

UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO
GRANDE DO SUL – UNIJUÍ
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA – DETEC
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ASPECTOS DO COMPORTAMENTO E DA
DEGRADAÇÃO DE MATRIZES DE CONCRETO DE
CIMENTO PORTLAND REFORÇADOS COM
FIBRAS PROVENIENTES DA RECICLAGEM DE
GARRAFA PET**

EDERLI MARANGON

Trabalho de Conclusão do Curso

Ijuí-RS, março de 2004

EDERLI MARANGON

**ASPECTOS DO COMPORTAMENTO E DA
DEGRADAÇÃO DE MATRIZES DE CONCRETO DE
CIMENTO PORTLAND REFORÇADOS COM FIBRAS
PROVENIENTES DA RECICLAGEM DE GARRAFA PET**

Trabalho de Conclusão do Curso

Trabalho apresentado ao corpo docente do Programa de Graduação em Engenharia Civil do Curso de Engenharia Civil da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para aprovação na disciplina e formação de nível superior no curso de Engenharia Civil.

Orientadores:

Luciano Pivoto Specht

Luis Eduardo Modler

Ijuí

2004

EDERLI MARANGON

**ASPECTOS DO COMPORTAMENTO E DA DEGRADAÇÃO DE
MATRIZES DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND
REFORÇADOS COM FIBRAS PROVENIENTES DA
RECICLAGEM DE GARRAFA PET**

Trabalho de Conclusão do Curso. Aprovação na disciplina e formação de Nível
Superior no curso de Engenharia Civil
Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul
Aprovado em Março de 2004

M. Eng. Prof. Luís Eduardo Modler
Orientador

M. Eng. Prof. Luciano Pivoto Specht
Co-Orientador/Banca Examinadora

M. Eng. Prof. Francisco Ripoli Filho
Banca Examinadora

M. Eng. Prof. Luís Eduardo Modler
Coordenador do Curso de Engenharia Civil

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores, Luis Eduardo Modler e Luciano Pivoto Specht, pelo incentivo, motivação, dedicação e confiança conferida na elaboração deste trabalho;

Agradeço aos meus professores, responsáveis pela minha formação profissional;

Agradeço a todos os meus colegas, em especial Thiago Rozek, Gláucio Moamar Walker, Fabiana Colla e Augusto da Rosa pelo apoio, compreensão e estímulo;

Agradeço aos laboratoristas, Ivan e Salete pelo auxílio na execução dos ensaios;

Agradeço aos meus pais, Pedro e Ironita, minha irmã Maiara, pelo incentivo e confiança em mim depositado.

RESUMO

A produção de lixo nas cidades brasileiras é um fenômeno inevitável, que ocorre diariamente e em composições que dependem do tamanho da população e do seu desenvolvimento econômico. O tratamento dos resíduos urbanos, apesar de ser uma tarefa de difícil execução, deve ser priorizada a cada dia das gestões municipais. A utilização de materiais reciclados na construção pode se configurar num importante canal de eliminação de resíduos urbanos que, de outra forma seriam depositados em qualquer lugar, aumentando o custo de deposição e tratamento, afetando o meio ambiente de forma agressiva e sem controle. Neste será avaliado o comportamento do concreto, com adição de fibras de garrafa PET (polietileno tereftalato). A pesquisa estuda as propriedades adquiridas pelo concreto produzido com diferentes teores de adição de fibras em diferentes traços de concreto. O estudo foi proposto com o objetivo de avaliar o comportamento dos materiais cimentados reforçados com fibras. Os ensaios realizados foram: caracterização do elemento de reforço (fibras PET), trabalhabilidade, resistência à compressão simples e resistência de tração na flexão. A partir desses ensaios realizados obteve-se valores de tenacidade e ductilidade. Dos ensaios realizados nota-se ganho de energia do material com fibra, sendo um material dúctil e não havendo até então processo de degradação das fibras.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	08
Lista de Quadro.....	09
Lista de Tabelas.....	10
Lista de Símbolos.....	11
1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Delimitação do tema	13
1.2 Formulação da questão de estudo	13
1.3 Definição dos objetos do estudo.....	14
1.3.1 Objetivo geral	14
1.3.2 Objetivos específicos.....	14
1.4 Justificativa.....	15
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1 Questão ambiental	17
2.1.1 Lixo	17
2.1.2 Reciclagem	19
2.1.3 Plásticos.....	21
2.1.4 PET (Polietileno Tereftalato)	28
2.2 Materiais compósitos	32
2.2.1 Matriz	34
2.2.1.1 Agregados.....	37
2.2.1.2 Cimento Portland.....	39

2.2.2 Fibras	40
2.2.3 Compósitos	41
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	43
3.2 Plano de coleta de dados.....	43
3.3 Materiais utilizados.....	45
3.3.1 Matriz	46
3.3.1.1 Aglomerante.....	46
3.3.1.2 Agregados.....	47
3.3.2 Caracterização Mecânica das Fibras.....	47
3.4 Preparação das amostras	51
3.5 Métodos de ensaios	52
3.5.1 Trabalhabilidade.....	52
3.5.2 Resistência à compressão	53
3.5.3 Resistência à tração na flexão	54
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	56
4.1 Trabalhabilidade	56
4.2 Resistência a Compressão Simples	57
4.3 Módulo de Elasticidade.....	59
4.4 Resistência à Tração na Flexão.....	60
4.5 Tenacidade	65
4.6 Ductilidade.....	65
4.7 Durabilidade.....	66
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
5.1 Conclusões.....	68
5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	70
6. BIBLIOGRAFIA	71
Anexos.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Potencial seletivo do plástico.....	27
Figura 02 - Disposição fibra/fissura.....	33
Figura 03 - Fibras de Garrafa PET.....	45
Figura 04 - Prensa utilizada para ensaio das Fibras.....	48
Figura 05 - Ruptura da fibra.....	49
Figura 06 - Deformação da fibra.....	50
Figura 07 - Força <i>versus</i> Deformação.....	50
Figura 08 - Prensa Compressão Axial.....	54
Figura 09 - Dispositivo adaptado para as leituras do deslocamento da linha neutra.....	55
Figura 10 - Trabalhabilidade.....	57
Figura 11 - Resistência a Compressão Simples Traço 9 MPa.....	58
Figura 12 - Resistência a Compressão Simples Traço 13 MPa.....	58
Figura 13 - Módulo de elasticidade M1.....	59
Figura 14 - Módulo de elasticidade M2.....	60
Figura 15 - Resistência à tração na flexão de pico traço M1.....	61
Figura 16 - Resistência à tração na flexão de pico traço M2.....	62
Figura 17 - Resistência à flexão pós-pico Traço M1- TF 0 e 250 g/m ³	63
Figura 18 - Evolução da Fissura.....	64
Figura 19 - Comparação da fibra original com a fibra retirada do concreto..	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Identificação universal dos termoplásticos.....	22
Quadro 2 - Utilização do plástico de acordo com sua resina.....	24
Quadro 3 - Tipos de Cimento Portland (CP).....	39
Quadro 4 - Variáveis e Idades Estudadas.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Utilização do plástico no Brasil.....	23
Tabela 2 - Consumo do plástico no Brasil.....	27
Tabela 3 - Características das matrizes.....	46
Tabela 4 - Amostras Incolores.....	48
Tabela 5 - Amostras Verdes.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PET – Polietileno Tereftalato

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas

ABIQUIM – Associação Brasileira da Indústria Química

DMT – Dimetil Tereftalato

PTA – Ácido Tereftalato

BHET – Bihidroxietil Tereftalato

Tg - Temperatura de Transição Vítrea

CHDM – Ciclohexano Dimetanol

PETG – Polietileno Tereftalato Glicol

ft – Resistência à Tração

fs – Resistência de Aderência

l - Comprimento

d - Espessura

CP – Cimento Portland

Z - Pozolana

F - Fíler

ARI – Alta Resistência Inicial

RS – Resistência a Sulfatos

RCS – Resistência a Compressão Simples

MPa – Mega Pascal

f_{ck} – Resistência Característica de Projeto do Concreto

LEC – Laboratório de Engenharia Civil

NBR – Norma Brasileira

F_t – Tensão de Ruptura

ε - Deslocamento

ϵ - Deformação

E – Módulo de Elasticidade

Kgf – Kilo Grama Força

M1 – Traço f_{ck} 9 MPa

M2 – Traço f_{ck} 13 MPa

TF – Teor de Fibra

σ - Tensão

IF – Índice de Fragilidade

q_{rup} – Tensão de Ruptura

q_{ult} – Tensão Última

T_f – Tração na Flexão

P – Carga (kgf)

d – Distância entre apoios

l – Comprimento da Vigota

CAD – Concreto de Alto Desempenho

1. INTRODUÇÃO

1.1 Delimitação do tema

Com o intuito de obter-se um diagnóstico e a compreensão do mecanismo de atuação e degradação de reforços plásticos reciclados nas propriedades do concreto de cimento Portland, leva este trabalho a desenvolver uma inspeção sobre as características das matrizes reforçadas.

1.2 Formulação da questão de estudo

Quais e como as propriedades são alteradas com adição de fibras plásticas de garrafa PET (polietileno tereftalato) recicladas em concreto de cimento Portland considerando as variáveis tempo de cura e teor de adição?

1.3 Definição dos objetos do estudo

1.3.1 Objetivo geral

Estudar o comportamento de concretos reforçados com fibras plásticas do tipo PET nas propriedades de concretos, levando em consideração o tempo de cura e os teores de adição bem como efeito de degradação da fibra dentro do concreto.

1.3.2 Objetivos específicos

- ✓ Realizar a caracterização mecânica dos elementos de reforço.
- ✓ Verificar a influência de diferentes teores de fibras PET nas propriedades de concretos pré-dosados.
- ✓ Verificar a constância das propriedades mecânicas do compósito levando em conta o efeito de degradação dos reforços.
- ✓ Analisar graficamente as tendências de comportamento das misturas concreto/fibra PET.

1.4 Justificativa

Ao verificarmos fatos da história, nos encontramos hoje em uma situação sem precedentes com relação ao lixo: nossos espaços de reserva estão diminuindo e a Terra parece que está se tornando pequena demais para a crescente população mundial. A pressão do homem sobre a Terra é cada vez maior, causando desequilíbrio em seus ecossistemas, afetando até mesmo a biodiversidade das espécies.

A utilização de materiais reciclados na construção civil pode se configurar num importante canal de eliminação de resíduos urbanos que, de outra forma, seriam depositados em qualquer lugar aumentando o custo de deposição e tratamento, afetando o meio ambiente de forma agressiva e sem controle.

O concreto de cimento Portland tem provado ser o material mais adequado para estruturas e o mais utilizados em construções; é também considerado um material com custo acessível e de grande facilidade de moldagem.

Vários tipos de fibras podem ser adicionados no concreto, tais como fibras de aço, fibras de vidro, fibras sintéticas e fibras naturais. O concreto com 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 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.

Para este melhoramento podem-se utilizar diversos tipos de reforços solicitados no estado pós-fissuração contribuindo de forma mais efetiva na resistência e durabilidade do material.

Torna-se bastante atraente a possibilidade de melhorar as propriedades do concreto utilizando fibras provenientes de garrafas PET. Está-se aliando um benefício ambiental com a melhoria de um material importantíssimo nas obras de construção civil.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Questão ambiental

2.1.1 Lixo

Segundo Grippi (2001) o lixo é matéria-prima fora do lugar. O tratamento do lixo doméstico, além de ser uma questão com implicações tecnológicas, é antes de tudo uma questão cultural.

