

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Diego Guimarães

**PISOS INDUSTRIAIS EM CONCRETO: DETERMINAÇÃO DE
TEORES ÓTIMOS DE FIBRAS DE AÇO E POLIPROPILENO
EM ENSAIOS MECÂNICOS**

Porto Alegre
dezembro 2010

DIEGO GUIMARÃES

**PISOS INDUSTRIAIS EM CONCRETO: DETERMINAÇÃO DE
TEORES ÓTIMOS DE FIBRAS DE AÇO E POLIPROPILENO
EM ENSAIOS MECÂNICOS**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Civil

Orientador: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Coorientador: Alexandre Rodrigues Pacheco

Porto Alegre
dezembro 2010

DIEGO GUIMARÃES

**PISOS INDUSTRIAIS EM CONCRETO: DETERMINAÇÃO DE
TEORES ÓTIMOS DE FIBRAS DE AÇO E POLIPROPILENO
EM ENSAIOS MECÂNICOS**

Porto Alegre, 08 de dezembro de 2010

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Ph.D. University of Leeds
Orientador

Prof. Alexandre Rodrigues Pacheco
Ph.D. The Pennsylvania State University
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Eng. Msc Luciane Caetano Fonseca (UFRGS)
MSc. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. MSc. Uziel Cavalcanti de Medeiros Quinino (UNISINOS)
MSc. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho à minha família, que sempre me apoiou, especialmente durante o período do meu curso de graduação, estando ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Luiz Carlos da Silva Filho, orientador deste trabalho e de todos meus trabalhos de iniciação científica durante o curso, por toda sua dedicação e a oportunidade que me propiciou de trabalhar no LEME – UFRGS, durante 4 anos, os quais contribuíram para consolidar minha formação acadêmica.

Agradeço ao Prof. Alexandre Rodrigues Pacheco, coorientador que me ajudou na escolha do tema, me orientou e revisou inúmeras vezes o trabalho, contribuindo de grande forma para a sua conclusão.

Agradeço a Prof. Carin, por me instruir em todas as etapas do trabalho e colaborar para eu terminar o trabalho com qualidade.

Agradeço ao Prof. Uziel Cavalcanti de Medeiros Quinino, de cuja pesquisa participei, o que contribuiu para que eu ampliasse meus conhecimentos sobre o concreto reforçado com fibras, também por sua amizade.

Agradeço à engenheiras Luciane Caetano Fonseca e Maria Vânia Nogueira do Nascimento Peres, por toda a contribuição e ajuda no trabalho de conclusão.

Agradeço ao mestrando Fabiano da Costa Höltz, por toda sua ajuda na parte experimental, colaboração nas concretagens, nos ensaios, pela amizade e todas as jantas no RU.

Agradeço aos bolsistas do LEME Wagner Della Flora Gross, Bruno Ricardo Biazetto, Marcos Vinicius Ribeiro, Astrid Costa Dittrich, Mariane Muller Barcelos, Victor Ivan Dal Bosco, Eduardo Bonow Simões por toda dedicação e colaboração nesta pesquisa, pois sem eles eu não teria terminado este trabalho.

Agradeço a Liliane Gaeversen, Euripedes Martins Fontes e ao Edgar Wallace Pereira Lucas, por todo o apoio e suporte para que a pesquisa pudesse ser realizada no LEME.

Agradeço a todos meus amigos, Wagner, Cleiton, Paulo, Karine, Henrique, Paty, Leonardo, Carine, Nessa, Renato, Raquel, Mateus, Marco, por estarem ao meu lado durante toda a caminhada. Agradeço ao pessoal do futebol de 5º feira, e da banda por toda a amizade.

Agradeço a minha namorada Dafne por toda a ajuda no TCC, revisando o texto e colaborando para a melhoria do trabalho. Por estar sempre presente nas horas difíceis e também por todos os momentos legais que passamos juntos.

Agradeço a Tia Flora, Tio Hilton e Tia Miriam, por sempre me apoiar e incentivar na jornada acadêmica. Sempre colaborando, seja com o cartão do jogo do Grêmio, seja com as tardes de sábado.

Agradeço a minha mãe, Daura Maria, e a minha tia Naura que me deram toda a base, o amor e o carinho para que eu atingisse o final do curso de engenharia, sempre me apoiando em todas as horas difíceis, quando o caminho parecia muito árduo, afinal uma boa estrutura precisa de uma boa base. Quando a estrada parecia muito longa, estavam elas lá do meu lado, ajudando a caminhar, eu amo vocês.

Agradeço a deus por todas as oportunidades que me propiciou e continua me proporcionando, por me dar forças para continuar a caminhada.

Agradeço as dificuldades que enfrentei; não fosse por elas, eu não teria saído do lugar. As dificuldades nos impedem de caminhar. Mesmo as críticas nos auxiliam muito.

Francisco Xavier

RESUMO

GUIMARÃES, D. **Pisos Industriais em Concreto Armado: determinação de teores ótimos de fibras de aço e polipropileno em ensaios mecânicos**. 2010. 60 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Apesar do concreto ser um material amplamente utilizado na indústria da construção civil, as estruturas construídas com este material podem apresentar sérias patologias devido ao seu comportamento frágil. Inúmeras pesquisas têm sido realizadas com o intuito de minimizar essa característica do material. Uma das alternativas atualmente é a adição de fibras randomicamente dispersas no material. Pisos industriais são casos muito importantes dentro da realidade da construção civil e, devido a sua relação entre área e espessura, podem vir a apresentar sérios problemas. Dentre as principais patologias, podem ser destacadas as fissuras, a abrasão, o desgaste e o esborcinamento (fraturamento junto às bordas). Um piso industrial sofre a ação de diversos tipos de carregamentos, além de problemas de retração e variação térmica. Esses fatores influem para que a vida útil seja minimizada. Desta forma, esta pesquisa visa colaborar para o avanço dos estudos dos concretos reforçados com fibras, com uma atenção especial para os pisos industriais reforçados com fibras de polipropileno ou aço. Quando a matriz cimentícia é reforçada com fibras, muitas de suas propriedades são alteradas: trabalhabilidade, resistência à compressão, módulo de ruptura (resistência à tração na flexão), resistência à tração direta, resistência ao impacto, resistência à fadiga, aumento da tenacidade e inibição na propagação de fissuras. Em projetos de pisos, haverá ganhos em economia e eficiência se os teores de fibras estiverem dosados com um teor ótimo, de maneira que não haja desperdícios, nem fique aquém do seu desempenho potencial. Para avaliar os efeitos da adição das fibras, foram realizados ensaios de tração na flexão, de compressão axial, e de impacto, teores entre 0,6% e 1,0% sobre o volume total de concreto, sendo utilizados dois tipos de fibras: aço e polipropileno. A utilização dos resultados obtidos nos ensaios deve colaborar para com melhorias na utilização das fibras em pisos industriais. Com a análise dos resultados, pode-se verificar que os teores de 0,8% tiveram uma melhor eficiência nos ensaios, sendo um alternativa interessante para a adição em pisos industriais. Na análise, os resultados de 0,6% de aço e de polipropileno foram muito similares e, desta forma, para baixos teores, o polipropileno se torna uma alternativa mais atrativa devido ao seu menor preço em relação ao aço.

Palavras-chave: pisos industriais; fibras; fissuras; aço; polipropileno; tenacidade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: etapas do trabalho de diplomação em engenharia civil.....	20
Figura 2: mecanismo de concentração de tensões na tração no externo das microfissuras.....	23
Figura 3: mecanismo de reforço das fibras atuando como ponte de transferência de tensões.....	25
Figura 4: representação das tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz imediatamente após a fissura.....	27
Figura 5: tensão máxima atingida pela fibra, em relação à tensão última admissível, em função do comprimento da fibra.....	32
Figura 6: fator de forma.....	33
Figura 7: formas e seções de algumas fibras de aço.....	38
Figura 8: piso industrial de concreto armado.....	43
Figura 9: piso industrial de concreto protendido.....	44
Figura 10: piso industrial de concreto reforçado com fibras.....	45
Figura 11: fibras de aço utilizadas na pesquisa.....	57
Figura 12: fibras de polipropileno utilizadas na pesquisa.....	58
Figura 13: ensaio de compressão axial simples.....	59
Figura 14: dimensões da viga.....	61
Figura 15: sistema Yoke – flexão 4 pontos, posicionamento dos LVDT na viga.....	61
Figura 16: ensaio sendo realizado na prensa computadorizada Shimadzu.....	62
Figura 17: esquema do ensaio de impacto.....	64
Figura 18: caracterização das placas de impacto.....	65
Figura 19: abatimento do tronco de cone.....	66
Figura 20: esquema da mesa de Graff e funcionamento.....	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibra e matriz.....	36
Quadro 2: concretagem sem fibras.....	51
Quadro 3: concretagem com fibras.....	52
Quadro 4: propriedades mecânicas e características das fibras de aço.....	57
Quadro 5: propriedades mecânicas e características das fibras de polipropileno.....	57
Quadro 6: preço de mercado das fibras	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: caracterização dos agregados miúdos.....	54
Tabela 2: caracterização dos agregados graúdos.....	55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: representação das tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz após deslizamento parcial da fibra.....	27
Gráfico 2: compósitos reforçados com fibras em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão.....	30
Gráfico 3: diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto.....	35
Gráfico 4: comparação entre os traços na dosagem (concreto sem fibras).....	51
Gráfico 5: comparação entre os traços na dosagem (concreto reforçado com fibras).....	52
Gráfico 6: granulometria do agregado miúdo.....	54
Gráfico 7: granulometria do agregado graúdo.....	56
Gráfico 8: determinação do fator de tenacidade.....	60
Gráfico 9: comparação entre todos os teores de fibras de aço.....	69
Gráfico 10: comparação entre todos os teores de fibras de polipropileno.....	69
Gráfico 11: comparação entre todos os teores de fibras de polipropileno e de aço.....	70
Gráfico 12: comparação entre todos os teores de fibras de polipropileno e de aço.....	71
Gráfico 13: comparação entre a 1º fissura e a ruptura para as fibras de aço.....	72
Gráfico 14: comparação entre a 1º fissura e a ruptura para as fibras de polipropileno....	73
Gráfico 15: comparação da 1º fissura para as fibras de aço e polipropileno.....	74
Gráfico 16: comparação da ruptura para as fibras de aço e polipropileno.....	74
Gráfico 17: resultados do ensaio de compressão aos 28 dias.....	75
Gráfico 18: resultados do ensaio de compressão aos 49 dias.....	75
Gráfico 19: comparação entre preços das fibras.....	77

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 MÉTODO DE PESQUISA	17
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	17
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	17
2.2.1 Objetivo principal	17
2.2.2 Objetivo secundário	17
2.3 HIPÓTESE.....	18
2.4 DELIMITAÇÃO.....	18
2.5 LIMITAÇÕES.....	18
2.6 DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	18
3 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS (CRF)	21
3.1 COMPORTAMENTO DAS MATRIZES CIMENTÍCIAS.....	21
3.2 FIBRAS UTILIZADAS NO CONCRETO.....	23
3.3 INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ.....	24
3.3.1 Comportamento Pré-Fissuração	26
3.3.2 Comportamento Pós-Fissuração	26
3.4 EFEITOS DA ADIÇÃO DE FIBRAS.....	28
3.5 PARÂMETROS QUE INFLUEM NO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS.....	29
3.5.1 Teor de Fibras	29
3.5.2 Geometria das Fibras	31
3.5.2.1 Comprimento crítico.....	31
3.5.2.2 Fator de forma.....	33
3.5.3 Distribuição e Orientação das Fibras	34
3.5.4 Resistência Mecânica e Módulo de Elasticidade das Fibras	34
3.6 FIBRAS.....	37
3.6.1 Fibras de Aço	37
3.6.1 Fibras de Polipropileno	38
4 PISOS INDUSTRIAIS	40
4.1 TIPOS DE PISOS INDUSTRIAIS.....	41
4.1.1 Pisos em Concretos Simples	41
4.1.2 Pisos em Concretos Simples com Armadura Descontínua	42
4.1.3 Pisos em Concretos Estruturalmente Armado	42

4.1.4 Pisos em Concretos Protendido	43
4.1.5 Pisos em Concretos Reforçados com Fibras	44
4.2 CARREGAMENTOS EM PISOS INDUSTRIAIS	46
4.2.1 Cargas Estáticas	46
4.2.2 Cargas Dinâmicas	46
4.3 CONCRETOS PARA PISOS INDUSTRIAIS	47
5 PROGRAMA EXPERIMENTAL	49
5.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA	49
5.2 DOSAGEM DO CONCRETO	50
5.3 MATERIAIS EMPREGADOS	53
5.3.1 Cimento	53
5.3.2 Agregado Miúdo	53
5.3.3 Agregado Graúdo	55
5.3.4 Fibras	56
5.3.5 Aditivo	58
5.4 ENSAIOS MECÂNICOS	58
5.4.1 Ensaio de Compressão Axial Simples	58
5.4.2 Ensaio de Tração na Flexão	59
5.4.3 Ensaio de Impacto	62
5.5 ENSAIOS COMPLEMENTARES NÃO MECÂNICOS	65
5.5.1 Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone	65
5.5.2 Ensaio Mesa de Graff	66
6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	68
6.1 RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO	68
6.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE IMPACTO	71
6.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO	74
6.4 CUSTO DAS FIBRAS NO CONCRETO	76
7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
REFERÊNCIAS	80
APENDICE A – Resultados dos Ensaios de flexão à Quatro Pontos	83

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil está em constante aperfeiçoamento de suas técnicas e de seus materiais, criando alternativas que atendam às suas necessidades. Neste sentido, observa-se um amplo desenvolvimento em relação ao aperfeiçoamento dos materiais com base cimentícia (concretos, argamassas e groutes). Dentre todas as melhorias já realizadas, apresenta grande destaque a incorporação de fibras. Através da incorporação de fibras, o concreto, caracterizado por um comportamento frágil, passa a apresentar um comportamento pseudo-dúctil. Assim, a técnica de inserção de fibras na matriz cimentícia é utilizada nos casos em que existe a necessidade de melhorias nas propriedades do compósito, resultando em alguns ganhos, como o aumento no comportamento à tração na flexão e a resistência à abrasão.

Desde a Antiguidade, a técnica de incorporar fibras para reforçar materiais de comportamento frágil na ruptura, como o concreto, tem sido utilizada. Porém, no último século, isto começou a ser feito em escala industrial, sendo desenvolvidos vários produtos comerciais com fibras (MEHTA; MONTEIRO, 1994). É possível observar esta tendência em casos como os de concretos projetados e peças pré-fabricadas. Em diversos tipos de pisos se pode utilizar o acréscimo das fibras, como é o caso de pisos de aeroportos e em pavimentos de ruas. Neste contexto, este trabalho interessa-se por dar um enfoque à análise da utilização de fibras para a melhoria do comportamento de pisos industriais de concreto.

Pisos industriais em concreto são elementos de grande importância em obras de Engenharia. Por esta razão, fatores como desempenho estrutural, estética, durabilidade e economia devem ser observados a fim de se tomar os melhores cuidados para um bom desempenho do piso. Nestes pisos existem esforços em várias direções, causando diferentes reações. Contudo, as propriedades fundamentais devem permanecer inalteradas, ou os danos devem ser mínimos para que o comportamento global do piso industrial não fique comprometido.

Existem muitos tipos de pisos industriais, entre eles os pisos em concreto: simples sem armaduras, simples com armadura descontínua de retração, estruturalmente armado, protendidos e reforçados com fibras (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007). Neste trabalho, estão em foco os pisos reforçados com fibras.

O concreto apresenta grande resistência à compressão. Porém, quando submetido a esforços de tração, ele não se comporta de maneira eficaz. Se um piso industrial não for corretamente dimensionado, podem surgir manifestações patológicas comprometedoras devido a esta deficiência da matriz cimentícia. Além desse problema, um piso industrial é apoiado em um meio compressível e não-uniforme, que são os solos. Os solos podem ter diferentes geomorfologias e apresentar diferentes comportamentos, também contribuindo para diminuir a vida útil de um piso.

Todos os pisos sofrem com os problemas relacionados anteriormente, porém as cargas estáticas e dinâmicas são as principais causas de patologias. Grandes *pallets* com cargas na ordem de 10 ou 20 tf/m² são cargas estáticas que causam fissuras. Existem também as cargas dinâmicas, que são o impacto de materiais sobre o piso e veículos como empilhadeiras e carretas, causando também graves danos. Os pisos podem sofrer problemas de expansão. A dilatação do piso é classificada como um grande problema estrutural. Em cidades com uma grande variação térmica, como é o caso de Porto Alegre, este tipo de patologia pode causar danos irreversíveis (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007).

Devido às características geométricas citadas anteriormente, o concreto utilizado em pisos industriais deve seguir algumas especificações técnicas. Desta forma buscando um melhor desempenho. Algumas destas características como: o tamanho do agregado, a espessura do piso, o teor de argamassa, o *slump*, a resistência característica, o fator de água cimento e o consumo de cimento, estimadas em valores e percentuais corretos podem melhorar o desempenho da matriz cimentícia. Com base na bibliografia foram escolhidos os melhores fatores para um melhor desempenho do concreto (DAL-MASO, 2008; POLISSENI, 2008).

Alguns dos problemas descritos anteriormente podem ser solucionados com a incorporação de fibras à matriz cimentícia, pois a sua inserção melhora muitas propriedades, como a resistência à compressão, à tração na flexão, ao impacto e à abrasão (BERNARDI, 2003). As fibras têm a capacidade de absorver a energia necessária à ruptura, atuando como pontes de transferência de tensões. As fibras também podem colaborar para o controle das fissuras, tornando-as mais estáveis (NUNES; AGOPYAN, 1998).

Neste trabalho será dada atenção à inserção de fibras de aço e de polipropileno à matriz cimentícia. Desta forma, após esta introdução, o segundo capítulo explica o método da

pesquisa com o objetivo principal e todas as delimitações e limitações do estudo. Depois de definido o método utilizado, foi necessária uma revisão bibliográfica, buscando o embasamento teórico para o desenvolvimento da pesquisa.

O capítulo 3 se refere às características da matriz cimentícia e ao funcionamento do concreto reforçado com fibras. Todas as propriedades essenciais da matriz e das fibras foram revisadas. O capítulo 4 se refere às características de pisos industriais, destacando-se aquelas necessárias para um bom desempenho dos pisos. O capítulo 5 descreve todo o programa experimental, com os ensaios e métodos realizados. Os ensaios foram realizados com o intuito de se encontrar um teor ótimo para cada fibra. O capítulo 6 descreve as conclusões da pesquisa, salientando-se todos os benefícios que a adição de fibras em um teor bem estimado pode proporcionar para a execução de projetos de pisos industriais.

2 MÉTODO DE PESQUISA

A seguir será apresentado o método de pesquisa utilizado neste trabalho.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: em termos de resistência mecânica, quais são os teores de fibras mais adequados para uma matriz de $f_{ck} = 30$ MPa, produzida para a aplicação em pisos industriais?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e são apresentados nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a verificação de teores ótimos de fibras de aço e polipropileno através de ensaios mecânicos (tração na flexão, compressão e impacto), para utilização em projetos de pisos industriais.

2.2.2 Objetivo secundário

Os objetivo secundário deste trabalho é a comparação do desempenho de fibras de aço e polipropileno em diferentes ensaios mecânicos, verificando-se seus efeitos sobre as propriedades reológicas da matriz de concreto.

2.3. HIPÓTESE

A hipótese desta pesquisa é que uma matriz cimentícia reforçada com fibras, aço ou polipropileno deve oferecer melhor desempenho em termos de resistência mecânica para projetos de pisos industriais quando proporcionadas nas quantidades de fibra de 0,6%; 0,8%; e 1,0% em relação ao volume total de concreto utilizado.

2.4 DELIMITAÇÃO

A pesquisa delimita-se ao estudo de concretos com $f_{ck}=30$ MPa, com um fator a/c 0,48, abatimento (*slump*) de $120 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$, traço de 1:1,72:2,65 (cimento : areia : brita), com um teor de argamassa de 50% e com adição de fibras, ora de aço, ora de polipropileno.

2.5. LIMITAÇÕES

O estudo limita-se à análise de concretos reforçados com fibras, em teor tal que sejam alcançados os melhores resultados em termos de resistência mecânica, em ensaios experimentais que investiguem diferentes propriedades reológicas do material:

- a) resistência à compressão;
- b) resistência à tração na flexão;
- c) módulo de elasticidade;
- d) resistência ao impacto.

2.6 DELINEAMENTO DA PESQUISA

A pesquisa está dividida em etapas com a finalidade de facilitar o entendimento, sendo elas:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) confecção de corpos de prova;

- c) ensaios experimentais;
- d) análise de resultados;
- e) conclusões.

A primeira etapa deste trabalho consiste de uma pesquisa bibliográfica. Esta foi fundamental na busca por embasamento teórico suficiente para a condução dos estudos. A fundamentação e a contextualização contribuíram para o aprofundamento da pesquisa. A definição de algumas variáveis que foram utilizadas no trabalho, foram estipuladas tendo como referência livros, dissertações, teses e artigos.

A etapa seguinte consistiu na confecção dos corpos-de-prova com os teores pré-estabelecidos. Esta etapa se constituiu no preparo, fase de cura e armazenagem em câmara úmida dos corpos-de-prova. Os corpos-de-prova foram moldados para os seguintes ensaios: compressão axial, de acordo com a NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994); tração na flexão, de acordo com a norma japonesa JSCE-SF4 (JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 1984); impacto, de acordo com a NBR 13818 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

Após os corpos-de-prova atingirem a idade de 28 dias, a próxima etapa realizada foi a dos ensaios experimentais, que se constituiu em ensaios mecânicos que foram realizados em prensa hidráulica. Ao final desta etapa, foi realizada uma análise dos resultados para que fosse estimado o melhor teor de fibras nos ensaios, além de serem criadas as curvas com as quais os resultados foram confrontados. Na última etapa ocorreu a obtenção das conclusões do trabalho, quando foram determinados os teores ótimos de fibras de aço e de polipropileno. A figura 1 apresenta todas as etapas do Trabalho.

