

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Investigação experimental das propriedades
mecânicas de compósitos de concreto com adições
híbridas de fibras**

Uziel Cavalcanti de Medeiros Quinino

Tese de Doutorado

Porto Alegre

Abril, 2015

UZIEL CAVALCANTI DE MEDEIROS QUININO

**Investigação experimental das propriedades mecânicas de
compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito para obtenção do
título de Doutor em Engenharia Civil.

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

Prof. Armando Miguel Awruch
Dr. Universidade Federal do Rio de Janeiro
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. João Luiz Calmon Nogueira da Gama
Dr. Universitat Politècnica de Catalunya UPC–ETE Caminos Canales y Puertos de Barcelona

Prof. Américo Campos Filho
Dr. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Prof. Bernardo Fonseca Tutikian
Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

À minha amada esposa, Otaciana Quinino, pessoa com quem decidi partilhar a vida.
Pelo carinho, pela paciência e por sua capacidade de me trazer paz ao longo da correria de
cada fase deste trabalho e nas inúmeras vezes em que, de forma especial, me deu força e
coragem, me apoiando nos momentos de dificuldades.

À minha filha, Cecília Quinino, que embora não tenha conhecimento daquilo que esteja sendo
discutido neste trabalho, contribui diariamente, iluminando os meus dias,
com seu sorriso e sua alegria de criança.

A elas, essa dedicatória tem o propósito de compensá-las das ocasiões que me afastei dos seus
convívios, absorvido neste trabalho.

*“ ... Seja, pois, o motivo de tuas ações e
dos teus pensamentos sempre
o cumprimento do dever,
e fazes as tuas obras sem procurares recompensa,
sem te preocupares com o teu sucesso ou insucesso,
com o teu ganho ou o teu prejuízo pessoal.
Não caias, porém, em ociosidade e inação,
como acontece facilmente
aos que perderam a ilusão
de esperar uma recompensa
das suas ações ...”
(Baghavad – Gita)*

AGRADECIMENTOS

Obrigo-me a iniciar meus agradecimentos, enfatizando minha gratidão a Deus, pois, apesar das inúmeras dificuldades peculiares de cada um dos dias, sempre soube entender o seu silêncio e nEle acreditei. Estou certo que além de ter me acompanhado em cada passo, Ele manteve fortalecida a minha vontade de chegar ao fim de mais uma etapa na vida acadêmica.

Naturalmente, tenho a necessidade de mencionar várias pessoas merecedoras dos meus agradecimentos, pois suas participações durante essa pesquisa foram valiosas, oferecendo sugestões pertinentes ao desenvolvimento do tema, reforçando a motivação, reconhecendo a determinação ou se prontificando para prestar qualquer tipo de ajuda. Sem menosprezar todas as contribuições, gostaria de elencar as mais substanciais.

Agradeço o amplo apoio e orientação do professor Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, inclusive pelos indispensáveis ensinamentos, discussões proveitosas e por proporcionar-me maturidade propícia para o andamento da pesquisa científica. Pela inesquecível acolhida junto ao laboratório sob sua coordenação, por sua contínua e legítima amizade, imensa compreensão e satisfação de trabalharmos juntos, deixo meus cumprimentos de gratidão.

Aos demais professores que colaboraram com sugestões e questionamentos fundamentais para a ratificação de vários tópicos abordados nesta tese, com destaque aos professores Protásio Ferreira e Castro, Denise Carpena Coitinho Dal Molin, Antônio Domingues de Figueiredo, por terem aceitado avaliar este trabalho ainda na etapa de exame de qualificação, bem como aos professores João Luiz Calmon Nogueira da Gama, Américo Campos Filho e Bernardo Fonseca Tutikian, como membros da banca examinadora da tese. Grato pelas contribuições em prol do aprimoramento do trabalho, sendo generosos em compartilhar suas experiências e concepções. O Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul é merecedor de agradecimentos, pois através de uma seleção séria, tive a oportunidade de realizar um curso de doutorado de excelência e de pertinente impacto no meio acadêmico. Às queridas Carmem e Ana Luísa, membros da secretaria deste programa, minha imensa dívida de gratidão pela orientação, paciência e assistência ao longo desta vinculação.

Várias parcerias foram estabelecidas ao longo deste convívio familiar e sou grato a todos os meus amigos e colegas que conviveram comigo nas salas de aula, assim como no âmbito deste e demais laboratórios do PPGEC. O Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais – LEME em especial, pelo clima de companheirismo e respeito mútuo, requisitos importantes na origem de

condições de trabalho adequadas. Aos responsáveis pelo LEME, por disponibilizarem as instalações e os equipamentos para o devido desenvolvimento desta investigação, pelo ambiente propício e encorajador para seguir, destaco minha imensa gratidão, com ênfase aos professores João Luiz Campagnolo e Dario Lauro Klein que colaboraram para o meu crescimento como pessoa, pesquisador acadêmico e profissional de engenharia, oferecendo-me diversas oportunidades e experiências em prol desta maturidade. Serão sempre merecedores do meu respeito e admiração. Devo incluir os queridos amigos Eurípedes Martins Fontes, Edgar Lucas e Flávio de Lima, na lista daqueles que são merecedores da minha gratidão. Aos irmãos da família LEME, colegas de pós-graduação, obrigado pelo convívio de amizade e cooperativismo: Ma. Vânia do Nascimento Peres, Eduardo Estevam, Leila Meneghetti, Monica Garcez, Rogério Antochaves, Alexandre Lorenzi, Luciani Lorenzi, Larissa Kirchoff, Luciane Caetano, Ângela Graeff, Estela Garcez, Alexandra Passuello, Camila Simonetti, Bruno do Vale e Tamara Baggio. Na fase de realização e acompanhamento dos inúmeros ensaios, pude contar com o auxílio dos pesquisadores de iniciação científica: Rossano Reis, Robson Rodrigues, Daniel Vieceli e Diego Guimarães. Um agradecimento especial a toda essa equipe, pois todos estão envolvidos neste trabalho, no qual alguns se tornaram fundamentais para execução do programa experimental. Pelas inúmeras ideias, pelo tempo dedicado no apoio e companheirismo e até mesmo nas confraternizações do grupo, minha imensa gratidão. Aqui faço uma especial referência à grande amiga Liliani Gaeversen, seu esposo Paulo Vicente e filhos, com quem dividi momentos de alegria e obtive apoio irrestrito em várias fases dessa trajetória na pós-graduação.

Aos amigos e colegas das instituições FEEVALE e UNISINOS, professores, funcionários e alunos, devo agradecer pelo incentivo e torcida em ver o fechamento desta tese.

À CAPES e ao CNPq pela utilização de recursos financeiros, permitindo-me o atendimento adequado das necessidades, assim como contribuindo diretamente para a formação e geração do pesquisador.

Ainda sim, aos velhos amigos que conquistei ao longo destes últimos anos, tendo a oportunidade de conviver com alguns deles. Dentre todos, insisto em querer reconhecer meu débito ao amado Padre Edgar (*in memoriam*) e a Beatriz Resmini, pelas orações, reuniões familiares e momentos de descontração. Aos queridos amigos, S. Delorge e D. Silvy, bem como seus familiares, pela amizade e companhia. Aos amigos Rafael e Érika, Luciane e Gustavo e Giovani e Danielle pela força e apoio, pela afinidade, pela companhia e parceria nos momentos de desopilação. Suas participações no decorrer deste trabalho foram bem ativas, inclusive através de laços de amizade e incentivo.

Faço questão de registrar minha gratidão ao amigo Mizaél Peixoto que, em uma de suas viagens de visita ao Rio Grande do Sul, fez questão de renunciar momentos de passeio com a família para me ajudar no decorrer do programa experimental, movimentando corpos de prova e auxiliando nos ensaios destrutivos, torcendo para que o fim desta etapa fosse breve.

Aos familiares da minha esposa, obrigado pela torcida e incentivo. Em especial, D. Socorro, minha sogra, que dedicou parte de seu tempo para direcionar suas orações em prol da conclusão deste trabalho, pedindo a Deus que me vigiasse ao longo desta trajetória de estudos e dedicação, atenuando as dificuldades dos obstáculos que precisavam ser vencidos e abreviando o tempo restante para a conclusão do curso.

Por último, mas não menos importante, também é digna do meu reconhecimento, em sua imensa generosidade, minha esposa, a Otaciana Costa Quinino, que sempre esteve ao meu lado ajudando-me no meu trabalho com palavras doces de apoio, carinho e amor. Sua atenção e dedicação prestados, não só nos momentos de alegria, mas, principalmente, nas dificuldades enfrentadas no transcorrer desta etapa tem um significado muito notável. Sua inabalável tranquilidade, seu incentivo preciso, sua peculiar serenidade e uma inesgotável paciência para me ouvir sempre, foram importantes. Devo reconhecer seu esforço em me ajudar quando solicitei auxílio na revisão das regras de ortografia, formatação e organização do texto. Além disso, contribuiu decisivamente com companheirismo em nossas atividades extra profissionais. Desculpe-me pelas inúmeras ocasiões em que me ausentei ou quando ocupei nossos momentos de lazer em família com minhas angústias e preocupações. Obrigado por renunciar alguns instantes de sua rotina de mãe e psicóloga atuante para me dar esse suporte.

A todos agradeço, profundamente e dedico o resultado do projeto, assumindo a responsabilidade de tudo que nele consta.

Sumário

| | |
|--|------------|
| Lista de Figuras..... | vi |
| Lista de Tabelas..... | xiv |
| Lista de Símbolos..... | xvi |
| Resumo..... | xix |
| Abstract..... | xx |
| Capítulo 1 – INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1.CONSIDERAÇÕES INICIAIS..... | 1 |
| 1.2.OBJETIVOS..... | 5 |
| 1.2.1. Objetivo geral..... | 6 |
| 1.2.2. Objetivos específicos..... | 6 |
| 1.3.LIMITAÇÕES..... | 7 |
| 1.4.ESTRUTURA | 8 |
| Capítulo 2 – ASPECTOS FUNDAMENTAIS DOS COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA REFORÇADOS COM FIBRAS..... | 10 |
| 2.1.CONSIDERAÇÕES INICIAIS..... | 10 |
| 2.2.O ELEMENTO DE REFORÇO | 13 |
| 2.2.1. Fibras Naturais..... | 15 |
| 2.2.2. Fibras Sintéticas..... | 18 |
| 2.2.3. Fibras Metálicas..... | 18 |
| 2.3.O COMPONENTE MATRICIAL..... | 19 |
| 2.4.OS EFEITOS DE INCORPORAÇÃO DAS FIBRAS..... | 20 |
| 2.5.COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA REFORÇADOS COM FIBRAS..... | 23 |
| 2.5.1. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS– CRF..... | 26 |
| 2.5.2. CARACTERIZAÇÃO..... | 28 |
| 2.5.3. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NAS PROPRIEDADES DO CRF..... | 31 |
| 2.5.3.1. Teor de fibras – Volume de fibras..... | 31 |

| | | |
|---------------|---|-----------|
| 2.5.3.2. | <i>Geometria das fibras</i> | 34 |
| 2.5.3.3. | <i>Distribuição e Orientação das fibras</i> | 38 |
| 2.5.3.4. | <i>Módulo de Elasticidade e Resistência Mecânica</i> | 40 |
| 2.5.4. | PRINCIPAIS PROPRIEDADES DOS CRF | 42 |
| 2.5.4.1. | <i>TRABALHABILIDADE</i> | 42 |
| 2.5.4.2. | <i>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO</i> :..... | 44 |
| 2.5.4.3. | <i>RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIRETA</i> :..... | 44 |
| 2.5.4.4. | <i>RESISTÊNCIA À FLEXÃO</i> :..... | 46 |
| 2.5.4.5. | <i>RESISTÊNCIA A CARREGAMENTOS DINÂMICOS –</i> <i>IMPACTO e FADIGA</i> | 47 |
| 2.5.4.6. | <i>TENACIDADE</i> | 48 |
| 2.5.4.7. | <i>DURABILIDADE</i> | 50 |
| | Capítulo 3 - COMPÓSITOS HÍBRIDOS DE FIBRAS | 52 |
| 3.1. | INTRODUÇÃO..... | 52 |
| 3.2. | COMPORTAMENTO DE COMPÓSITOS HÍBRIDOS..... | 53 |
| 3.3. | PRINCIPAIS TRABALHOS DESENVOLVIDOS..... | 56 |
| 3.4. | CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS POTENCIALMENTE ÚTEIS PARA GERAÇÃO DE COMPÓSITOS HÍBRIDOS..... | 59 |
| 3.4.1. | Aramida | 60 |
| 3.4.2. | Polipropileno | 62 |
| 3.4.3. | Vidro | 64 |
| 3.4.4. | Aço | 66 |
| 3.4.5. | Fibra de Carbono | 69 |
| 3.5. | ASPECTOS IMPORTANTES PARA SELEÇÃO DAS FIBRAS | 71 |
| | Capítulo 4 – METODOLOGIA E MATERIAIS | 76 |
| 4.1. | CONSIDERAÇÕES INICIAIS..... | 76 |
| 4.2. | ESTRATÉGIA DE PESQUISA..... | 76 |
| 4.3. | ORGANIZAÇÃO DO CAPÍTULO..... | 77 |
| 4.4. | SELEÇÃO DE ENSAIOS..... | 78 |
| 4.4.1. | Caracterização básica dos compósitos | 78 |
| 4.4.1.1. | <i>Resistência à Compressão Axial</i> – f_c^{CRF} | 78 |
| 4.4.1.2. | <i>Resistência à Tração por Compressão Diametral</i> - $f_{t,D}^{CRF}$ | 79 |

| | | |
|---|--|------------|
| 4.4.2. | Avaliação da Trabalhabilidade e Consistência..... | 80 |
| 4.4.2.1. | <i>Ensaio de Abatimento do Tronco do Cone.....</i> | 81 |
| 4.4.2.2. | <i>Consistência fluida pelo espalhamento na mesa de Graff. NBR NM68...</i> | 82 |
| 4.4.3. | Resistência à flexão equivalente..... | 85 |
| 4.4.3.1. | <i>Tenacidade e resistência à flexão.....</i> | 85 |
| 4.5. | SELEÇÃO DE MATERIAIS..... | 92 |
| 4.5.1. | Fibras..... | 92 |
| 4.5.1.1. | <i>Fibras de Aço.....</i> | 92 |
| 4.5.1.2. | <i>Fibras de Polipropileno.....</i> | 93 |
| 4.5.1.3. | <i>Fibras de Carbono.....</i> | 94 |
| 4.5.2. | Concreto..... | 95 |
| 4.5.3. | Fôrmas..... | 98 |
| 4.5.4. | Moldagem, adensamento e cura..... | 101 |
| 4.5.5. | Controle tecnológico..... | 102 |
| 4.6. | PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL..... | 102 |
| 4.7. | DEFINIÇÃO DE VARIÁVEIS..... | 105 |
| 4.7.1. | Variáveis Independentes (controladas)..... | 105 |
| 4.7.2. | Variáveis Dependentes..... | 106 |
| 4.7.3. | Variáveis constantes..... | 106 |
| 4.8. | INSTRUMENTAÇÃO..... | 106 |
| 4.8.1. | Sistema de medição de deslocamento..... | 106 |
| 4.8.2. | Abertura de entalhe..... | 107 |
| 4.8.3. | Deformações específicas..... | 111 |
| Capítulo 5 - ESTUDOS PRELIMINARES..... | | 112 |
| 5.1. | RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES..... | 112 |
| 5.2. | RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRABALHABILIDADE..... | 114 |
| 5.3. | RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO..... | 115 |
| 5.3.1. | Resultados de Flexão - Concreto Simples | 115 |
| 5.3.2. | Resultados de Flexão - Concretos com fibras..... | 120 |
| 5.3.2.1. | <i>Vigas de concreto com fibras de polipropileno.....</i> | 120 |
| 5.3.2.2. | <i>Vigas de concreto com fibras metálicas.....</i> | 124 |

| | |
|---|------------|
| Capítulo 6 – RESULTADOS..... | 126 |
| 6.1.CONCRETO FRESCO - TRABALHABILIDADE E CONSISTÊNCIA..... | 126 |
| 6.2.RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL - f_c^{CRF} | 129 |
| 6.3.RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL - f_{tD}^{CRF} | 137 |
| 6.4.FATOR DE TENACIDADE E RESISTÊNCIA À FLEXÃO EQUIVALENTE | 144 |
| 6.4.1. Teste de flexão (flexão em 04 pontos) - <i>Japan Society of Civil Engineers – JSCE – SF4, 1984</i> | 144 |
| 6.4.2. Teste de flexão (flexão em 03 pontos) - RILEM TC 162 – TDF..... | 151 |
| Capítulo 7 – ANÁLISE E MODELAGEM DOS RESULTADOS..... | 161 |
| 7.1. MODELAGEM DOS DADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL - f_c^{CRF} | 162 |
| 7.2. MODELAGEM DOS DADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL - f_{tD}^{CRF} | 168 |
| 7.3. MODELAGEM DOS DADOS DE FATOR DE TENACIDADE E RESISTÊNCIA À FLEXÃO EQUIVALENTE..... | 173 |
| 7.3.1. Teste de flexão – 04 pontos – <i>Japan Society of Civil Engineers – JSCE – SF4, 1984</i> | 173 |
| 7.3.1.1. Carga máxima - $f_{m\acute{a}x}$ - e resistência à flexão na primeira fissuração - $\sigma_{m\acute{a}x}^{CRF}$ | 174 |
| 7.3.1.2. Fator de tenacidade ou resistência à flexão equivalente - F_T | 179 |
| 7.3.2. Teste de flexão (flexão em 03 pontos) - RILEM TC 162 – TDF..... | 185 |
| 7.3.2.1. Força máxima – $f_{m\acute{a}x}$ – e Resistência à flexão equivalente- f_{eq} | 186 |

| | |
|---|------------|
| Capítulo 8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 192 |
| 8.1.CONSIDERAÇÕES SOBRE O TRABALHO E SUAS CONTRIBUIÇÕES..... | 192 |
| 8.2.CONCLUSÕES | 195 |
| 8.3.SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 201 |
| ANEXOS..... | 203 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 205 |

Lista de Figuras

| | |
|---|------|
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO | p.01 |
| x | |
| CAPÍTULO 2 - ASPECTOS FUNDAMENTAIS DOS COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA REFORÇADOS COM FIBRAS | p.10 |
| Figura 2.1: Classificação das fibras segundo BISFA. (FONTE: Maccaferri, Manual Técnico, 2009) | p.14 |
| Figura 2.2: Exemplos de tipos de fibras. (FONTE: Maccaferri, Manual Técnico, 2009) | p.14 |
| Figura 2.3: Típicas curvas tensão vs deformação para o concreto com fibras | p.32 |
| Figura 2.4: Diagramas carga x flecha obtidos nos ensaios de flexão de prismas de concreto com fibras em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico (baseado em FIGUEIREDO, 2000). | p.33 |
| Figura 2.5: Compatibilidade dimensional entre fibras-agregados. | p.37 |
| Figura 2.6: Propagação preferencial da fissura na interface agregado-matriz. | p.38 |
| Figura 2.7: Curva carga vs deslocamento, indicando valores de deslocamento para os quais devem ser calculados os índices de tenacidade segundo ASTM C 1018 (1994). | p.49 |
| CAPÍTULO 3 - COMPÓSITOS HÍBRIDOS DE FIBRAS | p.52 |
| Figura 3.1: (a) Estágios de união das fissuras e ação das fibras; (b) Diagrama tensão vs deformação correspondente. | p.55 |
| Figura 3.2: Descrição esquemática do comportamento de um compósito formado a partir da inserção de fibras de aço e fibras de polietileno. | p.57 |
| Figura 3.3: Propriedades de retração no concreto reforçado com adição híbrida de fibras (SUN et al, 2000). | p.58 |
| Figura 3.4 – Aparência de diversas formas de fornecimento da fibra aramida. | p.62 |

| | |
|---|------|
| Figura 3.5: Preço de 01 kg de fibra. | p.72 |
| Figura 3.6 – Diagrama de parâmetros de influência das fibras. | p.73 |
| CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA E MATERIAIS | p.76 |
| Figura 4.1 – Esquema de ensaio e dimensões – compressão simples. | p.79 |
| Figura 4.2 – Esquema de ensaio e dimensões – tração por compressão diametral | p.80 |
| Figura 4.4 – Diferença após a retirada do molde no abatimento do tronco de cone. | p.81 |
| Figura 4.5 – Ensaio do abatimento de tronco com cone invertido. | p.83 |
| Fonte: FIGUEIREDO, 2000. | |
| Figura 4.6 – Ensaio de Vebe. | p.83 |
| Fonte: FIGUEIREDO, 2000. | |
| Figura 4.7 – Mesa de Graff para verificação do espalhamento da mistura. | p.84 |
| Figura 4.8 – Configuração de ensaio – JSCE SF4, 1984 – Flexão em quatro pontos. | p.86 |
| Figura 4.9 – Sistema de aquisição contínua de dados. | p.87 |
| Figura 4.10 – Critério da JSCE SF-4 (1984) para a determinação da tenacidade | p.88 |
| Fonte: FIGUEIREDO, 2005 | |
| Figura 4.11 – Dimensões do corpo-de-prova prismático com entalhe no centro do vão. | p.89 |
| Figura 4.12 – Arranjo de ensaio previsto pela RILEM TC 162 – TDF – Flexão em três pontos. | p.90 |
| Figura 4.13 – Diagramas carga x deslocamento – áreas e energias absorvidas pelo CRF. | p.91 |
| Figura 4.14 – Características das fibras de aço empregadas no programa experimental | p.93 |
| Figura 4.15 – Ilustração da fibra sintética de polipropileno – FITESA | p.94 |
| Figura 4.16 – Fibra de carbono MBrace CF 130. a) ilustração do tecido; b) fibras | p.94 |

cortadas.