A virada do século vem desenvolvendo várias novidades com relação ao gerenciamento ambiental, principalmente o lixo, onde os espaços físicos estão ficando cada vez mais escassos para sua disposição causando sérios problemas à humanidade. O assunto da reutilização de materiais pelo mundo, é bastante antigo. No início do século passado, com o incremento da indústria gráfica, o papel já era reciclado, os papéis de segunda mão passavam por processos industriais sucessivos que os tornavam perfeitamente reutilizáveis.

Grippi comenta que nos últimos anos, o Brasil mudou muito de lixo. O crescimento acelerado das cidades e ao mesmo tempo as mudanças de consumo das pessoas trouxeram fatores que vem gerando um lixo muito diferente daqueles que eram produzidos tempos atrás. O lixo atual é diferente em quantidade e qualidade, em volume e em composição. A industrialização traz consigo naturalmente materiais a serem descartados, assim como o aumento no consumo atrelado ao crescimento populacional gera cada vez mais lixo para ser descartado. O fato de o homem existir traz consigo a existência do lixo na mesma proporção.

A população brasileira (160 milhões de habitantes) produz diariamente 240.000 toneladas de lixo. Cada brasileiro hoje gera, em média, 500 g de lixo por dia, ou seja, 100.000 toneladas correspondem ao lixo domiciliar em todo o país. Segundo dados do IBGE 80% da disposição final do lixo brasileiro é feita em vazadouros a céu aberto, sendo o pior cenário o da região Nordeste. Já a região brasileira que mais tem fomentado a reciclagem é a Sudeste, mesmo assim com 1,1% de todo o lixo produzido no país (UNIJUÍ, 2002).

Esta forma de dispor o lixo provoca poluição do solo, da água e do ar, além de atrair ratos, baratas, moscas e outros vetores de doenças infecciosas e parasitas, causando, enfim, a degradação ambiental e social. Um ideal humano seria não produzir resíduos. Na realidade, produzimos grande quantidade destes resíduos sólidos, o que torna necessário e urgente um gerenciamento adequado, porém, mais importante que tratá-los, deve ser a conscientização das pessoas no sentido de diminuir a geração dos mesmos (UNIJUÍ).

Dessa forma pode-se perceber que ainda há muito por se fazer no Brasil para que bons exemplos sustentáveis possam ser mostrados.

Alguns municípios brasileiros apresentam verdadeiras mazelas ambientais com relação ao gerenciamento do seu lixo urbano. Talvez a educação ambiental possa ajudar na reversão deste quadro, pois com a cobrança e a pressão cada vez maiores da sociedade os municípios devem repriorizar seus investimentos em prol do meio ambiente e passar para um processo de atualização mais responsável (GRIPPI).

2.1.2 Reciclagem

Grippi comenta que os estudiosos da reciclagem estão cada vez mais preocupados com a quantidade de lixo que diariamente é enviada desnecessariamente aos aterros sanitários tecnicamente ditos, pois, como é sabido pelas estatísticas, grande parte dos municípios brasileiros operam com verdadeiros e vergonhosos lixões. Sabe-se efetivamente que num período médio de 15 anos ocorre a degradação total de produtos crus e degradáveis, após 15 anos, o nível de degradação é praticamente nulo e depende de fatores que não estão disponíveis no aterro sanitário para que o processo de degradação continue.

Aplicada aos objetos produzidos pelo ser humano, a reciclagem de materiais refere-se ao aproveitamento de substâncias que, já tendo sido empregadas na constituição de um produto, são novamente utilizadas (também num tempo posterior) para a fabricação de outro. Neste contexto, a reciclagem implica na aplicação de processos de transformação, sejam eles industriais ou artesanais. Como na maioria das atividades humanas, depende de uma disposição para ser realmente efetiva (PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO, 1999).

Quantificando os tipos de resíduos pelo seu volume, existe uma relação de 55% de papel para 12% de plásticos (GRIPPI).

O uso de embalagens de plásticos permitiu, comparativamente a outras embalagens tradicionais como vidros e latas, uma redução importante na ocupação de espaço nos aterros, tendo em vista que 28 gramas de plásticos equivalem a 1 kg dos demais resíduos em termos de ocupação de espaço. Essa pesquisa, divulgada pela Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUIM), foi realizada com base na análise de amostras de resíduos removidos de aterros sanitários até 30 metros de profundidade, onde foram encontrados jornais, revistas, listas telefônicas, plásticos de toda ordem e resíduos de alimentos. Foram encontrados jornais da década de 1950 totalmente intactos, sem que tenham sofrido o processo da biodegradabilidade, como era esperado.

Os plásticos são um tipo de resíduo que inclui uma variedade de polímeros com características químicas e estruturais bem diferenciadas, que podem dificultar a reciclagem, por exigir uma separação mais detalhada, a fim de evitar que plásticos não compatíveis sejam processados em conjunto. Além disto, ainda há lacunas a serem preenchidas nas etapas da reciclagem de alguns tipos de plásticos ou de misturas dos mesmos. Outro fator a ser analisado é a contaminação que ocorre, principalmente quando não há coleta seletiva, levando à necessidade de lavagem que, por sua vez, gera resíduos líquidos (PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO).

Considera-se a reciclagem como uma das etapas essenciais no gerenciamento integrado dos resíduos sólidos de uma comunidade. Trata-se de uma das formas complementares de minimização desses resíduos (junto com a redução na fonte e reutilização), mas pode ser também considerada

como um modo de tratamento dos resíduos. Na prática, consiste em se encaminhar, para unidades específicas de processamento, objetos que iriam para deposição final, correta ou não. Em virtude da variabilidade dos materiais presentes, a reciclagem acarreta a necessidade de separação dos seus diversos tipos, o que pode ocorrer em diferentes graus e momentos (PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO).

Deve-se, portanto, reutilizar todos os materiais possíveis e reciclar ao máximo, comprar alimentos somente os que sejam necessários para não haver desperdícios, procurar adquirir produtos cuja embalagem seja reciclável ou que possam gerar volumes menores nos aterros (GRIPPI).

2.1.3 Plásticos

O inglês Alexander Parkes produziu o primeiro plástico em 1862. Rapidamente o plástico tornou-se um dos maiores fenômenos da era industrial, garantindo mais durabilidade e leveza. Mas como em sua maioria não é biodegradável, tornou-se alvo de críticas quanto ao seu despejo em aterros, que crescem junto com explosão populacional. A reciclagem de plástico começou a ser realizada pelas próprias indústrias, para o reaproveitamento de suas perdas de produção. Quando o material passou a ser recuperado em maior quantidade, separado do lixo comum, formou-se um novo mercado, absorvendo tecnologias para possibilitar a produção de artigos com percentuais cada vez maior de plástico reciclado.

Produzido principalmente a partir do petróleo, o plástico é um dos mais recentes materiais utilizado pelo homem, mas sua história teve

início há milhões de anos. Variações climáticas, tempestades, terremotos e erosões causaram o soterramento de resíduos de animais e plantas, depositados no fundo de mares e lagos de água salgada. Foram sendo acumuladas camadas de sedimentos, e desse processo resultou no aparecimento de um escuro óleo de pedra, conhecido como petróleo. Como uma grande alternativa para a substituição de outros materiais escassos ou com custos mais elevados, o plástico é utilizado em quase todos os setores da indústria, principalmente por sua versatilidade (GRIPPI).

As características de alta resistência e leveza do plástico permitiram o seu aproveitamento em uma gama tão extensa de produtos que hoje a humanidade praticamente não poderia imaginar-se sem ele. O plástico é também conhecido como Termoplástico, pela sua facilidade de moldagem industrial ao sofrer aquecimento e solidificando-se após o resfriamento. A identificação universal dos termoplásticos está apresentada no quadro 1.

Quadro 1
Identificação universal dos termoplásticos

1	PET	Polietileno Tereftalato
2	PEAD	Polietileno de Alta Densidade
3	PVC	Policloreto de Vinila
4	PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
5	PP	Polipropileno
6	PS	Poliestireno
7	OT	Outros plásticos especiais de engenharia

Fonte: GRIPPI 2001.

O plástico é utilizado em quase todos os setores da economia, como: construção civil, lazer, telecomunicações, indústrias eletroeletrônica, automobilística, médico-hospitalar e no transporte de energia. Atualmente,

o setor de embalagens é o que mais se destaca na utilização do plástico. Aproximadamente 30% das resinas plásticas consumidas no Brasil destinam-se a indústria de embalagens (GRIPPI). A tabela 1 mostra a utilização de plástico no Brasil.

Tabela 1
Utilização do plástico no Brasil

Embalagens	30%
Automobilística	20%
Eletroeletrônica	15%
Construção	15%
Têxtil	15%
Outras	5%

Fonte: GRIPPI 2001.

Os plásticos de engenharia apresentam módulo elástico elevado a temperaturas relativamente altas, com ampla oportunidade de substituição dos materiais tradicionais, pelos seguintes motivos: peso reduzido, comparado a cerâmica e metais; facilidade de fabricação e processamento; eliminação de tratamento anti-corrosivo; alta resistência ao impacto; bom isolamento elétrico; menor custo energético de fabricação e transformação; e custo de acabamento reduzido (MANO 1991).

Nesses polímeros, é possível observar a relação que existe entre a sua estrutura química e as propriedades apresentadas. Assim, todos os plásticos de engenharia são termoplásticos, isto é, são polímeros não-reticulados cuja fusibilidade permite um fácil processamento. Todos apresentam uma boa resistência mecânica, com módulo de elasticidade alto,

quer dizer, são rígidos à temperaturas ambiente e sua estrutura permite ordenação interna, que se reflete na cristalinidade e conseqüentemente, no reforço das propriedades mecânicas e resistência a reagentes químicos e solventes (MANO).

O quadro 2 apresenta as utilizações mais comuns de cada tipo de resina.

Quadro 2
Utilização do plástico de acordo com sua resina

1	PET	Frasco para refrigerantes.
2	PEAD	Utilidade domestica e produtos de limpeza.
3	PVC	Tubos e conexões, frascos de água mineral
4	PEBD	Sacos de lixo e embalagens flexíveis.
5	PP	Autopeças, fios têxteis, potes em geral.
6	PS	Copos descartáveis.
7	OT	CDs e eletrodomésticos.

Fonte: GRIPPI 2001.

Apesar de sua recente história, a industria do plástico é um dos setores da economia que mais se desenvolveu nos últimos anos em todo o mundo. No Brasil, a produção desse material apresenta um número expressivo. Mais de 6 mil empresas transformadoras de plásticos no mercado nacional, gerando em torno de 200 mil empregos diretos, e o consumo anual e crescente de mais de 4 milhões de toneladas de resinas termoplásticas (GRIPPI).

Os plásticos de engenharia de uso geral são conhecidos há algum tempo, alguns já produzidos em larga escala há mais de 20 anos. O primeiro desses materiais, anunciado pela DuPont em 1958, foi o poliacetal, ou polioximetileno, cujas características excepcionais para certas aplicações até então não foram superadas (MANO).

Não obstante os benefícios do plástico, a maior crítica em sua utilização é em relação à sua baixíssima biodegradabilidade ambiental. Uma garrafa de água mineral jogada no meio ambiente poderá ficar ali intacta por mais de 100 anos (GRIPPI).

Segundo Grippi a preocupação mundial com a preservação do meio ambiente gerou na década de 1970 o despertar da sociedade para o reaproveitamento dos resíduos sólidos, principalmente os urbanos, no qual o plástico se inclui. Para atender a essa necessidade, foram desenvolvidos programas de conscientização que acabaram por introduzir novos conceitos ambientais, difundindo a importância da reciclagem do plástico. Cada vez mais a sociedade envolvida com a produção do plástico vem considerando a preservação do meio ambiente como uma das questões fundamentais em seus princípios. Ao contrário do que se imagina, a reciclagem de plástico no Brasil é feita desde o início de sua produção.

