esperado. Taylor *apud* Specht (2000, p.08) acredita que, para haver um acréscimo de resistência pré-fissuração do compósito, é necessário a utilização de uma fibra mais rígida que a matriz, bem como a aderência do reforço com a matriz deve ser tal que impeça movimentos relativos entre as partes.

Higgins e Taylor *apud* Specht (2000, p.09) comparam o estado de tensões (flexão) encontrado em uma viga de material cimentado com o estado de tensões em uma viga reforçada com material fibroso e concordam que, para este tipo de solicitação, o volume de fibra ideal é menor que o usual para tração direta.

Segundo Johnston *apud* Specht (2000, p.09), 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, secundariamente, elas melhoram a ductilidade e a tenacidade de uma matriz com características frágeis.

As fibras não impedem a formação de fissuras no compósito, mas são capazes de aumentar a resistência à tração pelo controle da propagação das fissuras (Taylor *apud* Specht, 2000, p.09). Hannant *apud* Specht (2000, p.09) acredita que as fibras mantêm as interfaces das fissuras juntas, beneficiando as propriedades mecânicas no estado pós-fissuração, ou seja, aumentando a ductilidade. As fibras que “atravessam” as fissuras contribuem para o aumento da resistência, da deformação de ruptura e da tenacidade dos compósitos.

Taylor *apud* Specht (2000, p.09) sumariza os principais parâmetros relacionados com o desempenho dos materiais compósitos cimentados:

- *Teor de fibra*. Um alto teor de fibras confere maior resistência pós-fissuração e menor dimensão das fissuras.
- *Módulo de elasticidade da fibra*. Um alto valor do módulo de elasticidade causaria um efeito similar ao teor de fibra, mas, na prática, quanto maior o módulo, maior 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 e amplia sua distribuição pelo compósito.
- *Resistência da fibra*. Aumentando a resistência das fibras, aumenta, também, a ductilidade do compósito, assumindo que não ocorra o rompimento das ligações de aderência. A resistência necessária para uma fibra, dependerá, na prática, das características pós-fissuração necessárias, bem como do teor de fibra e das propriedades de aderência fibra-matriz.
- *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 suficientemente capaz de permitir que a tensão cisalhante desenvolva uma tensão de tração igual à sua resistência à tração.

Illston e Taylor *apud* Specht (2000, p.10) apresentam equacionamento do equilíbrio de forças idealizado no momento em que a fibra é solicitada no compósito, como demonstra a Figura 2.3. Nesta hipótese as fibras estariam paralelas entre si e perpendiculares à fissura. Torna-se evidente a importância não apenas do comprimento da fibra, mas também do diâmetro. A relação l/d ou índice aspecto, como é conhecido, é proporcional ao quociente entre a resistência à tração da fibra e a resistência da aderência fibra/matriz, onde “ l ” é comprimento e “ d ” é o diâmetro da fibra (Equação 2.1).

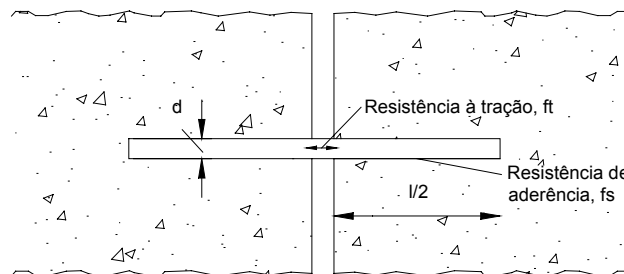


Figura 2.3 - Disposição fibra/fissura
Fonte: Taylor *apud* Specht(2000)

$$\frac{\pi d^2}{4} \times ft = \pi d \times \frac{l}{2} \times fs$$

$$\frac{l}{d} = \frac{ft}{2fs} \quad (\text{Equação 2.1})$$

Na maioria das vezes, a tecnologia dos materiais compósitos depende desta equação; se a fibra tem uma alta resistência à tração, como por exemplo o aço, então, ou a resistência de aderência necessária deverá ser alta para impedir o arrancamento antes que a resistência à tração seja totalmente mobilizada ou fibras de alta relação l/d deverão ser utilizadas (TAYLOR *apud* SPECHT, 2000, p. 11).

2.4 Concreto Reforçado com Fibras

2.4.1 Importância

Normalmente, o concreto contém numerosas fissuras. Essas fissuras podem ter várias origens, das quais destacam-se as causadas por assentamento plástico (consequência da exsudação da água do concreto), por elevação térmica oriunda da hidratação do cimento e variável em função do consumo e da retração plástica, por secagem rápida do concreto em estado fresco, causadas pela ação do clima no momento da concretagem e durante os primeiros dias de cura.

A rápida propagação dessas fissuras sob tensão aplicadas no concreto é responsável pela baixa resistência à tração do material. Inicialmente, considerou-se que as resistências à tração e à flexão do concreto poderiam ser aumentadas significativamente com a adição de fibras próximas umas das outras, pois estas poderiam obstruir a propagação de microfissuras, retardando, portanto, o início das fissuras de tração e aumentando a resistência à tração do material. No entanto, estudos experimentais mostraram que com os volumes e os tamanhos das fibras que poderiam ser convenientemente incorporados a argamassas ou concretos convencionais, os produtos reforçados com fibras não oferecem melhora substancial na resistência comparados às correspondentes misturas sem fibras. (MEHTA e MONTEIRO, 1994, p.434).

Entretanto, pesquisadores obtiveram considerável melhora no comportamento pós-fissuração de concretos contendo fibras, ou seja, embora as resistências últimas à tração não aumentaram apreciavelmente, as deformações de tração na ruptura aumentaram. Logo, pode-se afirmar que comparado ao concreto convencional, o concreto reforçado com fibras é muito mais tenaz e mais resistente ao impacto. (MEHTA e MONTEIRO, 1994, p.435).

2.4.2 Propriedades do concreto

a) Trabalhabilidade

A adição de qualquer tipo de fibra no concreto simples reduz a trabalhabilidade. Independente do tipo de fibra, a perda de trabalhabilidade é proporcional à concentração volumétrica de fibras no concreto. Para a maioria das aplicações, argamassas típicas ou misturas de concreto contendo fibras possuem consistência muito baixas; entretanto, o lançamento e a compactação do concreto é muito melhor do que se poderia esperar, pela baixa consistência. (MEHTA e MONTEIRO, 1994, p.442).

b) Resistência

Conforme visto anteriormente, a mais importante contribuição do reforço com fibras no concreto não é para a resistência, mas para a tenacidade à flexão do material. Embora o reforço possa ocasionar o aumento da resistência, este valor é tão moderado que torna-se desprezível. (MEHTA e MONTEIRO, 1994, p.443).

c) Tenacidade e resistência ao impacto

A maior vantagem do reforço do concreto com fibras é a melhora da tenacidade à flexão (energia total absorvida ao ser rompido um corpo de prova à flexão). Estão relacionados com a tenacidade à flexão as resistências ao impacto e à fadiga do concreto, as quais também são aumentadas consideravelmente. No entanto, pela escassez de ensaios satisfatórios de resistência ao impacto do concreto reforçado com fibras, tem sido difícil para os pesquisadores avaliar a exata magnitude da melhora. (MEHTA e MONTEIRO, 1994, p. 445).

d) Módulo de elasticidade, fluência e retração por secagem

A inclusão de fibras no concreto tem pouca influência no módulo de elasticidade, na retração por secagem e na fluência de compressão. A fluência de tração é reduzida levemente, mas a fluência de flexão pode ser consideravelmente diminuída, quando são usadas fibras de carbono muito rijas. Entretanto, na maioria dos estudos, devido ao pequeno volume, as fibras agem simplesmente como inclusões rígidas na matriz, sem produzirem muito efeito na estabilidade dimensional do compósito. (MEHTA e MONTEIRO, 1994, p.445).

e) Durabilidade

O concreto reforçado com fibras é geralmente feito com um alto teor de cimento e um baixo fator água/cimento. A durabilidade vai depender do tipo de fibra utilizada.