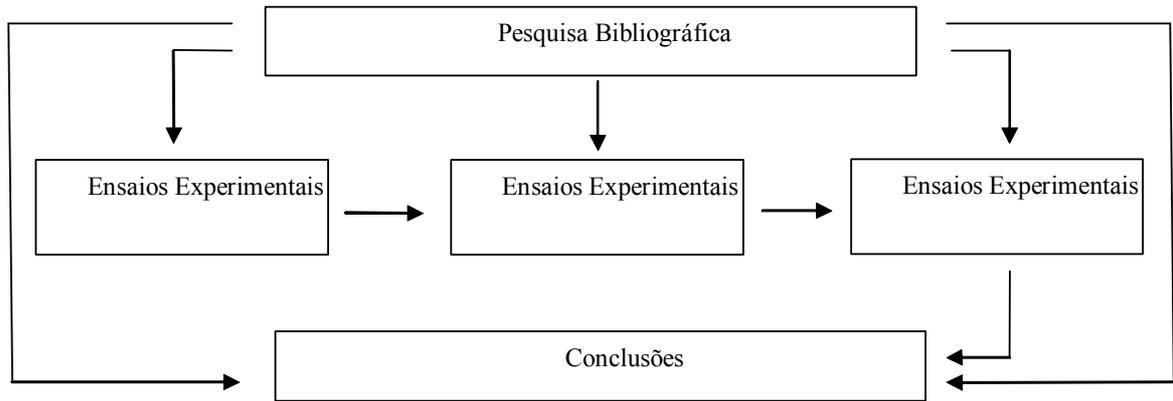


Figura 1: etapas do Trabalho de Diplomação em Engenharia Civil

3 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS (CRF)

A indústria da construção civil está sempre em busca do aperfeiçoamento de seus materiais. Modernamente, existe a idéia de que é conveniente que se misturem diferentes materiais com o intuito de se obter um conjunto com melhores características que os materiais iniciais. Assim, algumas limitações da matriz cimentícia podem ser amenizadas. O reforço com fibras é uma proposta bastante interessante, devendo-se, no entanto, conhecer o mecanismo proporcionado por estas adições. Em concretos reforçados com fibras, deve-se entender a interface fibra-matriz com o intuito de melhor dimensionar a mistura, além de se entender as diferentes características das fibras, suas particularidades e suas deficiências, almejando-se a busca de um conjunto final que apresente baixo custo e desempenho exigido. Alguns tópicos devem ser revisados para que se entendam os mecanismos proporcionados pelo concreto reforçado com fibras, tais como: o comportamento das matrizes cimentícias e das fibras utilizadas no concreto, a interação fibra-matriz e os efeitos da adição de fibras. Esses tópicos serão discutidos a seguir.

3.1 COMPORTAMENTO DAS MATRIZES CIMENTÍCIAS

O concreto é um material de utilidade incomparável, visto que oferece diversas alternativas de aplicação. Sendo altamente resistente à compressão, o concreto possibilita a execução de qualquer elemento estrutural, possuindo também um relativo baixo custo e ampla disponibilidade no canteiro de obras. Entretanto, o concreto possui um comportamento tipicamente frágil e, devido a essa característica, sua resistência a esforços de tração é reduzida. Além disso, sua capacidade de deformação antes da ruptura também não é eficiente (FIGUEIREDO, 2005, p. 1195; MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 5). Quando se utiliza o concreto, devem-se observar as características da matriz, ou seja, os materiais que a compõem: agregados, consumo de cimento e os finos utilizados. A matriz deve estar bem dimensionada de acordo com os materiais e o tipo de destinação à qual a estrutura irá ser utilizada. Contudo, deve-se entender, também, o mecanismo de propagação de fissuras nessa matriz. Beber (2003, p. 21) afirma que, em um compósito, a matriz é o corpo, e tem a

finalidade de unir os macro-componentes e dar forma ao compósito, além de proporcionar proteção aos elementos que podem ser inseridos.

Segundo Mehta e Monteiro (1994, p. 83), o concreto já contém microfissuras antes mesmo de ser submetido a tensões externas. Essa patologia pode ser causada devido às reações internas do cimento na etapa de cura. Também devem ser levados em conta outros fatores, como a exsudação, a zona de transição entre o agregado e a pasta e a contração térmica nas primeiras idades devido a variações de temperatura. A matriz cimentícia, nas primeiras idades, ainda não atingiu a resistência ideal para suportar esforços de tração. Devido a estes fatores, o concreto já está microfissurado quando sofre solicitações e é necessário um acréscimo de pouca energia para propagação destas fissuras. Pode-se observar que a soma destes fatores leva a matriz cimentícia a ter um comportamento frágil. Figueiredo (2005, p. 1199) acrescenta que, no momento em que as fissuras atingem um determinado comprimento crítico, ocorre a ruptura do material, o que caracteriza o comportamento frágil.

A zona de transição é um fator importante no estudo da propagação das fissuras do concreto, por afetar significativamente a capacidade de deformação da matriz e o módulo de elasticidade do concreto. As microfissuras e os vazios nesta região influem neste comportamento. Assim, esta zona pode ser caracterizada como o elo mais fraco da corrente, pois estes vazios e microfissuras contribuem para uma descontinuidade no material, sendo que, desta maneira, a transferência de energia não é permitida (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 40-41).

Garcez (2005, p. 7) corrobora com estas informações ao dizer que existe uma concentração de energia nas extremidades das fissuras. Essa energia se concentra rapidamente quando o concreto é submetido à tração ou à flexão, fazendo com que as fissuras se propaguem a um nível de tensão inferior ao de quando comparado com as tensões de compressão, concluindo que esta será uma provável consequência da ruína frágil do material. Esse mecanismo de propagação das fissuras em matrizes pode ser observado na figura 2, na qual as linhas mais escuras representam a concentração de tensões em uma matriz fissurada.

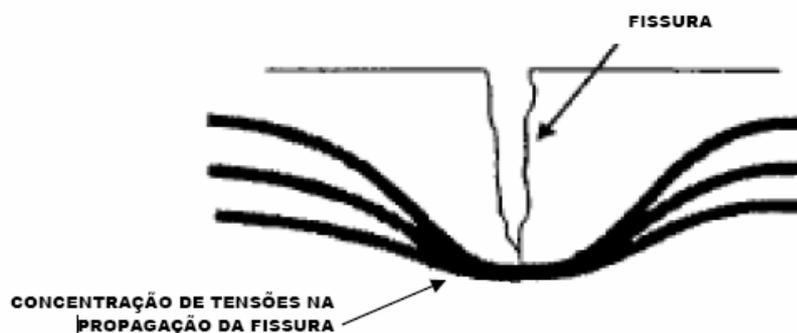


Figura 2: mecanismo de concentração de tensões na tração no externo das microfissuras (NUNES; AGOPYAN, 1998)

De acordo com a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007a), no estágio I, o concreto se encontra em regime elástico, no qual as tensões de tração são proporcionais às deformações específicas. Nesse estado, não existem fissuras, porém o concreto nunca é dimensionado para essas condições. Habitualmente, uma estrutura é dimensionada sabendo-se que irão surgir fissuras e que essas fissuras não devem ultrapassar limites especificados em Norma.

Devido a este procedimento, um reforço com armaduras é imprescindível, ainda que venham a existir os casos em que apenas tal medida não seja suficiente para impedir que patologias devido às fissuras aconteçam. Dentre as inúmeras alternativas que existem para melhorar as deficiências da matriz cimentícia, a inserção de fibras sempre se tem mostrado de maneira eficaz (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

3.2 FIBRAS UTILIZADAS NO CONCRETO

Utilizadas há vários séculos, as fibras tem recebido maior atenção nas últimas décadas, período no qual se vem buscando aperfeiçoá-las para o melhoramento da interface fibra-matriz. Novas técnicas de inserção de fibras na matriz estão sendo desenvolvidas, da mesma forma que existe uma constante evolução na indústria dos aditivos e outros materiais que são incorporados com o intuito de melhorar as propriedades da matriz cimentícia (MASIERO, 2008).

As fibras podem melhorar as características das matrizes de diversas formas. Elas interagem de maneira a aumentar o trabalho da fratura, ou seja, as fibras atuam absorvendo a energia que a matriz cimentícia não consegue absorver. Verifica-se que as deformações também aumentam bastante e são muito superiores às deformações da matriz sem o reforço de fibras. Algumas adversidades também podem ser observadas, como redução da trabalhabilidade do compósito no estado fresco (HIGA et al., 2007, p. 2; MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 435; NUNES; AGOPYAN, 1998).

Figueiredo (2005, p. 1199) também enfatiza que outra característica importante das fibras é que elas se distribuem aleatoriamente no material. Com isso, se o elemento não tem esforços bem localizados, como em uma viga, o reforço é global, em todas as partes da peça.

Garcez (2005, p. 8) ressalta que estão disponíveis uma variedade de fibras, tais como as de aço, polipropileno, carbono, vidro, bambu, entre outras, sendo que tais fibras podem ser classificadas em micro e macrofibras. Esta divisão dependeria de como estas fibras tendem a atuar na matriz, se antes ou após a fissuração do material.

Existem também outras características que devem ser observadas nas fibras, tais como o módulo de elasticidade e o fator de forma. Esses fatores também irão influenciar diretamente na eficiência final do compósito e, portanto, nos próximos itens, são abordados em maior detalhe.

3.3 INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ

Para que o compósito possa ter eficiência e apresentar resultados melhores que o material original, é indispensável que a interface fibra-matriz tenha um bom desempenho. Conforme Mano (1991) independente do material empregado em sua composição, o elemento matricial deve responder de forma a preservar a orientação das fibras e seu espaçamento, transmitir as forças de cisalhamento entre as camadas das fibras e oferecer proteção ao elemento de reforço.

Assim como a matriz envolve e protege a fibra, esta também colabora interagindo e melhorando as propriedades da matriz. Logo, a adição de fibras representa um acréscimo nas propriedades do compósito. Também devem ser observadas as condições de processamento

de cada um dos componentes da mistura, pois origina uma combinação de diferentes elementos – a matriz e as fibras – com o intuito de suportar cargas máximas e impedir que as deformações ultrapassem limites aceitáveis (FÉLIX, 2002, p. 8; MANO, 1991).

As fibras agem como pontes de transferência de tensões, minimizando a concentração de tensões nas extremidades das fissuras. Devido a esta característica, ocorre uma grande redução da velocidade de propagação das fissuras no material. Desta forma, o concreto, que tem um comportamento naturalmente frágil, passa a ser um material com um comportamento pseudo-dúctil. Devido à inserção de fibras, a energia, que antes se concentrava na matriz, passa a ser distribuída entre as fibras (FIGUEIREDO, 2000; FIGUEIREDO, 2005, p. 1199; GARCEZ, 2005, p. 7; MEHTA; MONTEIRO, 1994; NUNES; AGOPYAN, 1998, p. 7). Como pode-se observar na figura 3, as fibras atuam **costurando** as fissuras, impedindo que exista concentração de tensões na matriz.

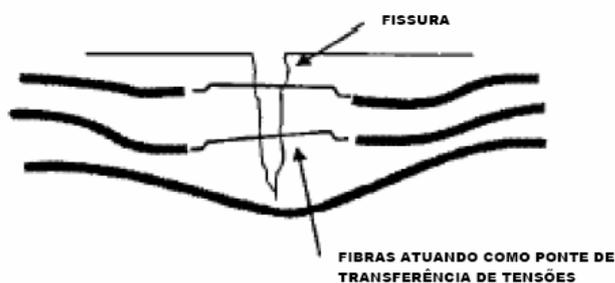


Figura 3: mecanismo de reforço das fibras atuando como ponte de transferência de tensões (NUNES; AGOPYAN, 1998).

Savastano Júnior (1992, p. 30) também corrobora com as afirmações acima ao concluir que as fibras tem a capacidade de aumentar a ductilidade do compósito. Quando as fissuras começam a se unir, devido a descontinuidades na matriz, a tenacidade é modificada e, nesse momento, as fibras atuam impedindo grandes deformações. Complementarmente, com o aumento da tenacidade, há uma elevação na capacidade de absorver energia do compósito.

É sempre importante ressaltar que as fibras têm a capacidade de absorver o excesso de energia oriundo da concentração de tensões que a matriz cimentícia não consegue absorver. Elas também contribuem para que a abertura das fissuras se propague de maneira estável.

Deve-se observar também a interface entre a fibra e a matriz, pois esta aderência é muito importante. De acordo com Garcez (2005, p. 8), em um concreto reforçado com fibras, o processo de fissuração é acompanhado pelo surgimento de forças de impedimento causadas pelas tensões de aderência desenvolvidas na interface fibra-matriz. Essas tensões entre a fibra e a matriz não se comportam de maneira similar durante os estágios de pré e pós-fissuração, pois, no estágio de pré-fissuração, as tensões são proporcionais às deformações específicas, o que não ocorre nos estágio de pós-fissuração. Esses comportamentos são detalhados a seguir.

3.3.1 Comportamento Pré-Fissuração

O comportamento de pré-fissuração pode ser caracterizado quando as microfissuras ainda não se uniram. Segundo Garcez (2005), as tensões são transferidas no estágio de pré-fissuração devido à diferença entre a matriz e as fibras. No início do carregamento, as tensões tangenciais (que surgem devido à diferença no módulo de elasticidade da matriz e da fibra), se distribuem ao longo da superfície de contato. Logo no início do carregamento, existe uma linearidade na distribuição de tensões. Porém, com o aumento do carregamento, a distribuição dessas tensões passa a ter um comportamento não-linear. Ao longo do tempo, as tensões de atrito passam a reger as transferências de tensões entre a matriz cimentícia e as fibras. Nunes e Agopyan (1998, p. 8) afirmam que não há descolamento na interface fibra-matriz enquanto as tensões não superam a resistência limite de cisalhamento.

3.3.2 Comportamento Pós-Fissuração

No estágio de pós-fissuração, como as tensões não se distribuem de maneira linear ao longo da interface matriz-fibras, o comportamento é estabelecido pelas tensões de atrito. O gráfico 1, a τ_{au} indica a máxima tensão de cisalhamento entre a fibra e a matriz para que as tensões tangenciais sejam proporcionais ao deslocamento. Assim, essa transferência de tensões acontece por tensão de aderência. Quando as tensões excedem esse valor, o mecanismo de transferência acontece por tensão de atrito. Com isso, a τ_{fu} configura a máxima tensão onde acontece o escorregamento da fibra (GARCEZ, 2005). A figura 4, mostra como é a

distribuição das tensões na interface matriz-fibra quando a transferência de tensão não é linear.

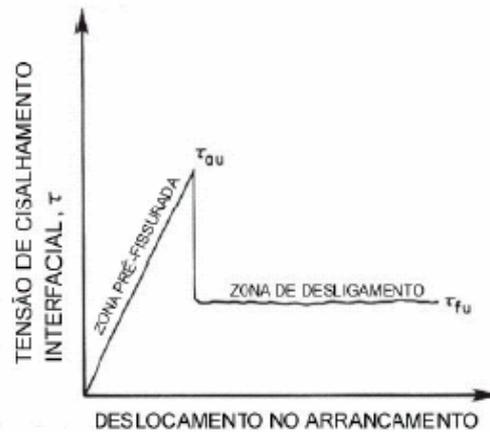


Gráfico 1: representação das tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz após deslizamento parcial da fibra (BENTUR; MINDESS, 1990 apud GARCEZ, 2005)

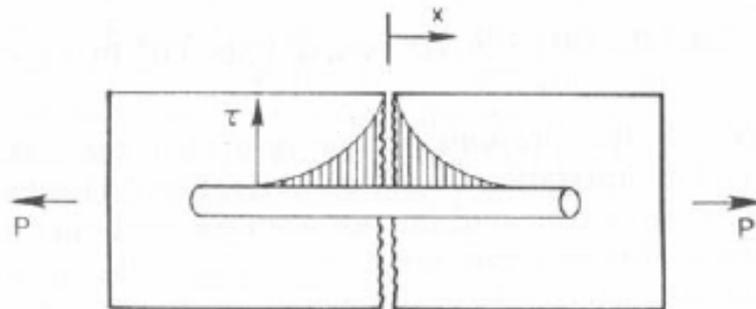


Figura 4: representação das tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz imediatamente após a fissura (BENTUR; MINDESS, 1990 apud GARCEZ, 2005)

À medida que aumenta o carregamento, as fibras passam a se desprender da matriz cimentícia. O processo de arrancamento destas fibras necessita de elevada energia. Com isso, a capacidade de absorver a energia do compósito (tenacidade) também se eleva. O processo descrito anteriormente culmina na propagação das fissuras. Com isso, é interessante observar atentamente o comprimento das fibras, pois quanto maior o comprimento, maior a possibilidade de travamento das fissuras, e, devido a isto, as fibras passam a formar pontes de transferência de tensões (GARCEZ, 2005; NUNES; AGOPYAN, 1998). É importante observar que todas as fibras se tornam efetivas em comportamento pós-fissuração devido às

altas deformações do compósito, sendo que toda a energia a partir deste ponto é absorvida pelas fibras (BERNARDI, 2003, p. 37).

3.4 EFEITOS DA ADIÇÃO DE FIBRAS

A adição de fibras traz ganhos significativos para a matriz cimentícia, melhorando as suas propriedades. Porém, deve-se levar em consideração o tipo de fibra que será adicionada no concreto, pois cada fibra possui características que poderão gerar efeitos diferentes. De acordo com Bernardi (2003), o emprego de fibras com características variadas resultará em variações significativas nas propriedades mecânicas dos compósitos gerados, permitindo que se obtenha diferentes ganhos em termos de resistência mecânica, ductilidade, abrasão e controle da fissuração.

Em todos os efeitos observados com o acréscimo de fibras, as maiores vantagens são o aumento da tenacidade¹, e o aumento da resistência à tração (FIGUEIREDO, 2000; GARCEZ, 2005, p. 34; MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 445; NUNES; AGOPYAN, 1998; PAIVA; FIGUEIREDO, 2007, p. 3). Outra característica importante que as fibras conferem às matrizes cimentícias é a melhoria da resistência ao impacto, ou seja, o compósito consegue suportar a colisão de elementos por um número maior de vezes (GARCEZ, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 1994; NUNES, 2006; SAVASTANO JÚNIOR, 1992).

Apesar da constatação de que há um acréscimo na tenacidade e outras características que definem a capacidade mecânica dos compósitos, existem alguns problemas e deficiências que podem vir a surgir no compósito com a incorporação das fibras. O decréscimo da trabalhabilidade da mistura pode ser observado, não importando o tipo de fibra incorporado. Com a adição de fibras, podem ocorrer problemas devido à incorporação de ar no compósito na moldagem, além das fibras intertravarem o compósito, dificultando a vibração. Isto ocorre porque, com a incorporação de fibras, aumenta-se consideravelmente a área específica dos materiais. Com o aumento da área específica diminui, naturalmente, a água disponível para a molhagem dos materiais. Devido a isso a coesão entre as partículas aumenta e os resultados

¹ Caracterizada como a capacidade de absorver energia pós-ruptura, ou também pode ser compreendida como a área sob a curva em um gráfico de tensão por deformação.

do ensaio de abatimento são alterados (FIGUEIREDO, 2005; GARCEZ, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

3.5 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

Existem muitos fatores que influenciam nas propriedades do concreto reforçado com fibras. Deve-se considerar, quanto às fibras:

- a) teor;
- b) geometria;
- c) distribuição;
- d) orientação;
- e) resistência mecânica;
- f) módulo de elasticidade.

A seguir, são apresentados os parâmetros que influenciam nas características do compósito.

3.5.1 Teor das fibras

A quantidade de fibras inserida no concreto pode ser ministrada em volume ou em teor e geralmente é calculada com base na quantidade de matriz. Deve-se observar que quanto maior o teor, maior será a quantidade de fibras que atuam diretamente na fissura como ponte de transferência de tensão, controlando a propagação de fissuras e influenciando diretamente a tenacidade do compósito (BENTUR; MINDESS, 1990 apud NUNES, 2006; FIGUEIREDO, 2005, p. 1200; GARCEZ, 2005, p. 16; GUIMARÃES et al., 2000, p. 3).

Também é relevante ressaltar que o volume de fibras deve ser inserido na matriz cimentícia com algum cuidado, pois teores muito altos de fibras podem comprometer a trabalhabilidade e, às vezes, esta perda de rendimento é tão acentuada que passa a comprometer o compósito

no estado endurecido. Ao contrário, teores muito baixos causam uma diminuição na trabalhabilidade sem acrescentar ganhos significativos ao compósito. Além disso, a adição de fibras acarreta um aumento no custo do volume do concreto. Logo, é importante que a dosagem seja equilibrada (FIGUEIREDO, 2005; GARCEZ, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 438).

Portanto, deve-se tomar um certo cuidado em relação ao volume de fibras adicionado a matriz. De acordo com Figueiredo (2000, p. 13), pode-se concluir que existe um teor que, mesmo após a ruptura, permite o compósito continuar mantendo sua capacidade portante. Este volume de fibras é chamado de volume crítico.

Analisando o gráfico de carga por deflexão demonstrado no gráfico 2, pode-se observar que existe um trecho linear, no qual as tensões são proporcionais às deformações específicas e ainda não ocorreu ruptura da matriz. Se, a partir do estágio em que há o rompimento da matriz cimentícia, o volume de fibras adicionado estiver acima do volume crítico, o compósito continuará aceitando níveis de carregamento crescentes. Caso contrário, se o volume estiver abaixo do volume crítico, ocorrerá uma queda na capacidade portante do compósito (FIGUEIREDO, 2000).

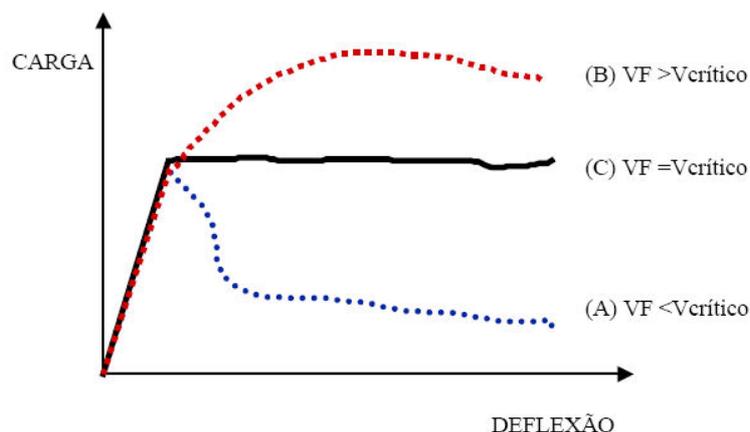


Gráfico 2: compósitos reforçados com fibras em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão (FIGUEIREDO, 2000, p. 14)

Outro problema que pode vir a surgir com altos teores de fibras é a formação de ouriços, que podem ser caracterizados como a aglomeração de fibras que não conseguem se dispersar na matriz cimentícia, quando da confecção do concreto (FIGUEIREDO, 2005, p. 1213).