Conforme Grippi, as formas de reciclagem dos plásticos dividem-se em três:

- ✓ A reciclagem mecânica que é a conversão dos resíduos plásticos industriais e pós-consumo em grânulos, que podem ser reutilizados na produção de sacos de lixo, solados, pisos, mangueiras, componentes de automóveis, fibras, utensílios domésticos, etc.

- ✓ A reciclagem energética consiste no reaproveitamento da energia gerada pela incineração do plástico, dentro de padrões adequados não causando danos ao meio ambiente. Esta queima gera energia, gás e vapor que são aproveitados no próprio processo industrial.

- ✓ Na reciclagem química, existem vários processos para este tipo de reciclagem, sendo que atualmente o que se encontra em estágios mais adiantados de desenvolvimento é a pirólise. Este processo consiste na quebra molecular por aquecimento, transformando o plástico em óleo e gases, sendo estes novamente utilizados como matéria-prima na indústria petroquímica.

Na figura 1 apresenta o potencial de seleção do plástico no Brasil.

O consumo de plástico no Brasil, apesar da recessão dos últimos dois anos, vem crescendo. A tendência é de aceleração do consumo, na medida em que houver a crescente retomada do crescimento econômico do país conforme apresentado na tabela 2 (GRIPPI).

Figura 1
Potencial seletivo do plástico

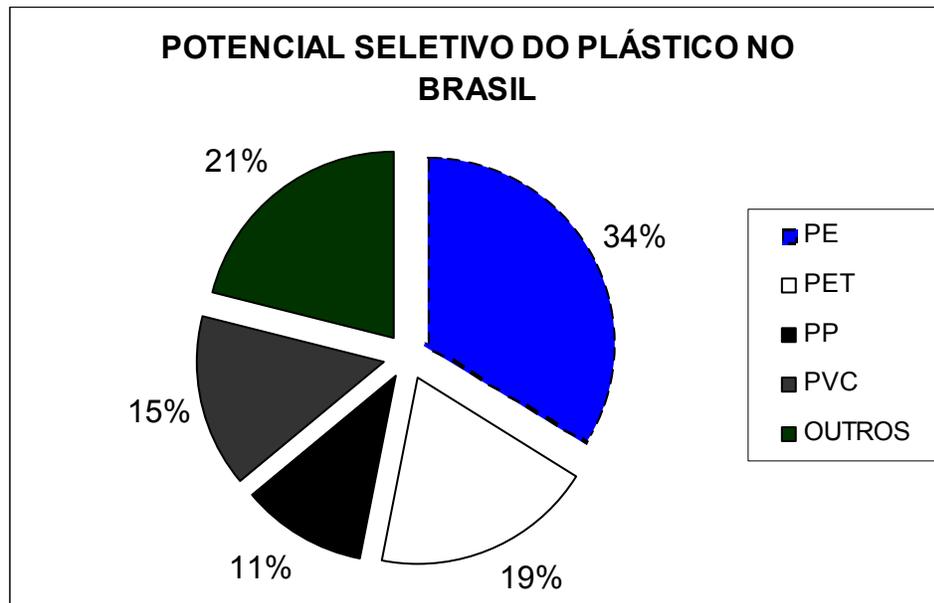


Tabela 2
Consumo do plástico no Brasil
(Mil toneladas/ano)

Tipo	90	91	92	93	94	95	96	97
PEAD	230	258	260	271	282	284	290	291
PEBD	460	485	491	502	510	515	517	520
PP	230	290	288	295	300	305	307	315
PS	125	127	122	130	145	147	152	160
PVC	340	400	410	409	410	412	420	429
PET	7	12	20	40	60	62	70	74

Fonte GRIPPI 2001.

2.1.4 PET (Polietileno Tereftalato)

O PET – polietileno tereftalato é hoje uma resina muito popular e com uma das maiores taxas de crescimento em aplicação como material de embalagem. Isso se deve sem dúvida às suas excelentes propriedades, a exemplo da elevada resistência mecânica, térmica e química, aparência nobre (brilho e transparência), parcialmente cristalina e orientada (translúcido), barreira a gases, entre outras (MANO).

Muito embora os poliésteres sejam conhecidos desde a década de 30, a primeira síntese do polímero com alto peso molecular foi sustentada em 1942, com potencial reconhecido na época para aplicações como fibra. Contudo, as garrafas tipo PET tornaram-se disponíveis no Brasil apenas em 1989 (SILVA).

Como família, os poliésteres são materiais produzidos pela polimerização de um ácido dicarboxílico e um glicol ou um 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 produtos da indústria petroquímica. Inicialmente o PET era na realidade apenas obtido a partir do ester do ácido tereftálico, o dimetil tereftalato-DMT, devido à dificuldade de obtenção do ácido com a pureza suficiente para a aplicação. Essa reação é conhecida como transesterificação e ainda hoje é uma das rotas utilizadas para a síntese do PET. O desenvolvimento de processos adequados à purificação do ácido tereftálico-PTA permitiu a produção comercial do PET pela rota da esterificação direta, hoje também muito utilizada para a fabricação do PET.

A reação de polimerização do PET se inicia com a esterificação dos monômeros, produzindo o bihidroxiethyl tereftalato-BHET. Na seqüência, o BHET continua a se condensar (reação de policondensação) aumentando o peso molecular da molécula até a formação do polímero. Os subprodutos das reações de transesterificação e de esterificação direta são metanol e água, respectivamente. As propriedades físicas e mecânicas do polímero dependem fundamentalmente do peso molecular médio das moléculas obtidas através do processo de polimerização (SILVA).

A determinação da propriedade conhecida como viscosidade intrínseca do polímero permite estimar seu peso molecular. Ao final da etapa de policondensação o PET apresenta peso molecular da ordem de 15.000 a 42.000, em torno de 0,65dl/g. Este polímero é adequado a aplicações como suporte de filme metálico para estampagem em plásticos, fitas magnéticas para gravação; mantas para filtros industriais; embalagem de alimentos, cosméticos e produtos farmacêuticos; filmes e placas para radiografia, fotografia e reprografia, impermeabilização de superfícies; frascos para refrigerantes gaseificados; fibras têxteis dentre outros (MANO).

A aplicação do PET para embalagens sopradas (garrafas) requer um polímero com peso molecular acima de 30.000 a 35.000, superior a 0,74 dl/g, o que não é possível se obter apenas com o processo de policondensação. Da mesma forma a aplicação do PET para fibras industriais requer um polímero perto de 1,0 dl/g. Logo, para adequar o PET a essas aplicações uma etapa adicional à polimerização foi introduzida, conhecida como polimerização em estado sólido ou pós-condensação. Para tanto, os peletes de PET são inicialmente submetidos a um aquecimento a 160-170°C para promover a cristalização parcial e a secagem. Em seguida, os peletes são submetidos a um aquecimento por 16h a cerca de 215°C, em um reator

com atmosfera inerte (com nitrogênio). Nesse processo aumenta-se o peso molecular do polímero até atingir o necessário ao uso pretendido.

O PET é um polímero cristalino e como tal tem suas propriedades dependentes do grau de cristalinidade que atinge após a transformação, até 40%. Quanto maior o grau de cristalinidade, maior a rigidez (menor resistência ao impacto), maior a resistência térmica e menor a transparência. A temperatura de transição vítrea é em torno de 75°C, logo é rígido à temperatura ambiente e flexível acima de 75°C (MANO).

Um produto comum da degradação térmica do PET é o acetaldeído. A presença de oxigênio induz a um processo de degradação oxidativa e a degradação térmica com umidade provoca a quebra das cadeias, reduzindo o peso molecular do polímero. A fabricação de garrafas, frascos e potes de PET envolvem três etapas seqüenciais: a secagem da resina, a injeção de uma pré-forma e o sopro da embalagem, geralmente com bi-orientação. A secagem é fundamental para evitar a degradação da resina durante o ciclo térmico da injeção, que acarretaria a redução do peso molecular do PET (comprometendo sua resistência mecânica). Para a injeção da pré-forma a resina é aquecida a temperaturas da ordem de 270°C, injetada nas cavidades do molde e resfriada muito rapidamente de forma a manter a estrutura molecular predominantemente na forma amorfa (baixo grau de cristalinidade). O sopro da embalagem é feito à temperatura de 90 a 100°C suficiente para moldar o PET na sua forma predominantemente amorfa. Dentro da janela de sopro, quanto menor a temperatura, melhor serão as resistências ao impacto e à carga vertical da garrafa.

Com a injeção é possível um acabamento de precisão para o gargalo, incluindo rosca e superfície de vedação, o que determina o elevado desempenho dos sistemas de fechamento das embalagens de PET. A

estrutura amorfa confere à embalagem a transparência desejada e flexibilidade suficiente para garantir boa resistência ao impacto, que é sensivelmente melhorada pela bi-orientação durante o sopro. Além dessas vantagens o processo de injeção e sopro do PET foi desenvolvido para contornar a baixa resistência desse material na forma fundida, o que impede seu processamento pelo processo tradicional de extrusão e sopro.

Pelo exposto pode-se perceber que algumas propriedades são fundamentais para a aplicação do PET para a fabricação de embalagens sopradas, quais sejam: viscosidade intrínseca (peso molecular), cristalinidade (grau e velocidade de cristalização) e temperatura de transição vítrea-Tg. No que se refere ao processamento, a velocidade de resfriamento das pré-formas, que determina o grau e a distribuição da cristalinidade, e o grau de estiramento durante o sopro são fatores importantes para a resistência ao impacto das embalagens.

Para flexibilizar as condições de processamento e ampliar as aplicações do PET, o uso de comonômeros se tornou uma prática. De maneira geral, a adição do comonômero tem como efeitos a redução do ponto de fusão e da cristalinidade em relação ao homopolímero. O termo copoliéster é usado aos polímeros cuja síntese usou mais de um glicol e/ou mais de um ácido dibásico. De maneira geral a cadeia do copolímero é menos regular que a do homopolímero e, portanto, apresenta menor tendência à cristalização (menor velocidade e/ou grau de cristalização).

A redução do ponto de fusão permite a obtenção de grades do polímero com menor tendência à degradação térmica e, conseqüentemente com menor tendência à formação de acetaldeído. O efeito sobre a cristalinidade se revela na redução tanto do grau como da taxa de cristalinidade o que facilita a etapa de resfriamento na injeção. Logo, com os

copolímeros de PET, tornou-se possível a fabricação de pré-formas mais espessas, como as das garrafas retornáveis, como também as de fundo petalóide (região mais espessa e com maior tendência à cristalização, conseqüentemente mais rígida e com menor resistência ao impacto). O teor de comonômero normalmente não ultrapassa 5%, para manter as propriedades características e desejáveis do PET. O comonômero mais comum é o ácido isoftálico, porém também são usados o dietileno glicol e o ciclohexano dimetanol-CHDM. O PETG é o poliéster modificado com alto teor de CHDM, de maneira a ser um polímero amorfo e com resistência na forma fundida que permite seu uso em processos de extrusão contínua e sopro. Como não apresenta a resistência mecânica do PET sua aplicação está voltada aos frascos pequenos para produtos não carbonatados.