Quando bem compactados e curados, concretos contendo fibras de aço possuem excelente durabilidade enquanto as fibras permanecerem protegidas pela pasta. Na maioria das condições ambientes, especialmente aqueles contendo cloretos, formação de ferrugem na superfície das fibras de aço é inevitável, mas as fibra no interior do concreto normalmente permanecem sem corrosão. (MEHTA e MONTEIRO, 1994 , p.446).

Já as fibras de vidro comum não podem ser utilizadas em argamassas ou concretos de cimento Portland, devido ao ataque químico pelo álcalis do cimento. Mesmo as fibras de vidro resistentes aos álcalis que possuem melhor durabilidade em meios alcalinos apresentam uma deterioração gradual com o passar do tempo. Analogamente, a maioria das fibras naturais, tais como algodão, lã e muitos outros, os polímeros sintéticos não possuem resistência ao meio alcalino da pasta. (MEHTA e MONTEIRO, 1994, p.446).

Faz-se necessário a realização de pesquisas que estudem, no decorrer dos anos, como se comporta o concreto de cimento Portland reforçado com fibras PET, determinando a durabilidade deste material frente a um meio alcalino.

2.5 Polietileno Tereftalato

PET (polietileno tereftalato) trata-se de um poliéster, polímero termoplástico. Segundo a ABEPET – Associação Brasileira dos Fabricantes de Embalagens PET (2002), ela é hoje uma resina muito popular e com uma das maiores taxas de crescimento em aplicação como material de embalagem, principalmente de refrigerantes:

Ano	Consumo para embalagens
1994	80000 ton
1995	120000 ton
1996	150000 ton
1997	185700 ton
1998	223600 ton
1999	244800 ton
2000	255100 ton
2001	270000 ton

Isso se deve, sem dúvida, a suas excelentes propriedades, como por exemplo elevada resistência mecânica a impactos, aparência nobre (brilho e transparência), barreira para gases e odores, baixo peso e ser 100% recicláveis. (ABEPET, 2002).

Além disso, a fibra de poliéster, como é conhecida, é bastante comum na indústria de tecidos e malhas (confecção de roupas), fabricação de carpetes e tapetes, forros e enchimentos, etc. Na engenharia civil, sua utilização é conhecida na forma de TNT (tecido não tecido), que é utilizado como filtro solar, manta asfáltica e material para contenção de encostas (queda de barreira, erosão...). (ABEPET, 2002).

2.5.1 Breve Histórico

A primeira amostra deste material foi desenvolvida pelos ingleses Whinfield e Dickson, em 1941. As pesquisas que levaram à produção em larga escala do poliéster começaram somente após a Segunda Guerra, nos anos 50, em laboratórios dos Estados Unidos e Europa. Baseavam-se, quase totalmente, nas aplicações têxteis. Em 1962, surgiu o primeiro poliéster pneumático. No início dos anos 70, o PET começou a ser utilizado pela indústria de embalagens. (ABEPET, 2002).

O PET chegou ao Brasil em 1988 e seguiu uma trajetória semelhante ao resto do mundo, sendo utilizado primeiramente na indústria têxtil. Apenas a partir de 1993 passou a ter forte expressão no mercado de embalagens, notadamente para os refrigerantes. (ABEPET, 2002).

2.5.2 Aspectos Químicos do PET

Como família, os poliésteres são materiais produzidos pela polimerização de um ácido dicarboxílico e um glicol ou bifenol. O PET é, portanto, o polímero formado pela reação do ácido tereftálico e o etilenoglicol. Por sua vez, o ácido tereftálico é obtido pela oxidação do p-xileno, enquanto o etilenoglicol é sintetizado a partir do eteno, sendo ambos no Brasil produzidos na indústria petroquímica. (ABEPET, 2002).

As propriedades físicas e mecânicas do polímero dependem fundamentalmente do peso molecular médio das moléculas obtidas através do processo de polimerização. (ABEPET, 2002).

O PET é sensível à degradação térmica, especialmente na presença de água e/ou ar (oxigênio). Um produto comum na degradação térmica é o acetaldeído. A presença de oxigênio induz um processo de degradação oxidativa e a

degradação térmica com umidade provoca a quebra das cadeias, reduzindo o peso molecular do polímero. (ABEPET, 2002).

2.5.3 O Lixo e o PET

Atualmente, o homem preocupa-se cada vez mais com os futuros efeitos da degradação ambiental em larga e pequena escala, que podem afetar as próximas gerações. Estudos e pesquisas são feitos no sentido de conter a progressão dos agentes poluidores e evitar, assim, o aumento da degradação ambiental.

O crescimento populacional de hoje não tem precedentes. Cerca de 150 pessoas nascem a cada minuto. Segundo cálculos da Organização das Nações Unidas (ONU) no mês de outubro deste ano a população do mundo pode chegar à marca de 6 bilhões. Teóricos crêem que a Terra está próxima do máximo de habitantes que pode alimentar, mas não há consenso. (CHERUBINO, 2002).

Existe muita coisa para fazer com relação à população, mas o mais difícil de enfrentar é o excesso do consumo, que produz também, lixo em excesso e outros elementos de alta periculosidade. A natureza tem nos dado cada vez sinais mais evidentes de que estamos além da capacidade de suporte do planeta. (CHERUBINO, 2002).

Quando se observa a produção de detritos domésticos e industriais, o quadro de prováveis catástrofes fica mais claro. Isso porque o problema é pouco discutido e estudado e, quando acontece, não são dedicados recursos específicos para as soluções apontadas. É o caso, por exemplo, dos lixões – depósito de lixo a céu aberto - prática de grande maioria das cidades brasileiras. (CHERUBINO, 2002).

O lixo visível do Brasil chega a 240 mil toneladas por dia, mais de um milhão por semana. Cerca de 75% dessa produção vai para os grandes lixões. Grande parte do material depositado nos lixões pode levar até 400 anos para se decompor, outra parte é composta por lixo químico misturado com restos de alimentos. Menos de 1% do lixo orgânico é destinado para usina de compostagem, apenas 0,1% é incinerado. Reciclar o lixo custa, normalmente, até 15 vezes mais do que depositar em lixões. (CHERUBINO, 2002).

Para se ter uma idéia mais clara, pode-se fazer a seguinte comparação: o lixo médio anual de uma pessoa é equivalente a 90 latas de bebidas, 2 árvores transformadas em papel, 107 frascos em geral, 70 latas de alimentos, 45 quilos de plástico e dez vezes seu próprio peso em refugos domésticos. (CHERUBINO, 2002).

Neste âmbito, encontra-se o material utilizado como reforço neste estudo. O volume de produção e venda de embalagens de PET no Brasil tende a aumentar significativamente nos próximos anos, elevando ainda mais a quantidade disponível deste poluente. Segundo a Cherubino Distribuição Comércio e Representações Ltda., uma empresa fabricante de vassouras ecológicas, cujas cerdas são de PET reciclado, calcula-se que cada brasileiro é induzido a descartar uma média de quarenta litros de embalagens plásticas de refrigerantes ao ano. Mundialmente, a demanda deste material é de cerca de 5 milhões de toneladas por ano.