| | |
|--|-------|
| Figura 4.17 – Curva Granulométrica – Agregado Miúdo. | p.96 |
| Figura 4.18 – Curva Granulométrica – Agregado Graúdo – Limites da zona $d/D = 9,5 / 25$. | p.97 |
| Figura 4.19 – Esquema de montagem das fôrmas – 02 células para moldagem de vigas com dimensões 550 x 150 x 150 mm. | p.99 |
| Figura 4.20 – Esquema de montagem das fôrmas – Bloco para extração de 06 corpos-de-prova cilíndricos 95 x 190 mm. | p.101 |
| Figura 4.21 – Fluxograma de pesquisa adotado. | p.103 |
| Figura 4.22 – Pontos de experimentos – definição do programa experimental. | p.104 |
| Figura 4.23 – <i>Clip gauge</i> instrumentado – dimensões, condições de contorno, disposição dos <i>strain gauge</i> | p.108 |
| Figura 4.24 – a) Simplificação viga monoengastada, <i>strain gauge</i> localizados a 1/3 das lâminas b) Comportamento $\delta x \varepsilon$ aço mola (média das deformações). | p.108 |
| Figura 4.25 – Dispositivo de calibração dos <i>clip gauges</i> . | p.109 |
| Figura 4.26 – Curvas de calibração para os <i>clip gauges</i> 01 e 02. | p.110 |
| Figura 4.27 – Simulação numérica MEF (ANSYS) - $\varepsilon (33,5\text{mm}) = 25,50 \times 10^{-6}$ | p.110 |
| Figura 4.28: detalhe do <i>strain gauge</i> utilizado na montagem do <i>clip gauge</i> | p.111 |
| Figura 4.29: detalhe do <i>strain gauge</i> colado a superfície da lâmina do <i>clip gauge</i> . | p.111 |
| CAPÍTULO 5– ESTUDOS PRELIMINARES | p.112 |
| Figura 5.1: Propriedades das fibras metálicas empregadas | p.112 |
| Figura 5.2: Evolução da resistência à compressão do concreto reforçado com fibras 65-35 – a) aos 14 dias ; b) aos 28 dias | p.113 |
| Figura 5.3: Evolução da resistência à compressão do concreto reforçado com fibras 65-60 – a) aos 14 dias; b) aos 28 dias | p.113 |
| Figura 5.4: Evolução da resistência à compressão do concreto reforçado com fibras 80-60 – a) aos 14 dias; b) aos 28 dias | p.113 |

| | |
|--|-------|
| Figura 5.5: Abatimento de tronco de cone – concreto reforçado com fibras de aço. | p.115 |
| Figura 5.6: Ruptura brusca da matriz – comportamento frágil do concreto | p.116 |
| Figura 5.7: Curvas P vs CMOD – vigas de concreto simples ($f_{ck} = 25$ MPa) | p.116 |
| Figura 5.8: Curvas P vs CMOD – vigas de concreto simples ($f_{ck} = 50$ MPa) | p.117 |
| Figura 5.9: Fibras sintéticas de polipropileno | p.121 |
| Figura 5.10: Propagação da fissura no CRF de polipropileno – <i>Polycrét CR</i> | p.121 |
| Figura 5.11: Evolução da propagação da fissura no CRF de polipropileno – <i>Polycrét CR</i> | p.122 |
| Figura 5.12: Curvas P vs CMOD – Concreto reforçado com fibras de polipropileno - a) Estrutural b) Corrugada. | p.123 |
| Figura 5.13: Curvas P vs CMOD – Concreto reforçado com fibras metálicas tipo 65-35 | p.124 |
| Figura 5.14: Curvas P vs CMOD – Concreto reforçado com fibras metálicas tipo 65-60 | p.124 |
| Figura 5.15: Curvas P vs CMOD – Concreto reforçado com fibras metálicas tipo 80-60 | p.125 |
| CAPÍTULO 6 – RESULTADOS | p.126 |
| Figura 6.1 – Vista de fenômenos de a) aglomeração de fibras (“ouriços”) e b) segregação da mistura de concreto fresco. | p.126 |
| Figura 6.2 – Concreto fresco reforçado com fibras – aparência da mistura. | p.127 |
| Figura 6.3 – Lançamento da mistura nas fôrmas de madeira. | p.129 |
| Figura 6.4: Bloco 440 x 300 x 200 mm e corpos de prova cilíndricos extraídos | p.130 |
| Figura 6.5: Resistência à Compressão Axial – valores médios (teor de fibra = 0,60%). | p.132 |
| Figura 6.6: Curvas Força x Deslocamento – Compressão Axial Pontos A', B', C' e D' – Teor de fibra de 0,60 %. | p.132 |
| Figura 6.7: Resistência à Compressão Axial – valores médios (teor de fibra = | p.133 |

0,80%).

| | |
|---|-------|
| Figura 6.8: Curvas Força x Deslocamento – Compressão Axial Pontos A''', B''', C''', D''' e O – Teor de fibra de 0,80 %. | p.134 |
| Figura 6.9: Curvas Força x Deslocamento – Compressão Axial Pontos A'', B'', C'' e D'' – Teor de fibra de 1,15 % | p.136 |
| Figura 6.10: Resistência à Compressão Axial – valores médios (teor de fibra = 1,15%) | p.136 |
| Figura 6.11: Curvas Força x Deslocamento – Compressão Axial Concreto Simples – Testemunhos – 0% | p.137 |
| Figura 6.12: Resistência à Tração por Compressão Diametral. Valores médios (teor de fibra = 0,60 %). | p.138 |
| Figura 6.13: Curvas Força x Deslocamento. Ensaio de Tração por Compressão Diametral Pontos A', B', C' e D. Teor total de fibras de 0,60 %. | p.139 |
| Figura 6.14: Resistência à Tração por Compressão Diametral. Valores médios (teor de fibra = 0,80 %) | p.140 |
| Figura 6.15: Curvas Força x Deslocamento – Tração por Compressão Diametral Pontos A''', B''', C''', D''' e O – Teor de fibra de 0,80 % | p.141 |
| Figura 6.16: Resistência à Tração por Compressão Diametral. Valores médios (teor de fibra = 1,15 %) | p.142 |
| Figura 6.17: Curvas Força x Deslocamento – Tração por Compressão Diametral Pontos A'', B'', C'' e D'' – Teor de fibra de 1,15 %. | p.143 |
| Figura 6.18: Curvas Força x Deslocamento – Tração por Compressão Diametral Concreto Simples – Testemunhos – 0% | p.143 |
| Figura 6.19: Curvas Força x Deslocamento – Flexão: JSCE – SF4 - teor de 0,60% | p.145 |
| Figura 6.20: Fator de Tenacidade ou Resistência à Flexão Equivalente valores médios (teor de fibra = 0,60%) | p.146 |
| Figura 6.21: Curvas Força x Deslocamento – Flexão: JSCE – SF4 - teor de | p.147 |

0,80%

| | |
|---|-------|
| Figura 6.22: Fator de Tenacidade ou Resistência à Flexão Equivalente valores médios (teor de fibra = 0,80%) | p.148 |
| Figura 6.23: Curvas Força x Deslocamento – Flexão: JSCE – SF4 - teor de 1,15% | p.149 |
| Figura 6.24: Fator de Tenacidade ou Resistência à Flexão Equivalente valores médios (teor de fibra = 1,15%) | p.150 |
| Figura 6.25: Curvas Força x Deslocamento – Flexão: JSCE – SF4 – TESTEMUNHO | p.151 |
| Figura 6.26: Aparência dos corpos de prova fissurados – Flexão: JSCE – SF4. | p.151 |
| Figura 6.27: Curvas F x CMOD – Flexão: RILEM TC 162 – TDF – teor de 0,60%. | p.152 |
| Figura 6.28: Curvas F x CMOD – Flexão: RILEM TC 162 – TDF – teor de 0,80%. | p.153 |
| Figura 6.29: Curvas F x CMOD – Flexão: RILEM TC 162 – TDF – teor de 1,15%. | p.154 |
| Figura 6.30: Valores médios de resistência à flexão f_{eq2} e f_{eq3} [MPa] RILEM TC 162 – TDF – teor de 0,60%. | p.156 |
| Figura 6.31: Valores médios de resistência à flexão f_{eq2} e f_{eq3} [MPa] RILEM TC 162 – TDF – teor de 0,80%. | p.157 |
| Figura 6.32: Valores médios de resistência à flexão f_{eq2} e f_{eq3} [MPa] RILEM TC 162 – TDF – teor de 1,15%. | p.158 |
| Figura 6.33: Curvas Força x CMOD – Flexão: RILEM TC 162-TDF – TESTEMUNHOS | p.159 |
| Figura 6.34: Aparência dos corpos de prova fissurados – Flexão: RILEM TC 162 – TDF | p.160 |
| CAPÍTULO 7 – TRATAMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS | p.161 |
| Figura 7.1 – Resistência à compressão axial – f_c^{CRF} –ação isolada da fibra | p.163 |

- Figura 7.2 – Resistência à compressão axial – f_c^{CRF} – para combinações binárias de fibras: a) Aço+Carbono; b) Aço+Polipropileno; c) Polipropileno+Carbono. p.165
- Figura 7.3 – Resistência à compressão axial – f_c^{CRF} – para combinações terciárias de fibras – comparação entre valores obtidos com o modelo proposto e dados experimentais. a) Teor de fibras = 0,6% - b) Teor de fibras = 0,8% - c) Teor de fibras = 1,15% p.167
- Figura 7.4 – Resistência à tração por compressão diametral – f_t, D^{CRF} - ação isolada da fibra. p.169
- Figura 7.5 – Resistência à tração por compressão diametral – f_t, D^{CRF} – para combinações binárias de fibras: a) Aço+Carbono; b) Aço+Polipropileno; c) Polipropileno+Carbono p.171
- Figura 7.6 – Resistência à tração por compressão diametral – f_t, D^{CRF} – para combinações terciárias de fibras – comparação entre valores obtidos com o modelo proposto e dados experimentais. a) Teor de fibras = 0,6% - b) Teor de fibras = 0,8% - c) Teor de fibras = 1,15%. p.172
- Figura 7.7 – Resistência à flexão na primeira fissura – $\sigma_{máx}^{CRF}$ - ação isolada da fibra. p.175
- Figura 7.8 – Resistência à flexão na primeira fissura – $\sigma_{máx}^{CRF}$ para combinações binárias de fibras: a) Aço+Carbono; b) Aço+Polipropileno; c) Polipropileno+Carbono. p.177
- Figura 7.9 – Resistência à flexão na primeira fissura – $\sigma_{máx}^{CRF}$ – para combinações terciárias de fibras – comparação entre valores obtidos com o modelo proposto e dados experimentais. a) Teor de fibras = 0,6% - b) Teor de fibras = 0,8% - c) Teor de fibras = 1,15%. p.178
- Figura 7.10 – Fator de tenacidade – FT - ação isolada da fibra. p.181
- Figura 7.11 – Fator de Tenacidade – FT para combinações binárias de fibras: a) Aço+Carbono; b) Aço+Polipropileno; c) Polipropileno+Carbono p.182
- Figura 7.12 – Fator de Tenacidade – FT – para combinações terciárias de fibras – comparação entre valores obtidos com o modelo proposto e dados experimentais. p.184
a) Teor de fibras = 0,6% - b) Teor de fibras = 0,8% - c) Teor de fibras = 1,15%.

| | |
|---|-------|
| Figura 7.13 – Máxima carga de ruptura – $f_{m\acute{a}x}$ – para as misturas ensaiadas. Comparação entre os resultados obtidos a partir da RILEM TC 162 TDF e JSCE SF4. a) Teor de fibras = 0,6% - b) Teor de fibras = 0,8% - c) Teor de fibras = 1,15%. | p.187 |
| Figura 7.14 – resistência à flexão equivalente para as misturas ensaiadas. Comparação entre os resultados obtidos a partir da JSCE SF4 e da RILEM TC 162 TDF. a) Teor de fibras = 0,6% - b) Teor de fibras = 0,8% - c) Teor de fibras = 1,15%. | p.188 |
| Figura 7.15 - Pontos de experimentos – misturas definidas no programa experimental | p.190 |
| CAPÍTULO 8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS | p.192 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|-------|
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO | p.01 |
| x | |
| CAPÍTULO 2 - ASPECTOS FUNDAMENTAIS DOS COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA REFORÇADOS COM FIBRAS | p.10 |
| Tabela 2.1: Valores de propriedades para diversos tipos de fibras (Bentur e Mindess, 1990) | p.41 |
| CAPÍTULO 3 - COMPÓSITOS HÍBRIDOS DE FIBRAS | p.52 |
| Tabela 3.1: Propriedades das fibras de carbono (ACI 440.2R-02, 2002) | p.70 |
| CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA E MATERIAIS | p.76 |
| Tabela 4.1 – Características do agregado miúdo | p.95 |
| Tabela 4.2 – Características do agregado graúdo | p.97 |
| Tabela 4.3 – Consumo de materiais por m ³ | p.98 |
| CAPÍTULO 5– ESTUDOS PRELIMINARES | p.112 |
| Tabela 5.1: Valores de a_c para os Concretos de 25 MPa e 50MPa | p.118 |
| Tabela 5.2: Valores de K_{IC} (10% a 25%) para os Concretos de 25 MPa e 50MPa | p.118 |
| Tabela 5.3: Valores de $CTOD_C$ (10% a 25%) para os Concretos de 25 MPa e 50 MPa | p.118 |
| Tabela 5.4: Valores de G_f (10% a 25%) para os Concretos de 25 MPa e 50 MPa | p.119 |
| Tabela 5.5: Valores básicos da energia de fratura G_{F0} [N/mm]. | p.119 |
| CAPÍTULO 6 – RESULTADOS | p.126 |
| Tabela 6.1 – Propriedades do concreto fresco reforçado com fibras | p.128 |
| Tabela 6.2 – Valores de f_c^{CRF} – Teor total de fibra = 0,60% | p.131 |
| Tabela 6.3 – Valores de f_c^{CRF} – Teor total de fibra = 0,80% | p.133 |
| Tabela 6.4 – Valores de f_c^{CRF} – Teor total de fibra = 1,15% | p.135 |
| Tabela 6.5 – Valores de f_{ID}^{CRF} – Teor total de fibra = 0,60% | p.138 |

| | |
|---|-------|
| Tabela 6.6 – Valores de f_{ID}^{CRF} – Teor total de fibra = 0,80% | p.140 |
| Tabela 6.7 – Valores de f_{ID}^{CRF} – Teor total de fibra = 1,15% | p.142 |
| Tabela 6.8 – Valores de FT – Teor total de fibra = 0,60% | p.146 |
| Tabela 6.9 – Valores de FT – Teor total de fibra = 0,80% | p.148 |
| Tabela 6.10 – Valores de FT – Teor total de fibra = 1,15% | p.150 |
| Tabela 6.11 – Valores de $f_{m\acute{a}x}$, δ_L , feq_2 e feq_3 – Teor total de fibra = 0,60% | p.155 |
| Tabela 6.12 – Valores de $f_{m\acute{a}x}$, δ_L , feq_2 e feq_3 – Teor total de fibra = 0,80% | p.156 |
| Tabela 6.13 – Valores de $f_{m\acute{a}x}$, δ_L , feq_2 e feq_3 – Teor total de fibra = 1,15% | p.157 |
| CAPÍTULO 7 – TRATAMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS | p.161 |
| | x |
| | p.192 |
| CAPÍTULO 8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS | |
| | x |

Lista de Símbolos

Letras do Alfabeto Latino

| | |
|--|---|
| a_c | Comprimento inicial da trinca |
| b_v | Largura da viga no ensaio de flexão |
| b_w | Largura parada base da viga |
| C_i | Complância inicial |
| $CMOD$ | Abertura normal do entalhe |
| $CTOD_C$ | Abertura Crítica da Ponta da Trinca |
| C_u | Complância acerca do decréscimo de $P_{máx}$ |
| d_{CP} | Diâmetro do corpodeprova |
| d_f | Diâmetro da fibra |
| $d_{máx}$ | Diâmetro máximo dos agregados |
| $DfBZ2.I, DfBZ2.II, DfBZ3.I, DfBZ3.II$ | áreas sob as curvas de carga por deflexão equivalentes à absorção de energia em virtude da contribuição das fibras. |
| E^{CRF} | Módulo de Elasticidade do Concreto Reforçado com Fibras |
| E_{sec}^{CRF} | Módulo de Elasticidade secante do Concreto Reforçado com Fibras |
| $E^{aço}$ | Módulo de Elasticidade da fibra de aço |
| $E^{carbono}$ | Módulo de Elasticidade da fibra de carbono |
| E^{PP} | Módulo de Elasticidade da fibra de polipropileno |
| F | Carga máxima obtida em ensaio com corpos cilíndricos |
| FT | Fator de tenacidade, ou resistência à flexão equivalente |
| f_c^{CRF} | Resistência à compressão axial do concreto reforçado com fibra |
| $f_{t,D}^{CRF}$ | Resistência à tração por compressão diametral do concreto reforçado com fibra |
| $f_t^{aço}$ | Resistência à Tração da fibra de aço |
| f_t^{PP} | Resistência à Tração da fibra de polipropileno |

| | |
|-----------------|---|
| $f_t^{carbono}$ | Resistência à Tração da fibra de carbono |
| f_c | Resistência à compressão nominal do concreto |
| f_{c28} | Resistência à compressão nominal do concreto aos 28 dias |
| h_v | Altura da viga no ensaio de flexão |
| h_{sp} | Altura da viga, correspondente à distância entre a ponta do entalhe e o topo do corpodeprova; |
| K_{IC}^S | Fator de Intensidade de Tensões Crítico |
| l_c | Comprimento crítico da fibra |
| L_{CP} | Altura do corpodeprova |
| L_v | Vão da viga durante o ensaio de flexão. |
| $P^{máx}$ | Carga máxima empregada no ensaio de flexão |
| Tb | Área sob a curva até o deslocamento equivalente de L/150 |
| V_{fcr} | Volume crítico de fibras |
| V_f | Volume de fibras |

Letras do Alfabeto Grego

| | |
|----------------------|--|
| δ | Deslocamento na ponta do clip |
| δtb | Deslocamento equivalente a $L/150$ |
| εm | Deformação específica correspondente à tensão σn |
| $\varepsilon 0$ | Deformação específica correspondente à tensão σinf |
| ε | Deformações aferidas nas abas do clip |
| $\rho^{aço}$ | Densidade do aço |
| ρ^{PP} | Densidade do polipropileno |
| σf | Tensão de ruptura à tração da fibra |
| σn | tensão considerada para o cálculo do módulo, adotada em 40% da tensão de ruptura do material |
| τc | Resistência de aderência fibra-matriz |
| σ_{inf} | Tensão de 0,5 MPa adotada no ensaio de flexão |
| $\sigma_{máx}^{CRF}$ | Resistência à flexão na primeira fissura |

RESUMO

QUININO, U. C. M., **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, RS.

Com a consolidação e difusão da tecnologia do concreto armado, empregada em construções das mais variadas naturezas, o desempenho das obras passou a depender diretamente da qualidade e propriedade dos seus materiais integrantes, o que gerou a necessidade e justificou os esforços envolvidos na avaliação de suas características e na melhoria de sua capacidade. A necessidade de compensar a nítida deficiência que o concreto apresenta com seu comportamento frágil e na sua baixa capacidade de deformação é a principal razão pela qual foi indispensável à incorporação de reforços. No entanto, as convencionais armaduras principais são incapazes de controlar a fissuração localizada, o que pode comprometer a durabilidade do material. Portanto, o desafio atual consiste em melhorar seu desempenho a tração de forma a distribuir essa capacidade resistente por todo o material, ao longo de todas as suas fases. Uma das soluções mais aventadas e promissoras de melhorar o desempenho deficiente à tração consiste na adição de fibras, misturadas ainda no estado fresco, com uma distribuição aleatória ao longo do volume, possibilitando a obtenção de um compósito com propriedades mais isotrópicas, bem como a promoção de efeitos positivos, a exemplo do ganho de resistência à ruptura, redução das deformações, o controle do processo de fissuração em diferentes níveis de tamanho (micro, meso e macro) em distintas zonas do concreto e, conseqüentemente, o aumento da durabilidade da estrutura. Dada a importância do tema e as possibilidades de melhoria levantadas, essa pesquisa visa colaborar com estudos envolvendo diferentes tipos de fibras no concreto e os diversos papéis que elas podem exercer. Contribuir nessa ideia de consorciar fibras com distintas características - **misturas híbridas** - é a principal motivação do presente trabalho, que tem como objetivo, explorar as proporções e combinações de fibras e entender como afetam as propriedades do compósito resultante, visando obter o desempenho mais adequado tanto antes quanto após a fissuração. Deste modo, o caráter inovador e o interesse associado a esse estudo estão diretamente ligados à realização de um programa experimental, para a geração de modelos de comportamento confiáveis, visando à previsão de caracterização mecânica e estabelecimento de parâmetros de seleção de fibras, bem como a futura implementação de leis constitutivas em simulações numéricas. Os resultados obedecem ao procedimento cuja metodologia prevê a investigação de combinações binárias e terciárias de fibras de aço, de polipropileno e carbono - com teores totais investigados de 0,6%, 0,8% e 1,15% de volume com relação ao concreto - comparando o desempenho dos compósitos resultantes, em relação ao concreto simples cuja resistência à compressão nominal (f_{c28}) é de 25 MPa. Nas análises foram avaliadas as particularidades das misturas no estado fresco e, para o estado endurecido, as prescrições das normas *ABNT NBR 5739:1994*, *ABNT NBR 7222:1994*, *JSCE SF4 (1984)* e *RILEM TC 162 TDF*. Por fim foi efetuada uma análise da habilidade dos modelos propostos em reproduzir os valores experimentais, com vistas à consideração do efeito da hibridização das fibras na mistura e os resultados mostraram que a efetiva participação das fibras metálicas e prudente combinação com as fibras sintéticas contribuem positivamente no desempenho do CRF, onde o ganho na resistência à flexão pode assumir valores, aproximadamente, na faixa de 50 a 90%, dependendo do teor total de fibras e a combinação entre elas, sem que haja a ocorrência de problemas no processo de produção.

Palavras chave: concreto, fibras, hibridização, desempenho, tenacidade.

ABSTRACT

QUININO, U. C. M., **Experimental investigation of the mechanical properties of composites of concrete with hybrid fiber additions.** 2015. Thesis (Doctorate in Civil Engineering) - Graduate Program in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre, RS.

With the consolidation and dissemination of reinforced concrete technology, used in the most varied nature's buildings, the performance of works came to depend directly on the quality and property of the used materials, which made it necessary and justified the involved efforts in assessing their features and in the improvement of its capacity. The need to compensate the clear deficiency that the concrete has with its brittle behavior and its low deformation capacity is the main reason why it was indispensable to incorporate reinforcements. However, the conventional main reinforcement were unable to control localized cracking, which may impair material durability. Therefore, the current challenge is to improve their performance traction to distribute the load capacity throughout the material, through all its phases. One of the most suggested and promising solutions to improve the poor tensile performance consists in the addition of fibers mixed into it still fresh, with a random distribution throughout the volume, making it possible to obtain a composite having more isotropic properties, as well as promoting positive effects, such as the gain resistance to breakage, reduced deformation, the control of the cracking process in different size levels (micro, meso and macro) in different zones of the concrete and, consequently, increase the durability of the structure. Given the importance of the topic and the possibilities for improvement raised, this research attempts to cooperate with studies involving different types of fibers in the concrete and the various roles it can play. Contribute to the idea of consorting fibers with different characteristics -**hybrid mixtures** - is the main motivation of this work, which aims to explore the proportions and fiber combinations and understand how they affect the properties of the resulting composite in order to obtain the most appropriate performance before or after cracking. Thus, the innovative nature and interest associated with this study is linked directly to the implementation of an experimental program to generate reliable role models, aiming to predict the mechanical characterization and establishment of fiber selection parameters and the future implementation of constitutive laws in numerical simulations. The results comply with the methodology procedure for the research of binary and tertiary combinations of steel fibers, polypropylene and carbon - investigated with total concentration of 0.6%, 0.8% and 1.15% volume with respect to the concrete - comparing the performance of the resulting composite relative to plain concrete whose compression at the nominal resistance (f_c28) is 25 MPa. In the analysis we evaluated the characteristics of the mixtures in the fresh state and, to the hardened state, the required standards *ABNT NBR 5739:1994*, *ABNT NBR 7222:1994*, *JSCE SF4 (1984)* e *RILEM TC 162 TDF*. Finally an analysis was made of the ability of the proposed models to reproduce the experimental values with a view to the consideration of the effect of hybridization of the fibers in the mix and the results showed that the effective participation of metallic fibers and prudent combination with synthetic fibers contribute positively in performance of CRF, where the gain on the flexural strength can assume values approximately in the range of 50 to 90% depending on the total fiber content and the combination of them, without the occurrence of problems in the production process.