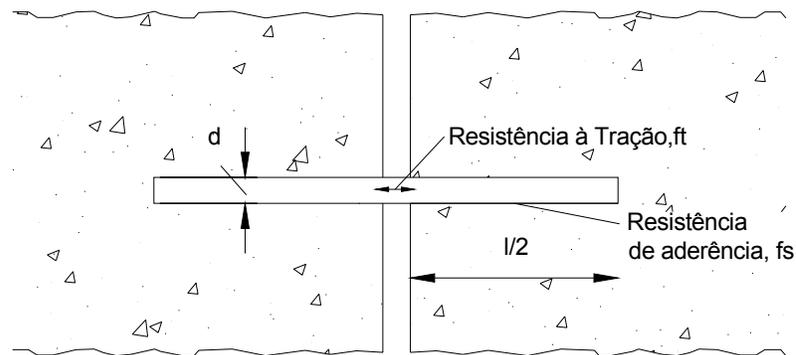
O PET-EX é também um copolímero de PET desenvolvido para uso no processo de extrusão contínua, porém é cristalino (mas com cristalização lenta) e apresenta da ordem de 1,05 dl/g. Finalmente, o PEN – polietileno naftalato, é um poliéster obtido pela reação do etilenoglicol e do ácido dicarboxílico do 2,6 naftaleno. Apesar de conhecido há anos, sua comercialização, foi inibida pela falta da oferta comercial do monômero ácido.

2.2 Materiais compósitos

Materiais compósitos, segundo Budinski *apud* Specht (2000, p.07), são misturas de dois ou mais materiais diferentes com características inferiores ao material resultante. São, portanto, constituídas por duas fases: a matriz de concreto de cimento Portland e o elemento de reforço às fibras.

Portanto este trabalho define compósito como uma matriz de concreto de cimento Portland com fibras de garrafa PET. A figura 2 mostra a disposição fibra/fissura.

Figura 2
Disposição fibra/fissura



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

$$\frac{l}{d} = \frac{ft}{2fs}$$

Em grande parte, a tecnologia dos materiais compósitos depende desta simples 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 seja totalmente mobilizada ou fibras de alta relação l/d deverão ser utilizadas (TAYLOR, apud SPECHT 2000).

2.2.1 Matriz

O concreto hidráulico é um material de construção constituído por mistura de um aglomerante com um ou materiais inertes e água. Quando misturados, primeiramente oferecem condições de plasticidade que facilitam as operações e manuseios que são indispensáveis ao lançamento nas formas, adquirindo, com o tempo, pelas reações que se processam entre o aglomerante e a água, coesão e resistência. O concreto é composto de cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo e água (PETRUCCI 1998).

O concreto é constituído pela mistura de seus componentes formando uma pasta de solução aquosa e grãos de cimento Portland (BAUER, 1995).

Petrucci salienta que são propriedades do concreto fresco:

- a) consistência;
- b) textura;
- c) trabalhabilidade;
- d) integridade da massa;
- e) poder de retenção de água;
- f) massa específica.

A trabalhabilidade, importante propriedade do concreto fresco, tem um valor relativo dependendo de sua fixação, além das qualidades intrínsecas dos materiais que constituem o concreto, das condições de mistura, transporte, lançamento e adensamento do material, bem como das dimensões, forma e armaduras das peças a moldar, determinando a sua devida resistência a ser solicitada quando endurecido (PETRUCCI).

A resistência pode ser considerada a propriedade mais importante do concreto, embora, em muitos casos, outras características, como a durabilidade e a permeabilidade, sejam também muito importantes. A resistência define uma idéia geral da qualidade do concreto, estando diretamente relacionada com a estrutura da pasta de cimento Portland hidratada. Além disso a resistência é um elemento essencial do projeto estrutural especificando a sua aceitação (NEVILLE, 1997).

É essencial que as estruturas de concreto desempenhem as funções que lhe foram atribuídas, a durabilidade dessa estrutura de concreto simples, armado ou protendido, é condicionada pelo eventual ataque de agentes agressivos a que estão sujeitos durante sua vida em serviço (BAUER).

Neville comenta que a durabilidade do concreto não significa vida indefinida, e nem significa qualquer tipo de ação. A durabilidade do concreto, manifesta uma deterioração originada por fatores externos ou por causas internas no interior do próprio material. As diferentes formas de ação podem ser físicas, químicas ou mecânicas. As causas mecânicas podem ser de impactos, abrasão, erosão ou cavitação. As causas químicas de deterioração podem incluir as ações álcali-sílica e álcali-carbonato.

Segundo Petrucci a agressão no concreto se dá devido à fissuração causada durante o endurecimento; a excessiva evaporação pode causar o gretamento superficial, desde que a água da superfície se evapore, não seja substituída naturalmente pela exsudação. A fissuração pode também acontecer quando a estrutura for solicitada.

Quando há deslocamento de gás ou vapor através do concreto se faz como resultado de um gradiente de concentração e não de um diferencial de pressão. A difusão de gases, o dióxido de carbono e o oxigênio apresentam grandes agressões: o primeiro leva a carbonatação da pasta de cimento hidratado e o segundo torna possível a corrosão da armadura do concreto (NEVILLE).

Petrucci comenta que pode-se atenuar ou impedir a agressividade do meio do concreto definindo a utilização dos elementos do concreto para as diversas situações. São divididos em itens esses processo:

- ✓ Escolha adequada do aglomerante;
- ✓ Elaboração cuidadosa do concreto;
- ✓ Lançamento e adensamento ótimos;
- ✓ Cura;
- ✓ Tratamentos superficiais;
- ✓ Tratamentos químicos.

Esses requisitos estão atrelados à qualidade, controle e garantia do concreto.

Segundo Helene e Terzian (1997) qualidade é conformidade aos requisitos e características do produto ou serviço que satisfazem às necessidades do usuário e geram satisfação. A qualidade para a indústria da construção civil, “adequação ao uso” pode ser entendida como:

- ✓ Ter resistência estrutural adequada;
- ✓ Ser funcional;
- ✓ Possuir as condições ideais de habitabilidade;
- ✓ Ter vida útil elevada (ser durável);
- ✓ Possuir baixo custo de operação e manutenção;
- ✓ Ter o preço acessível.

2.2.1.1 Agregados

Agregado é o material particulado, não coesivo, de atividade química praticamente nula, constituindo de misturas de partículas cobrindo extensa gama de tamanhos. Os agregados classificam-se segundo a sua origem, as dimensões das partículas e o peso específico aparente.

Conforme Bauer, os agregados podem ser classificados como:

- Naturais. Os que se encontram particulado na natureza.
- Industrializados. Os que sua composição particulada é obtida por processos industriais.
- Agregado miúdo: as areias.
- Agregado graúdo; os cascalhos e as britas.

Agregado é um material granular, sem forma e volumes definidos, geralmente inertes, de dimensões e propriedades adequadas para o uso em obras de engenharia. Sua aplicação é variada. Servem para lastro de vias férreas, bases para calçamento, são adicionadas aos solos que constituem a pista de rolamento das estradas, entram na composição de material para revestimentos betuminosos e são, finalmente, utilizados como material granuloso e inerte na produção de argamassas e concreto (PETRUCCI).

Pelo menos três partes do volume do concreto são ocupadas pelos agregados, portanto sua qualidade é de considerável importância. O agregado não pode só influenciar na resistência do concreto, pois agregados com propriedades indesejáveis podem não apenas produzir um concreto pouco resistente mas também podem comprometer a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto (NEVILLE).

2.2.1.2 Cimento Portland

Cimento Portland é um material constituído principalmente de material calcário, como rocha calcária ou gesso, e alumina e sílica, encontrados como argila ou xisto (NEVILLE 1997).

Neville comenta que o processo de fabricação do cimento Portland consiste essencialmente em moer a matéria prima, misturá-la intimamente em proporções adequadas e queimar essa mistura em um forno rotativo a uma temperatura de cerca de 1450 °C. Os tipos de cimento Portland estão no quadro 3.

Quadro 3
Tipos de Cimento Portland (CP)

Denominação	Sigla
Portland Comum	CP I
Portland Comum com Adição	CP I-S
Portland Composto com Escória	CP II-E
Portland Composto com Pozolana	CP II-Z
Portland Composto com Filler	CP II-F
Portland Alto Forno	CP III
Portland Pozolânico	CP IV
Portland de ALTA Resistência Inicial	CP V-ARI
Portland Resistente a Sulfatos	CP I RS/ CP I RS/ CP II-E RS/ CP II-Z RS/ CP II-F RS/ CP III RS/ CP IV RS

O cimento Portland é obtido pela pulverização de clínquer constituído essencialmente de silicatos hidráulicos de cálcio, com uma certa proporção de sulfato de cálcio natural, contendo, eventualmente, adições de certas substâncias que modificam suas propriedades ou facilitam o seu emprego (BAUER 1994).

Petrucci reforça que o clínquer, obtido pelo cozimento até a fusão do incipiente ($\pm 30\%$ de fase líquida) de mistura de calcário e argila devidamente dosados e homogeneizados.

O cimento Portland é produzido em instalações industriais de grande porte, localizadas junto a jazidas que se encontram em situação favorável quanto ao transporte do produto acabado aos centros consumidores (BAUER).

2.2.2 Fibras

O conceito de reforço com fibras nos materiais de construção não é algo novo. As fibras têm sido aplicadas em construções desde os primórdios de nossa história; há evidências que fibras de asbesto foram usadas para reforçar postes de argila há 5 mil anos, tijolos de adobe eram reforçados com fibras vegetais na Babilônia, pêlos de animais utilizados como reforço em argamassa de enchimento de paredes há centenas de anos, tijolos de barro eram produzidos pelos egípcios com argila cozida e reforçados com palha.

Entretanto, a adição de fibras para reforço do concreto é um material de construção relativamente novo. O emprego de fibras descontínuas adicionadas aleatoriamente ao concreto desenvolveu-se a partir de 1960, quando surgiu no mercado novos produtos tais como fibras poliméricas, metálicas, vegetais e minerais. Os primeiros estudos e pesquisas dirigidos à aplicação e utilização do concreto reforçado com fibras tiveram início a partir de 1971 nos Estados Unidos. Existem vários tipos de fibras envolvendo o estudo de reforços de materiais da construção (SPECHT, 2000).

No Brasil, o uso de fibras na mistura de concreto é ainda mais recente, sendo usada em escala comercial apenas a partir da década de 90. O concreto reforçado com fibras é um material compósito onde a matriz é o concreto de cimento Portland, no qual são incorporadas fibras, elementos descontínuos e aleatoriamente distribuídos, onde o comprimento predomina sobre a sua seção transversal. Atualmente têm sido usadas fibras de várias formas e tamanhos, produzidas em aço, plástico, vidro e materiais naturais, porém, as fibras de aço têm sido as mais utilizadas.

2.2.3 Compósitos

O maior potencial dos materiais compósitos fibrosos está no estado de pós-fissuração, onde as fibras contribuem de forma mais efetiva na resistência do material, aumentando assim a capacidade de absorção de energia do material. As fibras, geralmente, têm menor módulo de elasticidade que a matriz cimentada e, portanto, pouco ou nenhum aumento de tensão de fissuração é esperado. A deformação necessária para causar

fissuras na matriz cimentada é muito inferior à alongação das fibras (MODLER *et al* 2002).

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 secundariamente elas melhoram a ductibilidade e a tenacidade de uma matriz com características frágeis.

Hannant (1994) afirma que a fibra mantém as interfaces das fissuras juntas, beneficiando as propriedades mecânicas no estado pós-fissuração, ou seja, aumentando a ductibilidade. As fibras que "atravessam" as fissuras contribuem para o aumento da resistência, da deformação de ruptura e da tenacidade dos compósitos.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Esta pesquisa é de caráter quantitativo, desenvolvendo um estudo baseado em experimentos laboratoriais. Os ensaios que foram realizados são: medida da trabalhabilidade pelo *Slump test*, resistência à compressão axial com a medição do módulo de elasticidade e resistência à tração na flexão com a medição do deslocamento da linha neutra. Também foram realizados ensaios de resistência à tração das fibras de garrafas PET.

3.2 Plano de coleta de dados

Neste item são descritas as matrizes utilizadas e suas variáveis de ensaio. A quadro 4 mostra as variáveis e idades estudadas para cada ensaio realizado.