Atualmente, muito pouco deste "lixo" é reaproveitado. Em 1997, o Brasil produziu 121 mil toneladas de plástico PET, e somente 15% desta resina foi reciclada. Nos EUA, a taxa de reciclagem em 1997 foi de 40% de todas as embalagens PET, totalizando 760 mil toneladas. Porém, o índice de reciclagem deste material no Brasil vem aumentando: no ano de 2000, a taxa nacional de reciclagem do PET aumentou em 34%, comparado a 1999. (CHERUBINO, 2002).

Muitos fatores comprovam as vantagens e as necessidades de reciclar este material: pode ser reciclado várias vezes sem perder a qualidade do produto final;

representa em média 17% da coleta seletiva no Brasil; é de difícil degradação em aterros sanitários; é um lixo existente em todos os lugares; não pode ser incinerado, pois é um material altamente combustível que libera gases residuais como monóxido de carbono, acetaldeído, benzoato de vinila e ácido benzóico; sua reciclagem utiliza apenas 30% da energia necessária para a produção da resina virgem; as garrafas recicladas provêm de coleta através de catadores, além de fábricas e da coleta seletiva operada por municípios, contribuindo para a redução do índice de desemprego. (CHERUBINO, 2002).

Além de todos esses fatores que confirmam as vantagens de se reciclar o PET, o governo acaba de vigorar a norma que garante às indústrias brasileiras que utilizaram resíduo de plástico na fabricação de seus produtos o direito a um crédito presumido do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI). O objetivo do incentivo do governo é estimular as indústria a reciclar lixo plástico e, assim, indiretamente, gerar novos empregos na economia informal de recolher e revender o lixo plástico. (GOVERNO FEDERAL, 2002)

Atualmente, o maior mercado para o PET pós-consumo no Brasil é a produção de fibras para a fabricação de cordas (multifilamento), fios de costura (monofilamento) e cordas de vassouras e escovas. (CHERUBINO, 2002).

3. METODOLOGIA

3.1 Classificação do Estudo

O presente estudo trata-se de uma pesquisa aplicada de caráter quantitativo, baseada em experimentos laboratoriais.

3.2 Coleta de Dados

3.2.1 Matriz - As matrizes utilizadas nesta pesquisa consistem de concreto de cimento Portland com consumo de cimento de 278 Kg/m^3 . Os materiais componentes da matriz (Tabela 3.1) foram caracterizados no LEC - Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUI, sendo o agregado graúdo proveniente de jazida local (rocha basáltica da formação Serra Geral), o agregado miúdo proveniente da região de Santa Maria (areia de várzea) e o aglomerante o CP V – ARI.

O traço utilizado é provenientes de um estudo de dosagem desenvolvido no LEC para uma usina de concreto da cidade de Ijuí. Na Tabela 3.1, são apresentadas as características principais do traço utilizados.

Tabela 3.1 – Características das matrizes utilizadas

Traço	Características						
	<i>C</i>	<i>A</i>	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>f_{cj28} (MPa)</i>	<i>Slump(mm)</i>	<i>a/c</i>
1:3,55:1,37:2,55	278	987,73	381,14	707,79	33,85	50	0,66

Nota: C: consumo de cimento em Kg/m^3 ; A: quantidade de areia em Kg/m^3 ; B1: quantidade de brita #1 em Kg/m^3 ; B2: quantidade de brita #2 em Kg/m^3 ; f_{cj28} : resistência média à compressão aos 28 dias em Mpa; a/c: fator água/cimento

3.2.2 Fibras PET - Devido ao desconhecimento de estudos que possibilitassem um embasamento teórico sobre o composto fibroso de materiais cerâmicos com PET, realizou-se inicialmente uma pesquisa caracterizando estes compostos fibrosos com fibras poliméricas de polipropileno e fibras metálicas de aço, buscando, assim, dados referências que proporcionassem um ponto de partida para a pesquisa.

Nos ensaios dos compostos com fibras de aço, percebeu-se que a grande maioria das fibras foram arrancadas do composto, evidenciando problemas de aderência entre a matriz e a fibra. Entende-se, assim, que a resistência à tração destas fibras são muito superiores se comparadas com a aderência exercida.

Os resultados dos ensaios laboratoriais realizados com as fibras de polipropileno revelaram problemas no que se refere a resistência à tração deste tipo de fibra, pois todas foram seccionadas quando solicitadas.

Assim buscou-se, para as fibras PET, um ponto de equilíbrio entre a resistência à tração e a resistência à aderência. Utilizou-se, então, comprimentos de 15, 30 e 60mm e teores de 1000, 3000, 5000 e 7000 g/m^3 . Este tipo de fibra é comercializado com comprimento médio de 200 mm e espessura 3 mm por um pequeno custo, por uma fábrica de vassouras da cidade de Santo Ângelo -RS. Para se obter os comprimentos desejados, as fibras foram cortadas manualmente.

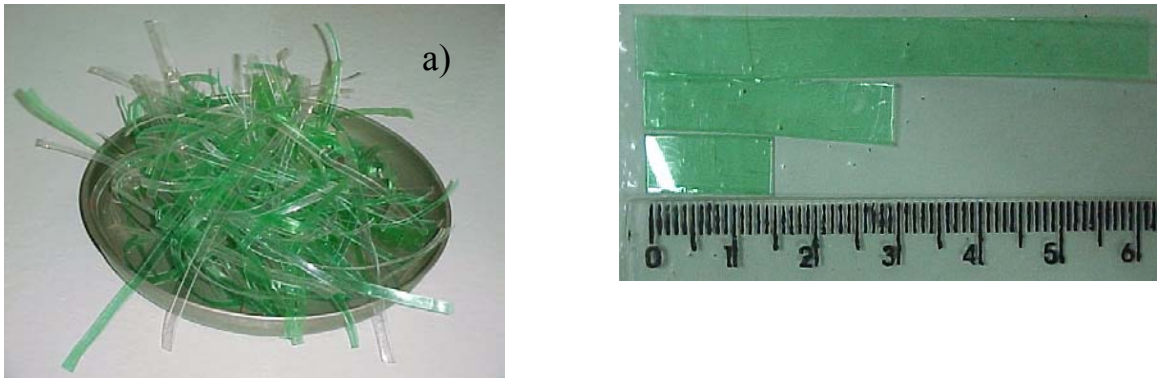


Figura 3.1 – Fibras PET. (a) como são comercializadas pela fábrica (b) cortadas nos tamanhos desejados

3.2.3 Matriz Experimental - No Quadro 3.1 são apresentados as variáveis e níveis utilizados na montagem da matriz experimental, para os ensaios de resistência à compressão simples, medição do módulo de elasticidade, resistência à tração por compressão e resistência à tração por compressão diametral.

Quadro 3.1 – Variáveis e níveis estudados na pesquisa

<i>Variável</i>	<i>Níveis estudados</i>
Idade do Ensaio (IE)	7, 14, 28 e 90 dias
Teor Fibra (TF)	1000g/m ³ , 3000g/m ³ , 5000g/m ³ e 7000g/m ³
Comprimento Fibras (CF)	15,30 e 60 mm

3.2.4 Métodos de Ensaio

a) Coleta preparação dos materiais

Amostras de agregado foram coletadas e secas em estufa. O cimento foi adquirido em quantidade suficiente para realização de todos os ensaios e

armazenado em embalagens plásticas fechadas de maneira a manter suas propriedades durante toda a pesquisa.

b) Mistura

Os materiais (agregado, aditivos, água e fibras) foram pesados com precisão de 0,1gf e misturados em betoneira especial para este fim e de acordo com as técnicas usuais do LEC. A moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos (10 x 20cm) e prismáticos foi feita em acordo com a NBR 5738. Os prismas

c) Cura

Os corpos de prova moldados foram armazenados em câmara úmida, onde o grau de saturação se mantém acima de 95% e a temperatura a 23 ± 2 °C até a data dos ensaios de acordo com a NBR 9479.

d) Ensaio de resistência à compressão simples e medição do módulo de elasticidade

O ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS) foi executado na prensa instrumentada do LEC e de acordo com a NBR 5739. O módulo de deformação (E) foi medido no mesmo ensaio e de acordo com a NBR 8522.