Keywords: concrete, fiber, hybridization, performance, toughness, steel, polypropylene, carbon.

INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

O concreto armado assumiu um papel essencial na indústria da construção ao longo do século XX, substituindo a alvenaria como principal material estrutural. Hoje em dia o mesmo é amplamente empregado, em construções das mais variadas naturezas. Com a consolidação e difusão dessa tecnologia no período do pós-guerra, o desempenho de muitas obras passou a depender diretamente da qualidade e propriedade dos materiais integrantes do concreto armado – concreto e aço, o que naturalmente gerou a necessidade e justificou os esforços envolvidos no estudo e avaliação de suas características e na melhoria de seu desempenho, durabilidade e trabalhabilidade.

A principal limitação relacionada à utilização do concreto consiste no seu comportamento notadamente frágil e na sua baixa capacidade de deformação antes da ruptura. Essa fragilidade se expressa no fato de que os valores de resistência à tração dos concretos serem tipicamente bastante inferiores (entre 8% e 15% aproximadamente, dependendo do patamar de resistência estudado) aos de sua resistência à compressão. Mehta e Monteiro (2014), discutindo as razões para esta diferença de comportamento sob distintos tipos de esforço, explicam que, no caso da compressão, a ruptura se dá pelo desenvolvimento de numerosas fissuras independentes, de pequena abertura, ao contrário do que ocorre na tração, onde algumas poucas trincas principais se unem, reduzindo a superfície total de ruptura e, conseqüentemente, o gasto energético.

Como é de amplo conhecimento na área da engenharia civil, a necessidade de compensar a deficiência de tração do concreto é principal razão pela qual foi necessária a incorporação de uma armadura de aço, gerando o concreto armado, para viabilizar o exitoso uso estrutural desse material.

A questão que vem discutida mais recentemente é que as armaduras tradicionais, formadas por barras de aço de dimensão de alguns centímetros, posicionadas de forma concentrada, são

incapazes de controlar adequadamente a fissuração localizada, o que pode comprometer a durabilidade do material.

Portanto, o desafio atual, para ampliar os usos possíveis e a confiabilidade de estruturas construídas com concreto, consiste em melhorar seu desempenho à tração de forma a distribuir essa capacidade resistente por todo o material.

Nessa busca cabe lembrar que o concreto é um material constituído de várias fases, com diversas propriedades. O mesmo pode macroscopicamente ser caracterizado como um compósito, formado por uma fase contínua - a pasta de cimento - que envolve inclusões particuladas - os poros e agregados. Uma das formas mais aventadas e promissoras de melhorar o desempenho deficiente à tração consiste na adição de mais uma parcela de inclusões, na forma de fibras, como é defendido por muitos pesquisadores (SHAH, SWARTZ e OUYANG, 1995; QUININO, 2004; FIGUEIREDO, 2011).

De acordo com Neville (1975) e Cánovas (1997), há vários efeitos positivos associados à adição de fibras no concreto e na argamassa: o ganho de tenacidade; o aumento da resistência à ruptura estática, à fadiga dinâmica e ao impacto; o melhoramento do comportamento à tração; a redução das deformações de sollicitação; e o controle de fissuras, no tocante ao número e à velocidade de propagação. Esses efeitos contribuem, conjuntamente, com o aumento da durabilidade da estrutura, pois a presença das fibras colabora com a diminuição das aberturas das fissuras, bem como ajuda a controlar e retardar sua propagação, permitindo que esta se dê de maneira estável.

Uma das vantagens é que, diferentemente do que ocorre no caso das barras de aço tradicionais, as fibras podem ser adicionadas à mistura de concreto fresco, o que favorece sua distribuição de maneira aleatória ao longo de todo o volume, possibilitando a obtenção de um compósito com propriedades mais isotrópicas.

Esse não é um conhecimento recente. Como lembram Tanesi e Agopyan (1997), a técnica de reforço por meio de inserção de fibras na matriz já era empregada desde, pelo menos, 1200 a.C., em lugares como o Egito, de acordo com registros existentes na Bíblia (ÊXODO 5, 6-7). As utilizações mais antigas normalmente envolviam a incorporação de fibras de origem vegetal e animal em construções de argila (BENTUR e MINDESS, 2007; CANOVAS, 1997; JOHNSTON, 1994; FIGUEIREDO, 2000), estratégia que ainda é utilizada até nossos dias por algumas comunidades, apesar dos problemas de durabilidade associados às fibras naturais.

Com o tempo e os avanços tecnológicos, foram sendo investigados, descobertos e/ou desenvolvidos diferentes tipos de fibras, com características que as tornavam mais adequadas para incorporação ao concreto, o que vem permitindo a geração de compósitos com propriedades cada vez melhores, e com desempenho muito superior ao tradicional, em alguns aspectos.

Dada a importância do tema, e as possibilidades de melhoria levantadas, um grande número de estudos, envolvendo diferentes tipos de fibras no concreto, vem sendo realizado, envolvendo desde fibras de basalto até fibras sintéticas oriundas da reciclagem de polímeros diversos.

Considerando o grande número e a diversidade das fibras estudadas, é natural que os resultados obtidos sejam bastante diferenciados. Por isso é extremamente importante atentar para as diferenças na forma de atuação de cada tipo de fibra, que vai depender de sua natureza, propriedades e dimensões.

As fibras metálicas usadas no concreto, por exemplo, tendem a apresentar módulo de elasticidade e diâmetro elevado, sendo mobilizadas, principalmente, após a fissuração, quando passam a atuar como pontes de transmissão de esforços e restrição de abertura de fissuras.

Já as fibras sintéticas podem ser mais finas e apresentar módulo de elasticidade muito inferior à matriz. Dada suas pequenas dimensões, podem se distribuir de forma mais disseminada na matriz e se mostrar mais eficientes no controle da microfissuração, dificultando a coalescência de fissuras e incrementando a resistência pré-fissuração do material. Por isso algumas fibras de baixo módulo e baixo custo, como as de polipropileno, já estão sendo empregadas para incrementar a resistência à tração de matrizes cimentícias em baixas idades, evitando fissuras por retração.

As fibras de carbono possuem elevado módulo de elasticidade e resistência à tração. Entretanto, sua superfície lisa dificulta a aderência junto a matriz. Como o diâmetro é bastante reduzido, o interesse é aumentar a capacidade portante do compósito através do controle da nucleação e propagação das fissuras numa fase microscópica do concreto, mais precisamente reforçando a zona de argamassa.

Ou seja, dependendo das características da fibra, os concretos resultantes da sua incorporação podem ter comportamento bastante distinto. Para ajudar a tentar entender essas questões e antever o comportamento esperado num concreto reforçado com fibras, vários estudos tem

tentado dividir as fibras em subcategorias, considerando os diferentes impactos em termos de reforço de matrizes cimentícias.

É possível, por exemplo, encontrar na literatura mais recente referências feitas a termos como macrofibra e microfibra, usados para tentar diferenciar as fibras maiores e mais resistentes, que atuam primariamente na pós-fissuração da matriz, das fibras menores e mais disseminadas, que atuam principalmente no retardo da fissuração.

Ao considerar esse diferentes papéis que as fibras podem exercer, alguns pesquisadores começaram a discutir a ideia de consorciar fibras com diferentes características, gerando o que está sendo cada vez mais chamado de **misturas híbridas** (BENTUR e MINDESS, 2007; RAMLI e DAWOOD, 2011; TAMIL SELVI e THANDAVAMOORTHY, 2013; YEW et al, 2011; SIVAKUMAR, 2011).

Esse é um tema emergente que tem recebido bastante atenção. Há na literatura um crescente número de pesquisas que buscam identificar os efeitos da combinação de fibras, investigando em que medida as diferenças de comportamento podem ser associadas à variação do módulo e das propriedades geométricas das fibras, ou se estão relacionadas também com a aderência, comprimento, teor e capacidade de deformação da fibra.

Contribuir nessa avaliação é a principal motivação do presente trabalho. Espera-se com o mesmos entender como combinações de fibras afetam as propriedades do compósito resultante, especialmente em termos de energia de fissuração e tenacidade.

Esse é um tema considerado relevante e atual, visto que muitas estruturas civis têm sido construídas com demanda crescentes de resistência e durabilidade, ou sujeitas às mais variadas solicitações oriundas de condições de suporte ou carregamento excepcionais. Em todas elas, o controle da fissuração, por retração, térmica ou decorrente de esforços mecânicos, é um aspecto fundamental.

Fica evidente que, para otimizar o uso das fibras no concreto, é necessário entender como cada uma delas contribui para o desempenho do material compósito resultante e explorar as proporções de combinação de fibras, buscando entender como obter o desempenho mais adequado tanto antes quanto após a fissuração. Dessa forma, se pode contribuir para a criação de elementos de concreto com maior capacidade de resistência à tração, o que pode ter efeitos benéficos em termos de durabilidade e custos.

Existe inclusive a expectativa de que a investigação de compósitos híbridos venha a fornecer subsídios para a otimização do desempenho do concreto no seu estágio endurecido, com respeito à resistência e rigidez, ou resistência ao fogo, por exemplo.

Embora se saiba que as propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibra são fortemente dependentes da resistência e do módulo de elasticidade da matriz, bem como da interface com as fibras, acredita-se que a combinação, em proporções adequadas, duas ou mais fibras, pode acarretar em resultados ainda mais positivos.

Segundo Qian e Stroeven (2000), ao usar diversas fibras, como reforço secundário ou terciário, pode-se, teoricamente, controlar o processo de fissuração em diferentes níveis de tamanho (micro, meso e macro), em diferentes zonas do concreto (pasta de cimento, agregado ou zona de interface entre eles), com diferentes idades de cura, assim como em diferentes estágios de carregamento. Em todo caso, essas combinações devem ser aplicadas com precaução, uma vez que os efeitos híbridos e eficiência de seus coeficientes devem ser diferentes, quando comparados aos compósitos com apenas um tipo de fibra.

Para Bentur e Mindess (2007), Ramli e Dawood (2011) e Tamil Selvi e Thandavamoorthy (2013), a combinação de fibras tem sido estudada para investigar alguns propósitos, de tal forma que um tipo de fibra contribui na resistência ou rigidez, e as demais atuam em outra propriedade na mistura, adequada ao processo.

Cabe destacar que, apesar de estarem em franca expansão, os estudos sobre a melhor forma de combinar o efeito de cada fibra ainda são incipientes e existe uma forte demanda de dados experimentais, envolvendo diferentes tipos e proporções de fibras, em uma mesma matriz, para geração de modelos de comportamento confiáveis.

Deste modo, o caráter inovador e o interesse associado a esse estudo estão diretamente ligados à realização de um programa experimental amplo e focado, com emprego de diferentes fibras, em proporções variadas, na expectativa de que se obtenham resultados importantes para orientar o desenvolvimento de novos e melhores materiais compósitos à base matrizes reforçadas com misturas racionais de fibras com características diferentes.

1.2. OBJETIVOS

O presente trabalho vai investigar combinações binárias e terciárias de fibras com propriedades diferentes (aço, polipropileno e carbono), comparando o desempenho dos compósitos resultantes, em termos de incremento de resistência à tração e tenacidade, em relação a concretos simples e com uso de somente um tipo de fibra.

Ao longo da pesquisa serão determinados parâmetros fundamentais associados à mecânica da fratura e fissuração, e desenvolvidos modelos empíricos de previsão do efeito de combinação de fibras. Além de investigar o comportamento de diferentes fibras quando associadas ao concreto simples, esta pesquisa busca contribuir para uma melhor compreensão da resposta das estruturas reforçadas com tais fibras, aumentando a sua capacidade de absorver energia, na garantia de apresentar uma boa resistência e controle de fissuras.

Ademais, busca-se estabelecer parâmetros de seleção de fibras aos projetistas, de modo a assegurar o emprego dessa técnica na construção civil, por meio da validação de considerações feitas experimentalmente, criando um modelo de previsão de comportamento à fratura de corpos de prova com fibras de diferentes características, isoladas ou combinadas, para uso em modelos de elementos finitos e/ou discretos.

1.2.1. Objetivo geral

Partindo das considerações mencionadas, foi estabelecido como objetivo principal deste trabalho:

Investigar o comportamento, em termos de análise do desempenho mecânico à compressão e à tração, bem como do controle da fissuração, da incorporação de combinações binárias e terciárias de fibras em uma matriz cimentícia padrão, para fins de caracterização e avaliação dos benefícios da hibridização das misturas de fibras para reforço do concreto.

1.2.2. Objetivos específicos

Estendendo o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Avaliar a tenacidade de compósitos formulados com diferentes combinações de fibras durante ensaio de flexão de vigas entalhadas ou não (considerando flexão em três pontos e flexão em quatro pontos), analisando a contribuição do reforço em termos de variação na ductilidade e tenacidade do material;
- Analisar os efeitos das diferentes combinações de fibras estudadas em propriedades básicas do compósito endurecido, tais como resistência à compressão e à tração;
- Caracterizar o comportamento à tração na flexão do concreto reforçado com um ou mais tipos de fibras, usando os dois principais procedimentos recomendados pelas normas internacionais - JSCE e RILEM;
- Avaliar comparativamente os efeitos de variações de fator de forma, tipo de material constituinte, comprimento e teor de fibras, no mecanismo de formação de fissuras e ruptura à tração (pré e pós-fissuração) dos compósitos gerados, durante ensaios de flexão;
- Formular e validar um sistema de medição de abertura de entalhe para utilização ao longo dos ensaios desta pesquisa, visando obter parâmetros para avaliação de características associadas ao mecanismo de fratura das vigas;
- Avaliar os eventuais efeitos negativos da inserção de diferentes combinações de fibras na trabalhabilidade de misturas de concreto;
- Mapear, estatisticamente, os efeitos de combinações de fibras com diferentes características nas propriedades dos compósitos resultantes, buscando subsídios para o desenvolvimento de um procedimento de formulação de compósitos com combinações binárias e terciárias de fibras;

1.3. LIMITAÇÕES

Considerando as condições limitantes inerentes à realização de um programa experimental estatisticamente significativo, foi necessário estabelecer algumas limitações, a fim de garantir a exequibilidade do trabalho:

Em primeiro lugar, considerou-se necessário limitar o número de tipos de fibras empregado no estudo, para fins de formulação das combinações binárias e terciárias a serem estudadas no

estudo. Dessa maneira, o intervalo de variações de propriedades das fibras foi automaticamente estabelecido.

Outra limitação importante refere-se à adoção de apenas dois modelos de corpos de prova para subsidiar o programa experimental: cilíndricos (similares aos previstos na NBR 5739:2007, usados para determinar a resistência à compressão e tração diametral) e prismáticos (conforme sugerido na JSCE e na RILEM), para ensaios de flexão em três e quatro pontos (no último caso com fissura induzida, para determinação da curva de abertura de fissuras).

Além disso, os corpos de prova foram submetidos a condições de carregamento e suporte constantes e foi empregado para geração da matriz um único traço de concreto simples, com baixa resistência nominal de 25 MPa.

Além disso, não foram levados em consideração os efeitos do ambiente, como temperatura, umidade, etc., como também não se levou em conta o custo do emprego desta tecnologia no mercado de construção civil.

1.4. ESTRUTURA

A estrutura do trabalho é apresentada a seguir, organizada em capítulos:

O Capítulo 1 introduz e justifica o presente trabalho, ressaltando a importância e os objetivos da pesquisa, e descrevendo sua organização.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os aspectos fundamentais dos compósitos de matriz cimentícia reforçados com fibras. Primeiramente, são apresentadas as características genéricas dos materiais compósitos, evidenciando o concreto reforçado com fibras como um material multifásico, constituído a partir de uma matriz cimentícia e de uma fase fibrosa que atua como elemento de reforço, o concreto e as fibras, respectivamente. Uma breve explanação das fibras mais comumente empregadas no reforço do concreto é apresentada neste item, evidenciando diversos trabalhos investigados na área de estruturas de concreto reforçadas com fibras. Além disso, é apresentada uma sucinta revisão sobre o efeito da incorporação das fibras nestas matrizes, ressaltando os principais fatores que influenciam a resposta do compósito em termos de propriedades resultantes da combinação concreto e fibras incorporadas.

No Capítulo 3 apresenta-se uma revisão dos principais trabalhos realizados, em termos do uso de compósitos híbridos de fibras com matriz de concreto, mostrando os benefícios e desvantagens oriundos desta técnica. Um levantamento de propriedades e características, bem como do custo necessário e eficiência de diferentes tipos de fibras servem como suporte para a seleção das fibras escolhidas para compor o programa experimental deste estudo.

O Capítulo 4 contém uma descrição dos materiais utilizados e a metodologia empregada para a realização dos ensaios visando à caracterização dos compósitos com combinações de fibras, como por exemplo, a obtenção de seus parâmetros de tenacidade.

O Capítulo 5 apresenta alguns resultados preliminares que serviram para a calibração de alguns equipamentos e definição de variáveis importantes na confecção das misturas, a exemplo dos tipos de fibras e suas geometrias, bem como teores e combinações adotadas para confecção das amostras.

O Capítulo 6 traz os dados obtidos durante os ensaios selecionados na metodologia. Nesta etapa, os resultados relativos à avaliação da trabalhabilidade da mistura no estado fresco, da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos e da resistência à flexão equivalente em corpos de prova prismáticos ensaiados à flexão com três pontos e quatro pontos de aplicação de carga são descritos, organizados de acordo com cada combinação de fibras.

No Capítulo 7 os dados apresentados no Capítulo 6 são tratados e analisados, através de ferramentas estatísticas com o intuito de relacionar as variáveis independentes e dependentes, resultando em modelos que visam atender aos objetivos estabelecidos no Capítulo 1 deste trabalho.

Finalmente, no Capítulo 8, as considerações finais e conclusões acerca do tema estudado são apresentadas nesta etapa final.

As referências bibliográficas que serviram de fundamentação e embasamento sobre o tema são listadas em um capítulo complementar.

ASPECTOS FUNDAMENTAIS DOS COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA REFORÇADOS COM FIBRAS

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os concretos com fibras são normalmente classificados como materiais compósitos. Este conceito é fundamental para que se entenda o funcionamento dos mesmos. O vocábulo compósito foi adotado na literatura especializada em Engenharia para indicar a classe de materiais constituídos pela combinação de dois ou mais elementos, com propriedades físicas e químicas distintas, que atuam em conjunto, mas ainda permanecem identificáveis. O mesmo deriva da adaptação do termo da nomenclatura inglesa *composite material*, que, por sua vez, advém do latim *compositu*, derivado do verbo *componere*, cujo significado principal é juntar, aglutinar ou compor.

Tomando Callister Jr. (2002) e Callister Jr. & Rethwisch (2014) como referência, pode-se afirmar que o termo compósito está intimamente vinculado à existência de um material com caráter multifásico, que apresenta uma proporção considerável das propriedades das fases que o constituem, e algumas propriedades emergentes, decorrentes da combinação destas fases. De acordo com o princípio de ação combinada, um compósito é uma consequência planejada do ajuste entre as melhores propriedades de dois ou mais materiais distintos entre si, por meio de uma combinação artificial. Callister Jr. (2002) observa ainda que as fases constituintes devem ser quimicamente heterogêneas e separadas por uma interface distinta. Por esta razão, muitas ligas metálicas, bem como os materiais cerâmicos, não se ajustam ao conceito de compósito, visto que a formação de suas múltiplas fases resulta de fenômenos naturais.

Para Agarwal e Broutman (1990), o material compósito pode ser definido como um sistema, cujas propriedades derivam das especificidades dos materiais constituintes, tais como suas características e sua geometria. Conforme Santiago (2002), os compósitos têm como característica a heterogeneidade aparente e a superioridade de suas propriedades em

relação às dos seus componentes, se considerados isoladamente.

Analisando a literatura, verifica-se que os materiais compósitos surgiram, na sua vertente estrutural, em meados do século XX, como enfatiza Kern (1999). Desde então, segundo este autor, os mesmos encontraram as mais diversas aplicações e vêm sendo empregados com sucesso em muitas áreas como, por exemplo, na indústria aeroespacial, aeronáutica e automobilística, em Bioengenharia (produtos médicos e biológicos), em artigos esportivos (bicicletas, equipamentos para golfe, tênis, etc.) e inúmeras estruturas da construção civil como pontes, passarelas, edificações e estruturas *offshore*¹, além da área de transportes, no caso de estruturas de navios, trens, etc.

Conforme Liao (1998), o emprego dos materiais compósitos em construção civil não é recente, sendo já observado, há algumas décadas, como uma alternativa aos materiais de construção convencionais e, mais recentemente, no reforço e na recuperação de estruturas. A preocupação atual consiste em caracterizar e aprimorar estes materiais, buscando contribuir na obtenção de materiais que permitam a elaboração de projetos que combinem durabilidade, resistência, baixo custo e facilidade de execução.

Uma das principais vantagens do emprego de compósitos é a possibilidade de se projetar materiais que atendam a certas demandas específicas da estrutura. Em outras palavras, os materiais compósitos são produtos que podem ser fabricados na medida certa e exata do que se considera necessário. Para Al-Qureshi (2002, apud BERNARDI, 2003) e Ramli e Dawood (2011), o maior proveito na utilização de materiais compósitos é que estes agregam as melhores propriedades de seus constituintes. Al-Qureshi (2002, apud BERNARDI, 2003) menciona ser possível, por exemplo, projetar um compósito pela combinação de materiais metálicos, cerâmicos ou polímeros, o que resultaria na obtenção de produtos extraordinários.

Martineau e Agopyan (2002) sugerem que o emprego de compósitos traz como vantagem o excelente desempenho mecânico, a boa durabilidade e a adequação às técnicas modernas de construção, na medida em que os mesmos são de fácil manipulação, montagem e manutenção, em decorrência de sua leveza. Barbero e Damiani (2003) acrescentam ao conjunto de vantagens do uso de compósitos as altas razões rigidez/peso e resistência/peso; a excelente resistência à corrosão e umidade; a baixa expansão térmica; o bom

¹ Termo em inglês adotado pela engenharia para fazer referência às estruturas que se localizam próximo ao mar, como por exemplo, as plataformas de petróleo.

desempenho à fadiga; a tolerância ao dano; a facilidade e leveza de transporte; a flexibilidade arquitetônica; o baixo consumo de energia na produção do material e da execução da obra.

Um incremento mais acelerado do índice de aplicação de compósitos na construção civil depende, todavia, da superação de alguns obstáculos. A literatura tem apontado alguns inconvenientes no que diz respeito ao uso dos materiais compósitos, tais como, seu comportamento mecânico complexo, resultado da sua heterogeneidade e anisotropia – decorrentes das diferenças entre a matriz e os elementos de reforço –, e algumas questões referentes a custo. Convém ponderar, entretanto, que não se pode fazer uma adequada avaliação em termos de custo, empregando apenas os custos unitários de produção. É necessário considerar aspectos importantes como a economia no transporte e manipulação de materiais compósitos, devido ao seu baixo peso; a possibilidade de pré-fabricação desses materiais, o que diminui o trabalho na obra; as características positivas em termos de durabilidade e trabalhabilidade, entre outros, que podem reduzir custos de produção ao longo do tempo. Além disto, é razoável esperar que, com o aumento da utilização de compósitos e conseqüente aumento da produção, o custo tenda a diminuir, como ocorreu com outros materiais.