Quadro 4
Variáveis e Idades Estudadas

Teor de Fibra (g/m ³)	Matriz													
	Matriz com RCS 9 MPa							Matriz com RCS 13 MPa						
	Corpos-de-prova para ensaio de (RCS) Resistência a Compressão Simples (idades)													
	3	7	14	28	90	180	360	3	7	14	28	90	180	360
0	2	2	2	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	2
250	2	2	2	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	2
5.125	2	2	2	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	2
10.000	2	2	2	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	2
Corpos-de-prova para ensaio de Tração na Flexão														
0				2		2	1				2		2	1
250				2		2	1				2		2	1
5.125				2		2	1				2		2	1
10.000				2		2	1				2		2	1

Com base em ensaios realizados por CORÓ (2002) com fibras PET definiu-se as dimensões de fibras utilizadas e os teores de adição dentro da matriz/compósito de concreto.

As fibras são comercializadas com comprimento médio de 200 mm e largura de 6 mm, por uma fábrica de vassouras da cidade de Santo Ângelo - RS. Os elementos de reforço utilizados possuem dimensões aproximadas de 30 mm de comprimento, 6 mm de largura e 0,2 mm de espessura. Para a formação dessas dimensões, as fibras foram cortadas manualmente com o auxílio de tesouras.

A figura 3 apresenta o material que foi utilizado para o reforço do concreto.

Figura 3
Fibras de Garrafa PET

a)



b)



3.3 Materiais utilizados

Neste item são apresentadas as características fundamentais dos materiais utilizados na pesquisa;

3.3.1 Matriz

As matrizes utilizadas nesta pesquisa são de concreto de cimento Portland. O traço utilizado foi desenvolvido através de dados já obtidos em um estudo de dosagem realizado pelo LEC – Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUI. As matrizes utilizadas neste trabalho foram dosadas para resistências à compressão com fck de 9,0 MPa e fck 13,0 MPa. A tabela 3 apresenta o consumo de material para a produção de 1m³ de concreto.

Tabela 3
Características das matrizes

Materiais	Fck= 9,0 MPa	Fck= 13,0 Mpa
	Kg/m ³	Kg/m ³
Cimento	159,034	180,739
Areia	1.046,639	1.026,849
Brita 1	374,213	374,808
Brita 2	694,968	696,072
Água	181,988	182,277

3.3.1.1 Aglomerante

O aglomerante utilizado foi o CP V – ARI da marca CAUÊ, adquirido em quantidade suficiente para a preparação de todas as amostras e armazenado em sacos plásticos fechados, de forma a preservar suas propriedades físicas e químicas durante a realização da pesquisa.

3.3.1.2 Agregados

As amostras de agregados foram doadas pela Pedreira Paim. O agregado graúdo é proveniente da cidade de Coronel Barros, caracterizada como rocha basáltica de formação Serra Geral. O agregado miúdo é caracterizado como areia de várzea proveniente da cidade de Santa Maria. A composição granulométrica e densidades dos agregados estão em anexo 1. Estes agregados foram secos em estufas a uma temperatura de 60 °C durante 24 horas, em seguida, depositadas em padiolas em local seco.

3.3.2 Caracterização Mecânica das fibras

A caracterização mecânica das fibras foi realizada no Laboratório de Engenharia Mecânica da URI – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e Missões. O ensaio e o preparo das amostras foi realizado de acordo com a norma NBR 9622/86 – Determinação das Propriedades Mecânicas a Tração – Plásticos. A figura 4 mostra a prensa utilizada para o ensaio.

Figura 4
Prensa utilizado para ensaio das Fibras



Foram realizados ensaios com amostras incolores e amostras verdes. A tabela 4 e 5 mostra a força de ruptura (FT), deslocamento (ϵ), deformação (ϵ) e o módulo de elasticidade (E) encontrados a partir dos ensaios.

Tabela 4
Amostras Incolores

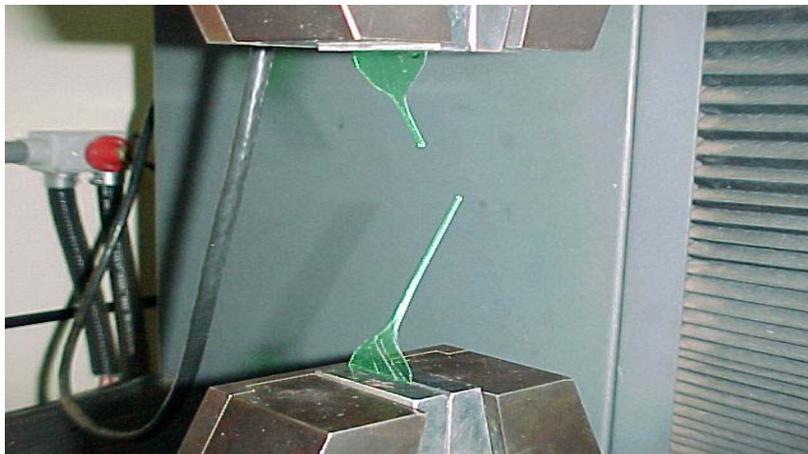
Amostras Brancas				
AMOSTRA	FT (kgf)	ϵ (mm)	ϵ (%)	E (MPa)
1	23,73	23,04	0,00250	100,0
2	23,10	26,55	0,00225	94,4
3	22,96	24,13	0,00225	100,0
4	25,36	27,44	0,00250	87,5
5	22,74	24,24	0,00250	95,0
6	22,18	22,03	0,00250	90,0
7	23,94	24,70	0,00225	102,8
MEDIA	23,43	24,59	0,00239	95,7

Tabela 5
Amostras Verdes

AMOSTRA	FT (kgf)	ϵ (mm)	ϵ (%)	E (MPa)
1	23,59	25,43	0,00250	92,5
2	23,52	25,84	0,00250	95,0
3	22,81	23,71	0,00250	90,0
4	25,57	30,60	0,00250	92,5
5	22,18	24,80	0,00250	90,0
6	22,74	25,50	0,00250	55,0
7	24,44	25,76	0,00250	65,0
MEDIA	23,55	25,95	0,00250	82,9

Os ensaios realizados mostraram que a força de ruptura das duas amostras são equivalentes, ficando entre 23 e 24 kgf. A figura 5 mostra a fibra no momento de sua ruptura.

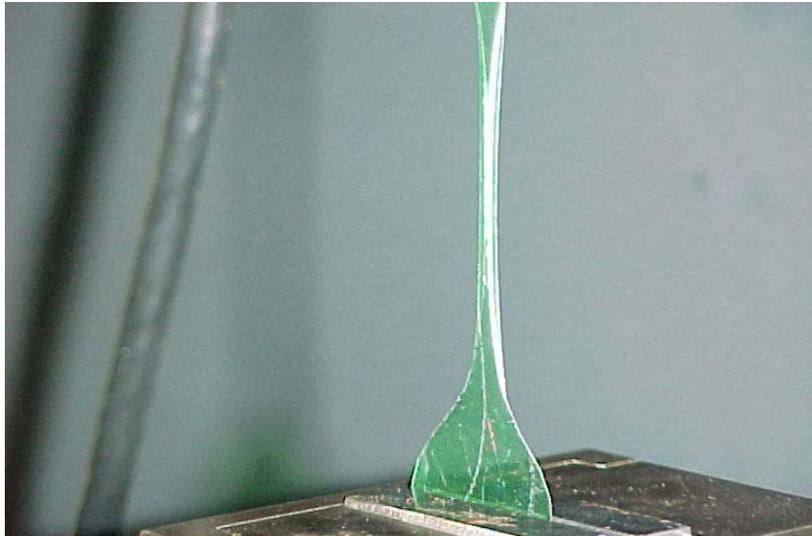
Figura 5
Ruptura da fibra



Com relação ao módulo de elasticidade percebe-se que as amostras verdes são mais deformáveis que as amostras incolores, portanto,

o módulo de elasticidade das amostras verdes é um pouco menor que os das amostras brancas. A figura 6 mostra a deformação da fibra.

Figura 6
Deformação da fibra



Todas as amostras desenvolvem as mesmas características de deformação, possuindo dois escoamentos e, logo após, então, sua ruptura. A figura 7 mostra o gráfico da tensão *versus* deformação.

Figura 7
ForçaXDeformação



Devido às amostras serem cortadas manualmente com a tesoura, tomando-se o máximo de cuidado, notou-se a dificuldade em se obter amostras perfeitamente iguais, sendo que algumas delas foram descartadas devido a presença de pequenos entalhes, ou seja, locais que deixam a amostra mais frágil. Para ensaios mais precisos, seria necessário que as amostras fossem estampadas, assim evitando desproporcionalidade e entalhes.

3.4 Preparação das amostras

Todos os materiais foram pesados para um volume de 60 litros devido à capacidade da betoneira que estava à disposição para a mistura. A mistura foi desenvolvida de acordo com as técnicas usuais do LEC.

Para a formação da matriz, foi imprimada primeiramente a betoneira com um pouco de água e cimento, logo em seguida foi adicionado o material na seguinte ordem: primeiramente colocou-se todo o agregado graúdo e cerca de 80 % da água, em seguida colocou-se todo o cimento, esperou-se o total envolvimento das partículas do cimento com o agregado, então, adicionou-se o agregado miúdo e o restante da água. Na formação do compósito as fibras foram adicionadas logo após o agregado graúdo.

Para cada teor e traço foram moldados 17 corpos-de-prova cilíndricos de 10X20 cm e 5 corpos-de-prova prismáticos de dimensões 15X15X50. Para o adensamento foi utilizado vibrador de imersão. O tempo

estimado de imersão da agulha foi a eliminação de todas as bolhas de ar envolvidas no concreto.

A cura foi realizada da seguinte maneira: depois que os corpos-de-prova foram moldados, ficaram em uma sala climatizada durante 24 horas com temperatura de 23 ± 1 °C. Passado este tempo, os corpos-de-prova foram desmoldados e levados à câmara úmida onde permaneceram até as idades definidas para os ensaios.

3.5 Métodos de ensaios

3.5.1 Trabalhabilidade

Para quantificar a trabalhabilidade foi utilizado o ensaio de consistência pelo abatimento do tronco cone, mais conhecido como *Slump test*. A norma que descreve o ensaio é a NBR MN 67 – Concreto-Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. A medida da trabalhabilidade é feita pelo abatimento causado na massa de concreto pelo seu peso próprio. O ensaio de abatimento mede a consistência, sendo normalmente empregada para garantir a constância da relação água/cimento.

Foram realizadas as moldagens dos traços de referência com a medida do Slump 6 ± 1 cm. Esta quantidade de água foi fixada e utilizada para as demais moldagens.

3.5.2 Resistência à compressão

De todos os parâmetros que influenciam na qualidade do concreto, tais como resistência mecânica, permeabilidade, durabilidade e deformações, o mais sensível às variações intrínsecas de produção, e o mais fácil de ser quantificado é a resistência à compressão medida através dos corpos-de-prova moldados, curados e ensaiados conforme normalização. A norma que descreve o ensaio é a NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos: Método de Ensaio.

Algumas propriedades do concreto variam proporcionalmente com sua resistência à compressão, sendo ela, portanto, a representante quase que global da qualidade do concreto. Isto não quer dizer, entretanto, que se deve deixar de analisar e quantificar as demais propriedades. O ensaio de resistência à compressão e medição do módulo de elasticidade foi executado conjuntamente em uma prensa instrumentada do LEC e de acordo com as NBR 5739 e NBR 8822 respectivamente. A velocidade de carregamento do equipamento para o ensaio é entre 0,3 MPa/s a 0,8 MPa/s. A figura 8 mostra a prensa utilizada para ensaio.