O mais comum de todos os ensaios de concreto endurecido é o de resistência à compressão, em parte porque é muito fácil, e em parte, porque muitas das características desejáveis do concreto são qualitativamente relacionadas com a resistência;

mas principalmente devido à importância intrínseca da resistência à compressão do concreto em projetos estruturais. (NEVILLE, 1997, p.573).

Os resultados destes ensaios podem ser influenciados por variações em: tipo do corpo de prova; tamanho do corpo de prova; tipo de molde cura; preparação dos topos; rigidez da máquina de ensaio e velocidade de aplicação da tensão. Por esse motivo, os ensaios seguiram um procedimento predeterminado único, sem nenhuma divergência. (NEVILLE, 1997, p.573).

O ensaio de resistência à compressão de corpos de prova tratados de um modo padronizado resulta numa apresentação da qualidade potencial do concreto. Naturalmente, o concreto na estrutura pode, na realidade, ser inferior, devido, por exemplo, a adensamento inadequado, segregação ou cura insuficiente. Esses efeitos não são importantes quando se quer saber quando o concreto pode ser deformado, ou quando a obra pode ter prosseguimento, ou ainda, quando a estrutura pode ser posta em serviço. (NEVILLE, 1997, p.574).

Sabe-se que a resistência do concreto é de fundamental importância no projeto de estruturas de concreto. No entanto, qualquer tensão é acompanhada de deformação e vice-versa. Também é possível surgir deformações por outras causas além de tensões. (NEVILLE, 1997, p.413).

Como muitos outros materiais, o concreto é elástico dentro de certos limites. Um material é considerado perfeitamente elástico se surgem e desaparecem deformações imediatamente após a aplicação ou retirada de tensões. Essa definição não implica linearidade entre tensões e deformações: alguns materiais como o vidro e algumas rochas apresentam comportamento elástico não-linear com relação a tensão-deformação. (NEVILLE, 1997, p.413).

e) Ensaios de resistência à tração

Embora o concreto não seja normalmente projetado para resistir à tração, o conhecimento dessa propriedade é útil para a estimativa da carga à qual ocorre fissuração. A ausência de fissuração é muito importante para se conservar a continuidade de uma estrutura de concreto e, em muitos casos, para prevenção de corrosão da armadura. Ocorre fissuração quando surgem tensões diagonais originadas por tensões de cisalhamento, mas o caso mais freqüente de fissuração é devido à retração contida e a gradientes de temperatura. Uma avaliação da resistência à tração do concreto pode ajudar a entender o comportamento do concreto armado, mesmo que, em muitos casos, o projeto não leve em conta de forma explícita a resistência à tração. (NEVILLE, 1997, p.586).

A resistência à tração interessa também no caso de estruturas de concreto simples sujeitas a abalos sísmicos, como barragens. Outras estruturas como pavimentos rodoviários e aeroportuários, são projetados com base na resistência à flexão, que implica resistência à tração. (NEVILLE, 1997, p.587).

São três tipos de ensaios de resistência à tração: tração direta, tração na flexão e tração por compressão diametral. Segundo Neville (1997, p.587), é muito difícil a aplicação de uma força de tração pura sem excentricidades, evitando qualquer tensão secundária. Assim, foram realizados os dois outros tipos de ensaios de resistência à tração.

Ensaio de resistência a tração por compressão diametral: os ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT) utilizam também corpos-de-prova cilíndricos 10x20cm e foram realizados em acordo com a NBR 6583. Para a realização dos cálculos utilizou-se a equação $R_t = 2P/\pi dh$, onde P = carga, d = diâmetro e h = altura do corpo-de-prova.

Nesse ensaio, um corpo de prova cilíndrico de concreto, do tipo usado no ensaio de compressão, é colocado com o eixo na horizontal entre os pratos da prensa, aplicando-se carga até a ruptura por tração indireta. No entanto, imediatamente abaixo da carga, surge uma tensão de compressão muito elevada e, na prática, se colocam calços

Ensaio de resistência à tração na flexão: os ensaios de resistência à tração na flexão foram realizados de acordo com a NBR 12142. Neste ensaio, um prisma de concreto é submetido à flexão, como uma viga, com carregamento em dois pontos simétricos até a ruptura. Como a distância dos pontos de carga é 1/3 do vão, Neville (1997, p.587) qualifica o ensaio como por “carregamento nos terços”. Foi preciso adaptar um dispositivo com o objetivo de medir o deslocamento vertical da linha neutra do corpo de prova prismático, conforme mostra a Figura 3.2.

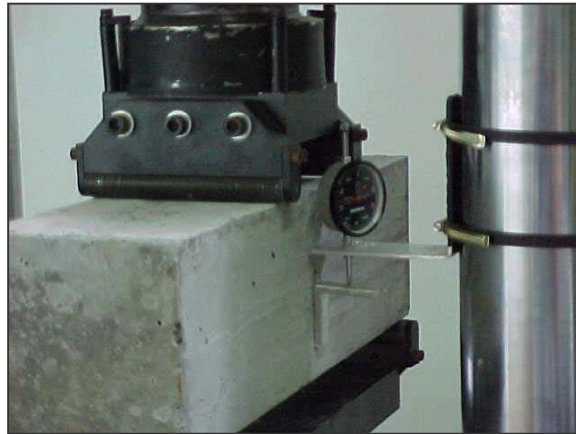


Figura 3.2 – Ensaio de resistência à tração na flexão

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os dados obtidos através dos ensaios serão tratados de forma quantitativa, ou seja, utilizando procedimentos estatísticos. De acordo com o que foi apresentado no Quadro 3.1, se buscará analisar variáveis em determinados níveis de estudo. Assim, se montará modelos gráficos capazes de apontar tendências acerca da influência do teor de fibras, comprimentos das fibras utilizados e sua relação com as características da matriz adotada.

4.1 Resistência à Compressão Simples

No gráfico 4.1 (ver Anexo 1) de resistência à compressão simples em função dos comprimentos das fibras pode-se perceber que as misturas com as fibras de comprimento C1, ou seja, 15 mm, obtiveram melhor desempenho.

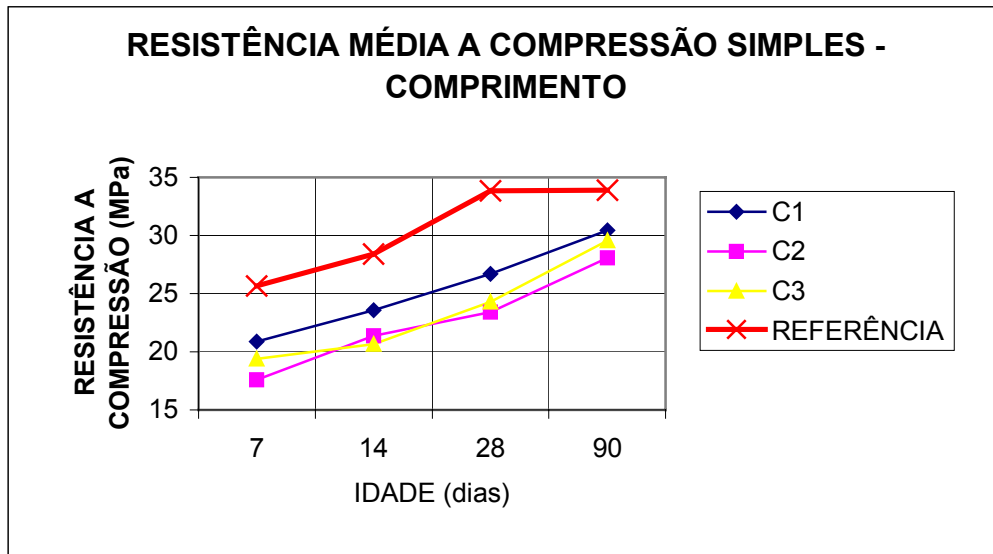


Figura 4.1 – Resistência média à compressão em função dos comprimentos

O gráfico 4.2 (ver Anexo 1), embora apresente uma certa descontinuidade, nos indica que a melhor desempenho do concreto fibroso para este tipo de solicitação se dá com as fibras de menor comprimento e em maior quantidade, ou seja, maior teor, no compósito.