3.5.2 Geometria das Fibras

A geometria das fibras é um parâmetro importante que deve ser levado em consideração, pois devido as suas diferentes características, as fibras podem ter várias formas e seções, apresentando também uma diversa variação de comprimentos. A razão entre o comprimento da fibra e seu diâmetro virtual é denominada fator de forma. Com essas características, é possível verificar a fibra mais apropriada para uma determinada matriz cimentícia.

A geometria da fibra deve ser observada com cautela. Fibras podem ser lisas ou com ancoragem, e isso vai refletir diretamente no arrancamento e na maneira como a fibra irá se comportar. O dispositivo de ancoragem é um dos principais mecanismos de transferência de tensões (GARCEZ, 2005; NUNES, 2006).

Em relação à geometria das fibras, a Teoria do Dano explica que fios extremamente finos tendem a ter uma resistência mecânica muito maior do que fios com uma área maior pois, quanto menor a área, menor será a quantidade de imperfeições. Devido a isso, a resistência dos mesmos passa a ser maior. Também cabe salientar que, à medida que se diminui a área da fibra, a resistência mecânica sofre um aumento que, porém, não é linear (VASCONCELOS, 1994 apud BERNARDI, 2003, p. 27). O comprimento crítico e o fator de forma da fibra são parâmetros de grande importância, pois definem a aderência da fibra em relação à matriz, conforme vê-se detalhadamente nos próximos itens.

3.5.2.1 Comprimento Crítico

As fibras podem ter os mais variados comprimentos. Porém, existe um comprimento onde a fibra tem o melhor desempenho. Figueiredo (2000, p. 17) afirma que o comprimento crítico se descreve pelo seguinte modelo: primeiramente, as tensões que a matriz não consegue absorver são transferidas para as fibras. Essa transferência de esforços aumenta de modo linear a partir

dos extremos para a região central da fibra. A tensão aumenta até que ela seja igualada à tensão de cisalhamento entre a fibra e matriz e, nesse instante, a tensão é máxima.

O comprimento crítico é um parâmetro que define o comprimento que a fibra deve ter para que a ancoragem entre a fibra e a matriz cimentícia seja mantida. À medida que a fibra tem um comprimento menor que o comprimento crítico, como se pode observar na figura 5(a), a carga de arrancamento se torna insuficiente para superar a σ_{fu} da fibra e, com isso, a fibra se desprende da matriz (FIGUEIREDO, 2000, p. 17-18).

Quando o comprimento da fibra é maior que o comprimento crítico, a fibra é ancorada na matriz cimentícia, elevando as tensões na fibra até que ela alcance a tensão de ruptura. Porém, a energia consumida na ruptura é menor que a energia consumida no arrancamento e, devido a esta justificativa, o compósito se torna mais frágil. Na figura 5(c) se consegue visualizar este comportamento (FIGUEIREDO, 2005, p. 1201; GARCEZ, 2005, p. 19). Conseqüentemente, a máxima tenacidade do compósito é obtida quando o comprimento médio das fibras empregadas é igual ao comprimento crítico (GARCEZ, 2005, p. 19), como se pode observar na figura 5(b).

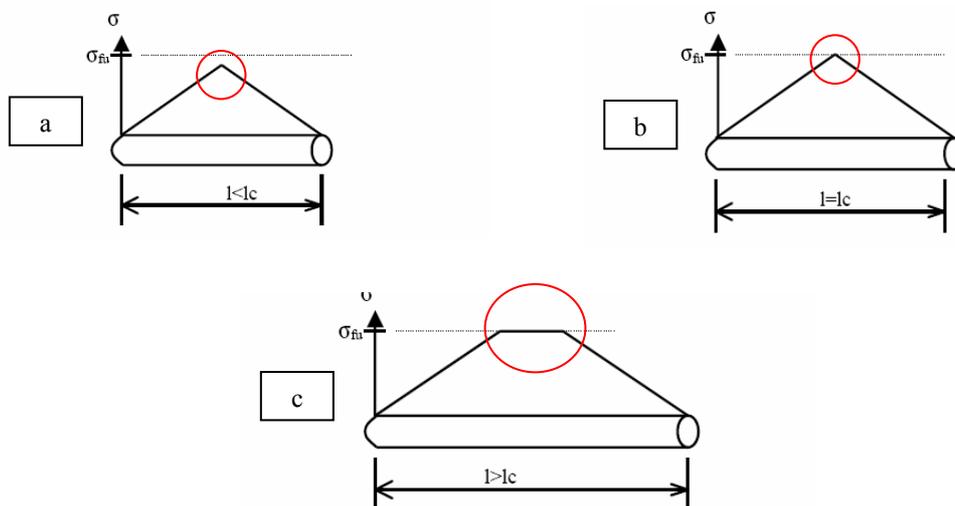


Figura 5: tensão máxima atingida pela fibra em relação à tensão última admissível, em função do comprimento da fibra (BENTUR; MINDESS, 1990 apud FIGUEIREDO, 2000)

Ainda, em termos de comprimento da fibra, é recomendável que haja uma compatibilidade dimensional entre os agregados e a fibra. Recomenda-se, também, que sejam utilizadas fibras de comprimento igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado

empregado no concreto (BERNARDI, 2003; NUNES, 2006). Garcez (2005, p. 23) ressalta que, quando não há compatibilidade dimensional entre os agregados e as fibras, a quantidade de fibras que atuam de maneira eficiente é reduzida.

3.5.2.2 Fator de Forma

Um dos parâmetros que descrevem as fibras é o fator de forma, que é uma relação entre o comprimento e o diâmetro equivalente à área de seção transversal da fibra. Se o comprimento da fibra for mantido e o diâmetro for reduzido, o fator de forma irá aumentar e, em razão disso, a quantidade de fibras que irá atuar na transferência de tensões será maior (FIGUEIREDO, 2005, p. 1201; NUNES, 2006, p. 73).

Mehta e Monteiro (1994) corroboram com essas informações, acrescentando que, com o aumento do fator de forma, o número de fibras que irá interceptar as fissuras será maior. Na figura 6 pode-se observar essa relação entre o comprimento e a área equivalente.

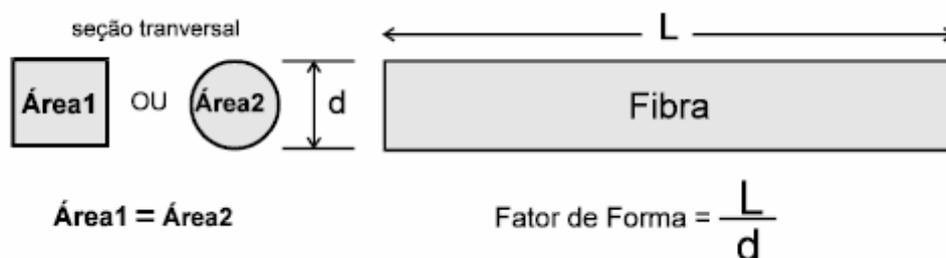


Figura 6: fator de forma (NUNES, 2006)

O fator de forma deve ser observado com cuidado, pois a fibra deve ter um comprimento compatível com o seu diâmetro, de maneira que a ancoragem com a matriz seja mantida sem ter decréscimos na resistência da fibra. Existem fibras que não apresentam diâmetro circular, e devido a isto, Barros² (1996, apud BERNARDI, 2003, p. 33) recomenda que se determine o diâmetro de uma seção circular de área igual à área da seção real da fibra.

² O autor lido cita a obra de Barros, J. A. O. intitulada **Estado-da-Arte dos Betões Reforçados com Fibras**, publicada em 1996, mas não informa outros dados.

3.5.3 Distribuição e Orientação das Fibras

As propriedades reológicas e mecânicas dos compósitos reforçados com fibras são diretamente influenciadas pela orientação das fibras, sendo que os materiais reforçados com fibras apresentam um caráter anisotrópico (FELIX, 2002). É importante salientar que, como já comentado anteriormente, uma distribuição não homogênea das fibras na matriz pode vir a ocasionar a formação de ouriços na mistura e uma posterior diminuição da eficiência do compósito no estado endurecido (FIGUEIREDO, 2005).

3.5.4 Resistência Mecânica e Módulo de Elasticidade das Fibras

O módulo de elasticidade é uma das propriedades mais importantes que se deve observar nas fibras. De acordo com o módulo de elasticidade, a fibra vai apresentar determinadas características que irão agir em determinadas zonas da matriz, como o comportamento pré e pós-fissuração. Quando o módulo de elasticidade da fibra é maior que o da matriz, toda a carga é transferida para as fibras, deixando o compósito com uma alta rigidez (BEBER, 2003; FIGUEIREDO, 2005, p. 1196).

Autores, como Bernardi (2003, p. 37), acreditam que as fibras podem ser divididas em dois grupos, ou seja as fibras com alto módulo de elasticidade e as fibras de baixo módulo de elasticidade, tomando-se como referência o módulo da matriz cimentícia. As fibras de aço, carbono, aramida, por exemplo, possuem um alto módulo, enquanto que as fibras de polipropileno, nylon e celulose, possuem um baixo módulo de elasticidade.

Como foi observado anteriormente, a característica do módulo de elasticidade vai influenciar diretamente nas características do compósito, bem como fibras com módulo de elasticidade mais baixo que o da matriz também podem melhorar as características do compósito. Nas primeiras idades a matriz ainda não tem a resistência necessária para suportar as tensões, porém existem efeitos, como a retração agindo no compósito, fazendo com que a matriz sofra fissuras. Na medida em que se acrescentam fibras com um baixo módulo de elasticidade, apesar destas apresentarem uma menor capacidade de reforço, o excesso de energia é transferido para as fibras (FIGUEIREDO, 2000).

Como se pode observar na figura 9, a matriz cimentícia consegue suportar tensões até o ponto A. Nesse momento ocorre a ruptura da matriz cimentícia, que transfere a tensão para a fibra que tem o módulo de elasticidade mais baixo, ponto C. Como a tensão da fibra é mais baixa que a da matriz nesse ponto, a fibra sofre uma grande deformação até o ponto D, garantindo que o compósito tenha o mesmo nível de tensão. Pode-se observar que a fibra sofre uma deformação brusca para conseguir absorver essa energia que a matriz não consegue. Devido a este comportamento, fibras com um baixo módulo de elasticidade são ideais para matrizes com um baixo módulo de elasticidade (FIGUEIREDO, 2000; FIGUEIREDO, 2005). Conforme afirma Figueiredo (2000, p. 4), a fibra de alto módulo de elasticidade já apresentará um elevado nível de tensão no momento da ruptura da matriz, o que lhe permitirá atuar como um reforço já a partir do ponto B, como se observa no gráfico 3, caso sua resistência não seja superada. No quadro 1 consegue-se visualizar as propriedades de algumas fibras, todas em comparação com a matriz cimentícia.

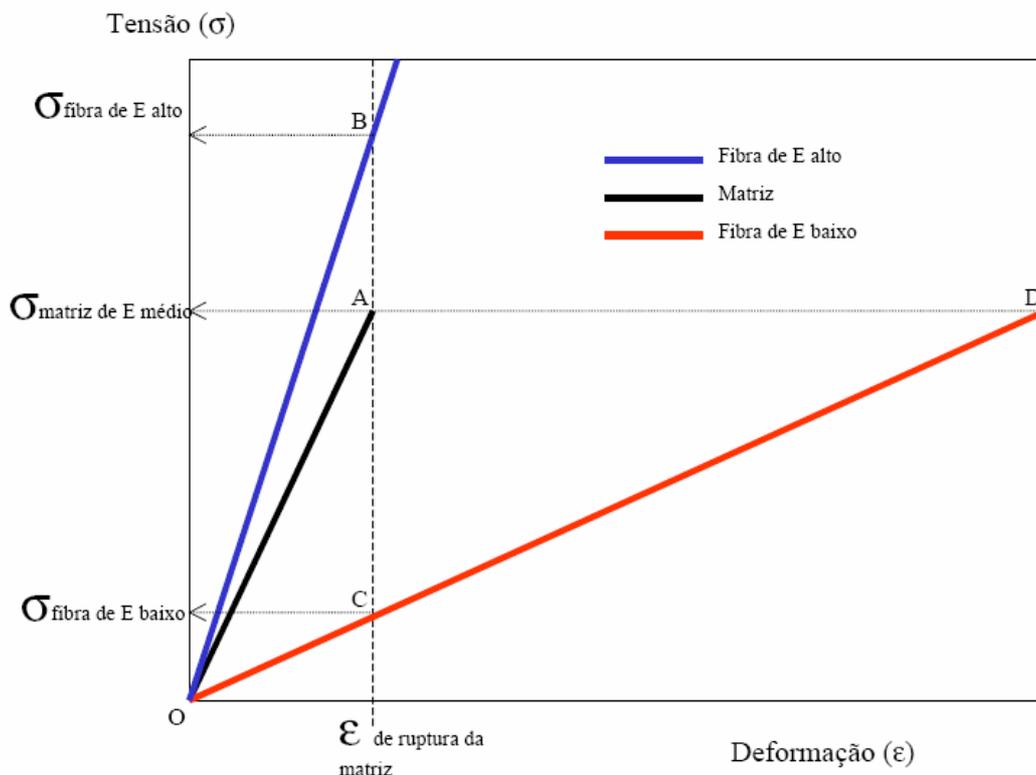


Gráfico 3: diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto (FIGUEIREDO, 2000)

Material	Diâmetro (μm)	Massa Específica (g/cm^3)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à Tração (GPa)	Deformação Específica na ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	190-210	0,5-2,0	0,5-3,5
Vidro	9,0-15,0	2,60	70-80	2-4,0	2-3,5
Amianto	0,02-0,04	2,6	160-200	3-3,5	2-3,0
Polipropileno	20-200	0,9	1-7,7	0,5-0,75	8,0
Kevlar	10	1,45	65-133	3,6	2,1-4,0
Carbono	9	1,9	230	2,6	1,
Nylon	-	1,1	4	0,9	13-15
Celulose	-	1,2	10	0,3-0,5	-
Acrílico	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3
Polietileno	-	0,95	0,3	0,0007	10
Fibra de madeira	-	1,5	71	0,9	-
Sisal	10 50	1-50,0	-	0,8	3
Matriz de cimento	-	2,5	10,0-45,0	0,0037	0,02

Quadro 1: valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibra e matriz (BENTUR; MINDESS, 1990 apud FIGUEIREDO, 2000)

Como as fibras modificam as características reológicas do compósito, deve-se atentar para o módulo de elasticidade da fibra. Fibras sintéticas (polipropileno e nylon), que apresentam um baixo módulo de elasticidade, são utilizadas para concretos com baixa resistência e podem ser ideais para controlar as fissuras nas idades iniciais do concreto (fissuras por retração) (FIGUEIREDO, 2000, p. 4).

Deve-se levar em consideração que as fibras com um alto módulo de elasticidade tendem a ser arrancadas, pois apresentam grande capacidade de absorver energia e, devido a isso, a ancoragem com a matriz é considerada a região mais problemática. Hannant³ (1978 apud BERNARDI, 2003, p. 14) corrobora com essa idéia, pois o autor acredita que o fator crítico não é a resistência da fibra, mas sim a eficiência da aderência desta em relação à matriz.

³ HANNANT, D.J.; **Fibre Cements and Fibre Concretes**. Toronto: John Wiley & Sons, 1978.

3.6 FIBRAS

Nos próximos itens são descritas algumas das características das fibras utilizadas nesta pesquisa.

3.6.1 Fibras de Aço

As fibras de aço são fibras muito utilizadas na indústria da construção civil para diversas finalidades, como reforço em pisos industriais, pavimentos, túneis, elementos pré-fabricados, concretos projetados, entre outras estruturas. Todas as especificações são devidas ao fato de as fibras de aço terem um alto módulo de elasticidade. Devido a esta característica, as fibras de aço aumentam significativamente a capacidade do compósito de absorver energia (BERNARDI, 2003, p. 47; CHODOUNSKY; VIECILI, 2007; FRANCO, 2008, p. 43; GARCEZ, 2005, p. 43).

Verifica-se que o consumo de fibras de aço tem aumentando nos últimos anos. A partir da década de 1990, pisos industriais passaram a ser produzidos com fibras sem o uso de armaduras, apresentando a mesma segurança de um piso estruturado. Pode-se observar a alternativa das fibras como uma eficiente economia em relação a outras técnicas (FRANCO, 2008, p. 42).

A fabricação das fibras de aço pode se dar por diversas maneiras, porém a fabricação a partir da trefilação a frio dos fios de aço é a mais utilizada. Neste processo, a fibra atinge elevadas resistências à tração (1.000 MPa), sendo que algumas fibras de aço podem ter resistências em torno de 2.500 MPa. Essas fibras podem ter variadas formas, tamanhos e tipos de ancoragens (BERNARDI, 2003, p. 47; FRANCO, 2008, p. 43; LOBÃO, 2005, p. 12).

Em relação à sua geometria, as fibras de aço podem ter comprimentos entre 0,025m e 0,075m, e a área pode ser circular ou retangular. Os fatores de forma podem variar no intervalo de 20 a 100 (relação entre o comprimento e diâmetro equivalente). É importante ressaltar que os fatores de forma mais utilizados para pisos industriais são os de 60 e 80 (FRANCO, 2008; LOBÃO, 2005). Na figura 10, pode-se visualizar algumas seções de fibras de aço e suas respectivas geometrias.

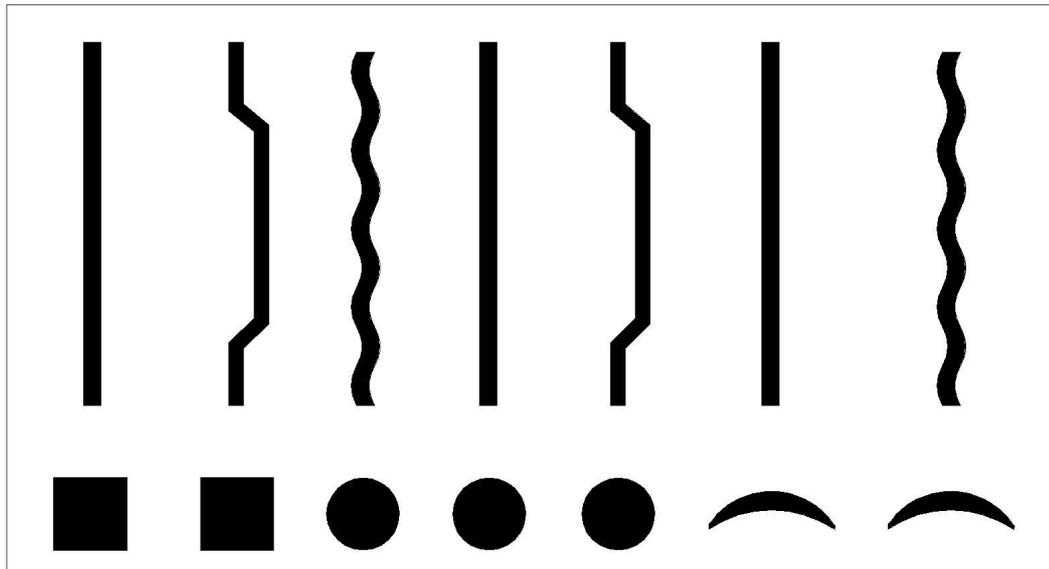


Figura 7: formas e seções de algumas fibras de aço
(adaptado de FRANCO, 2008; LOBÃO, 2005)

3.6.2 Fibras de Polipropileno

As fibras de polipropileno são de origem polimérica, sendo um tipo de plástico que possui um baixo custo, além de algumas características particulares. Sendo inerte, tem uma alta resistência a ataques químicos e álcalis. O polipropileno é formado por cadeias de moléculas polimerizadas, o que lhe proporciona uma baixa densidade em relação a outros materiais, estando em torno de 900 kg/m^3 (DONATO, 2007; FÉLIX, 2002; GARCEZ, 2005).

É importante conhecer as propriedades mecânicas dos materiais, uma vez que as fibras de polipropileno possuem uma boa resistência à tração e um baixo módulo de elasticidade. Quando nas matrizes cimentícias são incorporadas fibras de polipropileno, a resistência ao impacto é melhorada. Quando comparado às outras fibras de origem polimérica, o polipropileno possui um primoroso desempenho (BERNARDI, 2003, p. 49; DONATO, 2007, p. 19; FÉLIX, 2002, p. 5).

O estudo com as fibras de polipropileno se torna importante devido aos benefícios que o baixo módulo de elasticidade desta fibra pode proporcionar ao comportamento do compósito. Esse baixo módulo de elasticidade atua impedindo a propagação das fissuras junto à matriz cimentícia, que possui um pequeno módulo de elasticidade nas primeiras horas. Em elementos

que tenham uma grande área superficial, nos quais problemas de retração por secagem ocorrem frequentemente, é interessante a aplicação das fibras de polipropileno (BERNARDI, 2003).

4 PISOS INDUSTRIAIS

Pisos industriais são elementos altamente importantes em um projeto estrutural. No momento em que se projeta um piso industrial, uma série de quesitos devem ser levados em consideração, como o desempenho estrutural, a estética, a durabilidade e a questão econômica. Devido ao fato de o mercado da construção civil estar cada vez mais exigente, novos materiais e tecnologias estão constantemente sendo desenvolvidos. Porém, nos últimos anos, engenheiros e técnicos têm avaliado que cada vez mais crescem as patologias em pisos industriais (CHODOUNSKY; VIECILLI, 2007; FORTES et al., 2008). Com isso, estudos devem ser realizados com o intuito de minimizar esses problemas.

De acordo com Chodounsky e Viecilli (2007, p. 9), o piso industrial é um dos componentes mais importantes de uma instalação industrial, em qualquer área de produção ou logística. Porém, devido as suas características e condições de produção é frequentemente mais vulnerável a patologias do que outros elementos estruturais. Por isso, deve-se ter um cuidado com os critérios de dimensionamento que devem ser utilizados.