Figura 8
Prensa Compressão Axial



3.5.3 Resistência à tração na flexão

Embora o concreto não seja desenvolvido nem projetado especificamente para resistir à tração, a análise dessa propriedade se torna útil para a quantificação e estimativa de carga a qual ocorre a fissuração. A eliminação da fissuração é muito importante para a conservação e a durabilidade das estruturas de concreto de cimento Portland, prevenindo assim as agressões de intempéries e protegendo a armadura de corrosões. Para este ensaio a norma utilizada foi a NBR 12142 – Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos: Método de Ensaio.

São três os tipos de ensaios que podem ser realizados para a quantificação da resistência à tração: tração direta, tração na flexão e tração por compressão diametral. Para este trabalho foi realizado somente a resistência à tração na flexão. O prisma de dimensões 15X15X50 cm foi submetido à flexão, com carregamento em dois pontos simétrico até sua ruptura. No mesmo instante foi medido o deslocamento da linha neutra com um dispositivo adaptado. A Figura 9 apresenta o dispositivo adaptado para as leituras do deslocamento da linha neutra.

Figura 9

Dispositivo adaptado para as leituras do deslocamento da linha neutra



A fórmula utilizada para o cálculo da tração na flexão é:

$$T_f = \frac{P.l}{b.d^2}$$

Onde:

P – carga.

l - distância entre os apoios.

d – Altura do corpo de prova na seção de ruptura.

b – Largura do corpo de prova na seção de ruptura.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

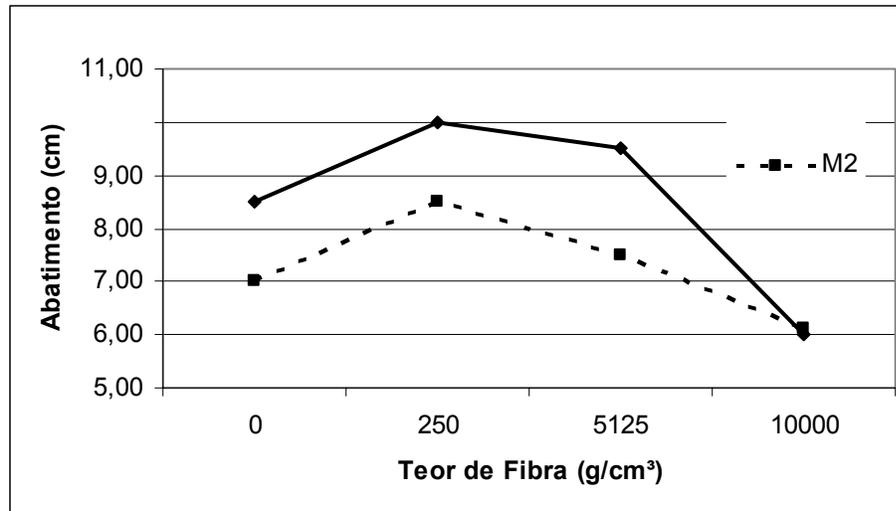
A análise dos resultados obtidos foi interpretada e tratada de forma quantitativa. Como apresentado no quadro 4 buscou-se avaliar as variáveis em determinados níveis de estudo a partir de modelos gráficos capazes de apontar tendências da influência do teor de fibras e o tempo de cura.

4.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é um dos aspectos importantes para a moldagem das peças de uma obra de concreto de cimento Portland.

Conforme pode-se observar na figura 10, para os dois traços estudados, a trabalhabilidade diminui com o aumento de fibras. Há um aumento para baixos teores e uma redução para altos teores. Portanto, o teor de fibra de 250 g/m³ é considerado o teor ótimo de fibras para a trabalhabilidade. Isso pode dificultar o bombeamento do concreto. Os dados coletados estão no anexo 2.

Figura 10
Trabalhabilidade



4.2 Resistência a Compressão Simples

Mheta e Monteiro (1994) afirmam que a resistência à compressão não é a mais importante contribuição do reforço do concreto com fibras. Isso pode ser observado facilmente nas figuras 11 e 12.

Com relação à resistência a compressão pode-se observar que para os dois traços e os três teores de fibras, os valores de resistência mantiveram-se paralelos e um pouco abaixo dos traços de referência.

Com a adição de fibras não há perdas significativas na resistência a compressão simples, o que incentiva a utilização deste resíduo no concreto. Todos os dados de ensaio e a tabulação dos dados estão no anexo 3.

Figura 11
Resistência a Compressão Simples Traço 9 MPa

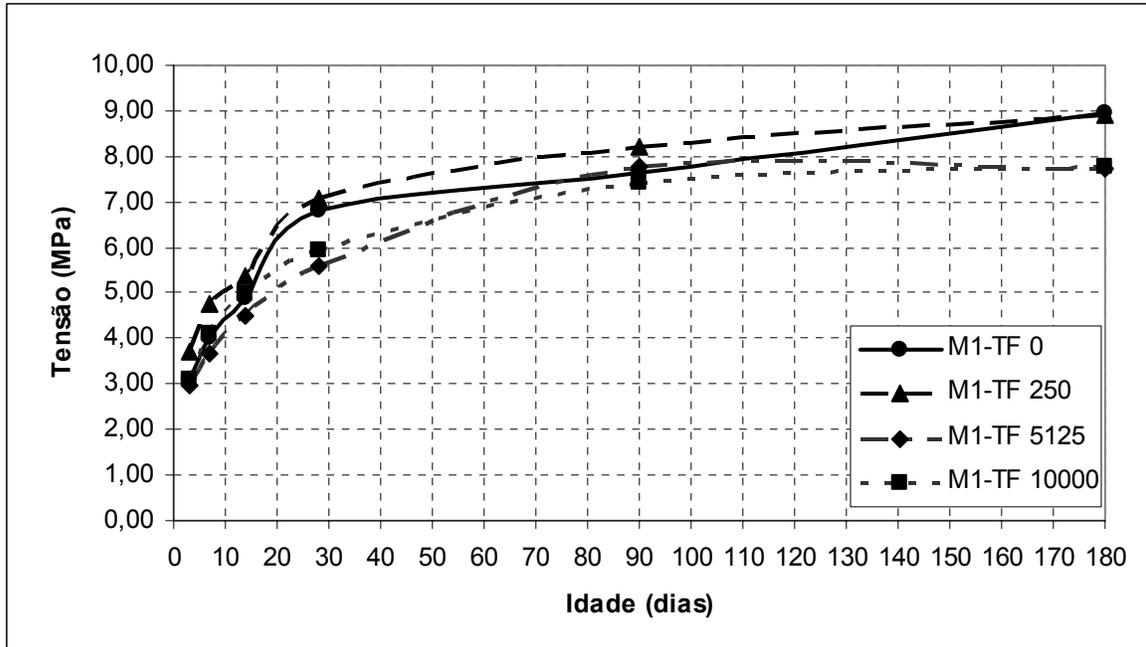
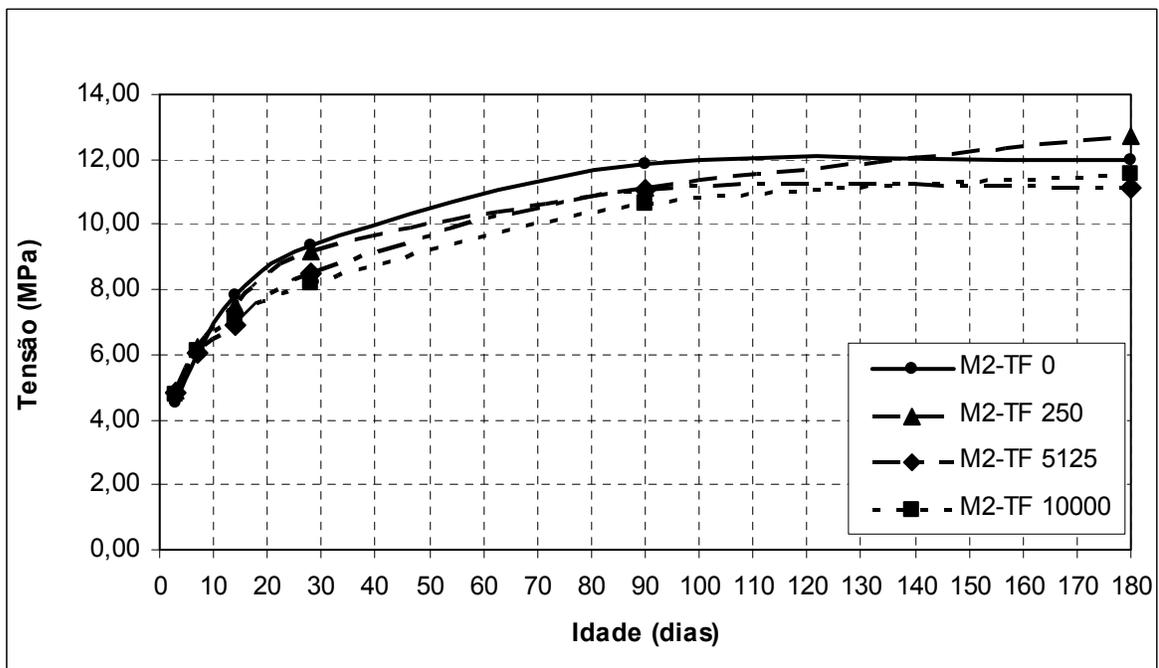


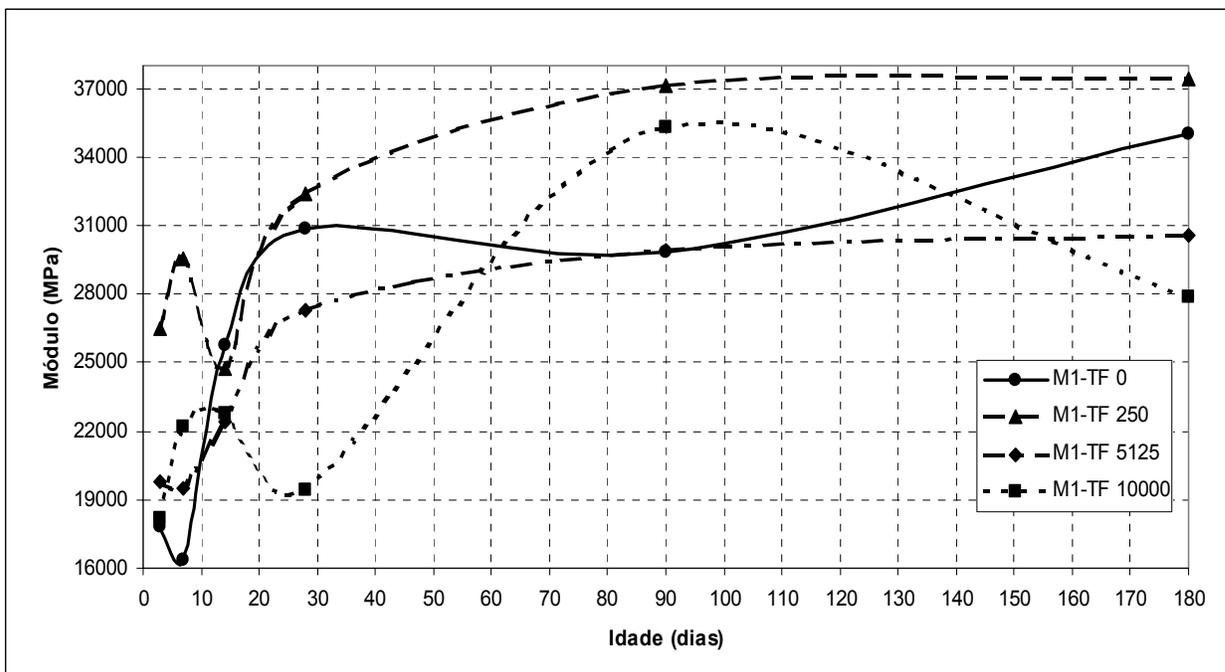
Figura 12
Resistência a Compressão Simples Traço 13 MPa