Apesar do significativo avanço nas pesquisas acerca do uso dos compósitos na construção civil, um obstáculo na implementação desta tecnologia refere-se ao pouco conhecimento de suas propriedades por boa parte dos engenheiros civis e dos projetistas. Muitos profissionais, diante das incertezas, optam por utilizar materiais convencionais, previstos em normas, na vasta bibliografia da área e em registros de aplicação prática. Santiago (2002), discutindo compósitos de matriz polimérica, destaca que, além do custo elevado, da escassez de normas e da falta de informações sobre a sua durabilidade, o emprego de compósitos pode ser encarado como uma desvantagem importante, tendo em vista a falta de cobertura do uso de materiais inovadores por parte de agentes seguradores. Em contrapartida, muitos projetos modernos mais desafiadores estimulam o emprego de materiais com propriedades e combinações não usuais, o que demanda o desenvolvimento de pesquisas que detalhem com maior precisão o comportamento dos compósitos ao longo do tempo e seu desempenho frente às solicitações a que uma estrutura poder estar submetida.

Para Félix (2002) e Callister Jr. (2002), o caráter multifásico dos compósitos está ligado à

sua constituição por elementos estruturais ou de reforço (descontínuo), também denominados de fase dispersa, misturados a um componente matricial (contínuo). A seguir, cada um desses elementos é brevemente discutido.

2.2. O ELEMENTO DE REFORÇO

Callister Jr. (2002) classifica os compósitos em três grupos, segundo a morfologia de seus elementos de reforço:

- particulados;
- fibrosos;
- estruturais.

Ainda que seja possível a adoção de partículas, lâminas, flocos, fibras, tecidos e *fillers* (substâncias utilizadas no preenchimento de rachaduras ou buracos) como elementos de reforço, tecnologicamente merecem destaque os compósitos cujos componentes de reforço disperso são elementos fibrosos. Isto decorre do fato de que as fibras normalmente apresentam maior capacidade de carga do que o mesmo material em sua forma compacta. Além disto, a forma fibrosa apresenta melhor desempenho no que tange à resistência e à rigidez, colaborando para impedir que as deformações resultantes extrapolem os limites aceitáveis. Portanto, seu uso se torna mais interessante do que o dos particulados, sob o ponto de vista estrutural.

As fibras podem se apresentar de várias formas, desde fios até mantas e estruturas têxteis de diferentes arquiteturas, podendo ser distribuídas de modo contínuo ou descontínuo; alinhadas ou distribuídas aleatoriamente (SILVA, 2003). Neste trabalho, será enfatizado como elemento de reforço o emprego de fibras descontínuas distribuídas aleatoriamente.

Conforme o BISFA², as fibras são classificadas de uma maneira geral, como sendo (ver Figura 2.1):

² BISFA: The International Bureau For The Standardisation of Man-Made Fibres.

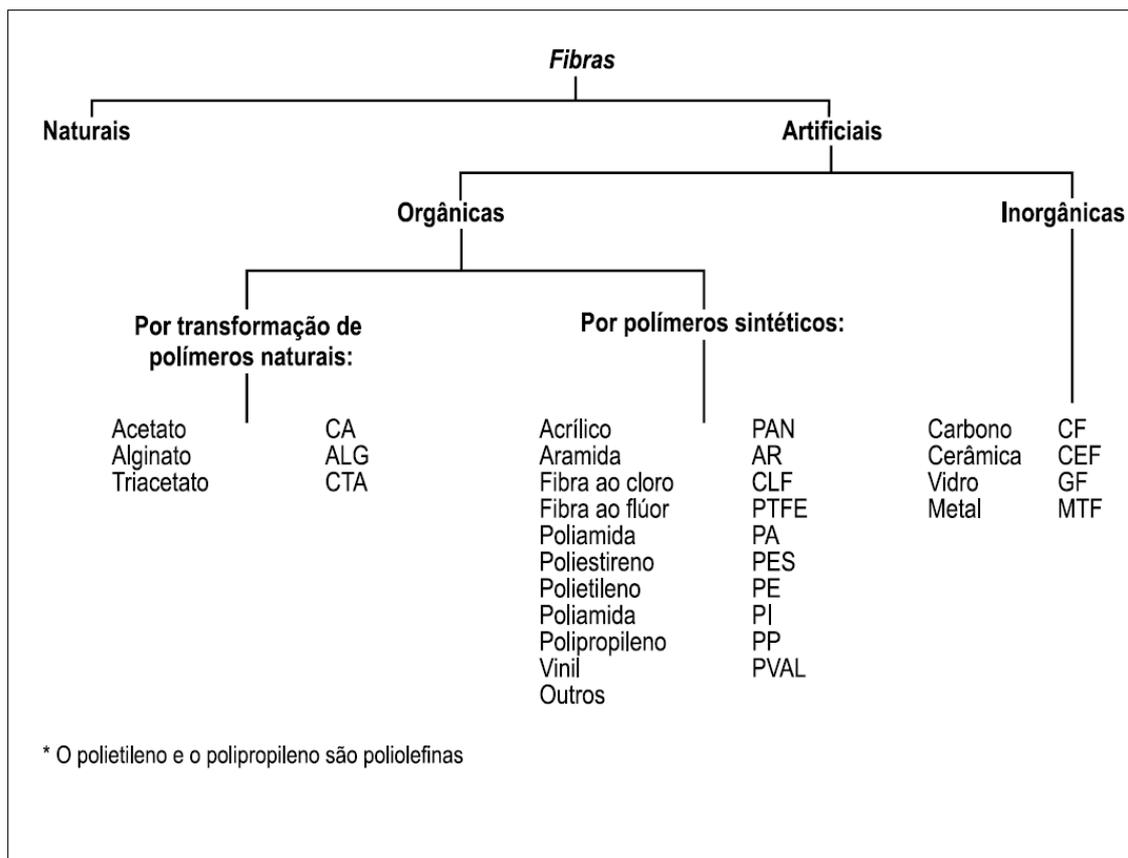


Figura 2.1: Classificação das fibras segundo BISFA.

(FONTE: Maccaferri, Manual Técnico, 2009)

A classificação do BISFA refere-se a todos os tipos de fibras sintéticas e não somente àquelas utilizadas para o reforço do concreto.

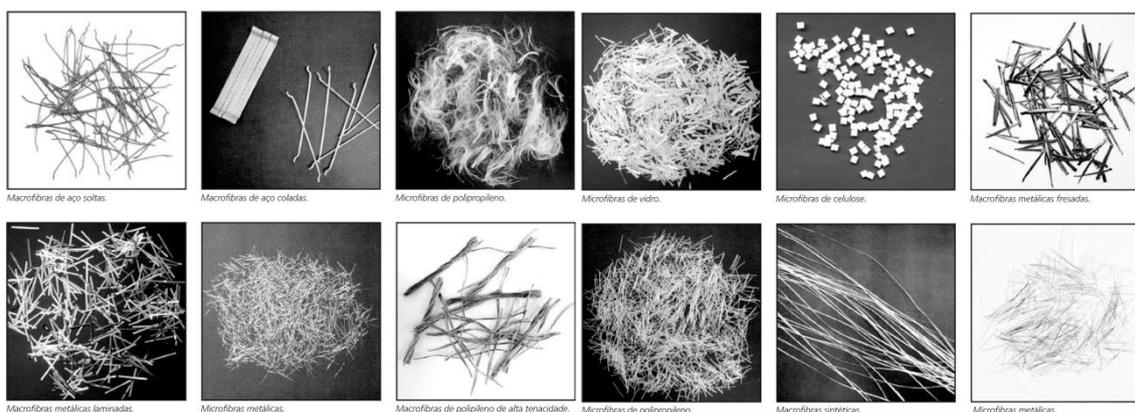


Figura 2.2: Exemplos de tipos de fibras.

(FONTE: Maccaferri, Manual Técnico, 2009)

Dentre outras classificações possíveis, as fibras podem ser catalogadas em três grupos principais: o primeiro grupo engloba as fibras que possuem uma tendência natural para se formarem e são facilmente encontradas em meio natural. Estas incluem, por exemplo,

fibras naturais de sisal, coco, piaçava, bagaço de cana-de-açúcar e palha de arroz; fibras minerais de asbestos e fibras animais tipo lã, seda ou crinas de cavalo.

O segundo grupo é constituído pelas fibras denominadas sintéticas ou artificiais. Como o próprio nome sugere, estas são fibras fabricadas pelo homem, mediante a utilização de diversos materiais e tecnologias.

O terceiro grupo refere-se às fibras metálicas, ou às fibras de aço, que são produzidas a partir de fios de aço trefilados, em vários comprimentos e diâmetros.

Os três grupos são brevemente apresentados a seguir.

2.2.1. Fibras Naturais

Segundo Grison e Hoinacki (1985) e Melo Filho (2005), as fibras naturais podem ser classificadas como vegetais, animais ou minerais, conforme sua origem.

Dentre estas, as fibras de origem vegetal têm obtido destaque, na medida em que se constituem em matéria-prima renovável e de baixo custo. Na literatura podem ser encontrados estudos com fibras naturais de celulose, juta, bambu (GHAVAMI, 1989), piaçava, bagaço de cana-de-açúcar, sisal e coco (TOLEDO FILHO, BARBOSA & GHAVAMI, 1990; REIS, 2006; SOTO IZQUIERDO, 2011), além de resíduos vegetais (AGOPYAN, 1991; SAVASTANO JR, NOLASCO & LUZ, 1997). Silva (2002) comenta que o emprego do reforço de fibras de celulose tem sido adotado em alguns países do mundo, como a Austrália, em substituição ao asbestos. As fibras são, em geral, aplicadas em formato de polpa, segundo processos fundamentados no método Hatscheck, que consiste na utilização de misturas altamente fluidas que provocam uma dispersão satisfatória das fibras no interior da matriz, seguida da drenagem do líquido excedente.

Bledzki e Gassan (1999) citam, como principais componentes das fibras vegetais, a celulose, hemicelulose, lignina, pectina, ceras e água solúvel. De acordo com Bledzki e Gassan (1999) e Bernardi (2003), é importante notar que a estrutura e a composição química das fibras vegetais são influenciadas por variáveis como formas de irrigação, seleção de sementes, hibridização de plantas, métodos de cultivo, condições climáticas, idade e absorção de alimento.

Segundo Agopyan e Savastano Jr. (1997), as fibras de origem vegetal geralmente apresentam um baixo módulo de elasticidade e elevada resistência à tração, características que conferem maior resistência ao impacto a matrizes de base cimentícia, em virtude da capacidade de absorção de energia, da possibilidade de trabalho no estágio pós-fissurado e da elevação da capacidade de isolamento termoacústico.

Toledo Filho (1997) adverte para a alta capacidade de absorção de água e inchamento das fibras vegetais, devido à sua estrutura porosa, o que pode ocasionar a diminuição da aderência na interface fibra-matriz. Como é sabido, uma boa aderência é crucial para a transmissão dos esforços atuantes na matriz para o reforço. Silva (2003) observa que métodos químicos e físicos podem alterar as propriedades das fibras, contribuindo para a melhoria das condições de aderência na interface fibra-matriz. Melo Filho (2005) menciona algumas operações que contribuem no aprimoramento da resistência de aderência, tais como a limpeza da superfície das fibras, para a eliminação de gorduras e camadas de restos de resinas e graxas; a utilização de substâncias que reajam com as fibras, diminuindo sua capacidade de absorção de água, aumentando a rugosidade e, por conseguinte, melhorando o processo de transferência de tensões. Argumenta, ainda, que as fibras podem ser submetidas a um processo de moldagem voltado ao melhoramento da homogeneidade de distribuição das fibras no interior da matriz.

A utilização das fibras vegetais em matrizes cimentícias causa preocupações quanto à durabilidade, pois a alcalinidade e umidade do meio podem provocar a deterioração das fibras. Para prevenir este efeito, Melo Filho (2005) cita alguns procedimentos considerados viáveis, tais como a geração de uma matriz menos alcalina, por meio da substituição parcial do cimento por pozolanas, que atuam consumindo o hidróxido de cálcio.

As fibras de origem mineral, apesar de empregadas há bastante tempo, atualmente têm aplicação industrial bastante limitada. O principal representante desta classe, o asbesto, apresenta restrições de uso devido à toxicidade e potenciais danos à saúde. Segundo Melo Filho (2005), o cimento amianto, muito utilizado no século passado, resulta, basicamente, da mistura de uma matriz altamente diluída de cimento Portland com fibras de amianto (asbesto). A morfologia especial da estrutura das fibras de asbesto permite que as mesmas se unam quimicamente ao cimento, propiciando uma excelente adesão fibra-matriz. Além disto, o asbesto apresenta elevado módulo.

Todavia, mesmo diante das excelentes características mecânicas e químicas e de sua compatibilidade com a matriz cimentícia, as fibras de asbesto foram abolidas de quase todos os países industrializados por causa dos problemas de saúde relacionados (asbestose, câncer de pulmão e mesotelioma³), sobretudo ligados ao seu manuseio durante o processo de produção do compósito. Essa limitação no emprego do amianto tem estimulado a realização de pesquisas que ofereçam alternativas de materiais com propriedades tão eficazes quanto às apresentadas pelo asbesto. Porém, como afirmam Studinka (1989) e Lima (2004), a empreitada na busca de materiais que substituam o asbesto com sucesso tem sido infrutífera, posto que, em geral, a maioria das fibras, tanto as naturais vegetais, quanto as sintéticas ou artificiais, tendem a apresentar, no caso de reforço de concreto, uma baixa durabilidade, perda da tenacidade e resistência, causadas pela elevada alcalinidade da matriz. Além disso, é notada a baixa adesão ao cimento e a instabilidade química dessas fibras.

Nos últimos anos começou-se a investigar outras fibras minerais que apresentam boa resistência à tração e compatibilidade química com a matriz cimentícia, com destaque para as fibras de wollastonita. A wollastonita é um metasilicato de cálcio, cuja composição é de 48,3% de óxido de cálcio e 51,7% de dióxido de silício, podendo apresentar pequenas quantidades de alumínio, ferro, magnésio, potássio e sódio. A principal utilização desta fibra se deu como substituto para o amianto, na produção de cerâmica, tintas e plásticos. Sabe-se que microfibras minerais, como a wollastonita, proporcionam um bom grau de ductilidade ao concreto no estado endurecido, além de contribuir na resistência à tração. Assim como as demais fibras, esse fenômeno ocorre em virtude das suas propriedades geométricas e quantidade inserida na mistura. Entretanto, não tem sido identificados muitos estudos que abordem as propriedades da wollastonita aditas ao concreto.

Quanto às fibras de origem animal, Bernardi (2003) comenta que as mesmas não são muito difundidas na construção civil devido a problemas de durabilidade e falta de homogeneidade, visto que suas propriedades dependem do tipo do animal do qual são extraídas e dos cuidados com o manejo do mesmo, o que se confirma pela escassez de estudos com o emprego destes materiais.

³ Mesotelioma é um tumor maligno na pleura ou abdome, causado pela exposição ao asbesto.

2.2.2. Fibras Sintéticas

As fibras sintéticas representam uma alternativa criada pelo homem para atender às necessidades de diversas indústrias, antes dependentes, exclusivamente, das fibras encontradas na natureza, principalmente o amianto. As fibras artificiais foram desenvolvidas, inicialmente, com o objetivo de copiar e melhorar as características e propriedades das fibras naturais. E, na medida em que suas aplicações foram crescendo, sua importância começou a se incrementar, juntamente com as tecnologias empregadas em sua produção.

As fibras sintéticas são normalmente derivadas de polímeros orgânicos como celulose, assim como resinas de petróleo, borracha, acrílico, poliéster, PVC, PVA, polipropileno, aramida e nylon, dentre outras. Em princípio, para efeito desta pesquisa, além das fibras inorgânicas (aço, vidro e carbono, por exemplo), destaca-se o emprego das fibras mais tradicionais geradas a partir do polipropileno, aramida e nylon, embora este estudo possa, posteriormente, servir de ponto de partida para investigações com a utilização de outras fibras, a fim de comparar parâmetros.

Bernardi (2003) e Garcez (2006) apresentam revisões extensas das propriedades das principais fibras sintéticas. Para os fins deste trabalho, serão discutidas apenas as propriedades das fibras sintéticas selecionadas para formar os compósitos híbridos. As principais características destas fibras estão apresentadas, de forma sucinta, no Capítulo 4.

2.2.3. Fibras Metálicas

Atualmente, existe uma vasta gama de fibras destinadas ao reforço do concreto. As fibras de aço são as mais utilizadas em elementos estruturais, pois, devido ao seu alto módulo de elasticidade, melhoram características como tenacidade, controle de fissuras, resistência à flexão, resistência ao impacto e à fadiga (ACI 544.1R-96, 2006).

A fibra metálica (aços carbono, suas ligas e alumínio), com destaque para a fibra de aço, é um produto cuja utilização implica nas mais variadas aplicações, como por exemplo, em concreto projetado para túneis, concreto convencional para pavimentos rígidos ou até mesmo concreto pré-moldado para tubos de água pluvial e esgoto.

As fibras de aço para reforço de concreto são produzidas a partir de diversos processos de fabricação, sendo o mais comum o corte de arame trefilado, de aço de baixo teor de

carbono. Em sua maioria, as fibras de aço são produzidas com aço-carbono ordinário, embora as feitas de ligas metálicas sejam as mais resistentes à corrosão e as mais adequadas para aplicações em concretos refratários e em estruturas marítimas, por exemplo.

Quando adicionadas ao concreto, atuam como uma armadura tridimensional, restringindo a propagação de fissuras e aumentando a resistência pós-fissuração do elemento estrutural.

O uso das fibras de aço no concreto proporciona um melhor comportamento dos elementos estruturais, devido à redução da formação de fissuras, resultando em melhor qualidade e maior durabilidade da obra. Outras vantagens em relação ao seu uso é que substitui, em algumas situações, a armadura convencional, e elimina ou diminui custos com mão-de-obra para armação e, praticamente, não gera desperdício de material. Além disso, não exige grandes investimentos para transporte e estocagem, e seu manuseio e aplicação são simples.

Vale salientar que na produção do CRFA – concreto reforçado com fibras de aço – não há, no Brasil, uma certificação padronizada dos produtores das fibras, bem como uma técnica segura de dosagem, ou seja, recomendações para uma correta mistura de um CRFA e controle nos elementos constituídos com esse material.

2.3. O COMPONENTE MATRICIAL

Dada sua elevada participação volumétrica na formação dos compósitos, as propriedades do componente matricial são fundamentais na determinação das propriedades físico-químicas e do comportamento do compósito.

De acordo com Bernardi (2003), o componente matricial é o meio de transferência e homogeneização dos esforços suportados pelos componentes de reforço. Para Hollaway (1993), sua função está ligada à união dos elementos de reforço, atuando como caminho para a transmissão e distribuição das solicitações externas entre os vários elementos e assegurando a manutenção de suas posições.

Beber (2003) destaca que o componente matricial exerce uma importante função de envoltório de proteção dos elementos de reforço contra agentes como abrasão, umidade, oxidação e agentes agressivos, tendo, ainda, a incumbência de separar e dispersar as fibras

do compósito. Conforme Mano (2000), independentemente do material empregado em sua composição, a fase matriz deve responder de forma a preservar a orientação das fibras e seu espaçamento, transmitindo as forças de cisalhamento entre as camadas das fibras, além de oferecer proteção ao elemento de reforço contra danos superficiais.

A matriz pode ser dúctil, do tipo orgânica ou polimérica, ou frágil, como as matrizes de vidro e cimentícias. Como exemplo de matriz dúctil, Bernardi (2003) salienta a utilização das resinas termofixas ou termoplásticas, dentre as quais é possível destacar a resina epóxi, que favorece a criação de matrizes com excelente desempenho mecânico, estabilidade e elevada resistência química. Mano (2000) ressalta a boa compatibilidade entre as resinas epoxídicas e os diversos tipos de fibras, o que explica seu amplo emprego para formação de Polímeros Reforçados com Fibras de elevado desempenho mecânico.

Dentre as matrizes frágeis, destacam-se as de natureza cimentícia, objeto deste estudo. O emprego de matrizes deste tipo tem sido registrado com bastante frequência. No caso da indústria de construção civil, a adição de fibras à matrizes de cimento ou gesso permite um considerável aumento da tenacidade dos elementos estruturais resultantes. Confirmado por estudos mais atuais, como o de Ramli e Dawood (2011), Hannant (1978) faz menção a alguns objetivos almejados com a incorporação de fibras a matrizes cimentícias, que incluem a melhoria da resistência à flexão e à tração, a ampliação da resistência ao impacto; o controle da fissuração e alteração do modo de ruptura, como também modificar a estrutura reológica do material.

2.4. OS EFEITOS DE INCORPORAÇÃO DAS FIBRAS

Independentemente da área de aplicação, a inserção de fibras normalmente visa ao aprimoramento das propriedades mecânicas da matriz, com elevação da tenacidade à fratura frágil (BALAGARU & SHAH, 1992; SANTOS, 2002; RAMLI & DAWOOD, 2011). Como observa Figueiredo (2005), a distribuição aleatória das fibras no material reforça a peça de modo global, diferentemente do que ocorre, por exemplo, com armaduras convencionais no concreto armado. É necessário destacar que, de modo geral, a utilização das fibras como elemento de reforço não é considerada como sendo suficientemente eficiente para substituir as armaduras convencionais. Além disto, é imprescindível atentar para aspectos como a compatibilidade matriz-fibra e a aderência, para que se obtenha o

resultado esperado.

De acordo com Martineau et al (2002), o emprego das fibras visa à imposição de obstáculos ao processo de fissuração, já que estas atuam como ponte de transferência dos esforços através da trinca, assegurando uma capacidade resistente após a abertura da mesma (FIGUEIREDO, 2005; TANESI & AGOPYAN, 1997; MATSUMOTO & LI, 1998, 1999; RAMLI & DAWOOD, 2011; OSTERTAG & BLUNT, 2010), o que proporciona uma expressiva redução da velocidade de propagação das fissuras no material, pela adoção de um comportamento pseudodúctil ou não frágil.

Ante o aparecimento da primeira fissura em um compósito sem adição de fibras, a abertura gradual dessa trinca se dá de modo instável, originando o colapso da peça. De outro modo, o surgimento de fissuras em materiais compósitos com fibras tende a ser retardado, acontecendo progressivamente, tanto em decorrência da retração, quanto da absorção de parte das solicitações pelas pontes de transferência constituídas pelas fibras, permitindo uma fissuração mais distribuída. Ou seja, a adição de fibras provoca a transferência de uma parcela da força atuante sobre o corpo, diminuindo o nível de tensão sobre os trechos mais solicitados deste. Esse mecanismo contribui para a redução do dano provocado por ocasionais defeitos microestruturais, como também aumenta a resistência mecânica do compósito. Ademais, essa redistribuição de tensão faz com que a energia elástica retida não seja dissipada por uma única frente de propagação, mas sim, por um conjunto de microtrincas. São as chamadas fissurações múltiplas⁴.

Além do comprimento, a perda de resistência resultante do processo de microfissuração, diminui expressivamente, em relação ao resultado proveniente de uma única trinca, ainda que sua área superficial total coincida com a área de microfissuras. Deste modo, é possível perceber um aumento na energia necessária para o colapso total da peça. Neste sentido, alguns estudos apontam o aumento do número de fissuras, embora a área total de fissuração seja menor, considerando a diminuição do tamanho das trincas (SWAMY e STRAVIRDES, 1979 e KOVLER et al, 1992 apud TANESI, 1997).