Em razão dessa importância, deve-se ter cuidados especiais com os pisos industriais, pois considerando-se que muitos problemas podem surgir no piso devido à relação entre a área e a espessura, considerando-se que o piso possui uma área muito grande em relação à espessura. Entre as diversas patologias que podem surgir nesses pisos, a fissuração é merecedora de cuidado especial (FALKNER et al., 1995 apud CHODOUNSKY; VIECILI, 2007).

No início da construção de pisos no Brasil, o preceito mais utilizado era o sistema de Damas, que se caracteriza por pequenas placas de concreto. Esse sistema implicava em um grande número de patologias. Com o passar dos anos e o avanço da tecnologia e dos materiais, houve uma evolução. Em relação às dimensões, as áreas das placas em um projeto de piso começaram a ser projetadas em maior tamanho e a espessura começou a se reduzir, sendo que hoje se pode fazer pisos com distanciamento entre as juntas de até 70 metros (BINA, 2009; DAL-MASO, 2008; POLISSENI, 2008; VIECILI, 2004).

Com todo esse avanço das técnicas de projetos de pisos as patologias continuaram se manifestando. Devido a isso, é necessário que estudos criteriosos sejam levados em conta no

desenvolvimento do projeto, como a cura, a execução e o acabamento. Também devem ser especificados a drenagem e o afastamento das juntas. Os autores também retratam que a técnica de dimensionamento de pisos no Brasil é nova se comparada ao tempo em que vem sendo utilizada na Europa e nos Estados Unidos. A história da pavimentação no Brasil já passou por diversas etapas e metodologias construtivas. Durante muitos anos, os pisos eram dimensionados de acordo com os critérios da PCA (*Portland Cement Association*), porém a partir da metade da década de 1990 os métodos são preconizados com forte base européia (FORTES et al., 2008, p. 44; RODRIGUES et al., 2006 p. 9; VIECILI, 2004). A seguir é descrita uma breve classificação dos tipos de pisos industriais.

4.1 TIPOS DE PISOS INDUSTRIAIS

Os pisos industriais podem ser divididos em algumas categorias e, abaixo, são descritas as mais importantes, ou seja, pisos em concreto:

- a) simples;
- b) simples com armadura descontínua de retração ou pisos em concreto reforçado com baixo teor de fibras de aço;
- c) estruturalmente armado;
- d) protendido;
- e) reforçado com fibras.

4.1.1 Pisos em Concreto Simples

É um tipo de piso em que todos os esforços de tração e retração são suportados pelo concreto, sendo um tipo de piso que necessita de barras de transferência. Não é muito utilizado em obras devido à necessidade de muitas juntas construtivas. Este tipo de piso também não é muito recomendando para o caso em que haverá um tráfego de cargas elevadas sobre o mesmo. O piso em concreto simples pode ter muitas patologias devido a esforços de fadiga. As dimensões das placas podem ser dimensionadas em função do diâmetro máximo do agregado. Uma das vantagens em relação aos outros pisos é a rapidez de execução

(PORTLAND CEMENT ASSOCIATION⁴, 1991 apud CHODOUNSKY; VIECILI, 2007; VIECILI, 2004).

4.1.2 Pisos em Concreto Simples com Armadura Descontínua

Este tipo de piso é construído com uma armadura constituída por telas de aço eletrosoldadas CA-30, tendo a função de combater os esforços de retração. No dimensionamento, esta armadura deve ser interrompida entre 3 a 5 cm das juntas. Caso a armadura não seja interrompida, podem surgir fissuras ao longo da placa. As fibras de aço também podem ser utilizadas neste tipo de piso, com dosagens entre 10 e 20 kg/m³ (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, 1991 apud CHODOUNSKY; VIECILI, 2007).

4.1.3 Pisos em Concreto Estruturalmente Armado

Neste tipo de piso os esforços são divididos, isto é, o concreto absorve os esforços de compressão e os esforços de tração são absorvidos pela armadura. Devido à presença da armadura, a espessura pode ser reduzida no dimensionamento e os prazos também podem ser reduzidos. Neste tipo de piso as juntas podem ser mais afastadas (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007; VIECILI, 2004).

No dimensionamento deste piso, deve-se considerar dois tipos de armaduras: a negativa, que tem como função combater a retração, e a positiva, que visa resistir aos esforços de tração. Este fator possibilita dimensionar placas com grandes dimensões. Este tipo de dimensionamento é muito utilizado na Europa. Placas com grandes dimensões também são conhecidas como sistema *Jointless Floor*, no qual tem-se dimensões de placas de até 40 m (BALBO, 2009; CHODOUNSKY; VIECILI, 2007, p. 30; RODRIGUES et al., 2006, p. 12). Na figura 7 pode-se visualizar um piso estruturalmente armado.

⁴ PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Fiber Reinforced Concrete**. Skokie, 1991.

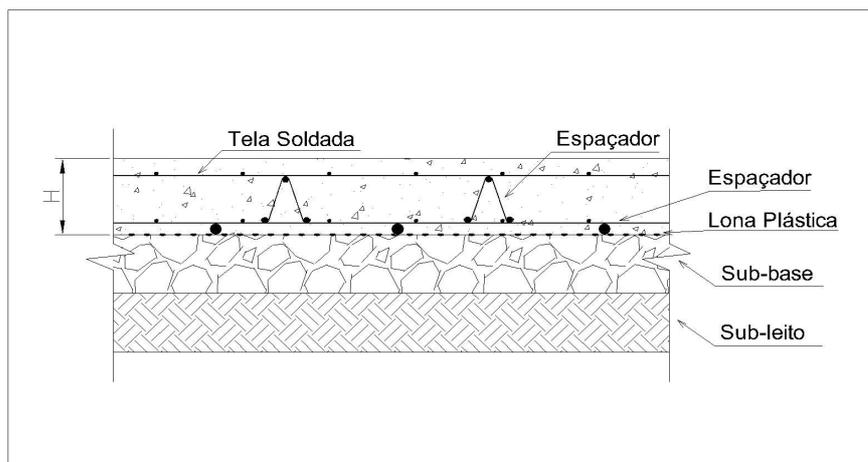


Figura 7: piso industrial em concreto armado
(adaptado de BALBO, 2009; RODRIGUES et al., 2006)

4.1.4 Pisos em concreto protendido

A idéia da protensão é criar esforços no elemento de compressão antes do carregamento ser imposto. Desta forma, pode-se empregar cargas maiores com redução do momento fletor. O conceito é equilibrar tensões que podem causar danos ao elemento estrutural. Porém, é uma técnica muito cara se comparada com as demais, além de necessitar de equipamentos especiais (BALBO, 2009; EMERICK, 2005 apud MILANI, 2006; SCHIMD, 1996 apud OLIVEIRA, 2000).

A técnica da protensão também pode ser utilizada para pisos industriais, sendo utilizadas cordoalhas engraxadas e plastificadas instaladas nas duas direções. A espessura do piso pode ser bastante reduzida, tendo tamanhos de até 90 mm. Há recomendações de se dimensionar um piso protendido para que este obtenha 65% da espessura de um piso em concreto convencional. Um detalhe importante é que, neste tipo de piso, pode-se utilizar juntas construtivas distantes de até 150 m. Apesar disso, o piso de concreto protendido é pouco utilizado no mercado nacional (HANCOCK; HOSSAIN⁵, 2000 apud CHODOUNSKY; VIECILI, 2007; VIECILI, 2004). Na figura 8 pode-se visualizar um piso de concreto protendido.

⁵ HANCOCK, J.; HOSSAIN, M. Cross-Tensioned Concrete Pavement: an alternative modern pccp design. in: mid-continent transportation symposium, 2000, Ames, Iowa. **Proceedings...** Ames: Iowa State University, 2000, p. 207-210.

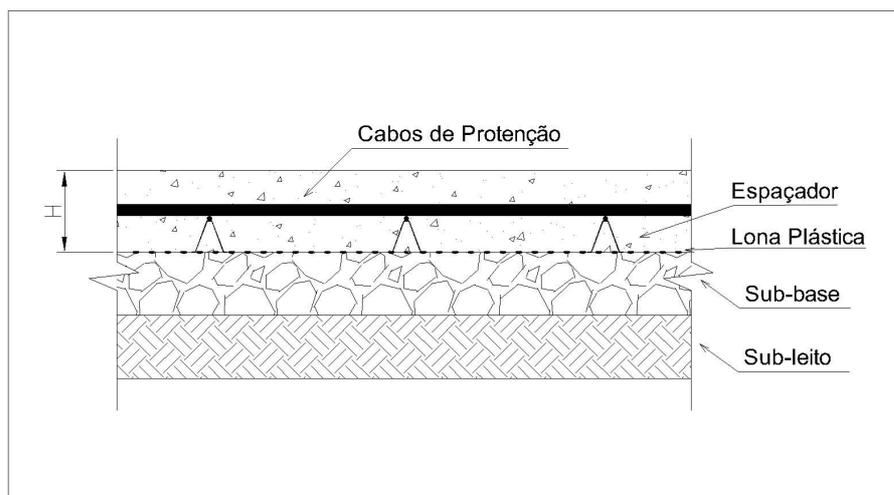


Figura 8: piso industrial em concreto protendido (RODRIGUES et al., 2006)

4.1.5 Pisos em concreto reforçado com fibras

O uso de fibras em concretos vem sendo cada vez mais corrente na indústria da construção civil. Como não poderia ser diferente, em pisos industriais também tem aumentado o número de projetos com fibras.

Como já citado nos capítulos anteriores, a utilização de fibras oferece melhoras significativas quanto à efetividade do compósito, permitindo uma maior absorção de energia antes da ruptura (tenacidade). Devido às melhorias provocadas pela adição de fibras, pode-se dimensionar placas com até 2.500 m² (MEHTA; MONTEIRO, 1994; VIECILI, 2004).

Uma das vantagens interessantes que se pode estabelecer com o uso de fibras, em comparação às armaduras convencionais, é a não interferência na operação em veículos guiados por indução magnética. Um aspecto dos mais importantes, no entanto, é a capacidade das fibras também de permitirem a inibição das fissuras com deterioração progressiva das juntas, ou esborcinamento (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE⁶, 1991 apud CHODOUNSKY;

⁶ O autor lido cita a obra do American Concrete Institute intitulada **Do Steel Fibers Mix with Wire Guides?**, deste instituto tendo sido publicado em uma revista em dezembro de 1991.

VIECILI, 2007; CONCRETE SOCIETY TECHNICAL REPORT⁷ 34, 1994 apud CHODOUNSKY; VIECILI, 2007).

Em relação aos comprimentos das fibras que podem ser utilizadas em pavimentos de concreto, Figueiredo (2005, p. 1201) afirma que se pode utilizar fibras mais longas do que em elementos convencionais, pois não existem grandes restrições em relação aos agregados. Na comparação com um pilar, dependendo da quantidade de armadura, pode-se limitar o tamanho das fibras ao tamanho dos agregados. Na figura 9 pode-se visualizar um piso de concreto reforçado com fibras.

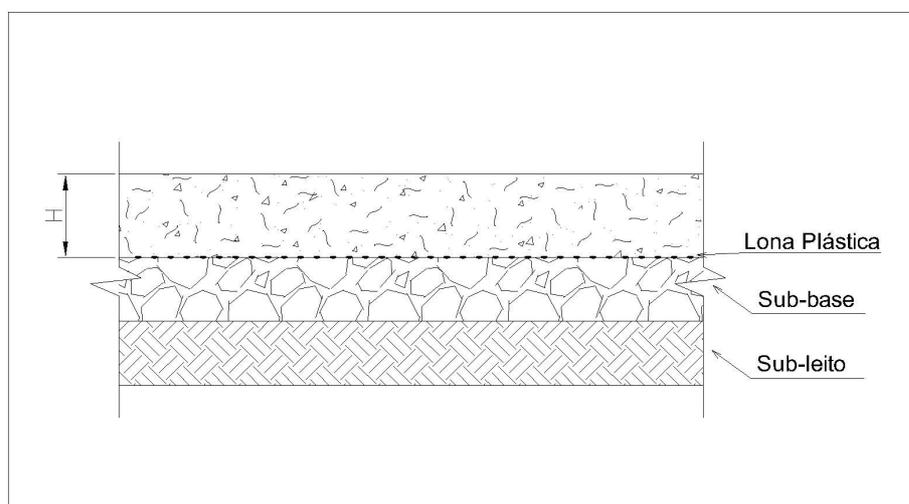


Figura 9: piso industrial de concreto reforçado com fibras
(RODRIGUES et al., 2006)

O surgimento de patologias em pisos de indústrias tem diversas causas. Para uma melhor compreensão dos problemas é necessário conhecer como eles se originam. Na continuidade deste trabalho, serão abordadas algumas causas de patologias em pisos industriais.

⁷ O autor lido cita a obra do Concrete Society Technical Report 34 intitulada **Concrete Industrial Ground Floors, A guide to the their desing and construction**, deste instituto tendo sido publicado em uma revista em segunda edição de 1994.

4.2 CARREGAMENTOS EM PISOS INDUSTRIAIS

Quando se dimensiona uma estrutura deve-se analisar o tipo de cargas que está imposta e a maneira como elas estão aplicadas. Dependendo da forma como é aplicada uma carga em um determinado elemento estrutural a resposta do mesmo pode ser diferente. Em pisos industriais podem existir carregamentos estáticos e dinâmicos a seguir uma breve explicação sobre cada deles é apresentada.

4.2.1 Cargas Estáticas

Cargas concentradas são tipos de solicitações que devem ser analisadas com cuidado, pois geralmente impõe grandes solicitações à estrutura. Com o avanço das indústrias, a altura dos porta *pallets* tem cada vez aumentado sendo que pode ter alturas de até 25 m. Devido a estas alturas muito elevadas a concentração de cargas nos apoios pode chegar a 20 tf. Momentos positivos elevados são gerados devido a estes fatores (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007; DAL-MASO, 2008).

Em um pavilhão industrial as cargas estão distribuídas de maneira que existem áreas com carregamento e áreas sem carregamento. O carregamento distribuído é constituído por essas regiões onde estão concentradas as cargas, sendo o estoques de *pallets*, materiais a granel e bobinas de papel são caracterizadas como este carregamento. Esta diferença de regiões carregadas e descarregadas gera momentos fletores máximos nas regiões superiores das placas, diferentemente das cargas concentradas nos apoios que geram momentos fletores negativos (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007; DAL-MASO, 2008).

4.2.2 Cargas Dinâmicas

As cargas dinâmicas devem ser avaliadas com cuidado, pois podem causar grandes patologias em pisos. Existem as cargas móveis, que são caracterizadas pelo tráfego de empilhadeiras e pelo impacto de *paletts* no piso. A movimentação é intensa em pisos industriais. Existe a circulação de empilhadeiras e transpaleteiras fazendo o transporte de *pallets*, a transferência de cargas para o piso é realizada através das rodas. Para a análise estrutural deve-se sempre

levar em conta qual o eixo mais carregado, o número de rodas e tipo de roda em carretas (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007; DAL-MASO, 2008).

Existem também as transpaleteiras que transportam cargas de porte menor que as empilhadeiras, porém as rodas são metálicas causando sérios problemas de abrasão. O impacto de pallets no piso pode causar adversidades também (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007; DAL-MASO, 2008).

4.3 CONCRETOS PARA PISOS INDUSTRIAIS

O concreto utilizado em pisos industriais deve seguir algumas recomendações para que o desempenho do piso seja satisfatório. Quando se dimensiona um piso alguns fatores como o traço, a granulometria dos agregados, o teor de argamassa, devem ser levados em consideração.

Em relação a espessura, um piso de concreto deve ser dimensionado de acordo com o tipo de carga que será imposta, entretanto, recomenda-se que espessura mínima seja de 10 cm. A espessura do piso deve ter de três a quatro vezes o diâmetro do agregado máximo. Quando o dimensionamento do piso é realizado segundo as normas européias existe uma limitação em relação a dimensão máxima da brita, sendo recomendada a dimensão máxima de 32mm. Recomenda-se também, que o agregado graúdo seja lavado antes do uso, para a remoção de material pulverulento, desta forma também se reduz a retração hidráulica. Deve-se salientar que a retração aumenta quando usa-se diâmetros menores de brita. Em relação aos agregados miúdos deve-se ter cuidado, pois quando a granulometria do agregado indica areias muito grossas ou muito finas, podem vir a surgir problemas na matriz de concreto (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007; DAL-MASO, 2008; RODRIGUES et al., 2006).

Em relação aos teores de argamassa ideais para pisos industriais segundo Polisseni (2008), é entre 48 a 52%. Dal-Maso (2008), afirma que aumentando-se o teor de argamassa a coesão da mistura também irá aumentar, contudo deve-se ter cuidados em relação a quantidade de argamassa, pois altos teores de argamassa favorecem a retração.

O consumo mínimo de cimento deve ser observado, e deve ser de 350 kg/m^3 , recomenda-se que ele seja o suficiente para permitir um bom acabamento superficial. Também deve-se evitar cimentos com adições de minerais. Em relação a resistência a compressão, o projetista irá especificar dependendo do tipo de utilização e do tipo de maquinário que irá operar sobre o piso. O valor mínimo de resistência a compressão sugerido na literatura é de 25 MPa. A combinação de materiais e parâmetros deve-se de determinada forma que as patologias posteriores sejam minimizadas. Por isso além da especificação mínima de 25 MPa o fator a/c deve ser inferior a 0,55, e o abatimento do concreto no estado fresco deve variar entre 10 e 15 cm (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007; DAL-MASO, 2008; RODRIGUES et al., 2006).

Algumas especificações em relação as fibras utilizadas no concreto devem ser observadas. Para pisos industriais com carregamento pesado recomenda-se que o fator de forma da fibra seja em torno de 80, contudo pisos com carregamento leve o fator de forma pode ser na faixa de 60. Quanto a dosagem de fibras recomenda-se que para fibras de aço com fator de forma em torno de 60 a dosagem mínima seja superior a $18,8 \text{ kg/m}^3$. Quando se usa fibras de aço no concreto existe recomendações que o teor de argamassa seja em torno de 50%, com um fator de a/c abaixo de 0,50 e um abatimento de tronco de cone (*slump*) próximo de $110 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ (BELGO, 2010; CHODOUNSKY; VIECILI, 2007; FRANCO, 2008).

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente capítulo tem por objetivo detalhar os diversos aspectos que envolveram os ensaios experimentais realizados no LEME (Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais) da UFRGS. Nos próximos itens, são apresentados a estratégia de pesquisa, os materiais e os métodos utilizados para se alcançar os objetivos deste trabalho.

5.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

Com base na revisão bibliográfica, foi possível acumular conhecimento necessário para as definições de variáveis, e tipos de fibras que deveriam ser abordados, bem como os estudos da utilização e ensaios que deveriam ser realizados para a utilização de fibras em pisos industriais. Como antes visto, pisos industriais são estruturas que sofrem grandes carregamentos. Foram escolhidas duas fibras, uma delas de aço, pois é a fibra mais utilizada pela indústria na construção de pisos (FIGUEIREDO, 2000). De acordo com os conceitos de adição de fibras, o reforço com fibras de aço é excelente para melhorar a ruptura pós-carregamentos e aumentar a resistência à tração. Esta pesquisa, em princípio, poderia ser realizada apenas com fibras de aço, porém as fibras de polipropileno são ideais para microfissuras e apresentam melhores resultados no combate das fissuras nas primeiras idades do concreto (FIGUEIREDO, 2000). As fissuras iniciais são patologias que ocorrem frequentemente em pisos devido a fissuras oriundas de retração, também a questão estética deve ser levada em consideração (oxidação das fibras).

Na pesquisa foram fixadas as características da matriz cimentícia, tais como o teor de argamassa, traço, etc., e os teores de fibra foram adicionados sobre o volume de concreto. Desta forma, comparou-se os efeitos das duas fibras para a mesma matriz cimentícia e as variáveis de estudos foram, portanto, os teores de fibra adicionados.

O teor ótimo de cada fibra foi determinado de acordo com os resultados de cada ensaio selecionado para a pesquisa, ou seja, de resistência à compressão simples, à tração indireta na

flexão, de módulo de elasticidade e ao impacto. Desta forma, pode-se caracterizar as propriedades mecânicas do compósito. Antes da realização da concretagem final foram realizadas concretagens para dosagem e ajuste do traço. No próximo item, uma breve explanação é dada a respeito destes aspectos.

5.2 DOSAGEM DO CONCRETO

O concreto foi dosado seguindo as especificações da ABCP (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2010), que propõe um método que dá curvas e tabelas para a dosagem do concreto. De acordo com o método primeiramente foi fixado a relação a/c, em seguida é determinado o consumo dos materiais, a partir do consumo dos materiais pode-se determinar o traço. Foram utilizados dois traços iniciais na dosagem do concreto sem fibras. Como o primeiro traço era um traço mais rico $m=4,81$, optou-se por testar também um traço mais pobre $m=5$, pois desta forma o consumo do cimento seria menor. Foi estabelecido uma proporção de agregados de $m=5$, e utilizado as tabelas do método da ABCP para estabelecer o traço. Nesta primeira etapa de dosagem optou-se pela concretagem em uma betoneira de eixo vertical, de forma a diminuir o desperdício de material. Moldou-se 15 corpos-de-prova cilíndricos de acordo com a NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994), para cada traço estabelecido. Na concretagem dos corpos-de-prova sem fibras não foi utilizado aditivo. Rompeu-se os corpos de prova com idades de 7 e 28 dias, em uma prensa hidráulica computadorizada. Após essa etapa inicial moldou-se corpos-de-prova com fibras para a comparação dos resultados. E observar como se comportaria a matriz cimentícia com a adição de fibras. Como os resultados de compressão do concreto sem fibras estavam abaixo do esperado. Foi estipulado reduzir o fator a/c para as concretagens finais do concreto reforçado com fibras. Nas concretagens com fibras utilizou-se aditivo, para a correção do abatimento. As especificações das concretagens sem fibras são encontradas no quadro 2. No gráfico 4 estão as comparações entre os diferentes traços sem a adição de fibras. Foram realizadas 3 concretagens para dosar com o concreto sem fibras.