4.3 Módulo de Elasticidade

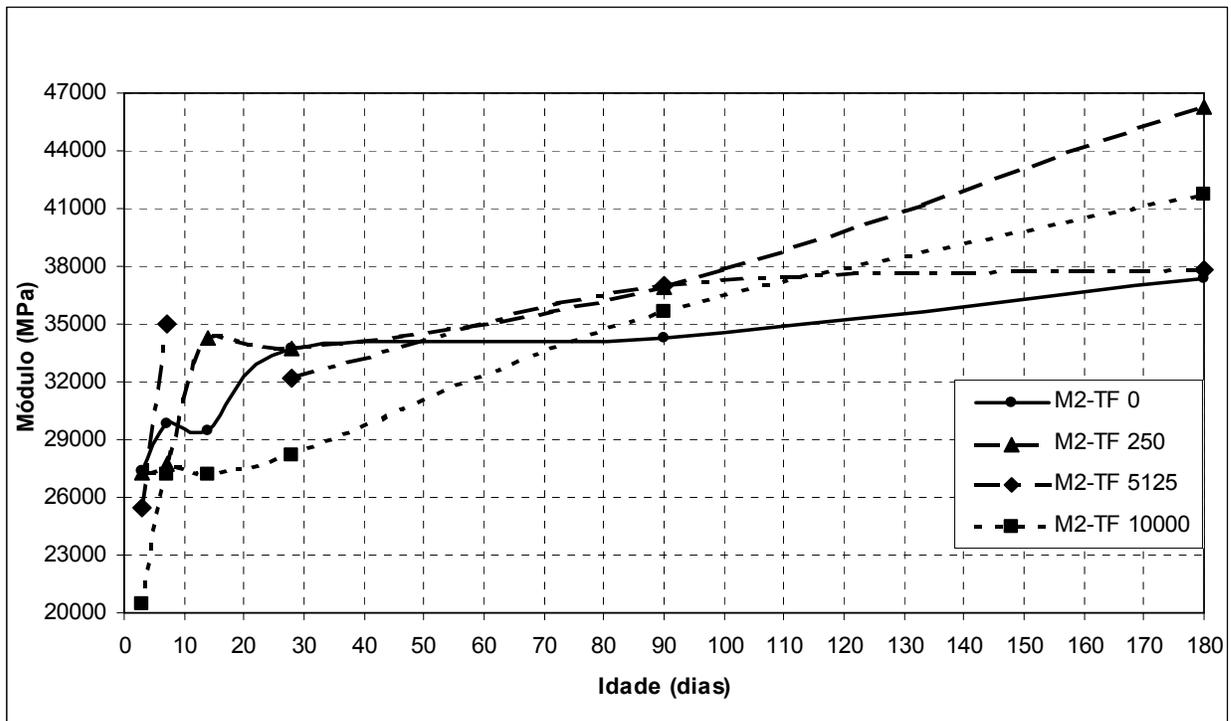
Com relação ao módulo de elasticidade, conforme mostra a figura 13, pode-se observar que para o traço M1, para os três teores de fibras, os valores de módulo mantiveram-se paralelos e um pouco abaixo do traço de referência.

Figura 13
Módulo de elasticidade M1



Já na figura 14 o traço M2 apresenta um comportamento diferente do traço M1 sendo que os três teores mantiveram-se acima do traço de referência com o processo de cura mais longo. Os dados estão no anexo 4.

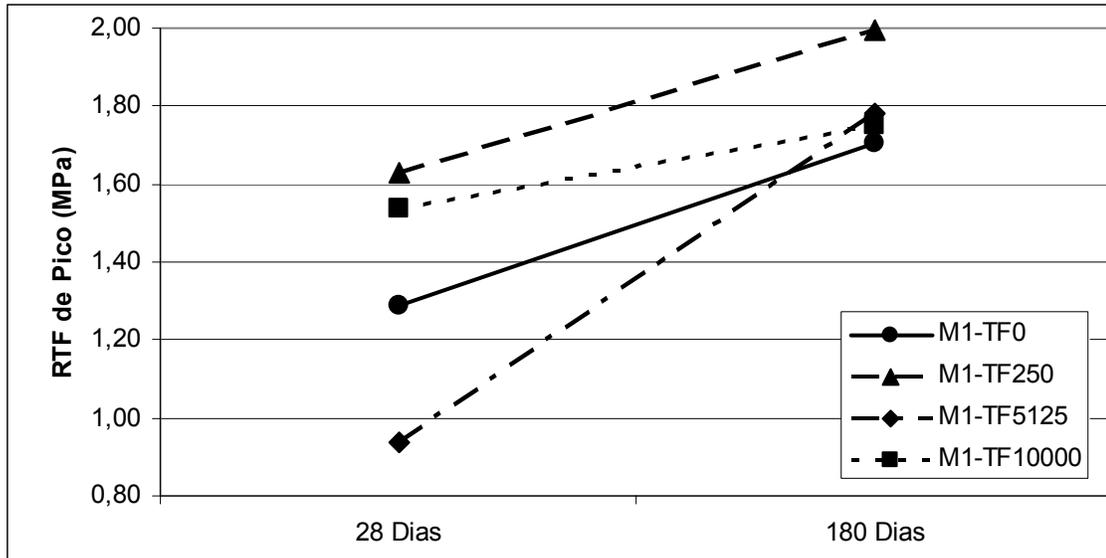
Figura 14
Módulo de elasticidade M2



4.4 Resistência à Tração na Flexão

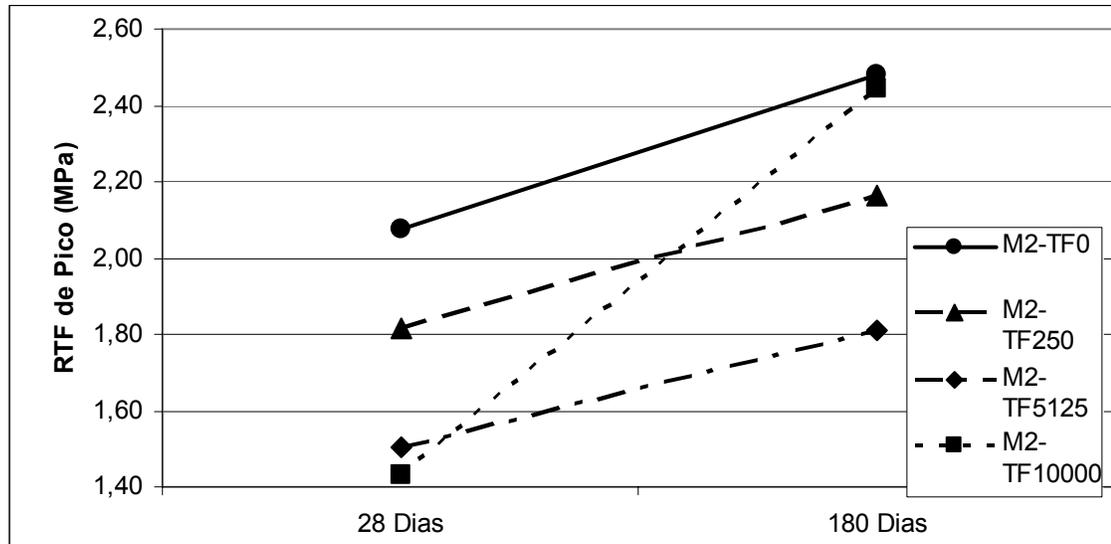
A partir dos ensaios de resistência à tração na flexão, apresentados na figura 15, nota-se que no traço M1 (f_{ck} 9,0 MPa), obteve melhores resultados com os teores de fibra menor e maior para 28 dias de cura, mas como aumento do tempo de cura, aos 180 dias, para todos os teores, obteve resistências de pico maiores que o traço de referência, além de manter sua resistência pós-pico sempre superior.

Figura 15
Resistência à tração na flexão de pico traço M1



A figura 16 mostra os valores da resistência à tração na flexão de pico. Para o traço M2 todos os teores mantiveram resistência à tração na flexão abaixo do traço de referência; mesmo com o aumento do tempo de cura, manteve-se abaixo do traço referência. Somente o teor de fibra 10000 g/cm³ obteve um melhor resultado com tempo de cura 180 dias, estando muito próximo do traço de referência.

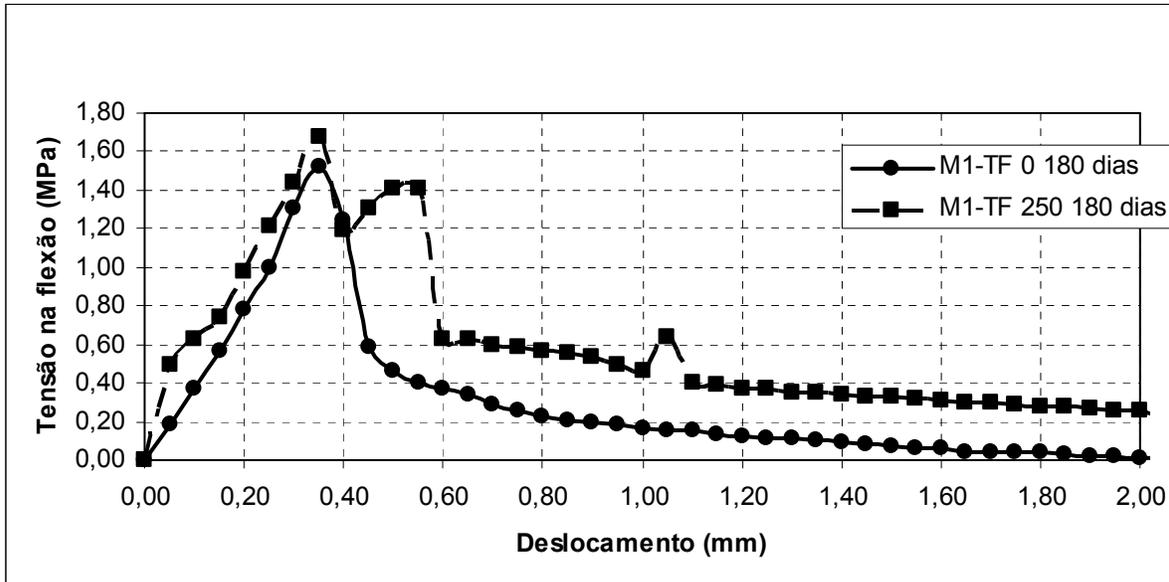
Figura 16
Resistência à tração na flexão de pico traço M2



Mesmo não alcançando os valores de pico maiores que o traço de referência, o comportamento pós-pico dos traços com fibras mantiveram-se sempre acima do traço de referência, isso mostra que as fibras são solicitadas quando a fissuração no corpo-de-prova aumentando o seu estado de tensão.

A figura 17 mostra as tendências das resistências pós-pico, onde se observa o grande potencial da utilização das fibras PET onde há um controle de fissuração e resistência a flexão.

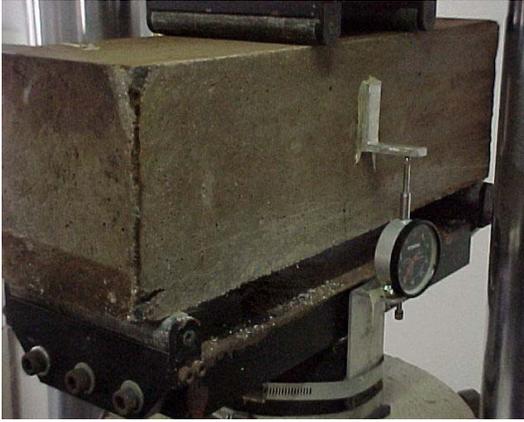
Figura 17
Resistência à flexão pós-pico Traço M1- TF 0 e 250 g/m³



A figura 18 mostra a evolução da fissura com a aplicação de carga. Nota-se que, ao contrário da matriz sem reforço, quando surge a primeira fissura há evolução é extremamente rápida, rompendo logo em seguida. Os dados estão no anexo 5.