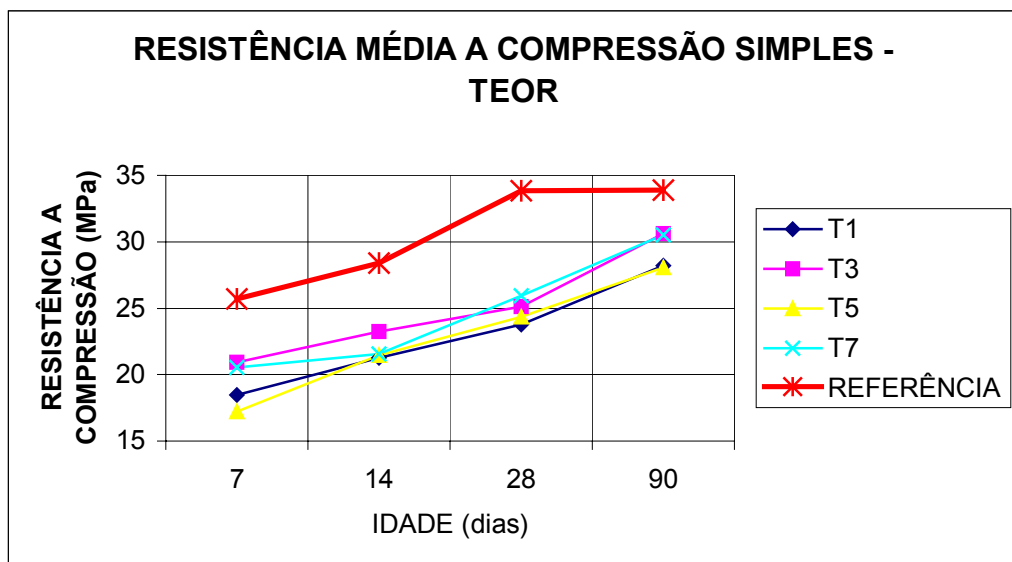


Figura 4.2 – Resistência média à compressão em função dos teores

Mheta e Monteiro (1994) afirmam que a resistência à compressão não é a mais importante contribuição do reforço com fibras no concreto. Isto pode ser facilmente identificado nos gráficos 4.1 e 4.2, onde todas as misturas reforçadas com

fibras, independentemente de teores e comprimentos, obtiveram valores de resistência a compressão inferiores aos valores da mistura de referencia.

4.2 Módulo de Elasticidade

Neville (1997, p.419) afirma que o módulo de elasticidade aumenta com a resistência do concreto, porém não existe um acordo sobre essa exata dependência. Sabe-se, apenas, que o crescimento do módulo de elasticidade é progressivamente menor do que o crescimento da resistência à compressão do concreto.

Analisando os gráficos 4.3 e 4.4 (ver Anexo 2) percebe-se que, em algumas misturas, existe uma contradição ao que Neville afirma. Isto nos leva a concluir que, durante a realização dos ensaios, deve ter havido alguma deficiência nas leituras dos resultados. No entanto, todos os valores obtidos ficaram dentro da faixa característica do módulo de elasticidade do concreto.

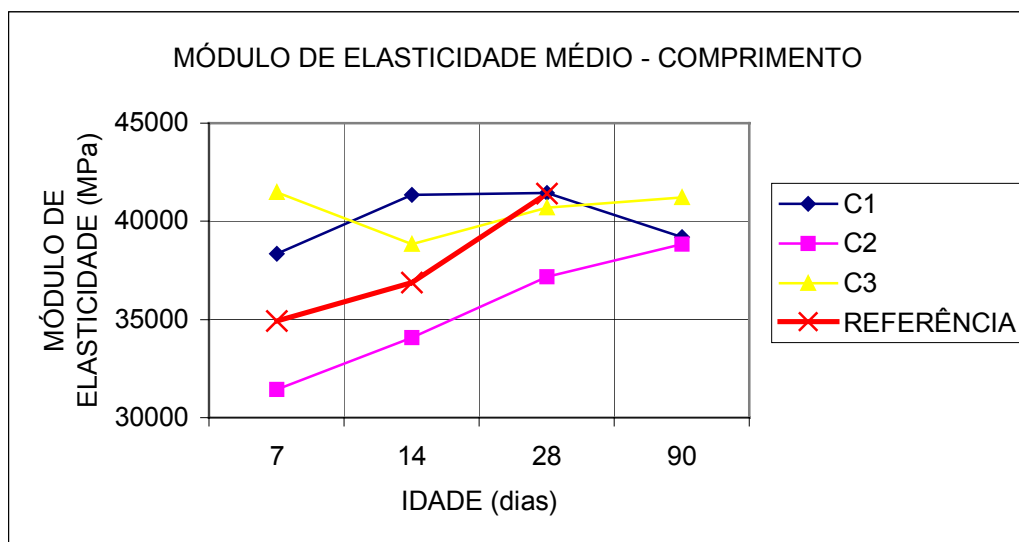


Figura 4.3 – Módulo de elasticidade médio em função dos comprimentos

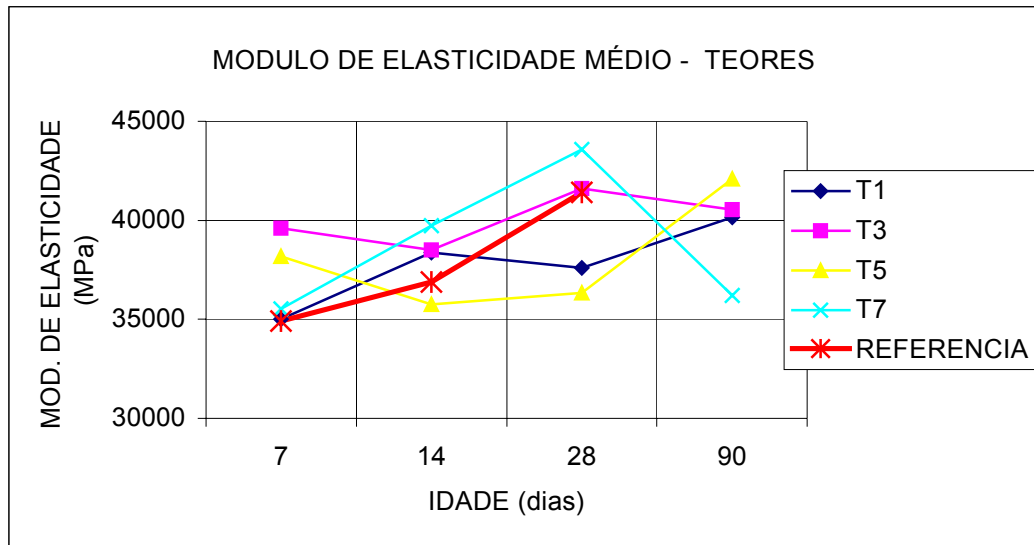


Figura 4.4 – Módulo de elasticidade médio em função dos teores

4.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os gráficos das resistências médias de tração por compressão diametral 4.5 e 4.6 (ver Anexo 3), tanto em função dos comprimentos como dos teores, evidenciam o fato de que a adição de fibras PET como material de reforço não qualificam o compósito quanto às suas características de resistência a tração, pois todas as misturas obtiveram valores inferiores ao da mistura de referência.