Traço A		cimento: areia:brita – 1:1,94:2,87 m=4,81				
a/c	α (%)	Umidade (%)	Temperatura (Celsius)	Abatimento (mm)	fc7 (MPa)	fc28 (MPa)
0,52	50,63	76	16,5	170	23,42	28,58
Traço B		cimento: areia:brita – 1:2,18:2,82 m=5,00				
a/c	α (%)	Umidade (%)	Temperatura (Celsius)	Abatimento (mm)	fc7 (MPa)	fc28 (MPa)
0,50	53	76	16,5	130	23,82	27,21
Traço C		cimento: areia:brita – 1:1,94:2,87 m=4,81				
a/c	α (%)	Umidade (%)	Temperatura (Celsius)	Abatimento (mm)	fc7 (MPa)	fc28 (MPa)
0,48	50,63	69	19,7	120	24,05	28,85

Quadro 2: concretagem sem fibras

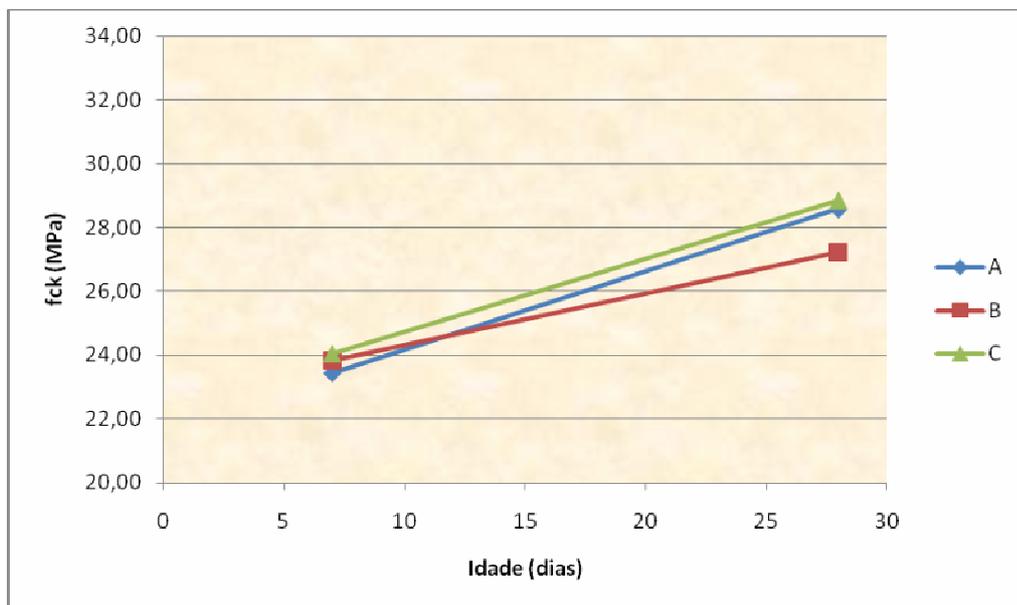


Gráfico 4: comparação entre os traços na dosagem, (concreto sem fibras)

Depois da etapa inicial de dosagem do concreto sem fibras, a próxima etapa foi a dosagem do concreto com fibras. No quadro 3, pode-se observar os resultados da dosagem do concreto com fibras. No gráfico 5, pode-se visualizar a comparação entre os diferentes traços. Os abatimentos especificados foram realizados depois do acréscimo de fibras. Nesta dosagem

com fibras foi adotado o valor de 1% em volume para o acréscimo de fibras. Devido ao fato deste teor ser o maior estabelecido para esta pesquisa.

Traço A		cimento: areia:brita – 1:1,94:2,87 m=4,81				
a/c	α (%)	Umidade (%)	Temperatura (Celsius)	Abatimento (mm)	fc7 (MPa)	fc28 (MPa)
0,52	50,63	51	15,5	100	22,93	28,41
Traço B		cimento: areia:brita – 1:2,18:2,82 m=5,00				
a/c	α (%)	Umidade (%)	Temperatura (Celsius)	Slump (mm)	fc7 (MPa)	fc28 (MPa)
0,52	53	51	15,5	95	21,26	23,83
Traço C		cimento: areia:brita – 1:1,72:2,65 m=4,37				
a/c	α (%)	Umidade (%)	Temperatura (Celsius)	Slump (mm)	fc7 (MPa)	fc28 (MPa)
0,48	50,63	66	17,3	95	25,88	33,05

Quadro 3: concretagem com fibras

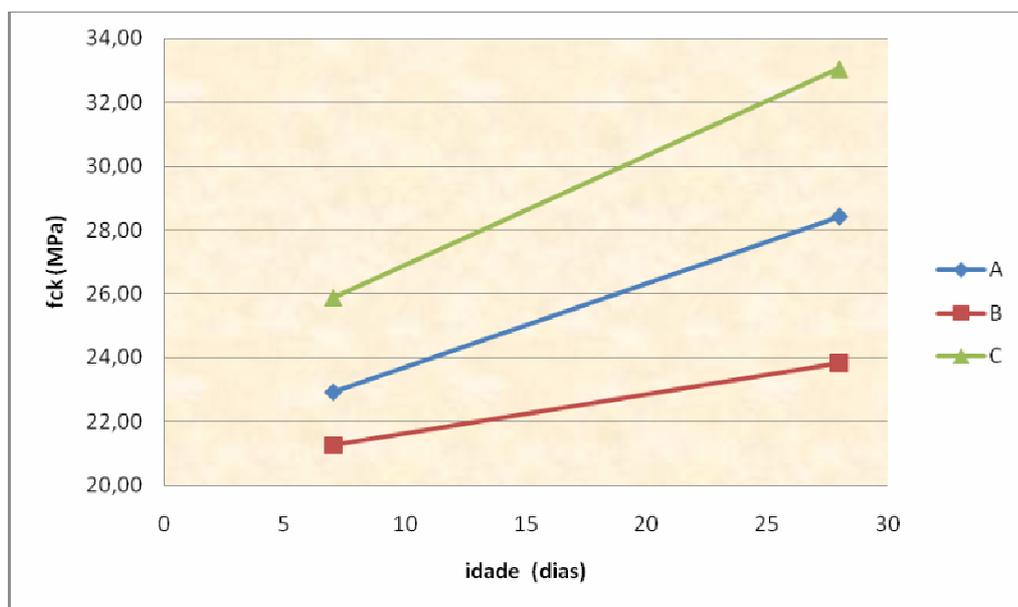


Gráfico 5: comparação entre os traços na dosagem, (concreto reforçado com fibras)

Com os resultados da dosagem foi estabelecido que o traço ideal para as concretagens finais seria o traço de 1:1,72:2,65 (cimento, areia, brita), com um fator a/c de 0,48, que atende as especificações da bibliografia, com uma resistência mecânica média aos 28 dias em torno de 33 MPa.

5.3 MATERIAIS EMPREGADOS

As propriedades dos materiais que foram utilizados nesta pesquisa estão descritas a seguir. Dentre os materiais empregados, utilizou-se, também, água proveniente do abastecimento local.

5.3.1 Cimento

O cimento utilizado nesta pesquisa é o cimento portland do tipo CP V-ARI – alta resistência inicial –. A marca utilizada era da Cimpor. Foi escolhido este tipo de cimento por ter alta resistência inicial, desta forma se tem rapidez na obtenção dos resultados. De acordo com o fabricante, a massa específica deste cimento é de 3.000 kg/m³, e todas as características físicas fornecidas estão de acordo com a NBR 5733/ 1991, Cimento Portland de Alta Resistência Inicial.

5.3.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado nesta pesquisa é oriundo do rio Jacuí, sendo identificado como uma areia quartzosa com caracterização de areia média ou regular. A composição granulométrica da areia pode ser visualizada na tabela 1.

Tabela 1: caracterização dos agregados miúdos

Abertura Peneira (mm)	Percentual Retido (%)	Percentual Retido Acumulado (%)
4,8	1	1
2,4	6	7
1,2	14	21
0,6	18	39
0,3	36	75
0,15	21	97
0,075	3	100
Fundo	0	100

A composição granulométrica foi definida de acordo com a NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a). O módulo de finura do agregado foi estimado em 2,12 e a massa específica ficou em torno de 2,59 g/cm³. De acordo com as especificações técnicas ela pode ser classificada como areia média fina. No gráfico 6 se pode visualizar a granulometria da areia.

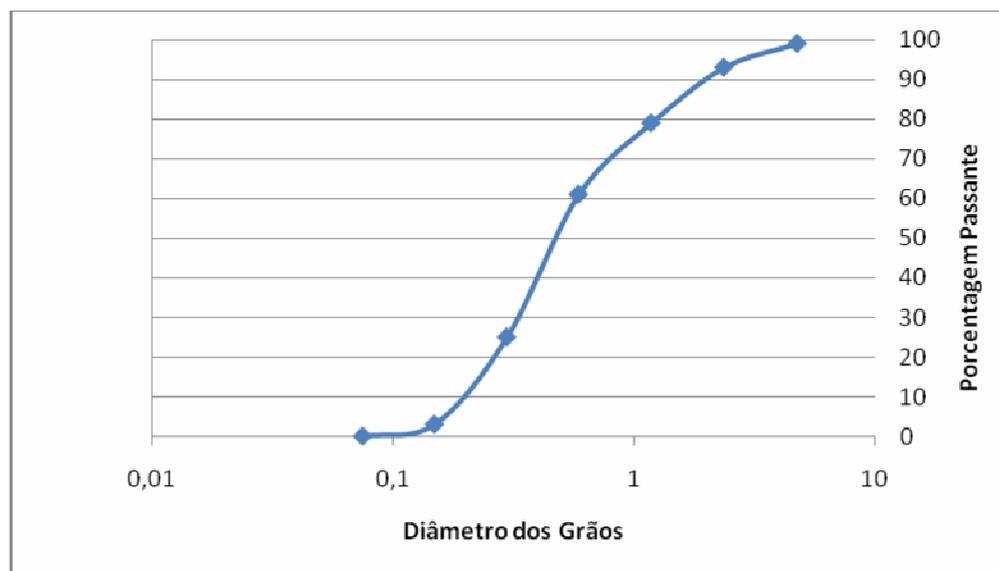


Gráfico 6: granulometria do agregado miúdo

5.3.3 Agregado Graúdo

Na modelagem dos corpos-de-prova, foram utilizados agregados graúdos oriundos da pedreira de Vila Rica, sendo identificado como uma brita de origem basáltica. Antes de sua utilização, a brita foi lavada e estocada em silo. A granulometria da brita foi realizada de acordo com a NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a). Na tabela 2 é apresentada a granulometria do agregado graúdo.

No gráfico 7, pode-se visualizar a granulometria do agregado graúdo, sendo que a massa específica do agregado foi de 2,8253 g/cm³. De acordo com a granulometria da brita, foi possível classificá-la como uma brita 2, onde o diâmetro máximo é de 25 mm. Notou-se que a granulometria da brita é muito homogênea concentrando em uma faixa.

Tabela 2: caracterização dos agregados graúdos

Abertura Peneira (mm)	Percentual Retido (%)	Percentual Retido Acumulado (%)
25,4	2%	2%
19,1	50%	51%
12,5	48%	98%
9,52	1%	99%
6,3	1%	100%
4,76	0%	100%
2,36	0%	100%
1,18	0%	100%
0,59/	0%	100%
0,297	0%	100%
0,149	0%	100%
0,075	0%	100%

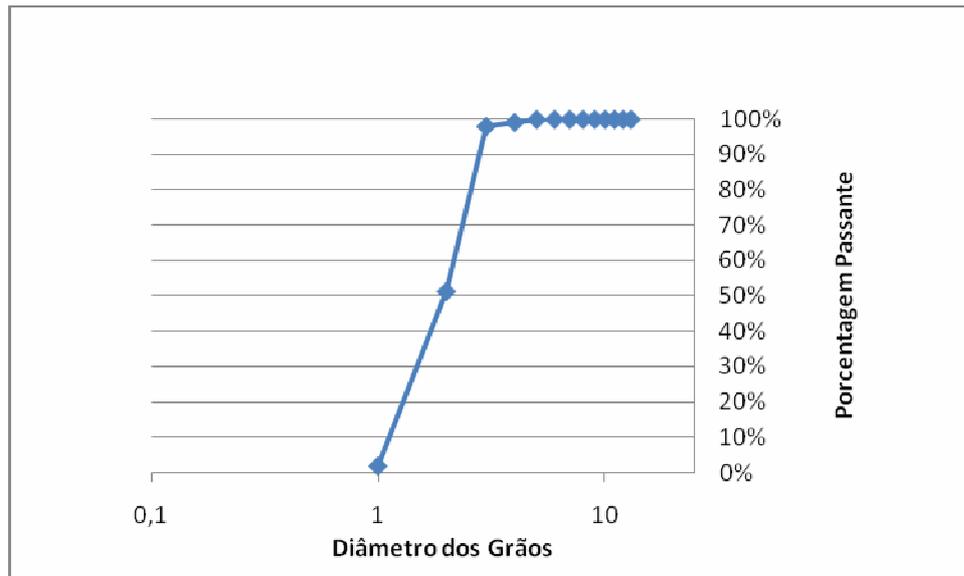


Gráfico 7: granulometria do agregado graúdo

5.3.4 Fibras

A seguir serão descritas as fibras utilizadas nesta pesquisa, com todas as suas principais características e propriedades mecânicas. Entre todas as fibras estudadas, as escolhidas foram as de aço e as de polipropileno.

Nesta pesquisa foram utilizadas as fibras de aço da Dramix, que são fibras comercializadas em formas de pentes, isto é, vêm coladas entre si. As fibras escolhidas possuem ancoragens nas pontas. O código das fibras de aço é o RC 65/60 BN. Essas fibras, de acordo com o fabricante, são em baixo carbono. A figura 11 ilustra as fibras de aço utilizadas.



Figura 11: fibras de aço utilizadas na pesquisa

Na quadro 4, pode-se observar as características e propriedades mecânicas das fibras de aço. As informações foram obtidas em catálogos da Dramix.

Fibra	Fator de Forma	Comprimento (m)	Diâmetro (m)	Massa Específica (kg/m ³)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
RC 65/60	67	0,060	0,00090	7.840	1.100	200

Quadro 4: propriedades mecânicas e características das fibras de aço (BELGO BEKAERT ARAMES, 2009)

No quadro 5 estão especificadas as propriedades geométricas e mecânicas das fibras de polipropileno utilizadas na pesquisa. As fibras foram da Polycrét e o modelo foi do tipo ES. Na figura 12, pode-se observar as fibras de polipropileno utilizadas na pesquisa.

Fibra	Fator de Forma	Comprimento (m)	Diâmetro (m)	Massa Específica (kg/m ³)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
ES	44,44	0,040	0,0009	900	750	7,7

Quadro 5: propriedades mecânicas e características das fibras de polipropileno (FITESA⁸,)

⁸ Não se tem informações precisas sobre a fibra utilizada na pesquisa devido ao fato da fibra ser produzida por outra empresa.



Figura 12: fibras de polipropileno utilizadas na pesquisa

5.3.5 Aditivo

O aditivo utilizado foi o Glenium 54, um superplastificante de terceira geração a base de uma cadeia de éter policarboxílico modificado, pois quando reforçado com fibras o concreto perde um pouco da trabalhabilidade. Como foi estipulado que o *slump* seria de 120 ± 20 mm, foi dosado uma quantidade em massa para cada porcentagem de fibra para a correção da trabalhabilidade. A densidade do superplastificante estava entre os valores de 1,067 e 1,107 g/cm³, de acordo com informações do fabricante.

5.4 ENSAIOS MECÂNICOS

Para avaliar as características e vantagens da adição de fibras, estipulou-se alguns ensaios, como compressão axial simples, tração indireta na flexão, módulo de elasticidade e impacto. Os ensaios são abordados nos próximos itens.

5.4.1 Ensaio de Compressão Axial Simples

A resistência à compressão de um elemento de concreto é de suma importância para a interpretação dos resultados obtidos. Essa resistência foi obtida de acordo com a NBR 5739

(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994). O ensaio desta Norma consiste na produção de corpos-de-prova do tipo cilíndrico com dimensões 10 cm de diâmetro e 20,0 cm de altura. Devido à inserção com fibras os corpos-de-prova foram extraídos de um bloco seguindo os preceitos da NBR 7680 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007b). Este procedimento foi adotado para evitar que as fibras ficassem orientadas dentro do corpo-de-prova. Os ensaios foram realizados em uma prensa com carga máxima de 200 kN, computadorizada e da marca Shimadzu. Foram produzidos 3 corpos-de-prova, sendo submetidos aos ensaios com a idade de 28 dias. De acordo com a figura 13, pode-se observar o ensaio de compressão realizado.



Figura 13: ensaio de compressão axial simples

5.4.2 Ensaio de Tração na Flexão

Uma das principais características do concreto reforçado com fibras é o acréscimo na capacidade de absorver energia do compósito, e existem diversas metodologias para analisar essa característica importante. Neste trabalho foi adotada a metodologia descrita pela norma japonesa JSCE-SF4 (JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 1984) – Method of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of Steel Reinforced Concrete –. Essa Norma emprega o fator de tenacidade, que pode ser obtido pela área em baixo da curva. Essa medida é realizada em Joules. As leituras nos LVDT devem ser consideradas até uma deflexão δ_{tb} (comprimento do vão da viga) de $l/150$, da viga. Quando o vão for de 0,3 m, a deflexão será de 0,002 m. O comprimento adotado é de 0,45 m, sendo que, desta forma, as leituras devem

ser realizadas até uma deflexão de 0,003 (FIGUEIREDO, 2000). O gráfico 8 mostra a tenacidade de um elemento para o ensaio, e a equação 1 foi utilizada para a obtenção do fator de tenacidade.

$$FT = \frac{TB}{\delta_{tb}} \frac{l}{b.h^2} \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

FT = fator de tenacidade na flexão (kgf/cm² ou MPa)

Tb = tenacidade na flexão (kgf.cm ou J)

δ_{tb} = deflexão equivalente a l/150 (cm ou mm)

b = largura do corpo-de-prova

h = altura do corpo-de-prova

l = vão do corpo-de-prova durante o ensaio

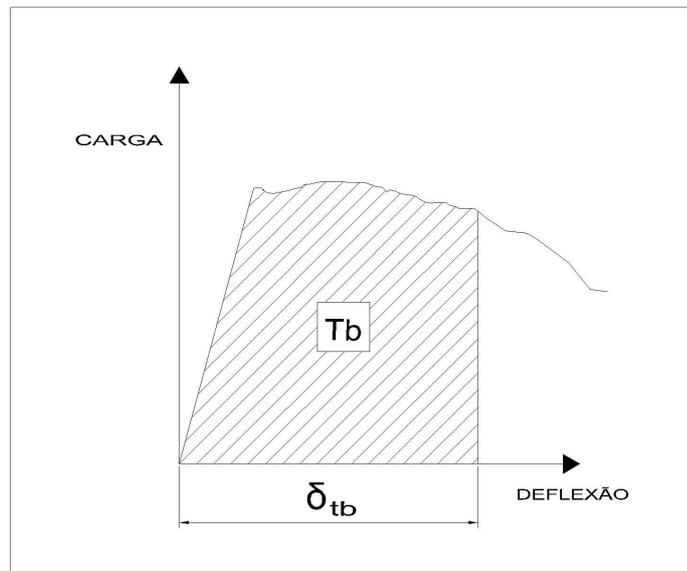


Gráfico 8: determinação do fator de tenacidade (adaptado de FIGUEIREDO, 2000)

Na determinação da tenacidade foram moldados corpos-de-prova prismáticos com as seguintes dimensões: 0,55 m de comprimento, 0,15 m de largura e 0,15 m de altura. A forma

de carregamento estabelecida foi o deslocamento da prensa, ao invés de carga máxima de ruptura, pois desta forma o gráfico não apresenta grandes variações. A figura 14 representa as dimensões da viga. A figura 15 representa o sistema Yoke.

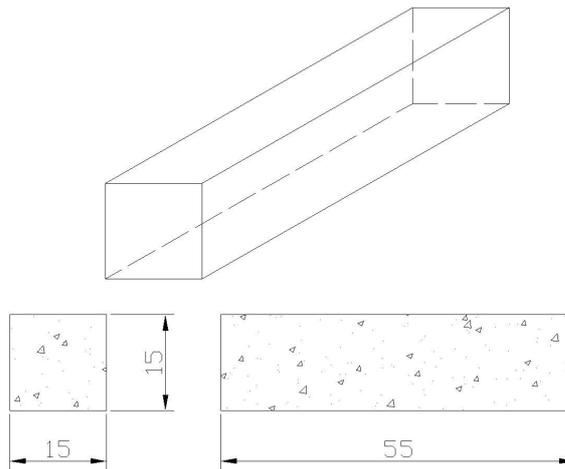


Figura 14: dimensões da viga (unidades em cm)

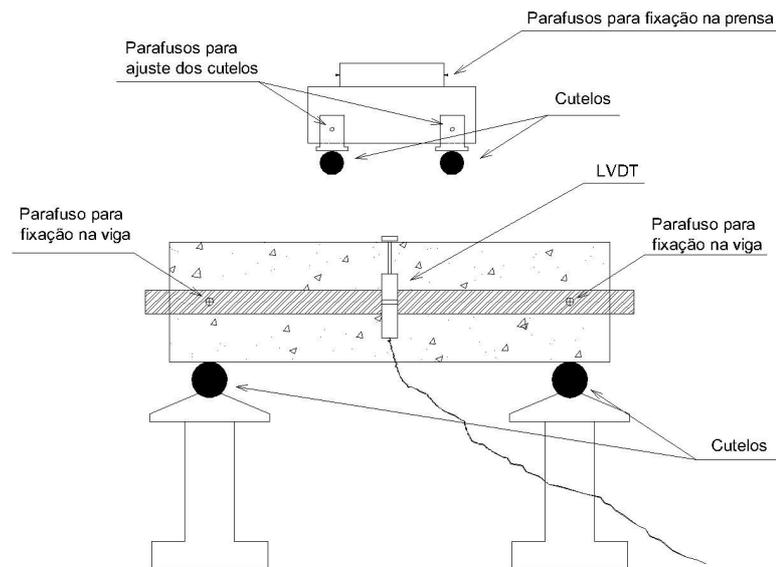


Figura 15: sistema Yoke – flexão 4 pontos posicionamento dos LVDT na viga (adaptado de FIGUEIREDO, 2000)

As vigas foram curadas em câmara úmida até a idade de 28 dias. Após, foram fixados dois LVDT (*Linear Voltage Differential Transducer*), em cada face do CP, através de um sistema tipo YOKE. O sistema YOKE vem sendo apontado aquele com maior confiabilidade (FIGUEIREDO, 2000)

Através dos LVDTs, após seus posicionamentos, foram realizadas as leituras das deflexões nos corpos-de-prova. O ensaio se caracteriza pela flexão à 4 pontos. As vigas foram apoiadas em dois cutelos inferiores e a carga foi aplicada por dois cutelos superiores. Os ensaios foram todos realizados na prensa computadorizada Shimadzu de 200 kN controlada por um computador. Na figura 16, pode-se visualizar o ensaio sendo realizado na prensa e o sistema utilizado.