Tal como afirma Garcez (2005), a eficiência do reforço das fibras na matriz cimentícia pode ser averiguada nos estágios pré e pós-fissuração. Nestes estágios, é possível controlar o comportamento mecânico pela interação fibra-matriz, por meio da transferência de força

⁴ O processo de fissuração múltipla é extremamente importante, pois ela controla o mecanismo de tenacidade do compósito.

da matriz para as fibras e de mecanismos de “costura” das fissuras, mediante níveis avançados de carregamento, o que denota a ação conjunta dos componentes. Neste ponto, em decorrência de uma satisfatória interação fibra-matriz, o resultado obtido é o aumento da capacidade de absorção de energia do compósito.

Tendo em vista a função da interface de propiciar uma transferência adequada dos esforços entre o reforço e a matriz, Mano (2000) entende que a interface entre os elementos oferece influência dominante sobre as características do compósito, à medida que é a responsável pelo trabalho em conjunto. Deste modo, convém ressaltar que a interface assume um papel tão importante quanto as propriedades e características dos materiais empregados.

Conforme Hannant (1978), o controle do comportamento teórico de um compósito deve partir das propriedades físicas das fibras e da matriz, bem como da força de aderência entre ambas. Porém, diante da expectativa de que fibras de maior desempenho tendem a produzir compósitos de maior desempenho, Hannant (1978) afirma que a maioria das fibras é arrancada, o que aponta para a eficiência da aderência destas à matriz como fator crítico, em lugar da resistência das fibras aplicadas.

Posto que a aderência entre os elementos possa ser de natureza mecânica ou físico-química e, além disso, estar pautada nas características da interface entre eles, Félix (2002) observa que a adesão na interface pode ser atribuída à atração física entre os átomos polares da matriz e da superfície inorgânica de algumas fibras. Também é importante levar em conta a possibilidade de que haja ligação química entre os componentes, dada a capacidade de um dos grupos da matriz de reagir com os grupos polares presentes nas fibras.

O desenvolvimento de tecnologias para o incremento da aderência da fibra à matriz tem sido estimulado pela constatação de que, conforme Plueddman (1982 apud FÉLIX, 2002), há um aprimoramento das propriedades mecânicas do compósito, devido à interação química entre as superfícies, o que propicia a transferência mais eficaz da matriz para o reforço das tensões mecânicas sofridas pelo material. É possível encontrar no mercado várias fibras pré-tratadas superficialmente com agentes de adesão específicos, voltados para a otimização da aderência do reforço à matriz e para a garantia de uma melhor transferência das tensões.

2.5. COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA REFORÇADOS COM FIBRAS

A potencialidade dos compósitos, enquanto materiais a serem aplicados na engenharia, foi amplamente levada em consideração, mediante a necessidade de desenvolvimento das tecnologias na produção de materiais empregados nos mais diversos campos de atuação.

No caso da engenharia civil, merecem destaque os compósitos feitos a base de cimento, que têm sido empregados sob a forma de argamassa simples ou armada (ferrocimento), concreto simples ou armado, cimento amianto (fibrocimento), concreto fibroso, entre outros. Neste sentido, Aziz (1981) comenta que a utilização da matriz cimentícia como material de construção apresenta como vantagens, a simplicidade, o baixo custo, o emprego de equipamentos simples, a versatilidade, a resistência e a vida útil.

A modernização das técnicas de aplicação de compósitos para reforço de concreto se acelerou a partir da década de 1960, como exemplificam os trabalhos desenvolvidos por Romuald e Batson (LEE e BARR, 2003). Desde então uma grande variedade de fibras tem sido testadas com este finalidade em vista, incluindo fibras à base de cimento, fibras naturais orgânicas e minerais (asbesto), fibras de vidro, fibras de aço, fibras de polipropileno e outras fibras sintéticas (ACCETTI e PINHEIRO, 2000; CANOVAS, 1997; NAAMAN, 1985; 2000; GAVA, 2004). De acordo com Chen, Mindess e Morgan (1994) e Bernardi (2003), o emprego de fibras com características variadas resultou em variações significativas nas propriedades mecânicas dos compósitos gerados, permitindo obter ganhos em termos de resistência, ductilidade e controle da fissuração. Estes incrementos nas propriedades do concreto pela adição de fibras têm sido confirmados em diversos estudos atuais (OSTERTAG & BLUNT, 2010; MARKOVIC e outros, 2003; YEW e outros, 2011; TAMIL SELVI & THANDAVAMOORTHY, 2013; KONAPURE & KANGIRI, 2014; VAIRAGADE & KENE, 2012).

Um dos materiais que mais contribuiu para a popularização dos materiais compósitos à base de fibras foi o asbesto, ou amianto, fibra mineral muito empregada na fabricação de fibrocimento. Estudos provando a toxicidade do amianto terminaram por comprometer a aplicação mais ampla deste material, devido aos riscos que a exposição a partículas muito pequenas de material silicoso poderia trazer à saúde humana, na forma de câncer de pulmão. Alguns estudos posteriores indicaram que o maior risco estava vinculado à manipulação do amianto durante o processo de produção, sendo o mesmo muito pequeno

após a formação do compósito. Diante da polêmica, todavia, a maioria dos países optou por proibir o uso de compósitos de cimento-asbesto. (STUDINKA, 1986 e BLEIMAN, BULENS e ROBIN, 1984 citados por BENTUR & MINDESS, 1990).

Devido às condições de produção, onde o excesso de água é removido da massa por prensagem e filtragem, concomitantemente, é possível utilizar teores bem elevados de fibras (maior ou igual a 10%) o que leva ao aumento considerável da capacidade resistente do compósito (FIGUEIREDO, 2000). No caso da imersão de fibras de asbesto empregadas no fibrocimento observa-se o inconveniente de uma grande absorção de água, aumentando a relação água-cimento, o que demanda grande quantidade de fibra e, conseqüentemente, de aglomerante para obter uma resistência aceitável.

O sucesso da fibra de vidro na indústria levou à tentativa da sua utilização em substituição ao amianto. Contudo, segundo Cánovas (1997), assim como Majumdar e Ryder (1968) e Majumdar (1970), citados por Bentur e Mindess (1990), a alta alcalinidade do cimento tende a provocar uma deterioração mais ou menos rápida das resistências, dependendo da composição do vidro empregado na fibra, do álcali contido no cimento, da umidade, da temperatura, entre outros fatores. Em contrapartida, Cánovas (1997) considera que o emprego de cimento com baixa alcalinidade, o revestimento das fibras de vidro com resina ou a adição de óxido de zircônio nas fibras pode contribuir para o aumento da durabilidade e resistência das mesmas, apesar do alto custo destas medidas.

Recentemente, com o desenvolvimento de fibras de vidro resistentes a álcalis, assim como o surgimento de outras fibras sintéticas, novas alternativas para a produção de compósitos reforçados com fibras passaram a se apresentar. Muitos aspectos da interação fibra-matriz cimentícia, no entanto, ainda não foram devidamente estudados, uma vez que não se tem conhecimento de parâmetros adequados para modelar o comportamento de concretos com fibras, em termos de resistência e deformação.

Muitos testes vêm sendo desenvolvidos para caracterizar diretamente a capacidade de absorver energia do concreto reforçado com fibras de aço, seja sob o carregamento de flexão, tração, compressão ou até mesmo impacto. Durante os últimos 30 anos, o concreto reforçado com fibras de aço é amplamente empregado em aplicações estruturais, ora em peças de argamassas, ora em concretos simples tendo em vista o elevado módulo de elasticidade (cerca de dez vezes superior ao concreto) (JO, SHON e KIM, 2001), a boa aderência à pasta de cimento, a elevada resistência mecânica e a facilidade de mistura à

massa de concreto fresca, além de serem relativamente econômicas (CANOVAS, 1997; GAVA, 2004).

No mundo, uma das aplicações mais importantes dos concretos reforçados com as fibras metálicas é a que se realiza na produção de anéis segmentados para revestimentos de túneis. Outra utilização das fibras metálicas tem lugar nas obras de concreto projetado de pavimentos de aeroportos, portos, pontes, bases militares, nos quais é possível evidenciar o seu comportamento. No Brasil, a produção de tubos de esgoto tem sido uma das mais promissoras produções no que tange à aplicabilidade da tecnologia dos concretos reforçados com as fibras de aço, já comprovada, conforme Chama Neto e Figueiredo (2003).

Além destas fibras também são aplicadas as de base orgânica que podem ser sintéticas e de origem vegetal, como as fibras de sisal, coco, celulose, dentre outras, normalmente empregadas na produção de componentes como tijolos e telhas. Essas fibras apresentam também o problema de garantia de durabilidade satisfatória quando aplicadas em meios alcalinos, como é o caso das matrizes de base de cimento. No entanto, podem representar uma alternativa muito interessante para a construção no meio rural ou até de habitações populares onde as exigências de desempenho não são muito elevadas (FIGUEIREDO, 2000).

As fibras sintéticas ou poliméricas se tornaram muito atrativas recentemente. De um modo geral, as propriedades das fibras sintéticas variam muito, em particular com respeito ao módulo de elasticidade. Para aumentar a resistência dos compósitos, as fibras precisam apresentar módulo de elasticidade maior que o módulo da matriz. Por esse motivo, as fibras de polipropileno e nylon, como exemplo de fibras sintéticas, são denominadas de fibras de baixo módulo, o que dificulta o seu emprego como reforço de compósitos. Entretanto, o baixo módulo das fibras de polipropileno é suficiente para inibir a propagação das fissuras. Quando o módulo de elasticidade da matriz é maior, as fibras de polipropileno tendem a apresentar uma limitada capacidade de reforço (ARMELIN e HAMASSAKI, 1990; VENÂNCIO e outros, 2013). No entanto, o emprego dessas fibras sintéticas pode vir a ser interessante em aplicações onde o reforço da matriz não é o objetivo principal, sendo, talvez, melhor destinadas ao controle de microfissuração por retração, que comumente surge durante a hidratação inicial do concreto. Uma das vantagens do uso de fibras de polipropileno no concreto pode estar ligada à sua

trabalhabilidade no estado fresco (TANESI, 1999), pois essas colaboram para sensível redução na exsudação do concreto.

Segundo Garcez (2005), algumas evidências acerca da eficiência das fibras foram averiguadas em diversas pesquisas. Contudo, convém ressaltar que o melhoramento resultante da inclusão de fibras está diretamente relacionado às características da matriz, bem como das fibras.

Quanto à eficácia da adição de fibras no aumento da resistência, a possibilidade de incorporação de ar e a indefinição quanto à homogeneidade da dispersão ou distribuição das fibras têm provocado dúvidas. Apesar disso, constitui-se fato o favorecimento da ductilidade e o incremento da resiliência dos compósitos de base cimentícia (GARCEZ, 2005), como também ganhos em resistência à tração, abrasão, fadiga e impactos, como apontam os estudos realizados por Bentur e Mindess (2007).

Ao longo do tempo, o avanço nas pesquisas tem proporcionado a elaboração de modos cada vez mais eficazes de produção de concreto voltados, principalmente, para o aumento da resistência. Como medidas de aprimoramento, é possível citar, por exemplo, a redução do fator água-cimento associada à adição de plastificantes, ou simplesmente, a adição de partículas finas e aplicação de agregados de alta resistência.

Em contrapartida, Bernardi (2003) nota que o aumento da resistência do concreto acarreta sua ruptura de modo brusco e repentino, que pode ser sanada com a adição de reforço à matriz cimentícia, inclusive na forma de fibras. Apesar da constatação de que há um notável acréscimo na resistência mecânica dos compósitos, relacionado ao aumento do teor de uma ou diversas fibras e à melhor adesão entre fibra e matriz, estas aplicações tendem a provocar a redução na trabalhabilidade da mistura. O comportamento aparentemente dúctil decorrente desse aumento de resistência, demanda alternativas que aliem trabalhabilidade e resistência, o que tem incentivado pesquisas em torno da produção de compósitos que possam ser empregados no campo estrutural.

2.5.1. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS – CRF

A abordagem do concreto com fibras deve partir da concepção de que qualquer concreto, dado a sua natureza heterogênea, caracteriza-se como um compósito constituído de partículas de agregado (miúdo e graúdo), unidas pela pasta de aglomerante que, por sua

vez, é formado pela reação química entre cimento e água. Por exemplo, é possível encontrar registros datados da década de setenta, da adição de agregados graúdos e fibras metálicas lisas a compósitos cimentícios. Para o ACI 544.1R (2006), o que caracteriza o concreto reforçado com fibras (CRF – *Fiber Reinforced Concrete*) é a adição, a cimentos hidráulicos, de agregados miúdos e graúdos, bem como de fibras discretas e descontínuas.

Dois tipos de cimento podem ser utilizados na produção do concreto: cimento asfáltico e cimento Portland. Nesta pesquisa, serão enfatizados apenas os concretos com base cimentícia do tipo Portland.

Apesar de merecer destaque como um dos materiais mais utilizados no campo da construção civil em todo o mundo, é possível identificar algumas limitações em seu uso, dada a sua fragilidade e as grandes variações de comportamento, no que se refere à expansão e à retração térmicas, devido à flutuação de temperatura. Em meio à necessidade de reparar essas e outras inadequações, a incorporação de fibras no concreto pode ser considerada como alternativa.

Nesta perspectiva, a redução da fragilidade dos compósitos de matriz cimentícia e, conseqüentemente, o aumento da durabilidade, podem ser atingidos por meio da adoção de fibras no reforço destes materiais, já que esse processo confere propriedades mecânicas referentes, sobretudo, à capacidade de deformação e à absorção de energia, diferentemente das propriedades de materiais não reforçados.

Jennings (1992) considera que a tecnologia em torno dos compósitos de matriz cimentícia reforçados com fibras produzirá materiais com características próximas às apresentadas pelos modernos materiais cerâmicos, no sentido de serem mais compactos, permeáveis, homogêneos e com menor índice de deformidade. Dentre as pesquisas desenvolvidas em torno do estabelecimento de propriedades e critérios de dimensionamento dos compósitos cimentícios e, apesar do crescente volume de pesquisas acerca desta proposta de material, convém destacar os estudos realizados no início da década de oitenta por Bentur e Mindess (1990) e Balagaru e Shah (1992), de acordo com os quais, foi possível observar que a utilização de fibras curtas em matrizes cimentícias contribui para o aumento da tenacidade.

2.5.2. CARACTERIZAÇÃO

Uma das principais dificuldades existentes na avaliação da interação entre a fibra e a matriz é a grande variação de parâmetros físicos e químicos destes constituintes. Essa avaliação é de grande importância na delimitação do comportamento dos materiais compósitos, na medida em que atua na distribuição das tensões entre os componentes, fazendo com que o compósito resista às solicitações aplicadas, ainda que esteja fissurado.

Para tanto, a eficácia das fibras no aprimoramento das propriedades mecânicas da matriz deriva da transferência de tensões da matriz para as fibras, na proporção em que o aumento da tensão de tração transferida para as fibras conduz à maior eficiência. Além disso, tem sido notada, nos estágios mais avançados do carregamento, a transposição transversal das trincas através das fibras (*bridging effect*), como fator que influi na eficácia.

De modo geral, a caracterização das propriedades dos compósitos é crucial no seu processo de produção e em sua aplicação, o que torna notável o interesse no desenvolvimento de pesquisas que subsidiem a prática do emprego dos compósitos reforçados com fibras, através da identificação do conjunto de fatores que atuam diretamente na eficácia do reforço fibroso, principalmente, no que toca à sua utilização na matriz cimentícia. Quanto a isso, é possível perceber as diferentes ênfases atribuídas a uns ou outros fatores no processo de produção do compósito que influenciam na eficácia do reforço com fibras.

Por exemplo, Zollo (1997) afirma que as características do concreto reforçado com fibras, bem como seu desempenho, decorrem do tipo de material, da geometria, da forma de distribuição, da orientação e nível de concentração da fibra, além das propriedades oriundas da matriz cimentícia.

Para Carvalho (2005), as propriedades dos compósitos dependem da combinação entre as propriedades da matriz, das fibras e das interfaces fibra-matriz. O ACI – *Association Concrete Institute* (2006) e Carvalho (2005) observam ainda que o comportamento e as propriedades dos materiais compósitos com fibras estão pautados na observação de parâmetros como: características da matriz e das fibras, geometria das fibras, seção transversal e comprimento, arranjo estrutural das fibras, proporção entre os materiais, características das interfaces dos materiais e interação entre os componentes.

De acordo com Shah e Ouyang (1991) e Balaguru e Shah (1992), a interação fibra-matriz pode ser afetada pelos seguintes parâmetros: condição da matriz (fissurada ou não

fissurada); composição da matriz; geometria da fibra; tipo da fibra; características da superfície da matriz; rigidez da fibra em comparação à matriz; orientação das fibras; quantidade de fibras adicionais; velocidade de carregamento e durabilidade das fibras no compósito.

Bentur e Mindess (2007) consideram que esses fatores estão amplamente vinculados a parâmetros como a geometria da fibra, a distribuição e a resistência da aderência fibra-matriz. Para Bernardi e Silva Filho (2003), as propriedades do compósito têm relação direta com o tipo, a proporção e a orientação das fibras, na medida em que suas propriedades atuam, inclusive, na determinação das características mecânicas do material compósito. Quanto ao tipo de fibras adequadas à produção do compósito, Bernardi e Silva Filho (2003) fazem menção à importância de levar em conta critérios como rigidez, resistência e comportamento em longo prazo.

Quanto à distribuição das fibras no compósito, Tanesy e Agopyan (1997) advertem para as variações nas propriedades e no comportamento do material decorrentes do processo de produção. De acordo com Félix (2002), além da distribuição e da orientação da fibras, a fração volumétrica exerce influência direta nas propriedades mecânicas e reológicas do compósito, cuja definição se dá durante a produção do material. Neste ponto, Resende (2003) cita, ainda, a geometria, como fator interveniente.

Já Banthia e Trottier (1994) atentam para a constatação de que o comportamento de aderência (*bond-slip strength*) sofre influência direta da geometria e da orientação da fibra, bem como da resistência da matriz. Com efeito, Bernardi (2003) comenta que a abordagem conjunta torna-se fundamental na estimativa do comportamento de aderência fibra-matriz.

Com relação ao concreto e às argamassas reforçados com fibras, Savastano (2000) observa que a região da matriz que envolve a fibra é caracterizada por uma alta porosidade, o que ocasiona o armazenamento de água e, conseqüentemente, o aumento do índice de alcalinidade, dada a presença de grande quantidade de hidróxido de cálcio. Dependendo do tipo de fibra, um determinado nível de alcalinidade pode ser tido como benéfico, como é o caso das fibras de aço, ou pode trazer danos ao desempenho do material, por exemplo, uma leve perda de resistência mecânica, decorrente do envelhecimento ou desgaste das fibras, o que ocorreria mediante o emprego de materiais sensíveis ao ataque alcalino, como a fibra de vidro.

No que diz respeito à atuação efetiva das fibras nas propriedades do concreto, Naaman (2000, apud GAVA, 2006) afirma que, independentemente do tipo, é necessário que a fibra atenda a alguns requisitos básicos com relação à matriz de concreto, como a superioridade da resistência à tração (na ordem de duas a quatro vezes) e do módulo de elasticidade à tração; a semelhança ou superioridade da resistência de aderência ao concreto em relação à resistência à tração da matriz de concreto; e a semelhança ou superioridade do coeficiente de expansão térmica e do coeficiente de Poisson. Quanto a este último, Gava (2006) comenta que os deslocamentos das fibras pelas tensões de tração podem ser evitados pela superioridade do coeficiente do Poisson das fibras, ou minimizados pelo processo de ancoragem mecânica destas. Santos (2002) sugere que é possível tentar evitar problemas associados ao deslocamento na interface fibra-matriz por meio do emprego de materiais com baixos valores de coeficiente de Poisson, pois, quando solicitadas, não provocariam uma solicitação intensa na sua seção transversal, o que preveniria contra problemas de aderência.

Com relação ao volume das fibras, Balagaru, Narahari e Patel (1992), por meio da avaliação de sua influência na tenacidade à flexão de concretos, notaram que o aumento do volume de fibras de aço ocasiona a elevação da capacidade de absorver energia. Ademais, a capacidade de suporte do concreto diante de elevados valores de deslocamento pode, aparentemente sofrer influência do volume de fibra.

Segundo Johnston e Skarendahl (1992), os parâmetros relativos à caracterização das fibras quanto a tipo, tamanho e volume pouco interferem no carregamento de primeira fissura, atuando mais intensamente no comportamento do concreto após a sua fissuração. Esse carregamento é influenciado, de acordo com esses autores, pela resistência da matriz e, sobretudo, pelo seu grau de compactação aliado ao fator água/cimento.

Para que se entenda a influência de cada um dos fatores acima citados que provoca alterações nas propriedades dos materiais compósitos, mais precisamente do concreto, se faz necessário o entendimento, ainda que sucinto, de fases distintas que regem o comportamento de fissuração de peças reforçadas com fibras.

Conforme Bentur e Mindess (2007), a participação da fibra no mecanismo de controle de fissuração se dá através dos estágios de pré-fissuração e de pós-fissuração. O estágio de pré-fissuração é caracterizado pela transferência de esforços por meio da aderência desenvolvida na interface entre fibra-matriz, distribuindo carregamento de modo que os

deslocamentos longitudinais nas áreas de contato entre si sejam iguais. Em virtude de rigidezes diferenciadas, aparecem tensões tangenciais que auxiliam na transmissão dos esforços da matriz para as fibras. Essas tensões aumentam até atingir a máxima tensão de aderência, que uma vez excedidas, dão início ao processo de deslizamento da fibra e, conseqüentemente, origem às tensões de atrito distribuídas ao longo da interface fibra-matriz, que caracterizam o mecanismo de pós-fissuração.

O aumento da carga solicitante provoca a abertura normal de fissuras e as fibras passam a ter papel indispensável de inibir a propagação destas. Dependendo da geometria das fibras, essas passam a sofrer um processo de arrancamento (*debonding*), ora podendo permanecer até o desligamento total da matriz, ora rompendo, conforme o material que a constitui.

A importância do entendimento dos mecanismos de transferência de tensões entre matriz e fibras está na possibilidade de previsão de eficiência das fibras, previsão da curva $\sigma \times \varepsilon$ e modo de ruptura (dúctil ou frágil). Dada a importância da abordagem das características acerca das reações entre fibra-matriz, a escolha de um determinado tipo de fibra a ser usada depende das características que se deseja do compósito obtido. Assim, é imprescindível que sejam examinados, ainda que sucintamente, algumas das principais variáveis que influenciam diretamente nas propriedades e no comportamento dos compósitos reforçados com fibras.

2.5.3. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NAS PROPRIEDADES DO CRF

A seguir, são discutidos, de forma resumida, os principais fatores que influenciam as propriedades de um compósito com adição de fibras.

2.5.3.1. Teor de fibras – Volume de fibras

A capacidade de reforço atribuída às fibras depende amplamente do teor de fibra empregado, visto que, quanto maior o teor, maior será a quantidade de fibras que atuam diretamente na fissura como ponte de transferência de tensão, o que ocasiona a elevação do reforço pós-fissuração do concreto. Por outro lado, a utilização de baixos teores de fibras, em relação a um valor limite, que será explicitado mais adiante, oferece pouca ou nenhuma resistência à tração, flexão ou compressão, comprometendo a resistência estática do concreto, além da diminuição do efeito de resistência ao cisalhamento, à tração ou à abrasão.