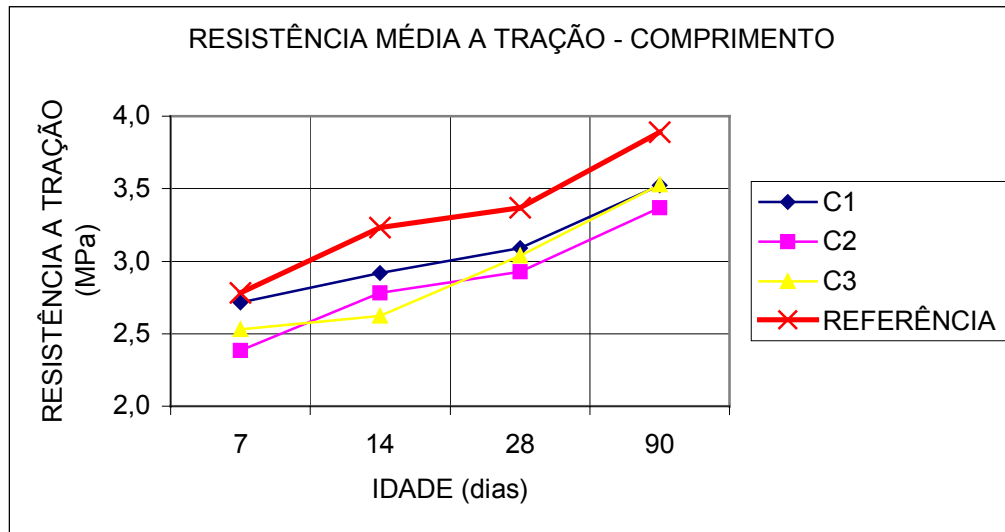


Figura 4.5 – Resistência média à tração por compressão diametral em função dos comprimentos

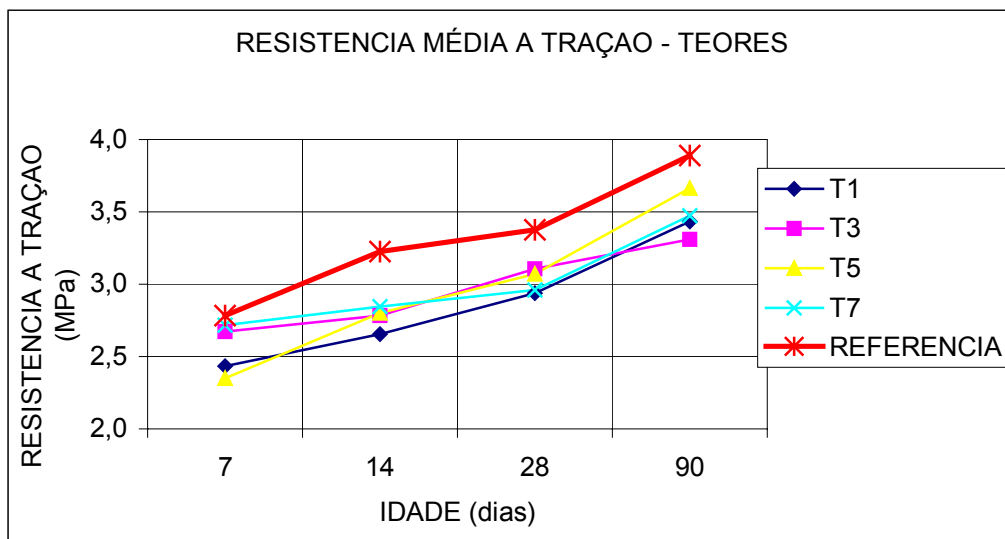


Figura 4.6 – Resistência média à tração por compressão diametral em função dos teores

Pode-se concluir também que dentre as misturas experimentais, a que obteve valor superior de resistência a tração por compressão diametral são aquelas cujo comprimento do material de reforço, ou seja, das fibras, são o comprimento C1 (15mm). Embora o gráfico 4.6, relacionado ao teor de fibras no compósito, não apresente uma tendência clara para a sua leitura, da mesma forma que o gráfico 4.2, pode-se afirmar que a

melhor performance do concreto fibroso para a solicitação a tração por compressão diametral se dá com as fibras de menor comprimento e em maior quantidade, ou seja, maior teor, no compósito.

4.4 Resistência à Flexão

No gráfico 4.7 (ver Anexo 4) dos ensaios de resistência à flexão das misturas com diferentes teores de adição de fibras é evidente a boa performance obtida nos compósitos com fibras de comprimento de 30 mm. A média da resistência a flexão no ponto do comprimento C2 sobe para 4,20 MPa.

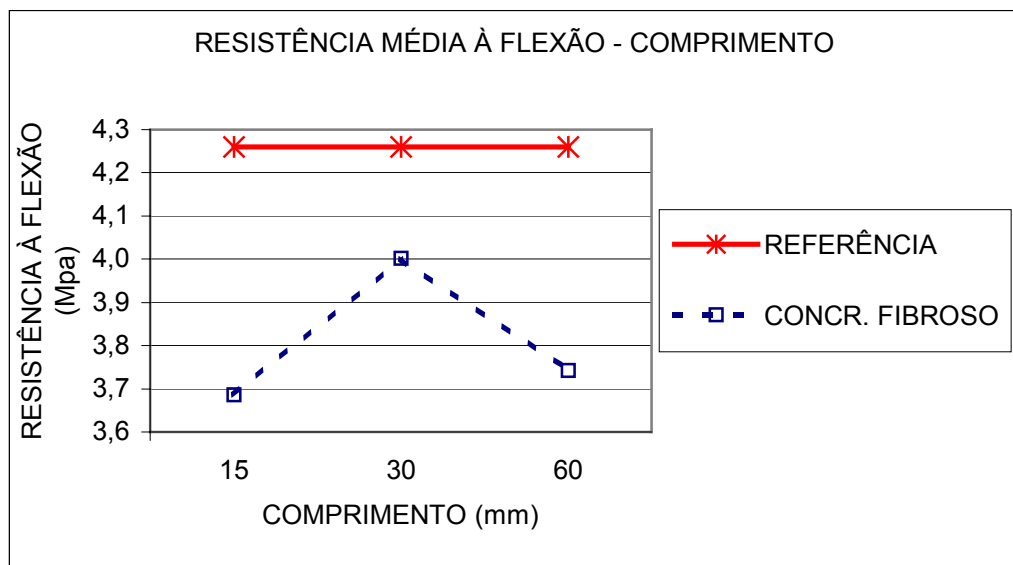


Figura 4.7 – Resistência média à flexão em função dos comprimentos

Mehta e Monteiro (1994, p.445) afirmam que a maior vantagem do concreto com fibra é a melhora da tenacidade à flexão (energia total absorvida ao ser rompido um corpo de prova à flexão). Estão relacionadas com a tenacidade à flexão as resistências ao impacto e à fadiga do concreto, as quais também são aumentadas consideravelmente. Este aumento de desempenho da tenacidade dos compostos cerâmicos fibrosos pode ser verificado no gráfico 4.8 (ver Anexo 5).