Figura 16: ensaio realizado na prensa computadorizada Shimadzu

5.4.3 Ensaio de Impacto

Quando acrescido de fibras, a matriz cimentícia tem suas qualidades melhoradas em relação ao impacto. Devido a isso, o ensaio escolhido para verificação e comparação dos teores de fibras adicionados, foi o ensaio de placas cerâmicas para revestimento – especificação e métodos da NBR 13818 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

Esta técnica foi desenvolvida para o estudo de corpos-de-prova de placas cerâmicas para revestimento, porém foram realizadas algumas modificações para o estudo de concretos. O ensaio consiste na queda de uma esfera de aço-cromo, com 1,053 kg de diferentes alturas.

Com o impacto, ocorre o início da fissuração e, através de deflectômetros instalados nos CP, consegue-se avaliar o deslocamento e determinar o aparecimento da fissura inicial e a energia que foi utilizada. A esfera é solta por um tubo vertical de 2,2 m e com diâmetro nominal de 0,075 m. durante o ensaio foram monitorados os corpos-de-prova, para verificação da abertura da primeira fissura, de acordo com a altura de queda da esfera. A altura de queda era aumentada progressivamente até o limite de 2,2 metros. Na figura 17, pode-se visualizar o esquema do tubo, e as placas com os deflectômetros.

Neste ensaio, foram utilizadas placas quadradas com 0,3 m de lado e com uma espessura de 0,075 m. Esta dimensão foi convencionada de acordo com a máxima dimensão do agregado. A espessura deve ser igual a 3 vezes o diâmetro máximo do agregado. A placa era apoiada no equipamento com ajuda de tiras de neoprenes, para que desta forma pudesse se simular um apoio semi-elástico, visando-se restringir apenas os deslocamentos verticais da placa. A figura 18 especifica a placa com as dimensões onde eram fixados os deflectômetros.

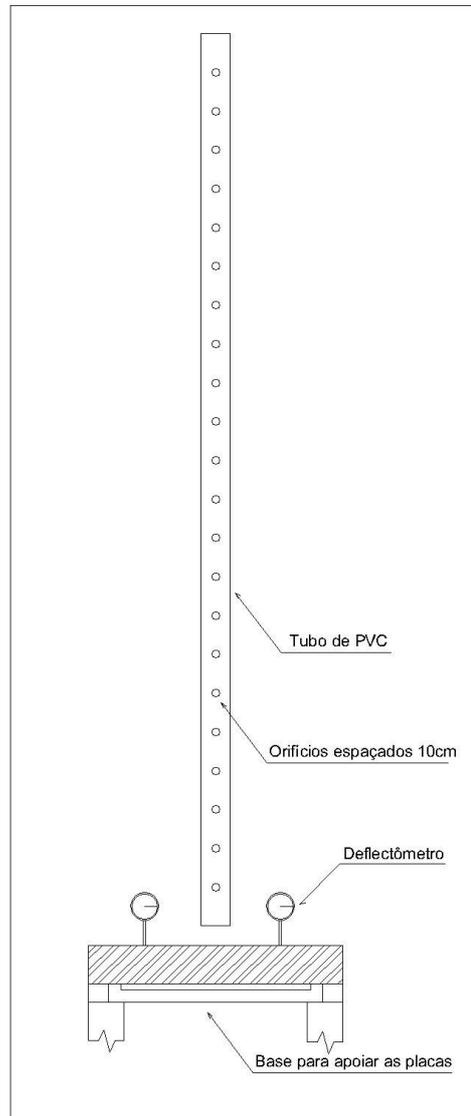


Figura 17: esquema do ensaio

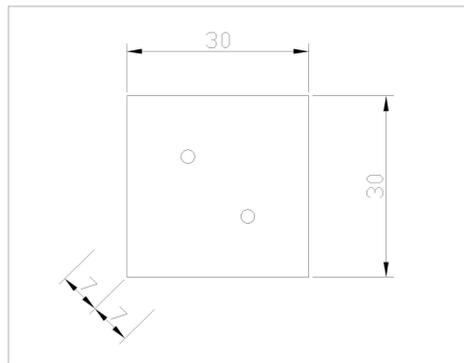


Figura 18: caracterização das placas

5.5 ENSAIOS COMPLEMENTARES NÃO MECÂNICOS

Foram realizados ensaios com o concreto no estado fresco para determinar a trabalhabilidade e consistência da mistura. Esses ensaios são descritos nos próximos itens

5.5.1 Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone

O ensaio de abatimento de tronco de cone (*Slump Test*) é muito utilizado na produção do concreto e deve ser realizado de acordo com a NBR 7223 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992). Para esta pesquisa foram estipulados que o abatimento de tronco de cone deveria estar em torno de $120 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$. O abatimento de tronco de cone foi realizado antes e após a inserção das fibras para a verificação da perda da trabalhabilidade da mistura. A figura 19 apresenta o ensaio de abatimento de tronco de cone do concreto sem o reforço de fibras.



Figura 19: abatimento de tronco de cone

5.5.2 Ensaio da Mesa de Graff

O concreto quando está reforçado com fibras apresenta uma redução na trabalhabilidade, e devido a este fator devem ser realizados ensaios que identifiquem a trabalhabilidade do concreto e a sua consistência fluída. O método da mesa de Graff pode ser eficiente para identificar estes fatores. Devido a estruturação do concreto quando reforçado com fibras em fase plástica. Ensaios estáticos não são muito recomendados, desta forma ensaios dinâmicos são mais recomendados. O ensaio é similar ao *Slump Test*, sendo constituído por uma mesa com fina chapa de aço na sua face superior. Esta mesa possui dobradiças em um dos lados e duas alças no lado oposto, possibilitando que se levante um dos lados e solte de forma a transferir energia para a mistura. A mesa possui 70 cm x 70 cm.

O cone para colocação do concreto deve, de acordo com a NBR NM 68 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998) ter as seguintes dimensões: altura de 20 cm com diâmetro inferior de 20 cm e diâmetro superior de 13 cm, e deve ser confeccionado em chapa de aço. Deve ser utilizado um soquete com seção transversal de 4 cm x 4 cm e 40 cm de altura.

A mesa deve ser umedecida antes da colocação do concreto. Em seguida, deve ser colocado o concreto no estado fresco dentro do cone. Devem ser colocadas duas camadas com 10 golpes uniformemente distribuídos. Depois, deve-se retirar o cone e realizar 15 golpes em 15 segundos, levantando a mesa e deixando-a cair. Por último, deve-se realizar as medidas dos

espalhamentos em duas direções. A consistência da amostra deve ser procedida de acordo com a média entre as duas direções. A figura 20 esquematiza a mesa e o sistema de funcionamento.

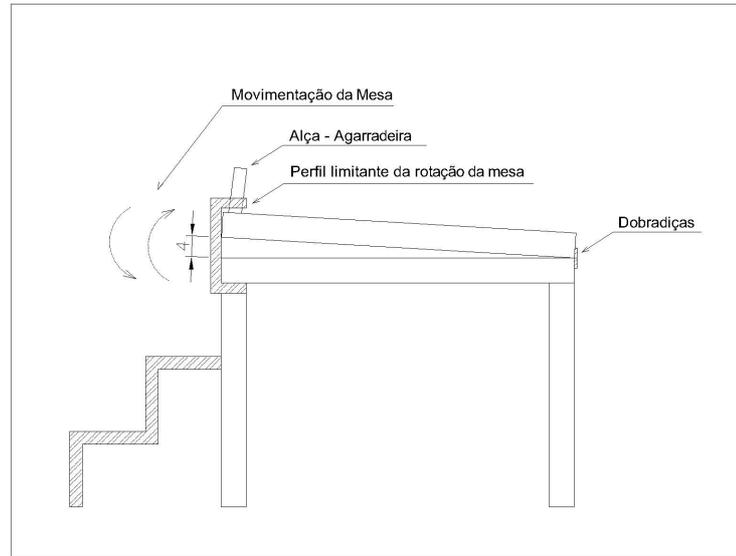


Figura 20: esquema da mesa de graff e funcionamento

6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No presente capítulo estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios especificados anteriormente, que são os resultados de flexão, impacto, compressão axial e módulo de elasticidade. Os resultados serão apresentados em conjuntos. Desta forma, pode-se comparar os diferentes teores para uma mesma fibra e comparar as duas fibras entre si, verificando a eficiência e os pontos negativos de cada fibra.

6.1 RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO

Após a realização dos ensaios os resultados de tração na flexão são apresentados em forma de gráficos. Nos quais o eixo vertical representa a carga em kN e o eixo horizontal representa o deslocamento dos LVDT, o deslocamento está em milímetros. Nos gráficos apresentados pode-se comparar o comportamento do concreto reforçado com fibras em relação ao testemunho, bem como a evolução da tenacidade com diferentes teores de fibras. Foi selecionado apenas um gráfico de cada teor, para se fazer a comparação. Cabe salientar que como haviam três corpos-de-prova para cada teor, foi escolhido o corpo-de-prova que tinha um comportamento com menos variações. Esta escolha foi realizada de forma que pudessem ser comparados os teores.

No gráfico 9 estão representados os resultados do ensaio para todos os teores de aço, juntamente com o testemunho, neste gráfico pode-se visualizar claramente que o teor de 0,8% de aço obteve um melhor desempenho se comparado com os outros teores. A capacidade de absorver energia do compósito quando adicionado fibras em um teor de 0,8% de aço, é maior que dos outros teores. Pode-se observar que a carga de pico não foi muito alterada com a adição de fibras, permanecendo entre 30 e 35 kN. A resistência de pico é governada pela matriz do concreto, a fibra atua após a nucleação das primeiras fissuras.

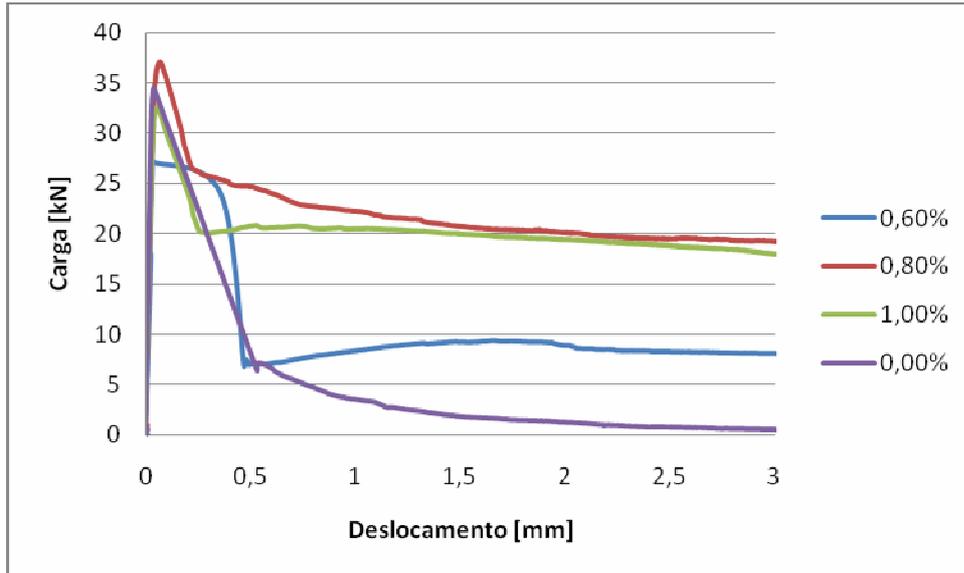


Gráfico 9: comparação entre todos os teores de fibras de aço

No gráfico 10 pode-se visualizar os resultados da adição de fibras de polipropileno no compósito. Nesses resultados, pode-se observar que o teor que teve melhores resultados foi o de 1%. O teor de 0,6% apresentou resultados similares ao teor de 0,8%, podendo-se verificar que o polipropileno necessita de mais fibras atuando e “costurando” as fissuras devido ao seu baixo módulo de elasticidade.

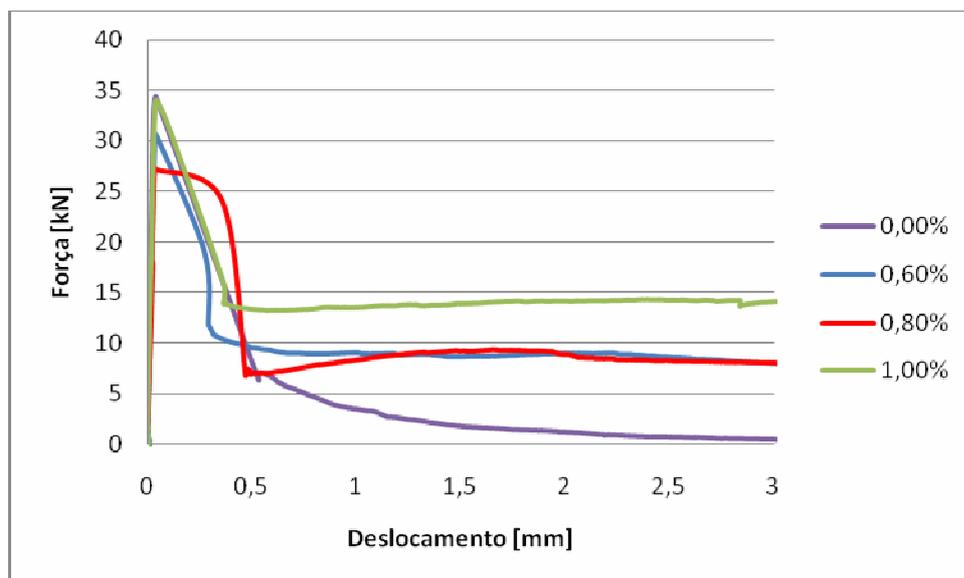


Gráfico 10: comparação entre todos os teores de fibras de polipropileno

No gráfico 11, pode-se visualizar todos os teores em único gráfico. Este tipo de comparação permite visualizar e comparar o comportamento das duas fibras, analisando a capacidade de absorver energia, e a carga residual suportada por tipo de fibra. O teor de 0,6% de aço se sobrepõe ao teor de polipropileno. Sendo que o comportamento das duas fibras é muito semelhante. Na comparação entre o aço e o polipropileno, os teores de 0,8% e 1,0% de aço apresentaram um melhor desempenho. A carga residual do teor de 0,8% é em torno de 20 kN, enquanto que, para o mesmo teor de polipropileno, ela pode ser estimada em torno dos 8 kN. Sendo que esta diferença entre cargas residuais entre o aço e o polipropileno, fica em torno dos 12 kN. Devido a este fator, os teores de 0,8% e 1,0% de aço, tem uma capacidade maior de tenacidade, se comparados com os mesmos percentuais de polipropileno.

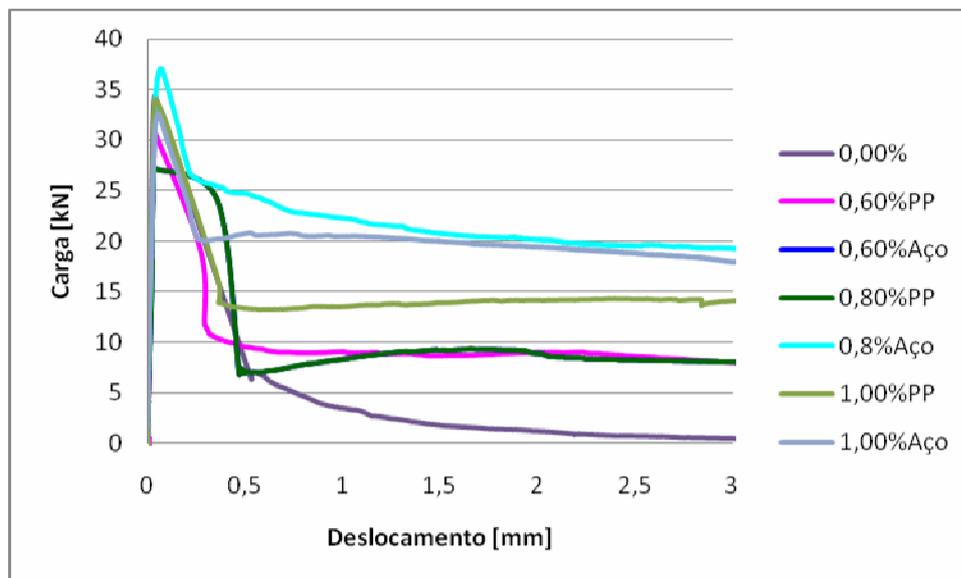


Gráfico 11: comparação entre todos os teores de fibras de polipropileno e de aço

O comportamento dos fatores de tenacidade das vigas é visualizado no gráfico 12. Estes fatores de tenacidade foram calculados de acordo com a equação 1. Para elaboração deste gráfico, foi calculada a média das tenacidades dos corpos-de-prova. Neste gráfico, pode-se visualizar que, quando se estuda fibra de polipropileno, o aumento do teor de fibra de 0,6% para 0,8% não representa um ganho significativo no fator de tenacidade. Cabe salientar que, com a adição de 1,0%, o fator de tenacidade aumenta para 2 MPa, resultando em um melhor desempenho em relação aos outros teores. Contudo, nota-se que existe uma variação significativa quando se observa o comportamento da inserção com fibras de aço. O fator de tenacidade aumenta de 1,5 MPa no volume de 0,6% para quase 3 MPa, nos volumes de 0,8%

e 1,0%, sendo que o compósito com o teor de 0,8% tem o fator de tenacidade com o dobro em relação ao teor de 0,6%. Também se observou que, quando a adição é de 0,6%, os teores de aço e polipropileno apresentam o mesmo desempenho.

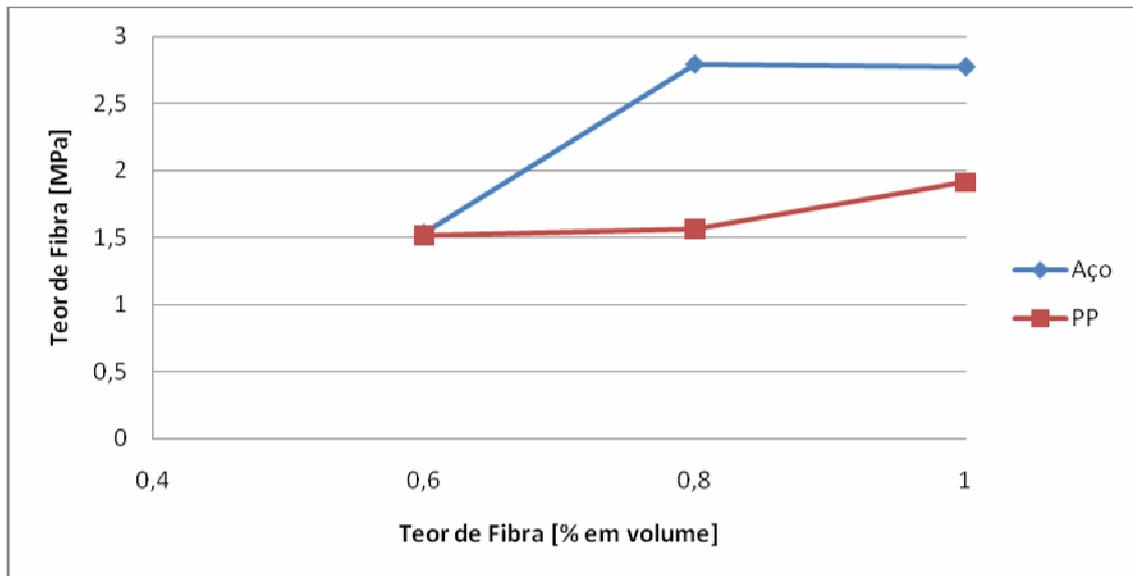


Gráfico 12: comparação entre todos os teores de fibras de polipropileno e de aço

6.2 RESULTADOS DO ENSAIO IMPACTO

Neste item são mostrados os resultados do ensaio de impacto. Os gráficos estão dispostos de maneira que o eixo vertical representa a energia em Joules, enquanto que, no eixo horizontal, estão representados os teores de fibras utilizados na pesquisa. É importante salientar que o ensaio de impacto tem uma significativa variabilidade devido às características do equipamento e do ensaio em si. A quantidade de corpos-de-prova, infelizmente, não foi grande o suficiente para suprimir os problemas decorrentes da variabilidade observada.

No gráfico 13 pode-se observar o comportamento das fibras de aço tanto na abertura da 1ª fissura como na ruptura do corpo-de-prova. A ruptura é considerada quando a fissura se desenvolve por toda a espessura da amostra. No gráfico, pode-se observar que os desvios padrões são altos. Quando se analisa a abertura de 1ª fissura não se consegue precisar o ganho na inserção de fibras devido ao desvio padrão englobar todos os resultados. Em relação à

ruptura, pode-se afirmar que, com a adição do teor de 0,8%, houve um retardo no colapso do corpo-de-prova em comparação com o teor de 0,6%, porém não se pode afirmar que o teor de 1,0% teve ganhos em relação aos outros dois teores devido ao desvio padrão.

Na comparação entre os teores, o teor de 0,8% obteve a menor variação em relação aos outros teores, pois seu desvio padrão foi baixo. Este resultado se estabelece tanto na abertura da 1ª fissura como na ruptura. Consegue-se observar que, quando se adiciona o teor de 0,8% de fibras, a amostra tem a capacidade de continuar absorvendo energia depois da abertura da 1ª fissura, aumentando, desta forma, a energia necessária para o colapso.