De acordo com Bentur e Mindess (2007), a utilização de teores de fibras, ainda que baixos, propicia um controle maior da abertura das fissuras no estágio pós-fissuração, acarretando mudanças no comportamento plástico em na tenacidade do material compósito, que podem ser percebidas por meio do alongamento da curva tensão vs deformação.

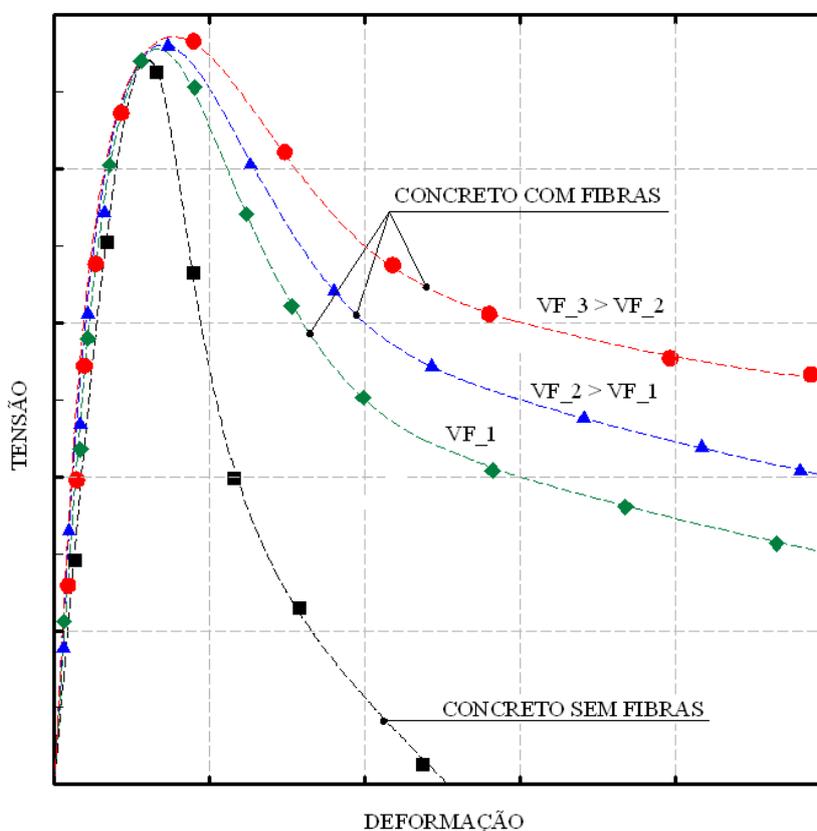


Figura 2.3: Típicas curvas tensão vs deformação para o concreto com fibras

É pertinente ressaltar que a concentração ou a quantidade de fibras utilizadas no concreto é habitualmente mensurada tendo em vista o volume de concreto reforçado. Assim, o teor de fibras é convertido em volume (V_f), que também pode ser medido mediante a proporção em massa correspondente. Contudo, Armelin (1992) considera que comparações de teores para fibras de massas específicas notadamente diferentes não têm sentido, na medida em que a proporção em massa está vinculada à massa específica da própria fibra.

É possível perceber a dificuldade, por parte de alguns autores, de abordar a quantidade de fibras a ser utilizada pela sua concentração ou volume total incorporados. Diante da adição de fibras ao concreto, é possível que as resistências mecânicas do compósito aumentem consideravelmente, embora algumas pesquisas tenham avaliado experimentalmente a quantidade ideal a ser incorporada a concretos convencionais, sem que houvesse perda de

trabalhabilidade da mistura, os resultados revelaram que, em alguns casos, os concretos reforçados com fibras não demonstram um aprimoramento substancial nas suas propriedades mecânicas, podendo, inclusive, haver uma redução de resistência à compressão. Neste sentido, surge a definição de volume máximo de fibras, como a máxima quantidade de fibras a ser adicionada adequadamente à matriz, na medida em que, o aumento do teor de fibras produz um incremento cada vez menor na resistência do compósito.

A fim de otimizar a resistência do compósito pela adição de fibras, a quantidade de fibras utilizada deve resultar em um volume de fibras superior ao volume crítico de fibras (V_{fcr}), que varia com a geometria e o tipo de material que as constitui e que expressa o volume mínimo necessário para a obtenção do efeito desejado. Figueiredo (2000) afirma que volume crítico é aquele volume de fibras que leva o compósito a ter a mesma capacidade portante da matriz e maior ductilidade que esta. A figura mostra o comportamento de corpos de prova à flexão de concretos com volume de fibras igual ao volume crítico, maior e menor a este.

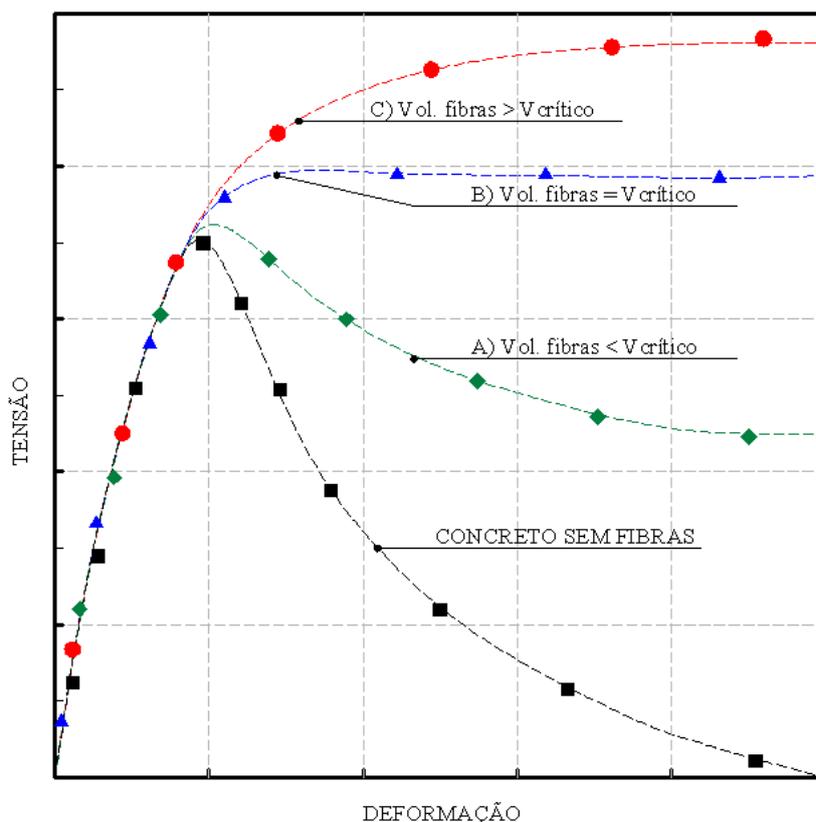


Figura 2.4: Diagramas carga x flecha obtidos nos ensaios de flexão de prismas de concreto com fibras em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico (baseado em FIGUEIREDO, 2000).

Segundo Garcez (2005), se $V_f > V_{fcr}$, o carregamento anteriormente suportado pela matriz é transferido para as fibras, após a primeira fissura. Uma vez que o volume se apresente satisfatório para sustentar a carga, o compósito conserva-se íntegro. Entretanto, caso $V_f < V_{fcr}$, o volume de fibras passa a ser considerado insuficiente para suportar o carregamento atuante na matriz antes da fissuração, provocando o esgotamento da resistência da fibra e a ruptura, que ocorre de modo instável ao longo da matriz.

Conforme Figueiredo (2000) e Tanesi e Agopyan (1997), há uma faixa de valores entre o volume crítico e o volume limite de fibras dentro da qual são especificadas as percentagens viáveis, em volume, de incorporação de fibras, que efetivamente contribuem no desempenho da matriz.

2.5.3.2. *Geometria das fibras*

Quanto à geometria das fibras, Vasconcelos (1994) comenta que, pela observação da natureza, o ser humano pôde compreender que fios extremamente finos, qualquer que seja o material de que se constituem, propiciam uma elevação não linear da resistência, na medida em que se reduz muito a área. Segundo Bernardi (2003) este comportamento pode encontrar respaldo na teoria dos defeitos, na medida em que fios muito finos apresentam uma baixíssima percentagem de falhas, o que dificulta a diminuição da resistência, comumente decorrente da presença destas imperfeições, que são, por sua vez, naturalmente encontrados em seções maiores.

Desta maneira, a geometria que está sendo utilizada tem um papel crucial na aderência dos compósitos, no seu desempenho após a fissuração e na sua ductilidade. Assim, é importante oferecer destaque à variedade de combinações geométricas de fibras a serem utilizadas no reforço do concreto. Conforme Naaman (2000, apud GAVA, 2006), as propriedades geométricas podem variar quanto à forma da seção transversal, o comprimento, o diâmetro, o diâmetro equivalente e a superfície.

Naaman (2000, apud GAVA, 2006) e Schwartz (1984) observam que as fibras podem apresentar seções transversais diversas, que variam da forma circular às formas poligonais, regulares ou irregulares, bem como podem ser produzidas de diversos tipos de processos. Zollo (1997) nota que, diante de uma seção transversal não circular, o diâmetro equivalente da fibra é determinado a partir do diâmetro de um círculo de mesma área da seção

transversal da fibra em questão. Apesar de apresentarem baixa rigidez à flexão, fibras com pequeno diâmetro equivalente se acomodam facilmente aos espaços na pasta de cimento. Ao passo que, fibras com grande diâmetro equivalente propiciam elevada rigidez à flexão, embora interfiram na consolidação dos agregados nos processos de mistura e adensamento. Accetti (2000) e Gava (2006) notam que a melhor aderência entre a fibra e a matriz de concreto pode ser desenvolvida pela alteração da geometria da fibra ao longo do seu comprimento, modificando sua superfície ou introduzindo deformações mecânicas, tornando-as: lisas, dentadas, deformadas, onduladas ou corrugadas, enroladas, torcidas e deformadas nas extremidades em forma de ganchos ou qualquer outro tipo de ancoragem.

Na verdade, o comprimento da fibra exerce uma função essencial na determinação da tensão de aderência, já que, como consequência de seu aumento, é possível notar uma melhoria na resistência de fissuração. Porém, segundo Figueiredo, Nunes e Tanesi (2000), o aumento de comprimento e de resistência da matriz deve funcionar de modo a não comprometer a capacidade de escorregamento da fibra em relação à matriz, diante do aumento da abertura da trinca, visto que, perante uma grande elevação da força de atrito entre a fibra e a matriz, a fibra poderá se romper, o que diminui ou anula a capacidade resistente da matriz após a fissuração. Quanto a isso, Harries e Young (2003) e Le e outros (2013) observam que a variação do comprimento da fibra provoca mudanças no modo de ruptura do compósito, que em vez de romper por arrancamento, há um rompimento das fibras por tração, afetando as características de absorção de energia do material.

Em geral, o modo de ruptura da adesão e o arrancamento das fibras de formas geométricas complexas se apresentam de maneiras bastante distintas, se comparados àqueles previstos por modelos analíticos simples, já que a extremidade pode fazer com que haja um aumento da demanda do volume de matriz voltado para a resistência à extração da fibra.

Para Araújo da Silva (2002), a relação entre o comprimento da fibra e o seu diâmetro equivalente corresponde ao fator de forma⁵, que tem como função descrever a geometria da fibra por meio de um parâmetro numérico, sendo esse um dos mais usados para a diferenciação das fibras. O aumento do valor fator de forma está diretamente relacionado ao acréscimo do comprimento da fibra ou à diminuição de sua seção transversal, o que,

⁵ É possível encontrar o termo taxa de aspecto ou relação de aspecto e, até mesmo, coeficiente de aspecto para representar esse parâmetro numérico.

segundo Mehta e Monteiro (2014), eleva a capacidade resistente após a fissuração da matriz, tendo em vista o aumento da quantidade de fibras atuantes no material.

Outro meio para avaliar o efeito do comprimento refere-se ao mecanismo de transferência de tensão. Por exemplo, se o comprimento de fibra é $l_f < l_c$, este não seria suficiente para o desenvolvimento de uma tensão igual à resistência à tração da fibra. Por outro lado, se o comprimento da fibra exceder l_c , a tensão produzida ao longo da fibra atingirá sua resistência, atuando sobre todo o potencial do reforço (BENTUR & MINDESS, 2007). Deste modo, a definição de comprimento crítico (l_c), como o menor comprimento necessário para que a tensão axial atinja a resistência à tração da fibra, pode ser utilizada como um critério que impõe limite à identificação de possíveis modos de falha no compósito, como: falha total proveniente do arrancamento de fibras com comprimento menor que l_c ; e, falha decorrente de fratura da fibra e da perda de aderência combinadas, que ocorrem apenas quando l_f é maior que l_c .

Callister (1997) considera que o comprimento crítico é função do diâmetro da fibra (d_f) e de sua resistência última de tração (σ_f), além da resistência de aderência fibra-matriz (τ_c), expresso por meio da fórmula:

$$l_c = \frac{\sigma_f d_f}{2\tau_c} \quad (2.1)$$

Ainda em termos do comprimento da fibra, é recomendável que sejam utilizadas as de comprimento igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado empregado no concreto. Ou seja, Maidl (1991 apud FIGUEIREDO, 2005) julga que deve ser buscada uma compatibilidade dimensional entre fibras e agregados, a fim de que as fibras possam interromper mais eficazmente a fissura ocorrida no compósito. Essa compatibilidade dimensional viabiliza o desempenho da fibra, reforço do concreto e não como reforço da argamassa, que envolve as partículas de agregados.

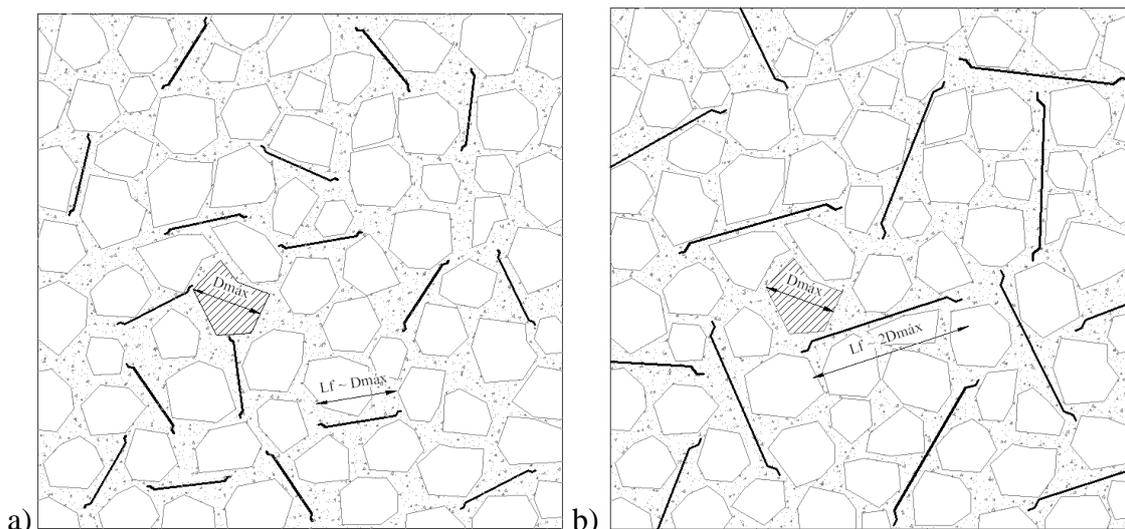


Figura 2.5: Compatibilidade dimensional entre fibras-agregados.

Para que se entenda esse fenômeno, Li & Maalej (1996) descrevem os mecanismos de desvio e de sinuosidade da trinca atuantes na região da ponta da fissura. O desvio da trinca acontece quando esta se depara com um agregado de elevada resistência, que não pode ser ultrapassado, alterando seu curso. Já o mecanismo de sinuosidade se dá diante da impossibilidade de desviar totalmente o obstáculo, mudando o curso da trinca, e tampouco consegue atravessar o agregado. Diante disso, a trinca passa a contornar o agregado por meio da interface argamassa-agregado. Estes dois mecanismos são responsáveis pela característica tortuosa apresentada pelas fissuras em concreto e contribui para o mecanismo de tenacidade por dificultar a propagação da fissura.

É sabido que a tenacidade do compósito na região da fissura da matriz, é assegurada pelos mecanismos de descontinuidade de fissuras provocadas pelo entrelaçamento dos agregados, bem como pelo entrelaçamento das fibras. Segundo Li e Maalej (1996), esse mecanismo protege a região próxima ao agregado, permitindo que a fissura ocorra apenas na argamassa entre os agregados, dificultando a sua propagação da trinca. Nesta circunstância, o entrelaçamento dos agregados é o principal responsável pelo comportamento de amolecimento após a fissuração do concreto sem reforço, o que o torna imprescindível na compreensão e avaliação acerca do processo de amolecimento após a fissuração do concreto reforçado com fibras.

Chenkui e Guofan (1995) ressaltam ainda que o efeito de ponte de transferência de tensões da fibra no compósito pode ser reduzido, caso o comprimento da fibra seja duas vezes menor que o diâmetro máximo dos agregados. Isto é, sabe-se que as fissuras têm a

preferência, na maioria dos casos, de se propagarem de modo a percorrer a interface agregado-matriz a atravessar o elemento de agregado em si, independente do seu tamanho. Diante de agregados de dimensões elevadas, as fibras, agora muito menores, tendem, por sua vez, a alinhar longitudinalmente às paredes do agregado, coincidindo com a direção de propagação das fissuras, o que provocaria a diminuição ou, até mesmo, a inexistência de transferência de esforços do plano perpendicular ao plano de propagação das trincas, não trazendo algum benefício para a tenacidade do compósito.

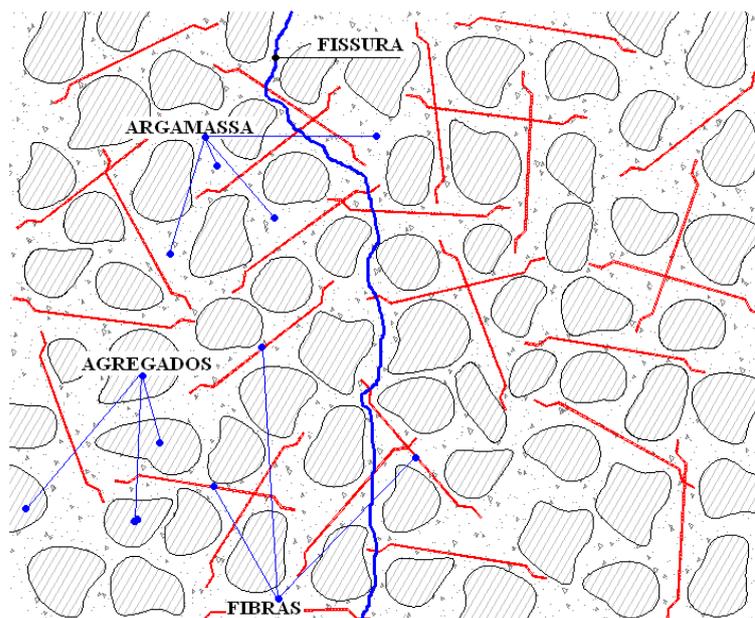


Figura 2.6: Propagação preferencial da fissura na interface agregado-matriz.

Por este motivo, o ACI (2008) não aconselha que se utilizem agregados com $d_{\text{máx}} > 19\text{mm}$, embora Chenkui e Guofan (1995) considerem viável o uso de uma fração de agregados com $d_{\text{máx}}$ de até 40mm, já que não ocasiona um comprometimento do desempenho do compósito.

É importante notar que, além da geometria das fibras, aspectos como a distribuição e a orientação das fibras no compósito, atuam diretamente na eficiência do material.

2.5.3.3. Distribuição e Orientação das fibras

Diante do interesse de verificar os efeitos da incorporação das fibras, as variações nas propriedades tendem a ser expressas, invariavelmente, em termos de quantidade média de fibras contidas no compósito. É normal esperar que a distribuição das fibras se dê de modo uniforme através da matriz, e que sua orientação tenda a ocorrer de forma aleatória, constituindo um reticulado tridimensional não orientado. Todavia, não há como comprovar

essas tendências após o término da produção do concreto reforçado com fibras, visto que é possível verificar uma notável dispersão nos dados de ensaio, além de uma considerável variação nos valores medidos.

Para Gettu et al. (2005), a distribuição e a orientação das fibras atuam diretamente na contribuição das fibras à rigidez, tanto com relação às fissuras, quanto à uniformidade de sua distribuição. Neste contexto, estes estudiosos destacam a relevância acerca da influência do processo de confecção na distribuição e orientação das fibras no compósito, pois, como foi anteriormente observado, espera-se uma distribuição uniforme, homogênea e isotrópica das fibras em compósitos com fibras dispersas. Entretanto, não é possível certificar a isotropia e a homogeneidade, tendo em vista a influência da moldagem e da compactação. Mesmo assim, quando se trata do controle de fissuração em determinados elementos estruturais, considera-se mais vantajosa uma orientação preferencial das fibras, do que a distribuição isotrópica.

Algumas pesquisas acerca da influência da compactação na orientação das fibras constataam que, durante o processo de moldagem, as vibrações tendem a provocar a segregação das fibras, promovendo orientações preferenciais destas ao longo de planos horizontais (GETTU, GARDNER, SALDIVAR & BARAGÁN, 2005; TOUTANJI e BAYASI, 1998). Estudos realizados por Gettu et al (2005) corroboram a existência de uma orientação preferencial das fibras decorrentes da vibração ao longo de planos perpendiculares à direção de lançamento, constatando ainda que há mais fibras na parte inferior dos corpos-de-prova.

Callister (1997) faz menção a outras propriedades do compósito com fibras, além da resistência, que sofrem influência da orientação, da concentração e da distribuição das fibras na matriz. Essa orientação pode atender a dois tipos de alinhamentos essencialmente opostos entre si: o alinhamento paralelo dos eixos longitudinais das fibras em um único sentido, e o alinhamento totalmente aleatório.

É comum que os compósitos apresentem uma distribuição aleatória de fibras contínuas ou descontínuas. Diferentemente das fibras contínuas, as descontínuas podem ser dispostas aleatoriamente ou parcialmente orientadas. De modo geral, há uma melhor perspectiva em torno das propriedades mecânicas do compósito diante de uma distribuição uniforme das fibras. De qualquer modo, busca-se aumentar, na direção transversal, o reforço e a resistência do compósito. Nota-se, neste caso, que o reforço fibroso é quase inexistente.

Além da geometria, da quantidade e da disposição das fibras inseridas no compósito, é imprescindível atentar ainda outro fator que afeta diretamente o desempenho do compósito, que é a natureza ou tipo da fibra empregada, podendo ser caracterizado pelo módulo de elasticidade e pela resistência mecânica.

2.5.3.4. *Módulo de Elasticidade e Resistência Mecânica*

Tanesi e Agopyan (1997) consideram que a determinação da capacidade de reforço que a fibra pode conferir ao concreto depende, principalmente, do módulo de elasticidade e da resistência mecânica. Para Batson (1974), vários materiais podem servir de base para a produção de fibras, o que gera uma vasta gama de propriedades, que permitem classificá-las em dois grandes grupos. Quanto ao módulo de elasticidade, as fibras podem ser divididas em duas principais classes: as que possuem módulo mais baixo que o da matriz cimentícia e as com módulo maior que o da matriz cimentícia.