Figura 18
Evolução da Fissura

a)



b)



c)



d)



e)



f)



4.5 Tenacidade

A tenacidade pode ser definida como a capacidade do material absorver energia, é calculada como a área sob curva da tensão *versus* deformação e qualitativo tensão *versus* deslocamento.

A figura 17 mostra, de maneira geral, que a inclusão de fibra aumenta sensivelmente q_{rup} . Quanto à tenacidade, verifica-se um acréscimo expressivo de energia que matriz com fibra absorve em relação a matriz de referência, mostrando assim que com a utilização das fibras PET, temos um material que absorve mais energia tanto pré-ruptura quanto depois de fissurado.

4.6 Ductilidade

A ductilidade é a relação entre a resistência máxima e a resistência pós-fissuração do material. A ductilidade é representada pela seguinte fórmula:

$$I_f = \frac{q_{rup} - 1}{q_{ult}}$$

onde:

q_{rup} = tensão de ruptura;

q_{ult} = tensão última;

Quanto maior o I_f , maior é a fragilidade do material, ao passo que I_f decresce com o aumento da tensão última. Quanto maiores forem as características de ductilidade do material menor será o valor de I_f .

Na figura 17, percebe-se, também, uma redução bastante expressiva do índice de fragilidade, o que caracteriza um comportamento mais dúctil do material.

4.7 Durabilidade

Conforme Pelisser (2003), em seu estudo com fibras PET recicladas para a fabricação de cordas, utilizando sobras de fio de cordas, relata que houve sinais claros de degradação, verificados através de imagens de microscopia eletrônica de varredura e através da perda de resistência, de ensaios realizados aos 150 dias de cura.

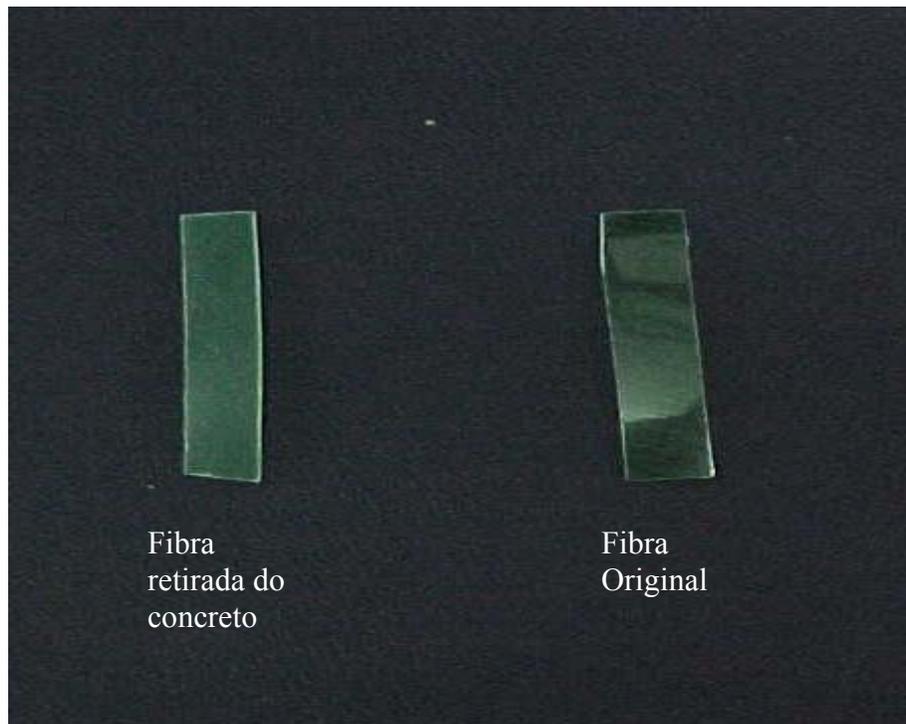
A degradação das fibras de PET foi também notada por Johnston (1994). Segundo o autor, a durabilidade de fibras sintéticas, como as de poliéster, em meio alcalino, é questionável: alguns tipos de fibras, como as de PET, mostram deterioração, definida como a perda rápida de resistência da fibra no cimento, devido à hidrólise e a dissolução em meio alcalino.

Observa-se na figura 12 e 13, para os ensaios realizados no estudo, não são visíveis o processo de degradação das matrizes em idades de 180 dias. Todas as matrizes ensaiadas possuíram um acréscimo significativo de resistência em relação as matrizes ensaiadas aos 28 dias. Em

uma análise visual, na figura 19 verifica-se que não há diferença de uma amostra original para uma amostra que esteve 180 dias dentro do concreto.

Figura 19

Comparação da fibra original com a fibra retirada do concreto



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Os resultados obtidos em ensaios de laboratório, apresentados, analisados e interpretados nos capítulos anteriores, permitem estabelecer conclusões.

Os ensaios realizados para caracterização mecânica dos elementos de reforço, fibras PET, mostram o mesmo comportamento em sua resistência, tanto para amostras incolores quanto para amostras verdes, diferenciando somente em relação ao módulo de elasticidade, sendo que as amostras verdes são mais deformáveis que as amostras incolores.

Nos ensaios realizados para medir a trabalhabilidade, observou-se que há um ponto onde o teor de fibra se comporta de maneira a ser considerada como ótima, fluindo-se melhor. Este ponto representa o teor de fibra é de 250 g/cm³.

Quanto à influência da inclusão aleatória de diferentes teores de fibras PET sobre as propriedades do compósito mostrou que essa influência

depende, fundamentalmente, das características dos teores de fibras e da matriz, sendo que o concreto é notavelmente afetado com as diferentes adições de fibras.

Com relação aos ensaios mecânicos de resistência à compressão axial não houve diferença significativa para os concretos com adição de fibras em relação ao concreto sem fibras em quaisquer as idades. Com relação ao módulo de elasticidade, notou-se uma tendência significativa de aumento com maiores teores de fibras.

Houve um aumento significativo da tenacidade para todos os concretos com fibras em relação ao sem fibras. Esta melhora do desempenho foi mantida e acrescida mesmo com o aumento do processo de cura até os 180 dias.

Foi verificado, nesta pesquisa, que não houve processo de degradação das fibras, provando que em todas as amostras houve aumento de resistência e aumento de sua tenacidade desde as primeiras idades até 180 dias. Porém ainda existem amostras para serem avaliadas com idades de 360 dias quando questão da degradação poderá ser melhor avaliada. No entanto, as fibras PET no concreto, podem ainda ser utilizadas e avaliadas, para reduzir a fissuração por retração plástica de concreto e argamassas, provavelmente sem prejuízos posteriores ao material.

De todos os gráficos analisados, observou-se que o melhor teor de fibra a ser usado é o teor de 250g/cm^3 , tanto para o traço M1 (9 MPa) como para o traço M2 (13 MPa). Todos os parâmetros analisados mostram que o teor de fibra 250 g/cm^3 possui melhor fluidez, maior resistência a compressão, maior resistência de tração à flexão e o maior ganho de energia.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Com a finalidade de complementar a pesquisa apresentada neste Trabalho de Conclusão de Curso, bem como dar continuidade a esta linha de pesquisa, sugere-se:

- a) Avaliar métodos padrões para a realização da caracterização das fibras, obtendo-se amostras iguais e sem entalhes.
- b) Desenvolver outras matrizes com diferentes traços ou até mesmo com CAD – concreto de Alto Desempenho, diferentes teores e comprimento de fibras.
- c) Avaliar comportamento deste material em relação à resistência ao fogo.
- d) Executar peças e construir um campo que leve estes materiais aos esforços de uso para avaliar seu comportamento (meio fios e lajotas de pavimento).
- e) Verificar os aspectos de acústica e transferência de calor.
- f) Realizar ensaio de Microscopia Eletrônica para verificar a possibilidade de degradação.

6. BIBLIOGRAFIA

ABEPET. **Associação Brasileira dos Fabricantes de Embalagens PET.** Disponível em: www.abepet.com.br. Acesso em: Agosto de 2003.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção Civil.** Volume 1. Rio de Janeiro – RJ. 5º ed. LCT. 1995.

CAMPAGNOLO, J. L.; FILHO, L. C. P. S. **Tendências na Utilização de Compósitos para Recuperação Estrutural.** Jornal do CREA: Março de 2003.

CORÓ, A. G. **Investigação das Propriedades Mecânicas de Concretos Reforçados com Fibras PET.** Ijuí – RS. Dezembro de 2002. pg.43.

FURASTÉ, Pedro Augusto. **Normas Técnicas para o Trabalho Científico.** Explicitação das Normas da ABNT. – 12º edição, Porto Alegre: s.n., 2003.

FRANKENBERG, C. L. C.; RAYA-RODRIGUEZ, M. T.; CANTELLI, M.(orgs). **Gerenciamento de Resíduos Certificação ambiental.** II Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental, Porto Alegre - RS: 26 a 28 de outubro de 1998.

GRIPPI, Sidney. **Lixo, reciclagem e sua história: guia para as prefeituras brasileiras** / Sidney Grippi. – Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

HANNANT, L. Fiber-reinforced cements and concretes. In: J. M. ILLSTON. **Construction Materials; their nature and behavior**. 2ed..London: J. M. Illston/E & FN spon, 1994. p.359-403.

HALL, L., VLACK, V. **Prípios de Ciência dos Materiais**. São Paulo – SP: Edgard Blücher LTDA, 1970, 14º reimpressão – 2002.

HELENE, P., TERZIAM. P. **Manual de Dosagem e Controle do Concret**. São Paulo. , Brasília, DF: SENAI. Pini, 1992.

JOHNSTON, C. D. Fiber-reinforced cement and concrete. In: V. M. MALHORTA. **Advances in concrete technology**. 2ed. Ottawa: V. M. Malhorta, 1994. p.603-673.

MANO, E. B. **Polímeros como Materiais de Engenharia**. São Paulo – SP: c, 1991.

MODLER, L. E. et al. **Investigação das Propriedades Mecânicas de Concretos Reforçados com Fibras**. Em: V Congresso de Engenharia Civil. Juiz de Fora – MG. 2002.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto**. 2º ed. São Paulo: Pini, 1997.

PELISSER, Fernando. **Avaliação do Desempenho de Concretos Reforçados com Fibras de Polietileno Tereftalato.** Em: 45º Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo: IBRACOM, 2003.

PETRUCCI, Eladio G. R. **Concreto de cimento Portland.** São Paulo: Globo, 1998.

Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. **Metodologias e Técnicas de Minimização de Resíduos Sólidos Urbanos.** – Rio de Janeiro; ABS – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1999. 65 p. il.

SILVA, J. **Propriedades Químicas dos Plásticos.** Disponível: www.google/propridadesquimicasdosplasticos. Acesso em: agosto de 2003.

SMITH, W. F. **Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais.** 3ed. McGRAW-WILL de Portugal, 1998.

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

TEXEIRA, E. N.; ILHA, M. S. O.; *in*: **II Encontro Tecnologia de Sistemas: Plásticos na Construção Civil.** São Paulo - SP. De 26 a 28 de Novembro de 1997.

UNIJUÍ – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Grupo Interdepartamental de pesquisa sobre Educação em Ciências –

Geração e Gerenciamento dos Resíduos Sólidos Provenientes das Atividades Humanas / GIPEC. – Ijuí: Ed. Unijuí, 2002. – 60 p. : il.