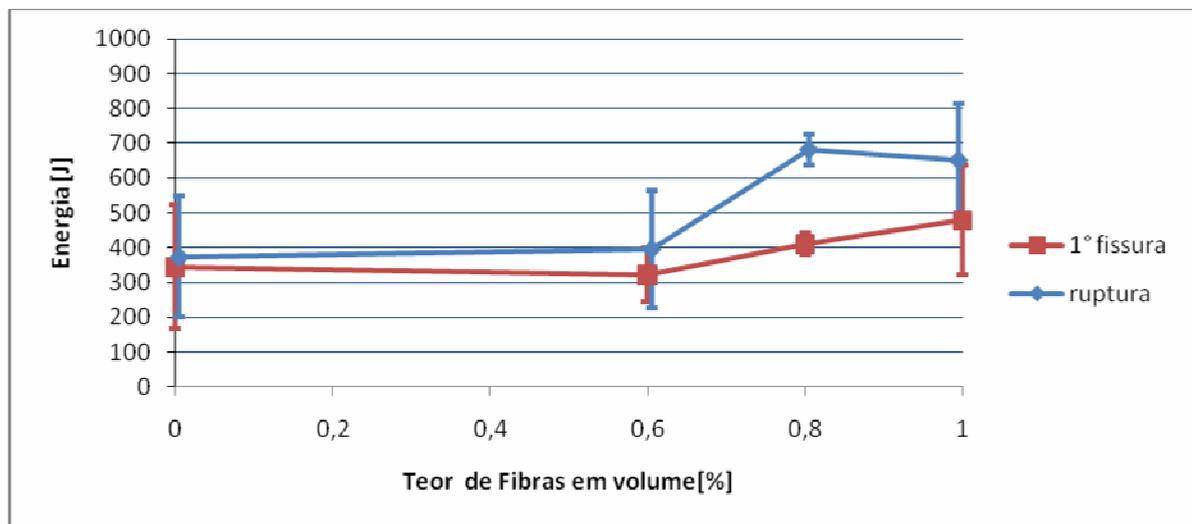


Gráfico 13: comparação entre a 1ª fissura e a ruptura para as fibras de aço

O gráfico 14 mostra os resultados do ensaio de impacto para as fibras de polipropileno. Quando se analisa a abertura da 1ª fissura, o resultado se mostra impreciso, pois devido aos valores do desvio padrão não se pode afirmar que a fibra inibiu a propagação da 1ª fissura. Uma alternativa seria o aumento do número dos corpos-de-prova, pois, desta forma, o desvio tende a diminuir. A análise do teor de 1,0% mostra que houve uma perturbação na amostra devido à adição de fibra. Na análise dos gráficos, pode-se notar uma tendência do teor de 0,8% ter um comportamento mais eficaz em relação aos outros teores. A distribuição granulométrica do agregado graúdo pode ter influenciado nos resultados.

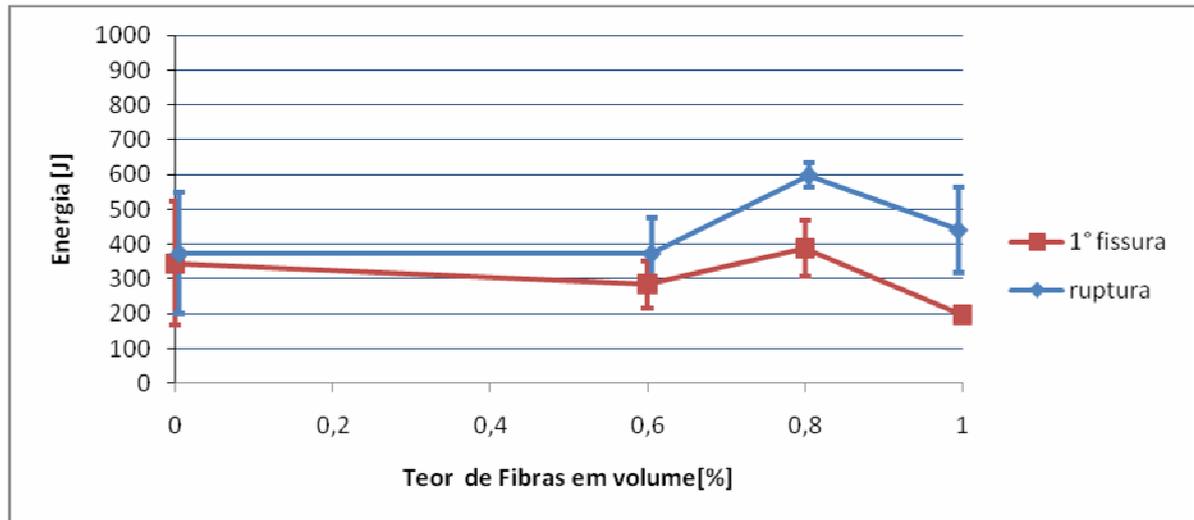


Gráfico 14: comparação entre a 1ª fissura e a ruptura para as fibras de polipropileno

O gráfico 15 representa a comparação da abertura da 1ª fissura entre as fibras de aço e de polipropileno. Pode-se observar que a diferença entre o aço e polipropileno é muito pequena e, devido ao desvio padrão dos dois teores, pode ser desconsiderada. A capacidade de inibir o aparecimento da 1ª fissura dos dois tipos é semelhante.

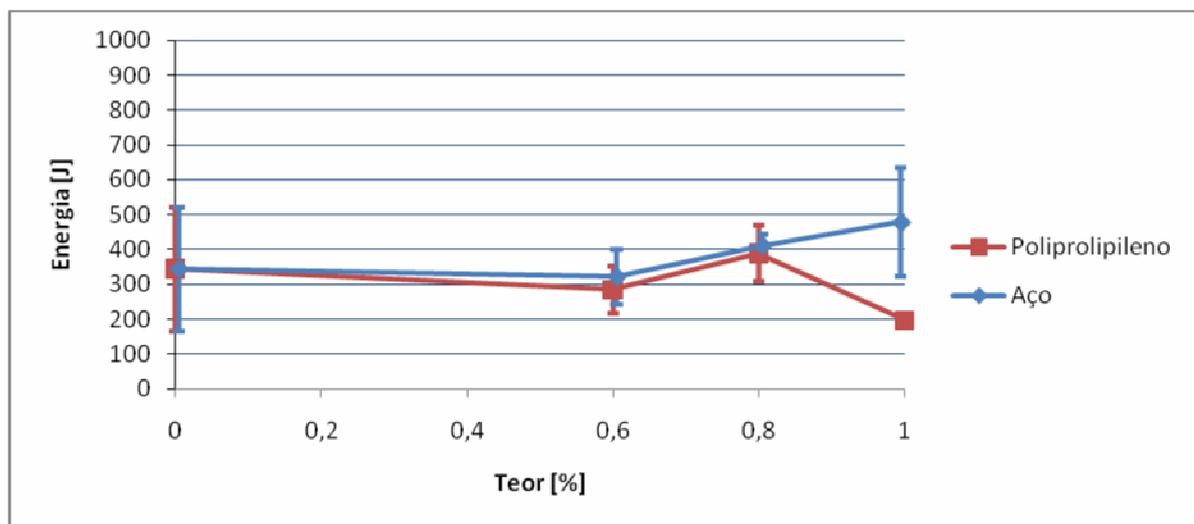


Gráfico 15: comparação da 1ª fissura para as fibras de aço e polipropileno

O gráfico 16 mostra a comparação entre os dois teores utilizados na pesquisa em termos de colapso da amostra. O teor de 0,8% possui a tendência de apresentar um desempenho mais satisfatório que o mesmo teor de polipropileno. Em relação aos outros teores não se pode afirmar sobre a comparação dos comportamentos.

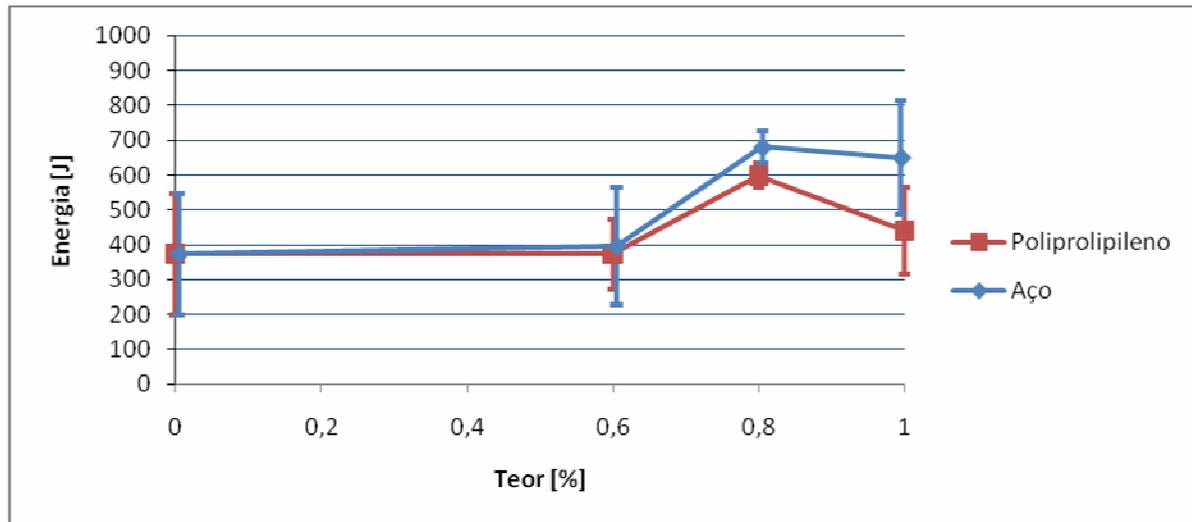


Gráfico 16: comparação da ruptura para as fibras de aço e polipropileno

6.3 RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO

Os resultados estão apresentados neste item, Para a análise destes resultados optou-se por gráficos onde o eixo vertical representa a Tensão em MPa para 28 e 49 dias. Cabe salientar que os corpos-de-prova foram extraídos de um bloco de concreto para evitar a orientação da fibras em uma determinada direção. Desta forma as fibras estariam distribuídas aleatoriamente, reproduzindo mais próximo do real. Os gráficos estão representados com o eixo horizontal contendo os teores de fibras, enquanto que o eixo vertical aparece com a tensão em MPa. Como os resultados esperados aos 28 dias não foram correspondidos, foram rompidos corpos-de-prova aos 49 dias para verificar se a resistência a compressão alcançaria o estipulado para o trabalho.

A primeira etapa de resultados corresponde ao resultado de compressão aos 28 dias. Pode-se observar que os resultados apresentados estão abaixo do estipulado para a pesquisa. Esta diferença pode ter ocorrido devido aos corpos-de-prova serem obtidos por extração, e não por moldagem individual de cada corpo-de-prova. Nas primeiras extrações houveram problemas com o extrator e isso pode ter causado uma redução nos valores de resistência à compressão. O bloco de 0,6% de aço trancou no extrator e isso pode ter afetado sua resistência. Pode-se notar que, em relação ao testemunho, os teores 0,6% e 0,8% de polipropileno tiveram uma carga de ruptura maior, sendo que uma queda ocorre no teor de 1,0%. Com relação ao aço, o teor de 0,8% tem uma pequena melhoria, se comparado ao testemunho.

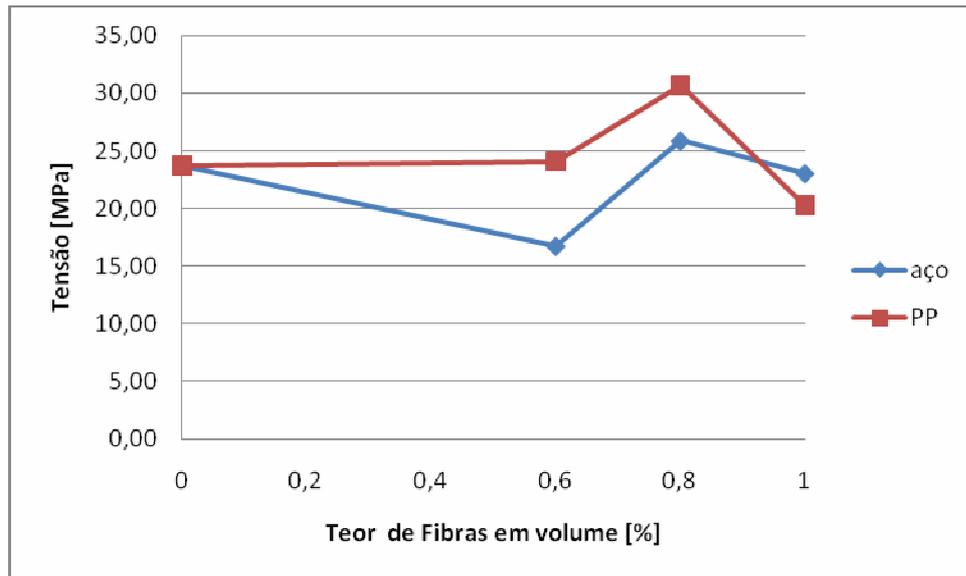


Gráfico 17: resultados do ensaio de compressão aos 28 dias

No gráfico 18, pode-se visualizar os resultados aos 49 dias do ensaio de compressão. A adição de fibras influencia na capacidade resistente do compósito, pois todos os teores, exceto o teor de 0,8% de aço ficaram abaixo em relação à resistência do testemunho. Com a adição de fibras, o compósito não tem acréscimos na resistência última de compressão. Pois a resistência a compressão do compósito é governada pela matriz cimentícia.

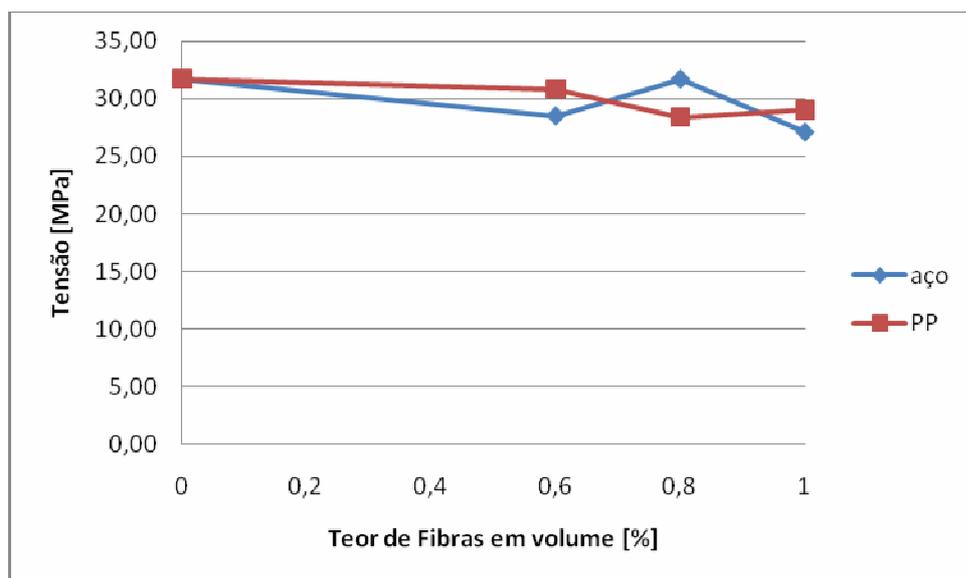


Gráfico 18: resultados do ensaio de compressão aos 49 dias

6.4 CUSTO DAS FIBRAS NO CONCRETO

Foi realizada uma pesquisa para se verificar o valor de mercado das duas fibras, pois desta forma se pode ter uma comparação entre a quantidade utilizada e o custo que teria o concreto com as adições de fibras. O preço de mercado da fibra da Dramix RC 65/60 é em torno de 6 reais a quantidade de 1 kg, enquanto que a fibra de polipropileno é vendida em pacotes com 600g e o custo do pacote custa em torno de 15,50 reais. Os valores da fibra de polipropileno foram conseguidos com a Diprotec, (Distribuidora de Produtos Tecnicos para a construção civil). O quadro 6 especifica o teor de fibras utilizado e o seu custo da utilização no concreto. Os valores do quadro foram calculados em kg/m³. Cabe ressaltar que a fibra de polipropileno é mais cara por metro cúbico, em relação a fibra de aço. Contudo na adição da fibra no concreto deve-se levar em consideração a massa específica da fibra. O polipropileno tem uma massa específica menor, desta forma é adicionado em menor quantidade em peso. Para um mesmo teor de fibra.

Teor [%]	Preço Aço	Preço Polipropileno
0,6	273,90 reais	136,65 reais
0,8	353,94 reais	182,38 reais
1,0	456,72 reais	230,02 reais

Quadro 5: preço de mercado das fibras

No gráfico 19, pode ser visualizada a comparação entre as fibras e os preços. Pode-se observar que a adição de fibras de polipropileno tem custo menor em comparação com o aço. Na comparação entre as duas fibras, o preço do aço é quase duas vezes mais caro que o preço do polipropileno. O teor de fibra utilizado em um piso deve ser analisado entre os aspectos econômicos e científicos. Quando se adiciona fibras de aço ou de polipropileno, deve-se ter cuidado, pois se, com o teor escolhido, o concreto tiver um desempenho mecânico similar, deve ser utilizada a fibra de polipropileno devido a seu custo ser mais baixo.

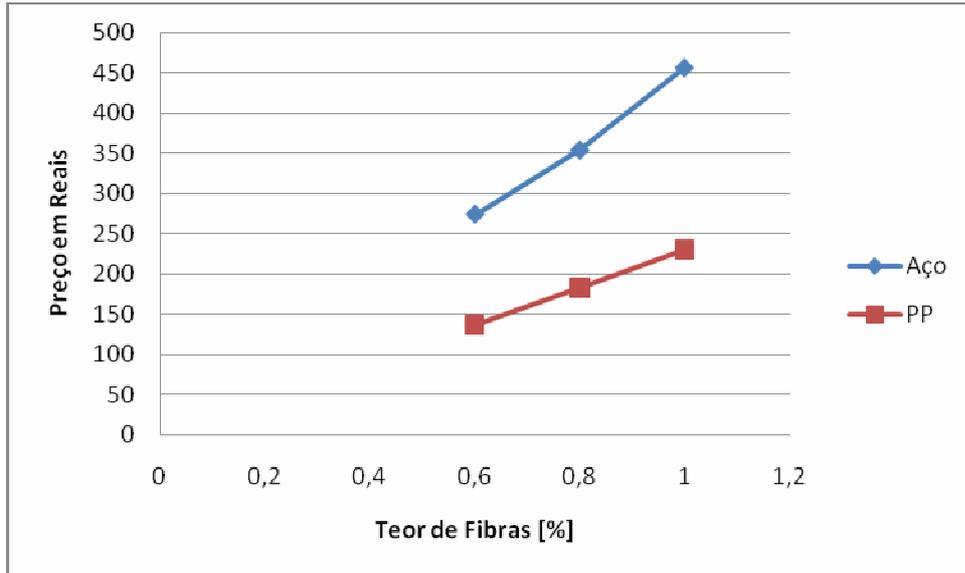


Gráfico 19: comparação entre preços das fibras

7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca pelo aperfeiçoamento de novos materiais e métodos deve ser uma constante na indústria da construção civil. O desenvolvimento de novas técnicas é vital para o avanço desta indústria. Devido a diversas patologias que vem sendo relatada nos últimos anos em pisos industriais, deve-se buscar alternativas. Desta forma, esta pesquisa visou colaborar com o avanço da tecnologia dos pisos industriais.

As duas fibras, tanto o aço como o polipropileno se mostraram interessantes e melhoraram as características reológicas do concreto. Os teores escolhidos mostraram que existe uma tendência de melhora do comportamento mecânico quando se aproxima de um certo teor.

Na análise de todos os resultados, verificou-se que o teor de 0,6% para as duas fibras tem comportamento similar, ou seja, as características mecânicas não se diferenciam significativamente. Desta maneira, pode-se concluir que, para baixos teores, as fibras apresentam um comportamento similar, devendo, no entanto, ser utilizada a fibra de polipropileno devido ao seu menor custo.

Os compósitos com o teor de 0,8% de aço obtiveram excelentes resultados, em comparação aos outros teores adicionados. Em todos os ensaios realizados o teor de 0,8% de aço se destacou. Porém, cabe salientar que as fibras de aço tem um custo mais elevado em Kg/m³ que o polipropileno. O preço da fibra de polipropileno é mais caro que a fibra de aço, porém na dosagem o concreto reforçado com fibras de polipropileno torna-se mais barato, pois deve-se observar que massa específica do polipropileno é menor que a do aço.

Existem diferentes características mecânicas que foram estudadas nesta pesquisa, buscando-se a melhoria da capacidade de absorver energia do compósito. Os resultados que devem ser observados devem ser os de tração na flexão. Nestes resultados, consegue-se observar que a inserção de 0,8% de fibras de aço é o teor que apresenta um melhor comportamento em relação aos outros teores. Quando é avaliada a fibra de polipropileno, o teor que tem um melhor comportamento é o teor de 1%.

Em relação ao ensaio de impacto, deve-se ter um cuidado na análise dos resultados. Isto se deve ao fato que os desvios padrões obtidos se mostraram elevados. Quando se procura inibir o aparecimento da 1ª fissura, as duas fibras se comportam de maneira semelhante. Porém quando a análise é realizada em termos de colapso do corpo-de-prova, as fibras de aço apresentam uma tendência de desempenho um pouco superior.

A análise relativa aos ensaios de compressão apresenta nos resultados de 28 dias desempenho inferior ao estipulado para a pesquisa. Este fato pode ter ocorrido devido a problemas com o extrator. Devido a isso, foi realizado o ensaio aos 49 dias, que mostra um desempenho mais próximo do ideal. Pode-se observar que a inserção das fibras tem pouco efeito sobre a resistência à compressão do concreto, sendo que, em alguns teores, a resistência foi prejudicada com a adição de fibras.