No que toca à utilização de fibras de baixo módulo, sua baixa resistência mecânica torna necessária a elevação dos teores dessas fibras na matriz, a fim de possibilitar o reforço da matriz, embora possa inviabilizar a aplicação do material. Em contrapartida, a fibra de alto módulo de elasticidade tende a apresentar um alto nível de tensão no momento da ruptura da matriz, tornando válida a sua atuação como reforço. Ainda assim, um alto módulo de elasticidade não é suficiente para garantir que a fibra atue como reforço na matriz, visto que uma baixa resistência à tração ou ao cisalhamento compromete ou anula a capacidade de reforço pós-fissuração.

Ademais, Figueiredo (2005) salienta que fibras de baixa resistência e de baixo módulo de elasticidade apresentam melhor desempenho quando inseridas em concreto com baixos valores de módulo de elasticidade e de resistência, são os casos onde o concreto se encontra no seu estado fresco ou, até mesmo, momentos antes do processo de endurecimento.

Apesar de não colaborarem muito para a elevação da resistência do compósito, as fibras com baixo módulo de elasticidade e maior alongamento, com relação às matrizes cimentícias, mostram grande capacidade de absorção de energias, apresentando grande resistência ao impacto e elevada tenacidade, dada a capacidade que a fibra possui de resistir a grandes deformações (WALTON & MAJUMDAR, 1975 apud CEPED, 1982). Com respeito aos compósitos produzidos com fibras de elevado módulo de elasticidade e

resistência, é possível notar sua alta resistência à tração, sua rigidez e sua capacidade de resistência a cargas dinâmicas.

Convém ressaltar que fibras de baixo módulo de elasticidade e resistência têm como função diminuir o risco de fissuração plástica, enquanto que as fibras de módulos de elasticidade e resistência elevados propiciam reforço ao concreto endurecido.

Desta maneira, durante o carregamento do compósito, o emprego de fibras com módulo de elasticidade demasiadamente superior ao da matriz de concreto provoca a fissuração precoce da matriz, que transfere toda a carga para as fibras. Esse carregamento adicional suportado pelas fibras, de modo contínuo, estimula a fissuração múltipla e o aumento da deformação e da energia de ruptura do compósito.

Acetti e Pinheiro (2000) sinalizam que fibras com baixo módulo de elasticidade, em geral apresentam um elevado coeficiente de Poisson, características que conduzem a uma maior perda de aderência na interface fibra-matriz, estimulando o deslizamento e o arrancamento das fibras curtas e alinhadas. Essa limitação pode ser evitada por medidas como o entrelaçamento de fibras ou o uso de fibras fibriladas.

Depois de apontar algumas das características mais importantes das fibras, o quadro abaixo apresenta alguns dos valores dessas características, frente a matriz de cimento.

Tabela 2.1: Valores de propriedades para diversos tipos de fibras (Bentur e Mindess, 1990)

| <i>Material</i> | <i>Diâmetro [μm]</i> | <i>Densidade [g/cm³]</i> | <i>Módulo de Elasticidade [GPa]</i> | <i>Resistência à tração [GPa]</i> | <i>Deformação na ruptura [%]</i> |
|--------------------------|--|---|---|---|--|
| Aço | 5 – 500 | 7,84 | 190 – 210 | 0,5 – 2,0 | 0,5 – 3,5 |
| Vidro | 9 – 15 | 2,60 | 70 – 80 | 2 – 4 | 2 – 3,5 |
| Amianto | 0,02 – 0,4 | 2,6 | 160 – 200 | 3 – 3,5 | 2 – 3 |
| Polipropileno | 20 – 200 | 0,9 | 1 – 7,7 | 0,5 – 0,75 | 8,0 |
| Aramida Kevlar | 10 | 1,45 | 65 – 133 | 3,6 | 2,1 – 4,0 |
| Carbono | 9 | 1,9 | 230 | 2,6 | 1,0 |
| Nylon | - | 1,1 | 4,0 | 0,9 | 13 – 15 |
| Celulose | - | 1,2 | 10 | 0,3 – 0,5 | - |
| Acrílico | 18 | 1,18 | 14 – 19,5 | 0,4 – 1,0 | 3 |
| Polietileno | - | 0,95 | 0,3 | $0,7 \times 10^{-3}$ | 10 |
| Fibra de madeira | - | 1,5 | 71 | 0,9 | - |
| Sisal | 10 – 50 | 1 – 50 | - | 0,8 | 3,0 |
| Matriz de cimento | - | 2,50 | 10 – 45 | 3,7 | 0,02 |

2.5.4. PRINCIPAIS PROPRIEDADES DOS CRF

2.5.4.1. TRABALHABILIDADE

O uso do concreto com fibras tem sido direcionado as mais diversas aplicações, em virtude de algumas vantagens tecnológicas. Porém, cria-se a necessidade de um melhor entendimento de suas propriedades, quer seja no estado fresco, quer seja quando endurecido, para que seja viável a revisão de métodos e técnicas de produção.

A propriedade mais notável no comportamento do compósito no estado fresco é a trabalhabilidade, já que desempenha um papel crucial na performance do concreto endurecido. Assim, é necessário atentar para a trabalhabilidade da mistura desde o processo de dosagem da matriz de concreto para a produção do compósito com fibras. Segundo Mehta e Monteiro (2014), essa propriedade refere-se ao grau de facilidade no manuseio, transporte, lançamento e adensamento do concreto, ainda em estado fresco, sem que haja prejuízos na sua homogeneidade, bem como segregação de suas diferentes fases. A trabalhabilidade adequada contribui ainda no processo de compactação, na resistência mecânica e, principalmente na durabilidade do concreto, que são propriedades a serem abordadas a seguir.

Diante da multiplicidade de fatores que afetam a trabalhabilidade, é possível distinguir entre dois grupos de fatores: os intrínsecos, que englobam aspectos como o atrito interno entre as partículas, a coesão, a viscosidade, a homogeneidade, a quantidade de ar incorporado, entre outros; e os extrínsecos, que estão relacionados aos métodos de ensaio, equipamentos, transporte, lançamento e adensamento, além das características da estrutura em estado endurecido. Todavia, é importante advertir para a dificuldade de mensuração objetiva acerca destes fatores e das condições de uso e processos aos quais o concreto será submetido.

Conforme Mehta e Monteiro (2014), no caso da incorporação de fibras ao concreto, é perceptível o prejuízo à trabalhabilidade, devido à elevação na consistência deste, o que colabora com o atrito interno entre os elementos da massa do concreto, fato relacionado à forma e à área superficial das fibras. Na verdade, segundo o ACI (2006), a grande área superficial das fibras faz com que haja um maior contato entre estas e destas com as outras partes constituintes, o que restringe a fluidez e a mobilidade da mistura.

Bentur e Mindess (2007) constataram também que, assim como na interface agregado-pasta, existe uma zona de transição na interface fibra-matriz, na qual se forma uma camada de água adsorvida à superfície das fibras. A diminuição da quantidade de água livre na mistura propicia a redução do espaço entre as diferentes partículas do concreto fresco, prejudicando a fluidez.

Ceccato (1998) e Vairagade e Kene (2012) chamam a atenção para a influência exercida pelo teor de fibras incorporado e pelo fator de forma das fibras na trabalhabilidade, fatores aos quais Mehta e Monteiro (2014) acrescentam o tamanho e a granulometria do agregado, relação água-cimento e processo de mistura. Esses parâmetros podem provocar a ocorrência de problemas relativos à perda da homogeneidade, como a segregação e formação de ouriços⁶, que trazem como consequência o enfraquecimento do material, devido à perda de aderência na interface fibra-matriz, culminando no prejuízo do comportamento pós-fissuração, tida como a característica mais relevante do concreto com fibras.

O domínio dessa propriedade pode ser obtido pela escolha cautelosa de um método de ensaio que se mostre adequado às características específicas do concreto. Além do que, é importante identificar as limitações de ensaio, quanto à mensuração dos parâmetros, bem como a aplicação à qual se destina o material.

Alguns estudiosos, como Soroushian e Bayasi (1992), Johnston (1984) e o ACI (2008), examinaram o emprego de três modelos de métodos de ensaio empregados na avaliação da trabalhabilidade do concreto. O método *slump-test*, mais comumente conhecido como abatimento do tronco de cone (NBR 7223), tem sua eficácia prejudicada diante de um elevado teor de fibras (CECCATO, NUNES & FIGUEIREDO, 1997; VAIRAGADE & KENE, 2012). O segundo método refere-se à mensuração do tempo gasto pelo concreto com ou sem fibras, submetido à vibração, ao descer por um cone de abatimento invertido (ASTM C995-94). Como terceiro método foi mencionado o ensaio de VeBe (ACI 211.3, 1991), que oferece uma avaliação em termos do grau de facilidade demonstrado pelo material para ser compactado pelo mecanismo de vibração.

No entanto, mesmo ante tais indicações, Ceccato (1998) adverte para as limitações de tais métodos, sobretudo no que se refere ao nível de consistência do concreto fresco, que atua condicionando seu emprego às exigências das mais diversas aplicações do concreto

⁶ Termo adotado para caracterizar o embolamento das fibras no interior da mistura de concreto.

reforçado com fibras. Desta forma, é preciso identificar a eficiência e a sensibilidade dos diferentes métodos, a fim de que haja uma apreciação adequada da trabalhabilidade do material, em termos de avaliação do comportamento no estado endurecido.

2.5.4.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO:

De acordo com o ACI (2006), a resistência à compressão de um compósito sofre pouca ou nenhuma influência decorrente da adição de fibras, não sendo uma propriedade muito relevante para os concretos reforçados com fibras, embora haja casos em que se observa uma queda no valor da resistência do compósito, relacionado ao acréscimo da quantidade de água para melhorar a trabalhabilidade do mesmo.

Em contrapartida, diversas pesquisas notaram que a resistência à compressão pode ser elevada, ainda que sutilmente, por influência do teor e do aspecto de forma das fibras, embora seja mais significativa a elevação decorrente da concentração, se comparada à obtida com o fator de forma (BARROS, 1996; GLAVIND & AARRE, 1991; YEW e outros, 2011; TAMIL SELVI & THANDAVAMOORTHY, 2013; KONAPURE & KANGIRI, 2014, VAIRAGADE & KENE, 2012). Levando em conta que as fibras agem como ponte de transferência de tensões através das fissuras, observa-se também uma melhora na resistência à compressão, que pode ser avaliada por intermédio do procedimento de ensaio indicado pela JSCE (JSCE-SF5, 1984). Este método emprega o acoplamento de dois LVDTs⁷ ao corpo-de-prova cilíndrico, visando ao levantamento da curva carga por deformação axial.

Conforme estudo experimental realizado por Zangelmi Jr. (1999, apud Figueiredo 2005), o aumento do teor de fibras não produziu mudanças significativas nem nas características elásticas, nem nos valores de resistência do concreto. Outra conclusão encontrada na literatura acerca da obtenção de resistência à compressão de corpos de provas contendo concreto com fibras (ARMELIN & HELENE, 1995), indica a existência de diferenças significativas quanto à influência do direcionamento preferencial da fibra. Caso o concreto seja comprimido no sentido perpendicular ao plano de projeção, é possível notar um gasto energético pós-fissuração superior ao concreto comprimido em sentido paralelo ao plano de projeção.

2.5.4.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIRETA:

⁷ O *Linear Variable Differential Transducer* (Transformador Diferencial Variável Linear) é um transdutor para conversão de deslocamento em sinal elétrico, por Hermam Schaevitz, em 1946.

A resistência à tração, diferentemente da resistência à compressão, pode ser consideravelmente aprimorada pela inserção de fibras a matrizes de base cimentícia, levando em conta, sobretudo, o volume de fibras empregado e o alinhamento destas na direção das tensões principais de tração. Todavia, diante da dificuldade de execução, esse incremento de resistência torna-se irrelevante.

Bentur e Mindess (2007) afirmam que o alinhamento das fibras não é suficiente para promover a elevação da resistência, sendo necessária a adição de altos teores, a fim de permitir o acréscimo de resistência. Além disso, destacam a importância do emprego de fibras que possuam um elevado valor de resistência à tração, embora seja indispensável atentar para a manutenção da trabalhabilidade, através da observância do critério de volume crítico.

De acordo com o ACI 544.4R-88 (1988) a curva tensão *vs* deformação varia conforme as dimensões do corpo-de-prova, o método de ensaio, as propriedades do equipamento utilizado e o aparecimento de fissuras no corpo-de-prova. Contudo, não há um modelo padrão de ensaio para determinar a curva de concretos com fibras na tração direta.

Li e Stang (2004) afirmam que ensaios experimentais de tração direta têm como vantagem, sobre outros tipos de ensaios, uma noção da real distribuição de fissuras do compósito ao longo do carregamento, além de facilitar a comparação entre resultados experimentais e os valores obtidos com outros materiais.

É possível verificar que durante o ensaio de tração (similar na flexão), destaca-se a ocorrência de comportamentos diversos e a existência de fases distintas no histórico de carregamento dos concretos reforçados com fibras. Na primeira fase, Li e Stang (2004) salientam a presença de pequenas deformações elásticas que satisfazem, pelo menos de modo aproximado, a Lei de Hooke. Essas deformações têm uma relação linear com as tensões, uma vez que, diante do término do carregamento, as deformações apresentam valores mínimos ou, até mesmo, nulos.

De outro modo, o processo de microfissuração da matriz, na segunda fase, é marcado pela não linearidade nas relações entre deformação e tensão, o que demonstra um aumento da capacidade de suporte do material. Nesta fase, o tipo de fibra é crucial na determinação do seu comprimento, cujo estudo só tem fundamento ante a intenção de elevar a capacidade

de deformação. A partir do ponto de transição⁸ entre o ramo ascendente linear e o trecho de descarregamento não linear, as fibras passam a atuar mais eficazmente como mecanismo de união das superfícies de ruptura.

A superioridade das tensões atuantes na interface fibra-matriz, em relação aos valores limites, ocasiona a perda de resistência dos compósitos, desencadeada pelo descolamento e pela ruptura das fibras. Entretanto, na medida em que a literatura adverte para a dificuldade de interpretação dos resultados obtidos em ensaios de tração direta, têm sido privilegiados os ensaios de flexão ou tração indireta, que serão mais bem abordados mais adiante.

Para Shah et al (1972, apud ACI 544.4R-88) existe uma similaridade entre resistência à tração de concretos com fibras e de concretos sem reforço fibroso (2 a 4 MPa), embora se considere que fibras com alto módulo de elasticidade possam contribuir para a elevação da resistência à tração. Na verdade, é comum verificar que se utiliza, em volume, menos de 2% de fibra, o que não altera significativamente o índice de resistência à tração.

2.5.4.4. RESISTÊNCIA À FLEXÃO:

Em geral, os concretos reforçados com fibras apresentam um comportamento bastante satisfatório, no que se refere à flexão. Chanvillard e Rigaud (2003) observam que, após a primeira trinca, é perceptível a distribuição não linear das tensões de flexão atuantes na seção trincada. Essa fase de múltipla fissuração contribui para a resistência, após a qual tem início a abertura e a determinação dos pontos de fissura. Diferentemente dos casos de resistências à tração e à compressão, os incrementos na resistência à flexão, voltadas para as tensões de tração indiretamente atingidas, mostram-se nitidamente maiores perante as tensões derivadas de esforços de tração axial. Estes resultados foram confirmados por um outro estudo realizado por Formagini e Sidiclei (2005).

A diferença entre resultados experimentais, sobretudo no que tange às respostas de tração axial e de tração na flexão, é frequentemente atribuída a uma compensação dos esforços de tração em relação às forças de compressão na flexão, e habitualmente denominada efeito escala ou fator de correção.

Ainda no que diz respeito à obtenção de resultados díspares em ensaios de tração e flexão, outras pesquisas têm apontado que essa diferença tende a ser reduzida, à proporção que o volume de fibras adicionado ao compósito é aumentado. Porém, Chuang e Ulm (2004)

⁸ Ponto que indica a resistência à primeira fissura, ou limite elástico, ou limite proporcional.

atribuem o efeito escala ao processo de execução, sem estipular relação com o material utilizado.

Mesmo portando deformações muito superiores à deformação de fratura do concreto convencional, os concretos reforçados com fibras, como observam Mehta e Monteiro (2014), continuam a resistir a cargas consideráveis. Com relação a isso, é possível averiguar, por meio de análises de resultados oriundos de testes de flexão com diversas dosagens de concretos com fibras e fundadas nas especificações de normas como a ASTM C1018, que a resistência última de primeira fissura depende intensamente de parâmetros da matriz, como também da influência das características das fibras.

2.5.4.5. *RESISTÊNCIA A CARREGAMENTOS DINÂMICOS – IMPACTO e FADIGA*

Dentre as propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras, a resistência ao impacto, ou absorção de energia dinâmica, ocupa uma posição de destaque por ser identificada como sendo a energia consumida no rompimento de um corpo-de-prova padrão, na qual se verifica a quantidade de golpes necessários ao alcance de um nível e tamanho pré-definido de dano. Além do mais, para o ACI 544.2R-89 (1999), essa propriedade permite a avaliação das dimensões do fragmento liberado logo após a ação das cargas resultantes da colisão, no decurso de um intervalo mínimo de tempo, ora na forma de um projétil, atingindo o corpo-de-prova, ora no modo explosivo, agindo na superfície.

Perante a constatação de Johnston (1985) de que ensaios de impacto são dificilmente repetíveis, pois demandam equipamentos sofisticados e produzem resultados muito dependentes da taxa de aplicação do carregamento, nota-se a escassez de estudos que abordem a resistência ao impacto, sobretudo, relativa ao concreto com fibras. Em vista desta escassez de ensaios padronizados de resistência ao impacto, mesmo diante de indicativos da boa performance de concretos reforçados com fibras ao impacto, Mehta e Monteiro (2014) consideram difícil a avaliação em torno da real magnitude da melhoria provocada pela inserção de fibras.

Contudo, é sabido, como afirmam Balaguru e Shah (1992), que a resistência do compósito ao impacto aumenta significativamente com a inserção de fibras à matriz. Tendo em vista a avaliação da resistência ao impacto de placas formadas por matriz de base cimentícia de resistência normal, sem adição de reforço ou reforçadas com fibras, Banthia et al (1998) constataram que tanto no carregamento último, quanto na capacidade de absorção de energia, verificam-se os maiores incrementos no desempenho ao impacto.

Gopalaratnam e Shah (1986) afirmam que, em geral, a resistência a cargas de impacto depende do mecanismo impactante e do monitoramento de alguns parâmetros, durante o ensaio. O ACI 544.2R-89 (1999) faz referência a alguns testes: (a) impacto de pêndulo de Charpy; (b) impacto com queda de um corpo pesado (simples ou repetitivo); (c) taxa de deformação constante; (d) impacto de projétil; (e) impacto de barra de Hopkinson; (f) emprego de explosivos e (g) uso de pêndulos instrumentados.

Também merece destaque a solicitação repetitiva ao longo do tempo em estruturas de concreto com fibras. Esses esforços cíclicos, ao qual o material fica exposto, geram uma ruptura, denominada de fadiga, que se dá num nível de tensão inferior ao previsto no ensaio estático, já que, a cada ciclo de carregamento, as trincas tendem a se propagar, reduzindo a área para a transferência de tensão. Conforme Suresh (1998), fadiga é definida como um termo que se aplica às mudanças que podem ocorrer nas propriedades do material, devido à aplicação periódica de tensões ou deformações, podendo provocar a fissuração ou falha. Quanto maior a proximidade entre a carga cíclica e a carga correspondente à resistência do material, menor será a quantidade de ciclos necessários para o colapso total da peça. Suresh (1998) observa ainda que o processo de falha por fadiga ocorre de diferentes formas: fadiga mecânica, fadiga causada por flutuações de temperatura, fadiga termomecânica, fadiga dada pela presença de agentes agressivos e fadiga de contato. A fadiga, em qualquer material, sempre se dá devido à propagação das microfissuras nele existentes, inclusive no concreto.

Com respeito à atuação das fibras, estas atuam no compósito como ponte de transferência de tensão nas trincas, reduzindo a propagação destas e, conseqüentemente, aumentando o número de ciclos necessário para levar o concreto à ruptura.

Diante da influência dos carregamentos dinâmicos acima mencionados, percebe-se a relevância do entendimento dessas solicitações na determinação da resistência dos materiais compósitos.

2.5.4.6. *TENACIDADE*

A tenacidade de um material pode ser definida como a propriedade que delimita a medida de capacidade de absorção de energia, empregada, geralmente na caracterização da resistência à fratura, quando submetido a deformações (estáticas ou dinâmicas), ou quando submetido a carregamentos de impacto.

Embora possa ser obtida através de ensaios de tração direta, a realização deste teste, com vistas à avaliação dessa capacidade é de difícil realização. Portanto, a literatura tem recomendado os testes de flexão na determinação da tenacidade, já que apresenta como vantagens a simplicidade nos procedimentos de execução e a possibilidade de simular condições de carregamento que conseguem reproduzir situações ocorridas na prática.

A representação da energia absorvida pela peça é dada pela área abaixo da curva carga vs deslocamento, cujo valor tem se mostrado útil na avaliação de compósitos, apesar de ter sua determinação dependente das dimensões do corpo-de-prova, da configuração do carregamento, do tipo de controle de carga e da taxa de carregamento.

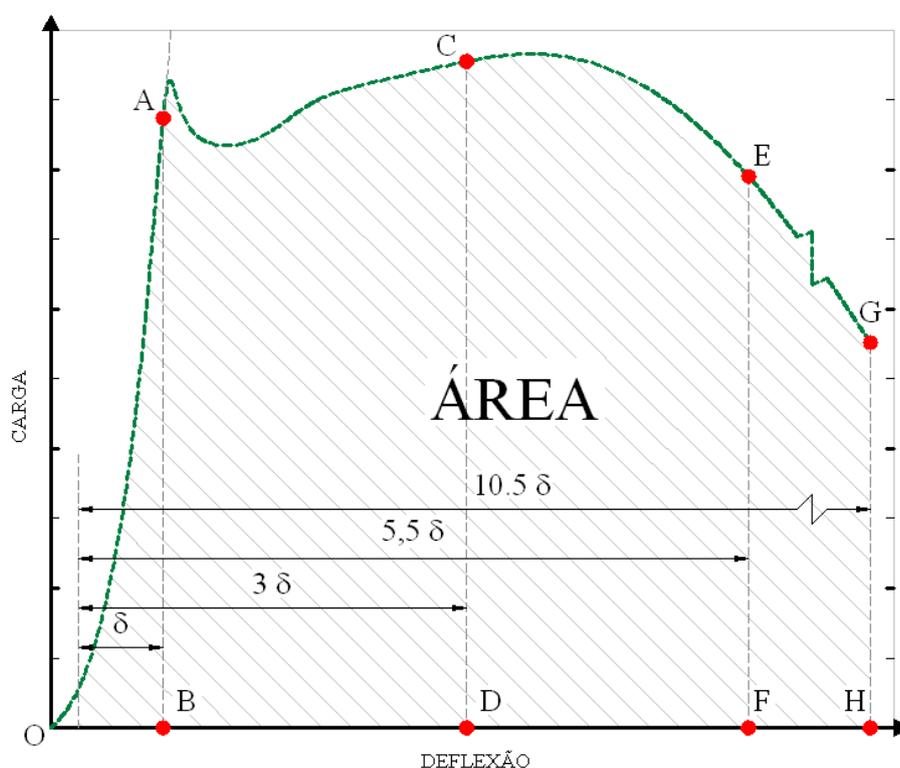


Figura 2.7: Curva carga vs deslocamento, indicando valores de deslocamento para os quais devem ser calculados os índices de tenacidade segundo ASTM C 1018 (1994).