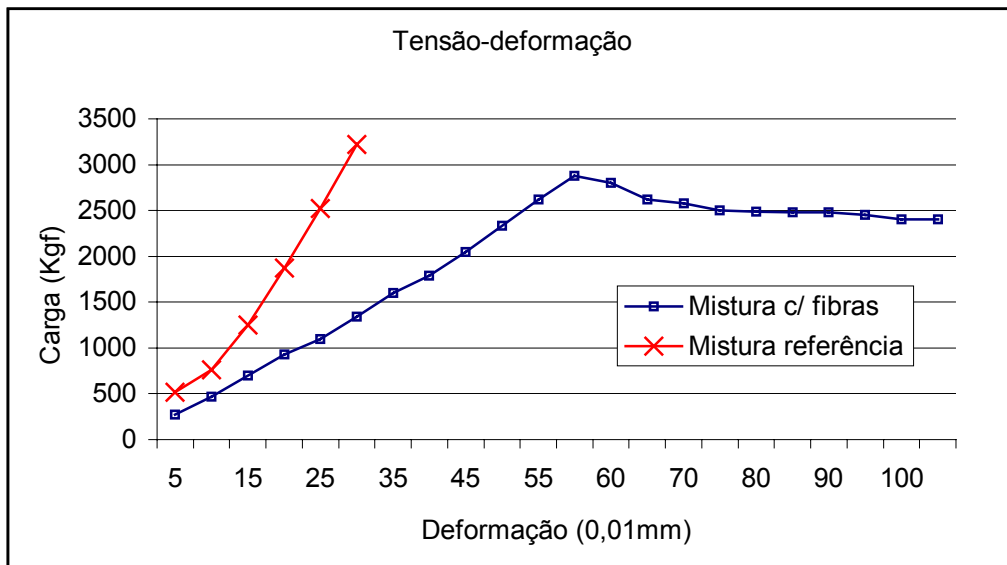


Figura 4.8 – Gráfico tensão-deformação no ensaio à flexão

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um das principais necessidades do trabalho era encontrar o ponto de equilíbrio, ou ainda, o ponto mais próximo, entre a resistência mecânica da fibra e a resistência de aderência entre a fibra e a matriz. Os ensaios nos mostraram que a grande maioria das fibras, quando tracionadas, eram “partidas”, porém permaneciam aderidas a matriz, evidenciando uma alta resistência de aderência e baixa resistência mecânica. Como a resistência mecânica à tração da fibra é um valor fixo, característico do material, seria indicado alterar o valor da resistência de aderência, ou seja, alterar o consumo de cimento da mistura.

O resultado da busca deste ponto de equilíbrio ficou mais próximo nos ensaios de resistência à flexão, onde os gráficos nos mostraram que, para este tipo de solicitação, aproxima-se do equilíbrio quando as fibras adicionadas à matriz possuem um comprimento em torno de 30 mm.

A principal melhora no desempenho de concretos reforçados com fibras se dá no pós-pico da solicitação de tensão. Conforme o gráfico 4.8, mesmo após atingir o valor máximo de tensão suportável, os concretos fibrosos continuam a suportar certa carga, diferentemente do concreto convencional. Isso porque as fibras, após o rompimento do concreto, conseguem “segurar” o material.

Esta propriedade do concreto fibroso de continuar admitindo carga mesmo após atingir a tensão máxima de ruptura o torna um material muito propício a, por exemplo, execução de pavimentos e cabeça de estacas.

O fato das misturas com fibras de comprimento de 15 mm e teor de 7000 g/m³ terem evidenciado melhor desempenho nos ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral pode ser atribuído ao fator “aderência”, ou seja, como os ensaios mostraram que as fibras não tinham deficiências quanto à sua aderência com a matriz, quanto maior o número de fibras na superfície de ruptura melhor o desempenho do concreto para estas solicitações.

Embora os resultados da utilização das fibras PET em um material compósito de concreto, dentro da faixa de teores e comprimentos estudada, não tenha elevado a resistência a compressão simples e tração por compressão diametral, a sua utilização pode ser muito favorável quando aplicada em concretos cuja finalidade não exija alta resistência, como é o caso do concreto utilizado para a execução de meio-fio, blocos, pisos, etc.

As vantagens deste material de enchimento em concreto de baixo desempenho podem ser tanto econômicas quanto ecológicas. Adicionando este material a um concreto cuja finalidade não exija alta resistência mecânica, reduzir-se-á ainda mais o consumo de cimento, pois qualquer espaço ocupado por algum outro material significa redução do teor água/cimento. Se analisarmos sob o ponto de vista ecológico, a adição destas fibras ao concreto é ainda mais vantajosa do que economicamente. Como já mencionado, o lixo de garrafas PET significa, atualmente, um grande problema para a natureza. Assim, qualquer utilização destinada a este lixo urbano significa uma grande benefício para a natureza.

A pesquisa deixa em aberto vários caminhos para a sua continuidade. Primeiramente, poderá se estudar a adição destas fibras em uma matriz com menor consumo de cimento, variando o comprimento e os teores do material de enchimento. Pode-se, também, fazer um estudo referente à durabilidade deste material dentro do concreto, sua reação perante o álcalis do cimento, ao fogo e a outros fatores ao qual este material pode

ser exposto. Além disso, é importante uma futura abordagem sobre a influência do teor de ar incorporado nas misturas, assim como um aprofundamento nas características de tenacidade deste material compósito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEPET. **Associação Brasileira dos Fabricantes de Embalagens PET**. Disponível em: www.abepet.com.br. Acesso em: nov. 2002.
- AÏTCIN, Pierre-Claude. **Concreto de alto desempenho**. Trad. Geraldo G. Serra. Ed. PINI, São Paulo, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos: Método de Ensaio**: NBR 5739. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Determinação do Módulo de Deformação. Estática e Diagrama – Tensão – Deformação: Método de Ensaio**: NBR 8522. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos**. NBR 12142. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. – **Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. NBR 7222. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. – **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**. NBR 5738. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. – **Agregados para concretos**. NBR 7211. Rio de Janeiro.
- CHERUBINO, **Distribuição Comércio e Representações LTDA**. Belo Horizonte –MG. Disponível em: www.cherubino.com.br. Acesso em: nov. 2002.
- FIGUEIREDO, A. D.; TANESI, J.; NINCE, A. A.; **Concreto com fibras de polipropileno (CFP)**. *Revista Técnica*, São Paulo, setembro de 2002. P.48.
- GOVERNO FEDERAL. Disponível em: www.gov.br. Acesso em: nov. 2002.
- METTA, K. M., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto, estrutura, propriedade dos materiais**. São Paulo: Pini, 1994. 573p.
- MODLER, Luís Eduardo et al. **Investigação das Propriedades Mecânicas de Concretos Reforçados com Fibras**. Em: V CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL, 2002, Juiz de Fora, MG.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 2^a ed.,1997.

PETRUCCI, Eladio G.R. **Concreto de Cimento Portland**. São Paulo. Ed. Globo, 1998.

SPECHT, L. P. **Comportamento de Misturas Solo-Cimento_fibra Submetidas a Carregamentos Estáticos e Dinâmicos Visando a Pavimentação**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre.

TERZIAN, Paulo. Controle de fissuras por retração plástica em pisos industriais de concreto. **Revista Técnica**, São Paulo , outubro de 2001. P.55.