A adição das fibras no concreto é uma alternativa interessante, sendo que várias características da matriz são melhoradas, como foi verificado nesta pesquisa. Contudo, a adição de fibras na matriz cimentícia deve ser ministrada com cuidado, pois teores altos podem prejudicar seu desempenho devido ao acúmulo de ar aprisionado no interior do compósito e, desta maneira, funcionando como um concentrador de tensão.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Dosagem do Concreto. Apresentação em Power Point. Disponível em: <http://pessoal.utfpr.edu.br/gogola/arquivos/5_Dosagem%20abcp.pdf> . Acesso em: 20 out. 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7223**: concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro , 1992.
- _____. **NBR 5739**: concreto – ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro , 1994.
- _____. **NBR 13818**: placas cerâmicas para revestimento – especificações e métodos de ensaios. Rio de Janeiro , 1997.
- _____. **NBR NM 68**: concreto – determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff. Rio de Janeiro , 1998.
- _____. **NBR NM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro , 2003a.
- _____. **NBR 8522**: concreto – determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e de curva tensão-deformação. Rio de Janeiro , 2003b.
- _____. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimentos. Rio de Janeiro, 2007a.
- _____. **NBR 7680**: concreto – extração, preparo e ensaio de testemunhos de concreto. Rio de Janeiro, 2007b.
- BALBO, J. T. **Pavimentos de Concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.
- BEBER, A. J. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono**. 2003. 289 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BELGO. BEKAERT ARAMES. Dramix. [Belo Horizonte], 2009. Disponível em: <http://www.belgomineira.com.br/produtos/construcao_civil/dramix/pdf/dramix.pdf>. Acesso em: 20 set. 2010.
- BERNARDI, S. T. **Avaliação do Comportamento de Materiais Compósitos de Matrizes Cimentícias Reforçadas com Fibra de Aramida Kevlar**. 2003. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BINA, P. Pisos industriais e pavimentos com fibras: o desenvolvimento e o futuro. **Revista Concreto e Construções**, São Paulo: IBRACON, ano 37, n. 56, p. 24-30, out./nov./dez. 2009.
- CHODOUNSKY, M. A., VIECILI, F. A. **Pisos Industriais de Concreto**: aspectos teóricos e executivos. São Paulo: Reggenza, 2007.

DAL-MASO, J. **Pisos industriais de concreto com armadura distribuída projeto e execução.** 2008. 77 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2008.

DONATO, M. **Medidas diretas de tensão em solo reforçado com fibras de polipropileno.** 2007. 146 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FELIX, A. H. O. **Compósitos de polipropileno com fibra de vidro utilizando viniltrimetoxisilano como agente de adesão.** 2002. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço.** São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000. Boletim Técnico PCC/260.

_____. Concreto com fibras. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005. p. 1195-1225. v. 2.

FORTES, R. M.; SOUZA, C. J. N.; BARBOSA JÚNIOR, A. S. Recuperação de piso industrial: peculiaridades e dificuldades. **Revista Concreto e Construções**, São Paulo: IBRACON, ano 35, n. 49, p. 44-48, jan./fev./mar. 2008.

FRANCO, B. L. M.; A tecnologia do concreto reforçado com fibras de aço. **Revista Concreto e Construções**, São Paulo: IBRACON, ano 36, n° 50, p. 42-47, abr./mai./jun. 2008.

GARCEZ, E. O. **Análise teórico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a cargas de impacto.** 2005. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GUIMARÃES, M. C. N.; FIGUEIREDO, A. D.; AGOPYAN, V. Análise de repetibilidade do ensaio de tenacidade à flexão para concretos reforçados com fibras de aço (CRFA). In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 42., 2000, Fortaleza. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2000.

HIGA, L. H.; FRANCO, B. L. M.; CRAVO, A.; SILVA, R. M.; MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. Método de dosagem do concreto reforçado com fibras de aço para otimização da tenacidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49., 2007, Bento Gonçalves, RS. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Concrete Library of JSCE n. 3 – Part III-2 – JSCE-SF4: method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete.** [S. l.], June 1984. p. 58-60.

LOBÃO, L. M. M. **Taxa de armadura longitudinal de tração mínima em vigas de concreto de resistência normal com fibras de aço.** 2005. 109 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MANO, E. B. **Polímeros como Materiais de Engenharia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1991.

MASIERO, I. M. Aplicações práticas para concreto reforçado com fibras de aço: pisos industriais. **Revista Concreto e Construções**, São Paulo: IBRACON, ano 36, n. 51, p. 38-42, jul./ago./set. 2008.

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

MILANI, A. C. **Análise de Lajes Planas Protendidas pelo Método dos Elementos Finitos**. 2006. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

NUNES, N. L.; AGOPYAN, V.; **A influência do fator de forma da fibra na tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibras de aço**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998. Boletim Técnico PCC/225.

NUNES, N. L. **Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos**. 2006. 253 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

OLIVEIRA, P. L. **Projeto Estrutural de Pavimentos Rodoviários e de Pisos Industriais de Concreto**. 2000. 218 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

PAIVA, G. P.; FIGUEIREDO, A. D. A influência dos procedimentos experimentais na precisão dos resultados dos ensaios de tenacidade em CRFA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49., 2007, Bento Gonçalves, RS. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007.

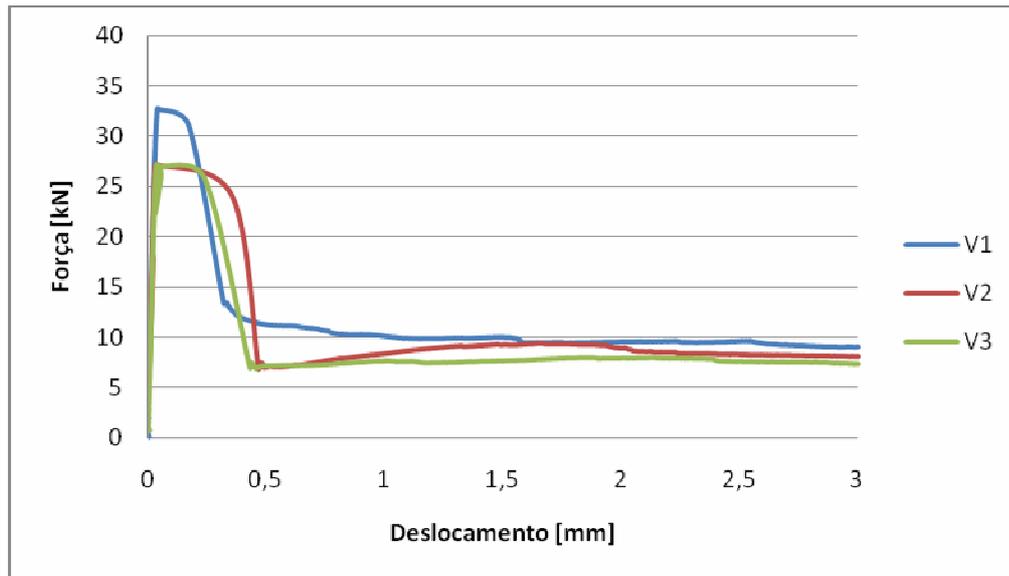
POLISSENI, A. E. Pisos Industriais Plano de Concretagem. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2008. Disponível em: <http://www.marcoscassiano.com/eng/attachments/078_Pisos%20industriais%20-%20Plano%20de%20concretagem.pdf>. Acesso em: 20 out. 2010.

RODRIGUES, P. P. F.; BOTACINI, S. M.; GASPARETTO, W. E. **Manual Gerdau de Pisos Industriais**. São Paulo: Pini, 2006.

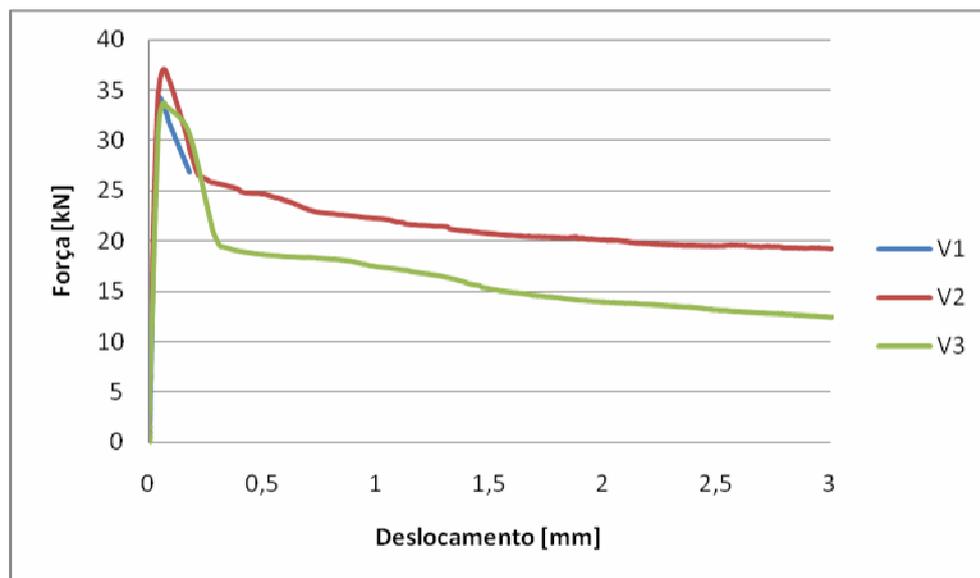
VIECILI, F. A. **Influência da utilização dos endurecedores superficiais cimentícios na resistência à abrasão de pisos industriais de concreto**. 2004. 99 f. Trabalho de Conclusão (Mestrado em Engenharia) – Curso de Mestrado Profissionalizante da Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SAVASTANO JÚNIOR, H. **Zona de transição entre fibras e pasta de cimento Portland: caracterização e inter-relação com as propriedades mecânicas do compósito**. 1992. 249 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

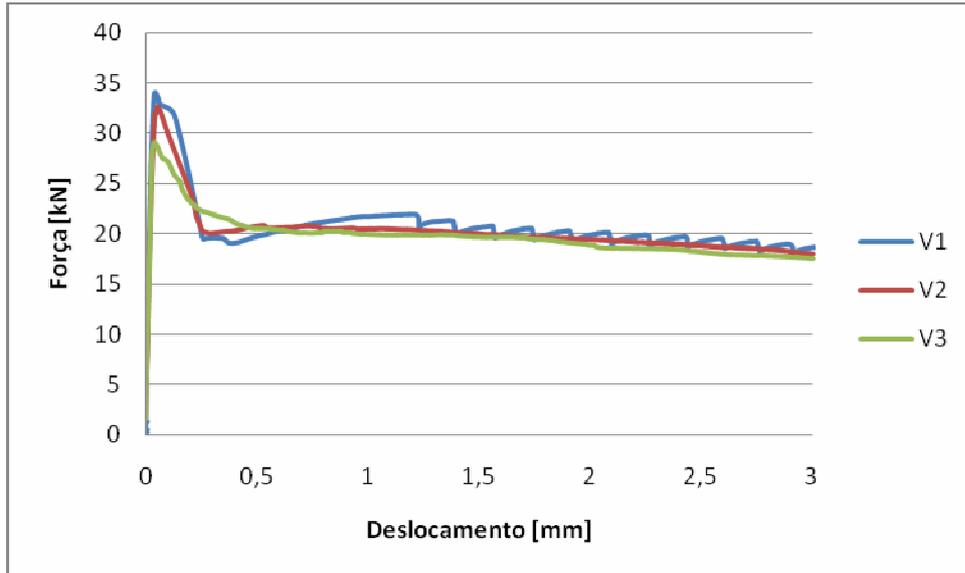
APÊNDICE A – Resultados dos Ensaios de Flexão à Quatro Pontos



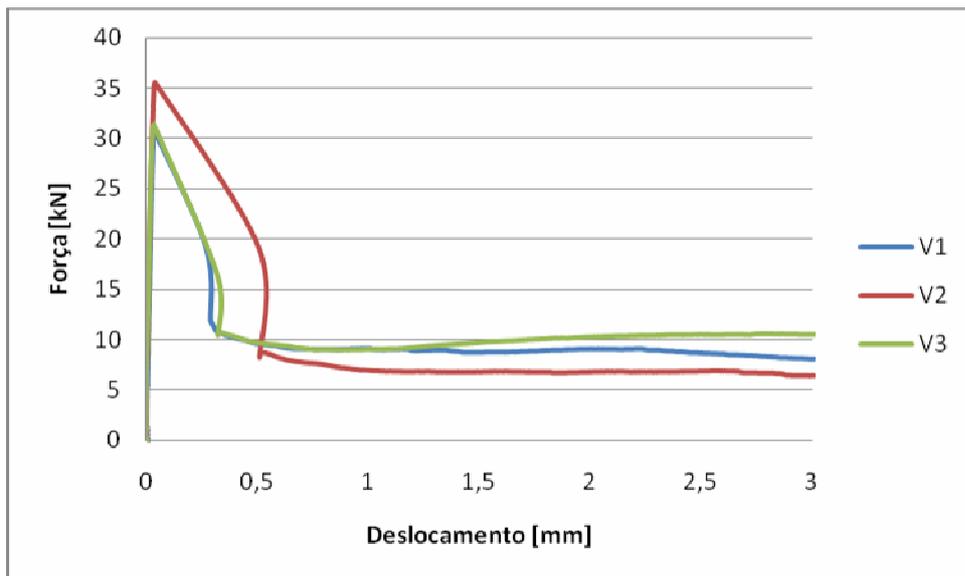
Teor de 0,6% de Aço



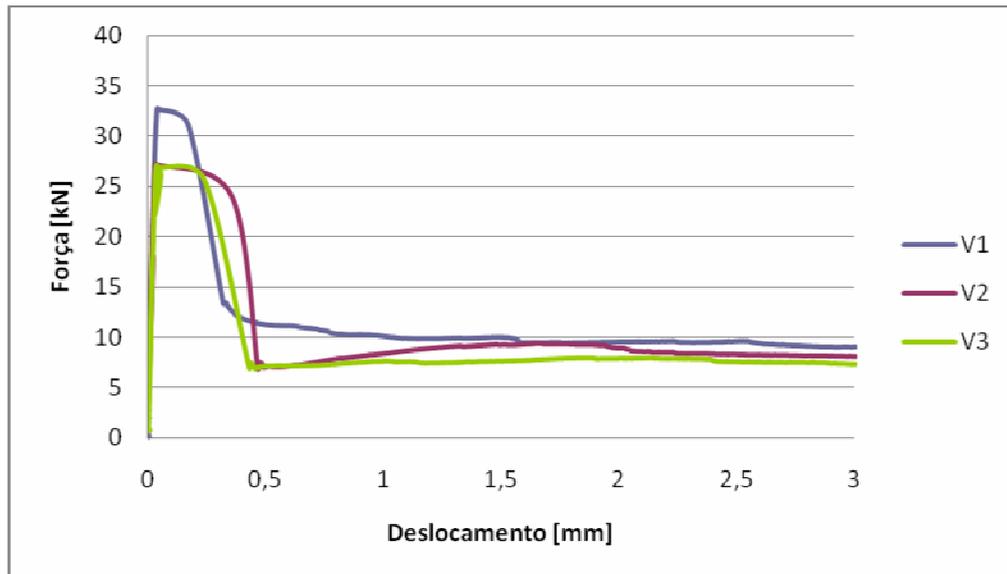
Teor de 0,8% de Aço



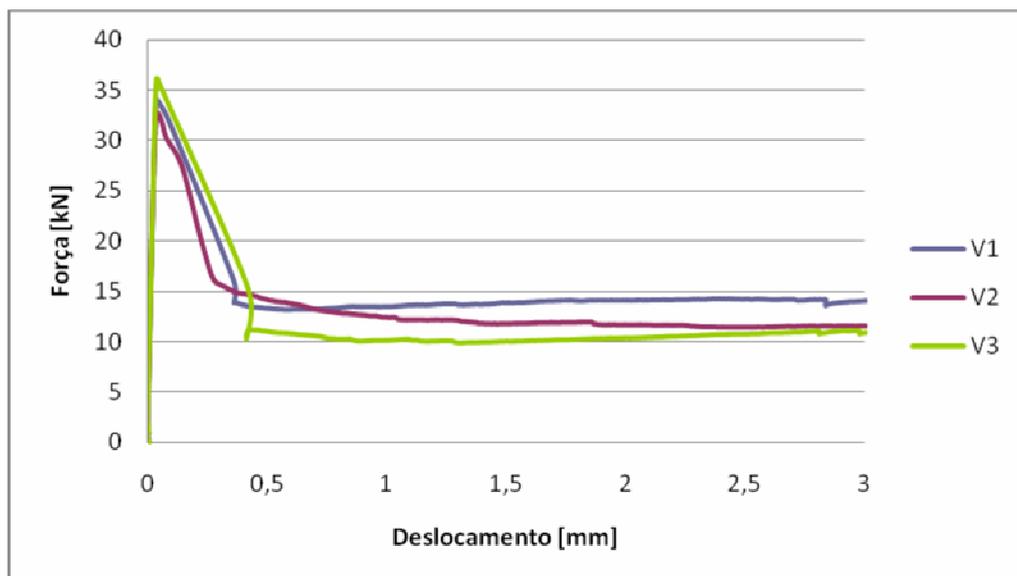
Teor de 1,0% de Aço



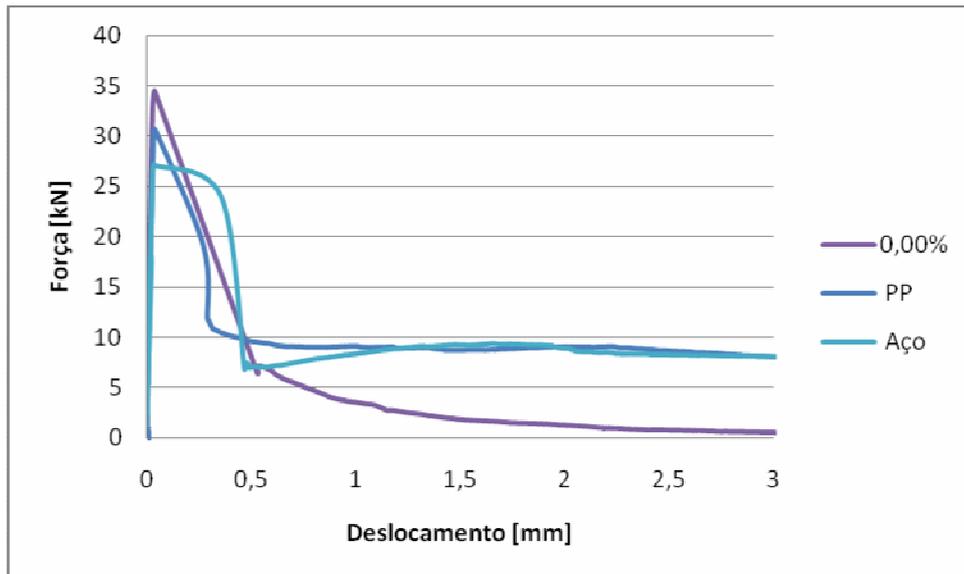
Teor de 0,6% de Polipropileno



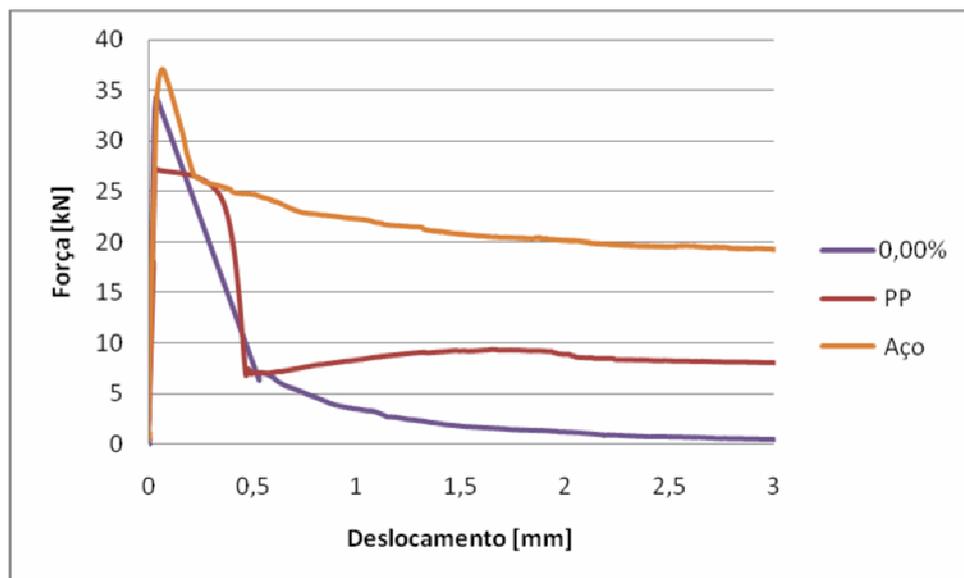
Teor de 0,8% de Polipropileno



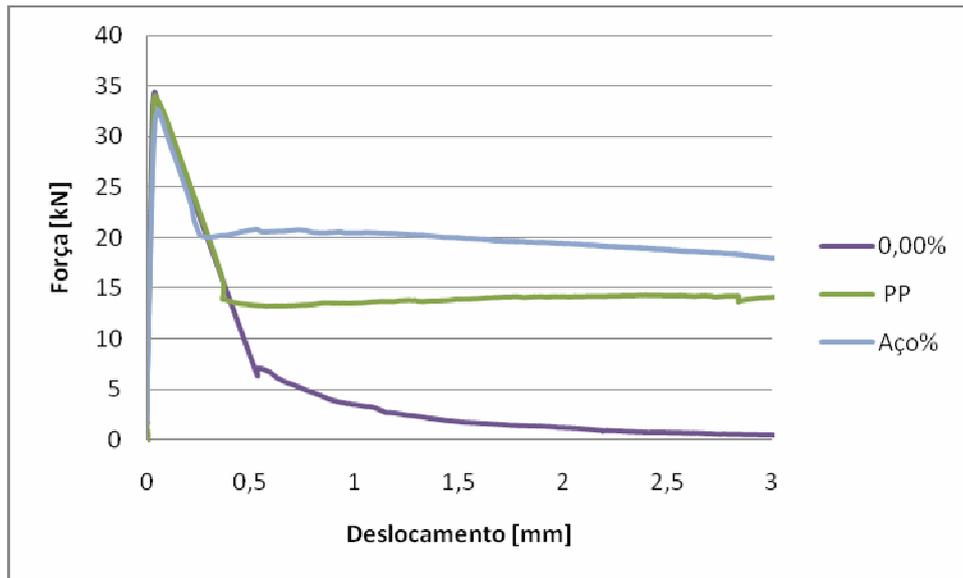
Teor de 1,0% de Polipropileno



Teor de 0,6% de Aço e Polipropileno



Teor de 0,8% de Aço e Polipropileno



Teor de 0,8% de Aço e Polipropileno