ANEXOS

ANEXO 1
RESULTADO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO
SIMPLES (MPa)

Idade	TEOR 1000 g/m3			
	COMP. 1	COMP. 2	COMP. 3	MÉDIA
7 dias	20,13	14,48	20,79	18,47
14 dias	23,42	17,36	22,96	21,25
28 dias	26,16	18,61	26,53	23,77
90 dias	30,51	22,19	31,95	28,22

Idade	TEOR 3000 g/m3			
	COMP. 1	COMP. 2	COMP. 3	MÉDIA
7 dias	20,51	21,28	20,93	20,91
14 dias	25,02	23,43	21,33	23,26
28 dias	27,06	24,38	23,97	25,14
90 dias	33,59	27,72	30,53	30,61

Idade	TEOR 5000 g/m3			
	COMP. 1	COMP. 2	COMP. 3	MÉDIA
7 dias	22,33	14,09	15,29	17,24
14 dias	23,85	21,95	18,51	21,44
28 dias	28,15	23,99	20,91	24,35
90 dias	28,76	29,78	25,69	28,08

Idade	TEOR 7000 g/m3			
	COMP. 1	COMP. 2	COMP. 3	MÉDIA
7 dias	20,52	20,57	20,57	20,55
14 dias	22,00	22,82	19,80	21,54
28 dias	25,50	26,55	25,77	25,94
90 dias	28,90	32,53	30,10	30,51

Idade	MÉDIAS		
	COMP. 1	COMP. 2	COMP. 3
7 dias	20,87	17,60	19,39
14 dias	23,57	21,39	20,65
28 dias	26,72	23,38	24,29
90 dias	30,44	28,06	29,57

Idade	REFERÊNCIA
7 dias	25,68
14 dias	28,40
28 dias	33,85
90 dias	33,89

ANEXO 2

RESULTADO DOS ENSAIOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

(MPa)

<i>Idade</i>	TEOR 1000 g/m3			
	COMP. 1	COMP. 2	COMP. 3	MÉDIAS
7 dias	32077,14	28234,00	44767,50	35026,21
14 dias	47050,00	25678,00	42357,50	38361,83
28 dias	41628,75	32705,00	38500,00	37611,25
90 dias	42994,75	31388,75	46098,33	40160,61

<i>Idade</i>	TEOR 3000 g/m3			
	COMP. 1	COMP. 2	COMP. 3	MÉDIAS
7 dias	37410,00	37900,00	43515,00	39608,33
14 dias	45098,75	33732,00	36680,00	38503,58
28 dias	40311,25	37254,00	47300,00	41621,75
90 dias	41647,50	40706,00	39301,25	40551,58

<i>Idade</i>	TEOR 5000 g/m3			
	COMP. 1	COMP. 2	COMP. 3	MÉDIAS
7 dias	47385,00	24828,00	42360,00	38191,00
14 dias	36605,00	37043,33	33620,00	35756,11
28 dias	38228,33	35376,00	35387,50	36330,61
90 dias	38553,75	42370,00	45386,25	42103,33

<i>Idade</i>	TEOR 7000 g/m3			
	COMP. 1	COMP. 2	COMP. 3	MÉDIAS
7 dias	36578,00	34776,25	35216,00	35523,42
14 dias	36650,00	39901,25	42650,00	39733,75
28 dias	45651,43	43422,50	41637,50	43570,48
90 dias	33568,75	40920,00	34125,00	36204,58

<i>Idade</i>	MÉDIAS		
	COMP. 1	COMP. 2	COMP. 3
7 dias	38362,54	31434,56	41464,63
14 dias	41350,94	34088,65	38826,88
28 dias	41454,94	37189,38	40706,25
90 dias	39191,19	38846,19	41227,71

<i>Idade</i>	REFERÊNCIA
7 dias	34912,50
14 dias	36875,00
28 dias	41421,88

ANEXO 3

**RESULTADO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR
COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)**

<i>Idade</i>		TEOR 1000 g/m3			
		COMP. 1	COMP. 2	COMP. 3	MÉDIA
7	<i>dias</i>	2,68	1,97	2,66	2,43
14	<i>dias</i>	2,78	2,26	2,93	2,66
28	<i>dias</i>	3,19	2,22	3,42	2,94
90	<i>dias</i>	3,30	2,92	4,09	3,44

<i>Idade</i>		TEOR 3000 g/m3			
		COMP. 1	COMP. 2	COMP. 3	MÉDIA
7	<i>dias</i>	2,72	2,65	2,64	2,67
14	<i>dias</i>	2,97	2,95	2,43	2,78
28	<i>dias</i>	3,21	3,04	3,07	3,11
90	<i>dias</i>	3,36	3,24	3,33	3,31

<i>Idade</i>		TEOR 5000 g/m3			
		COMP. 1	COMP. 2	COMP. 3	MÉDIA
7	<i>dias</i>	2,66	2,31	2,08	2,35
14	<i>dias</i>	3,04	3,02	2,36	2,80
28	<i>dias</i>	3,35	3,11	2,74	3,07
90	<i>dias</i>	3,96	3,57	3,47	3,67

<i>Idade</i>		TEOR 7000 g/m3			
		COMP. 1	COMP. 2	COMP. 3	MÉDIA
7	<i>dias</i>	2,80	2,61	2,75	2,72
14	<i>dias</i>	2,88	2,89	2,77	2,85
28	<i>dias</i>	2,61	3,33	2,93	2,96
90	<i>dias</i>	3,47	3,74	3,22	3,48

<i>Idade</i>		MÉDIAS		
		COMP. 1	COMP. 2	COMP. 3
7	<i>dias</i>	2,72	2,38	2,53
14	<i>dias</i>	2,92	2,78	2,62
28	<i>dias</i>	3,09	2,93	3,04
90	<i>dias</i>	3,52	3,37	3,53

<i>Idade</i>		REFERÊN.
7	<i>dias</i>	2,78
14	<i>dias</i>	3,23
28	<i>dias</i>	3,37
90	<i>dias</i>	3,89

ANEXO 4

RESULTADO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO (MPa)

TEOR (g/cm³)	COMP.(mm)	RTF (Mpa)		RTF MEDIA (Mpa)
0	0	4,56	3,95	4,26
1000	15	4,08	4,11	4,10
1000	30	3,77	3,27	3,52
1000	60	3,22	4,19	3,71
3000	15	3,73	3,26	3,50
3000	30	3,9	4,55	4,23
3000	60	4,02	4,19	4,11
5000	15	3,64	3,83	3,74
5000	30	3,94	3,88	3,91
5000	60	3,01	3,57	3,29
7000	15	3,32	3,52	3,42
7000	30	4,34	4,36	4,35
7000	60	4,12	3,62	3,87

ANEXO 5

**RESULTADO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO TENSÃO-
DEFORMAÇÃO DE UMA MISTURA E DA REFERÊNCIA**

Concreto fibroso

L Desl.	L Carga (kgf)	L Carga (kN)	T Flexão (MPa)
0	0	0	0,00
5	270	27	0,35
10	470	47	0,61
15	700	70	0,92
20	930	93	1,22
25	1100	110	1,44
30	1340	134	1,75
35	1600	160	2,09
40	1790	179	2,34
45	2050	205	2,68
50	2330	233	3,05
55	2620	262	3,43
58	2880	288	3,77
60	2800	280	3,66
65	2620	262	3,43
70	2580	258	3,37
75	2500	250	3,27
80	2490	249	3,26
85	2480	248	3,24
90	2480	248	3,24
95	2450	245	3,20
100	2400	240	3,14
105	2400	240	3,14

Concreto convencional

L Desl.	L Carga (kgf)	L Carga (kN)	T Flexão (MPa)
0	0	0	0,00
5	520	52	0,68
10	760	76	0,99
15	1250	125	1,64
20	1870	187	2,45
25	2520	252	3,30
30	3220	322	4,21