Contudo, é possível minimizar ao menos parte desses efeitos, através da normalização da capacidade de absorção de energia, expressa pela razão entre a energia necessária para romper uma viga produzida com CRF pela energia necessária para romper uma viga sem reforço.

Para tanto, é imprescindível que se preserve, para ambos os casos, as mesmas condições de geometria e carga, como também a composição da matriz. Ainda assim, é preciso atentar para a influência decorrente das características das fibras utilizadas na razão encontrada.

Além dos testes de flexão, também podem ser encontrados outros métodos na literatura, voltados para a avaliação da tenacidade.

Figueiredo (2005) faz menção a alguns testes como o método de ensaio prescrito pela *Japan Society of Civil Engineers* (JCI SF4) – um dos mais simples e mais utilizados, inclusive no Brasil –; o ASTM C1018; alguns métodos indicados pela *European Federation of Producers and Applications of Specialists Products for Structures* (EFNARC, 1996) e outro, mais recente, proposto pela ASTM (C1399, 2002) e pela *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, System and Structures* (RILEM TC 162 – TDF 2002).

2.5.4.7. DURABILIDADE

Um dos aspectos ainda não dominados pelas pesquisas acerca dos materiais compósitos é a questão da durabilidade, que é definida como a capacidade que o material possui de conservar suas principais características, sob determinadas condições de exposição em longo prazo.

Portanto, para a investigação sistemática da durabilidade de um material devem ser levados em conta a identificação da função e das características do material esperadas ao longo do seu uso (exigências do usuário), a verificação de suas condições de exposição, a caracterização dos principais agentes de degradação, o reconhecimento dos mecanismos de degradação provocados pelos agentes e a delimitação do dano ocorrido, face à ação imposta pelos agentes, por meio desses mecanismos de degradação.

De acordo com Silva (2002), esses fatores proporcionam dados conclusivos sobre a durabilidade ou não do material, além de oferecerem recursos para a avaliação da viabilidade de aperfeiçoamento, adaptação ou produção de novos produtos para diferentes fins.

No caso de compósitos reforçados com fibras naturais, nota-se uma preocupação no que se refere às suas propriedades de longa duração, pois, segundo Toledo Filho et al (2000), é possível que sejam notados alguns efeitos, seja em fibras dispersas, seja em fibras

alinhas dentro de uma matriz. Como exemplo, tem-se a diminuição da capacidade de absorção de energia, provocada pelo ataque químico do hidróxido de cálcio, derivado, por sua vez, de reações do cimento, culminando na perda da resistência.

Tanesi e Figueiredo (2000) constatam uma relação de dependência entre a durabilidade dos concretos com fibras, a durabilidade das fibras empregadas submetidas às condições do meio em que foram distribuídas, a durabilidade do próprio compósito e os agentes externos agressivos. Estes autores frisam ainda que os concretos com fibras devem ser bem compactados e curados, a fim de que apresentem uma durabilidade satisfatória, enquanto suas fibras permanecerem protegidas pela pasta.

Um dos agentes mais comuns no comprometimento da durabilidade dos concretos é a corrosão. Dentre as condições ambientais, é frequentemente citada a presença de cloretos, o que invariavelmente ocasiona a corrosão das fibras mais superficiais, embora as fibras contidas no interior do compósito permaneçam preservadas. A utilização de fibras resistentes à corrosão, como é o caso das fibras metálicas, pode evitar esse processo.

A adição de fibras no concreto contribui na diminuição da fissuração, o que propicia uma melhoria consideravelmente na durabilidade, por exemplo, de concretos com armadura de aço, visto que reduz a inclusão de agentes agressivos, como umidade, oxigênio e cloretos, assim como diminui a probabilidade de que ocorra corrosão nas armaduras. No caso de concreto reforçado com fibras de aço, Tezuka (1999) vê como comparável a sua durabilidade em relação à do concreto convencional.

É possível citar outros fenômenos que também estão, de alguma forma, relacionados à performance do concreto endurecido no estágio pré-fissurado, com relação à sua durabilidade. Dentre eles, a retração e a fluência que, por sua vez, estão associados ao movimento de fluidos dentro do concreto. De acordo com testes do ACI (1988), esses fenômenos são pouco afetados pela adição de fibras, uma vez que estas representam pouca restrição quando o concreto permanece não fissurado. Entretanto, quando a retração é restringida, as fibras podem proporcionar um benefício, contribuindo para a redução da quantidade de fissuras, bem como as suas aberturas médias. Não obstante, Tanesi (1999) e outros (CHANVILLARD, AITCIN & LUPIEN, 1989 apud FIGUEIREDO, 2005) enfatizam a redução da exsudação com a presença das fibras, independentemente do tipo, o que é vantajoso para a durabilidade, em virtude da contribuição na resistência à entrada de agentes agressivos.

COMPÓSITOS HÍBRIDOS DE FIBRAS

3.1. INTRODUÇÃO

Como discutido no capítulo anterior, o comportamento de um material frágil à fissuração pode ser melhorado com a inclusão de fibras descontínuas distribuídas uniformemente, que suportem as cargas atuantes no plano transversal à abertura das trincas.

Apesar de fibras de vários tamanhos e de materiais distintos já terem sido incorporadas ao concreto, com fins variados, ainda não foi desenvolvido um modelo padrão que represente adequadamente a influência das fibras no mecanismo de propagação de fissuras. Para entender como a geometria e as propriedades das fibras afetam o comportamento do compósito à fissuração, é necessário considerar o mecanismo de como as fibras interagem com a matriz de concreto. Interpretações deste processo podem ser encontradas na literatura (LI e MAALEJ, 1996), sendo normalmente admitido que a eficiência relativa das fibras esteja inversamente relacionada ao seu tamanho e diretamente relacionada à uniformidade de sua distribuição (MOBASHER, STANG e SHAH, 1990).

Apesar da percepção de que fibras com características diferentes afetam de forma distinta o processo de propagação de fissuras, a maioria dos compósitos de matriz cimentícia, até hoje, foram reforçados com um único tipo de fibra. Nas últimas décadas, todavia, vem crescendo a consciência de que a utilização de combinações de fibras com características diferentes se constitui em uma alternativa interessante para a otimização, em diversos níveis (micro, meso e macro), do desempenho do compósito. Essa combinação tem sido denominada de hibridização do compósito. Hoje, admite-se, teoricamente, que o uso de dois ou mais tipos de fibras, combinadas adequadamente, pode resultar numa melhora das propriedades do compósito, levando a uma melhor resposta para diferentes solicitações e níveis de tensão. Cabe coletar evidências deste comportamento, que permitam modelar o mesmo. Colaborar neste sentido é o objetivo deste trabalho, como descrito no Capítulo 1. Para tanto, é necessário entender como se comporta um compósito híbrido.

3.2. COMPORTAMENTO DE COMPÓSITOS HÍBRIDOS

Xu, Magnani e Hannant (1998) observam que um compósito híbrido deve apresentar uma interação positiva entre as fibras incorporadas e as demais fases do compósito, de modo que o desempenho resultante exceda o que seria obtido com o emprego das fibras de forma isolada, gerando assim um efeito sinérgico.

Essa sinergia é uma consequência da combinação de fibras primárias, cujo objetivo principal é o acréscimo da capacidade portante e ductilidade do compósito após a fissuração da matriz, e de fibras ditas secundárias, cuja presença tem por objetivo controlar o processo de fissuração interna, retardando o desenvolvimento de fissuras.

Para atuar como reforço primário, as fibras necessitam interagir com os agregados, obedecendo a um critério de compatibilidade dimensional. Seu volume deve exceder o volume crítico, para que se obtenha um compósito com maior resistência e ductilidade.

Já quando são usadas como reforço secundário, as fibras podem ser menores e os teores empregados, mais baixos.

De acordo com Banthia e Gupta (2004), para que um compósito híbrido seja eficiente, a estratégia de combinação de fibras primárias e secundárias (e, eventualmente terciárias) deve ser pautada pelas respostas esperadas e características de cada uma das fibras componentes. Os autores destacam que se deve atentar para as seguintes questões:

- *Resposta constitutiva das fibras:* uma das fibras deve ser mais forte e apresentar maior rigidez, contribuindo com o acréscimo nas tensões que retardam a ocorrência da primeira fissura e incrementando a resistência última. Já o segundo tipo de fibra deve ser relativamente flexível e dúctil, conduzindo a uma maior rigidez, bem como a uma maior capacidade de deformação na zona de pós-fissuração, podendo essa última fornecer propriedades adequadas para o manuseio da mistura fresca.
- *Dimensões das fibras:* a utilização de uma fibra de menor dimensão, com capacidade de transpor a microfissura, ajuda a controlar o crescimento e retarda a coalescência de fissuras, o que conduz a um aumento da resistência à tração do compósito. A fibra de maior dimensão tem a finalidade de impedir a propagação de fissuras em um nível macro, resultando, portanto, em uma melhoria significativa na resistência à fratura do material compósito.

- *Função das fibras:* enquanto um tipo de fibra pode ser escolhido porque aprimora as propriedades do compósito nas primeiras idades, resultando em uma melhor trabalhabilidade e maior facilidade de produção no estado fresco, a outra fibra pode ser escolhida porque atua de forma a gerar benefícios nas propriedades mecânicas do compósito endurecido.

Conforme citam Jia e Shah (1994), é importante ressaltar que as trincas se desenvolvem a partir de pequenas fissuras distribuídas, descontínuas e finas, oriundas de falhas ou defeitos microestruturais, tais como poros ou efeitos de interface entre materiais. Com o aumento do nível de carregamento as fissuras coalescem até formar grandes descontinuidades no material, que vão evoluindo para formar as fissuras e trincas visíveis a olho nu.

Em matrizes não reforçadas, a coalescência da primeira microfissura, início do processo de nucleação da trinca, coincide normalmente com a carga máxima de ruptura do material. A partir de então as tensões tendem a se concentrar no vértice das aberturas das fissuras, provocando a propagação das mesmas.

A presença de uma quantidade considerável de fibras longas e finas, conhecidas como microfibras (que tipicamente apresentam diâmetros menores que 50 μm), inibe a nucleação e crescimento de fissuras. Estas microfibras atuam retardando o processo pelo qual as microfissuras (com espessura compreendida entre 1,3 μm e 10 μm e aproximadamente 30 mm de comprimento) se unem para dar origem a trincas de dimensões bem maiores, macroscópicas, chamadas microfissuras. A presença de microfibras não interrompe o aumento do comprimento das fissuras microscópicas, mas aumenta o gasto energético para que isto ocorra. A presença das mesmas resulta, ainda, em um mecanismo de união que enfraquece a propagação instável das trincas a partir do ponto em que as microfissuras começam a se unir.

Segundo Lawler, Zampini e Shah (2002), à medida que as deformações do material são incrementadas com o processo de propagação das fissuras em nível macroscópico, as fibras de maiores dimensões começam a agir de modo a impedir o seu crescimento. Com isso, o decréscimo da carga máxima é prolongado, provocando ganho de resistência, rigidez e ductilidade. A presença das microfibras pode alterar o modo de ruptura do compósito. Ao invés de uma ruptura por perda de monoliticidade da matriz, passamos a observar uma perda governada pela ocorrência de arrancamento ou fratura das fibras. A utilização de fibras mais longas, com mecanismos de ancoragem mais eficientes, melhora a ancoragem e

dificulta o arrancamento, fazendo com que as fibras possam desenvolver toda sua resistência, rompendo por esgotamento da capacidade de tração.

A fim de ilustrar o comportamento dos compósitos híbridos, Lawler, Wilhelm, Zampini e Shah (2003) desenvolveram o diagrama esquemático mostrado na Figura 3.1, que apresenta o processo dividido em três estágios distintos.

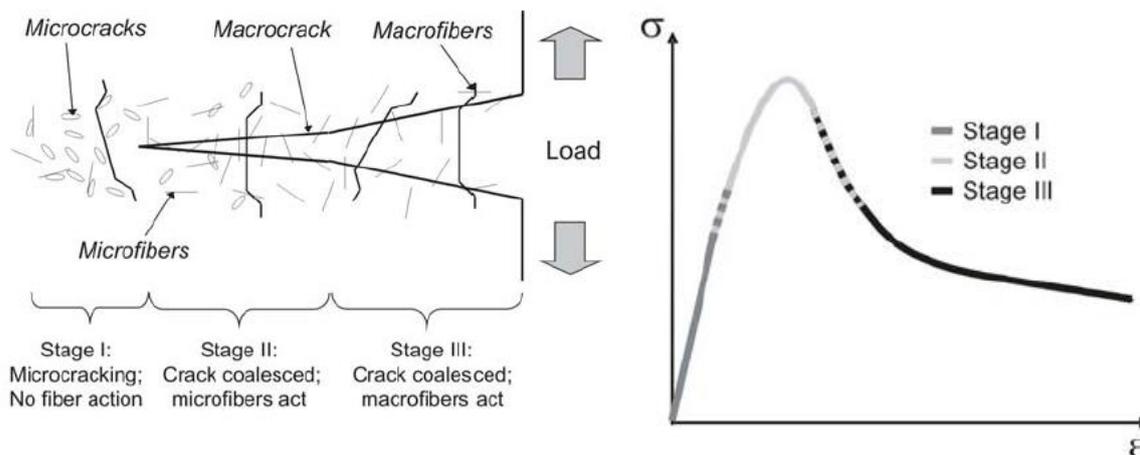


Figura 3.1: (a) Estágios de união das fissuras e ação das fibras; (b) Diagrama tensão vs deformação correspondente.

Na primeira fase, quando só existem microfissuras espalhadas pela matriz, a presença das macrofibras não exerce nenhum efeito e a eficiência das microfibras é bastante limitada. Quando as microfissuras começam a coalescer para a formação de fissuras mais bem determinadas, as microfibras passam a exercer um papel fundamental. Com a propagação destas fissuras, as macrofibras começam a ser solicitadas e assumem papel preponderante, “costurando” a matriz e aumentando a resistência à propagação das fissuras. Como evidenciado no diagrama tensão vs deformação da Figura 3.1 (b), as macrofibras normalmente atuam no incremento da tensão pós-pico, aumentando a resiliência do material.

Lawler, Wilhelm, Zampini e Shah (2003) destacam que as microfibras são efetivas na limitação da abertura das trincas que já tenham se nucleado. Porém, as mesmas não impedem que ocorram aumentos no comprimento das trincas.

Se as microfibras não forem mobilizadas antes das fissuras se unirem, a eficiência do compósito cai consideravelmente, e as mesmas se comportam de forma similar às macrofibras, mas com uma eficiência que pode ser bem menor, no que se refere à prevenção da formação das trincas.

Tendo em vista o mecanismo pelo qual as fibras interagem com o processo de fratura, percebe-se que o fator determinante na eficiência do compósito é o espaçamento entre as microfibras e não o seu tamanho. Obviamente, a utilização de fibras menores e mais finas favorece sua dispersão na matriz, reduzindo os espaçamentos entre fibras e dificultando a propagação de fissuras.

Além do espaçamento, o módulo de elasticidade das fibras também exerce um importante papel para determinar sua eficiência no compósito, pois indica qual a força necessária para provocar certo nível de deformação, que vai causar, eventualmente, o aparecimento e crescimento das fissuras.

3.3. PRINCIPAIS TRABALHOS DESENVOLVIDOS

Bentur e Mindess (1990, 2007) atribuem a Walton e Majumdar (1975) as primeiras investigações acerca dos benefícios da combinação de fibras na resistência à tração ou resistência ao impacto. Os autores estudaram os efeitos da hibridização de matrizes cimentícias com fibras de asbesto e carbono, bem como os efeitos de incorporação de polipropileno e vidro em testes de impacto de corpos de prova de concreto. Estes testes demonstraram que a resistência ao impacto foi mantida na presença de fibras de baixo módulo inseridas no compósito híbrido, mesmo depois de ensaios acelerados e exposição por um ano a 60°C. Este efeito mostrou ser significativo em compósitos híbridos com fibras de vidro e polipropileno.

Bentur e Mindess (1990, 2007) citam ainda, como trabalhos pioneiros neste campo, os estudos de Kobayashi e Cho (1982), que pesquisaram as vantagens da combinação de polietileno e aço, e do estudo de Hasaba et al (1984), que analisou dados experimentais de compósitos híbridos formados por polipropileno e aço.

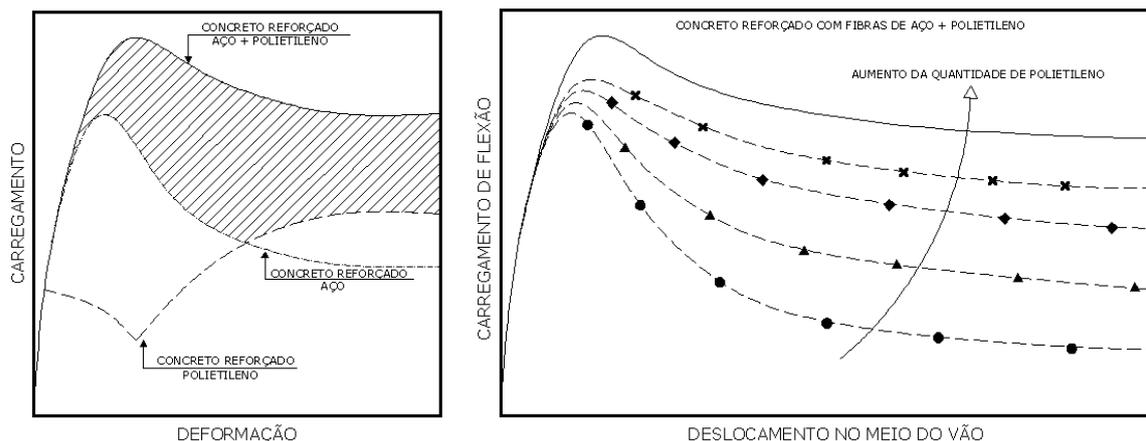


Figura 3.2: Descrição esquemática do comportamento de um compósito formado a partir da inserção de fibras de aço e fibras de polietileno.

Vários outros testes de corpos de prova com combinações de fibras são encontrados na literatura, evidenciando a ocorrência de uma sinergia positiva. Pesquisas apontam que a hibridização com fibras de aço e polipropileno aumenta a resistência à compressão do compósito (GLAVIND & AARRE, 1991; YEW e outros, 2011; TAMIL SELVI & THANDAVAMOORTHY, 2013; KONAPURE & KANGIRI, 2014, VAIRAGADE & KENE, 2012).

Já, de acordo com Feldman e Zheng (1993), a combinação de fibras com diferentes módulos de elasticidade contribui para que ocorra um ganho na resistência última e na capacidade de deformação no estágio pós-fissuração.

Diversas pesquisas apontam que as propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras híbridas são muito superiores, em comparação às mesmas propriedades de concretos reforçados com apenas um tipo de fibra – com destaque para o incremento na resistência à flexão (MARKOVIC e outros, 2003; YEW e outros, 2011; TAMIL SELVI & THANDAVAMOORTHY, 2013; KONAPURE & KANGIRI, 2014, VAIRAGADE & KENE, 2012).

Investigações realizadas por Stähli e Van Mier (2004), acerca do efeito de três diferentes tipos de fibras como reforço para concreto, levando em conta tanto as propriedades do estado fresco, como também os resultados de ensaios à flexão, indicaram que concretos contendo dois ou mais tipos de fibras são mais eficientes do que os concretos reforçados com uma única fibra.

Em estudos experimentais desenvolvidos por Sun et al (2001), os benefícios da utilização de fibras combinadas (aço, polipropileno e PVA) nas propriedades dos compósitos cimentícios híbridos, como a permeabilidade e retração na matriz foram avaliados – ver Figura 3.3.

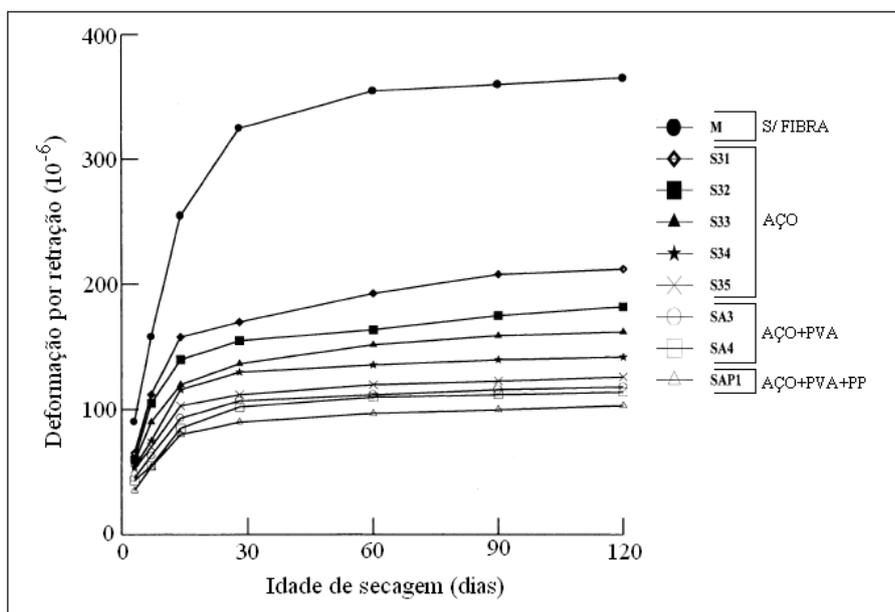


Figura 3.3: Propriedades de retração no concreto reforçado com adição híbrida de fibras (SUN et al, 2000).

O efeito combinado das fibras metálicas com fibras de PVA – de menor geometria e módulo de elasticidade – reduz as deformações oriundas da retração do concreto se comparado ao efeito resultante da adição de fibras metálicas somente e, conseqüentemente, o mesmo efeito foi observado quando uma terceira fibra – polipropileno – foi adicionada ao coquetel de fibras, reduzindo ainda mais as propriedades de retração da matriz. Os autores concluíram ainda que a combinação de diferentes formas e tamanhos de fibras incorporadas contribui para a redução da quantidade de fissuras no concreto, inibindo sua propagação nas mais diferentes escalas, bem como a diminuição de poros presentes entre as fases do compósito.

Banthia e Soleimani (2003) testaram, através de ensaios de compressão, vários tipos de compósitos produzidos com combinações de fibras, concluindo que compósitos híbridos baseados em uma fase de fibra de polipropileno e uma fase de fibra carbono produzem um maior nível de sinergia em termos de tenacidade em relação aos baseados em compósitos apenas com fibra de polipropileno. Do mesmo modo, foi notável o ganho no desempenho

mecânico de uma combinação híbrida de dois tipos de fibras de carbono – uma isotrópica de baixo módulo e outra de alto módulo.

Banthia e Gupta (2004) investigaram uma combinação híbrida ternária de macro e micro fibras de aço, polipropileno e carbono. Com base nos resultados de ensaios de resistência à flexão, os autores observaram que a máxima sinergia ocorria quando se combinavam macrofibras de aço com microfibras de polipropileno, sendo obtidos resultados muito positivos também com o emprego de macrofibras de polipropileno e microfibras de carbono.

Chen e Liu (2005) observaram que uma combinação adequada de fibras de carbono, aço e polipropileno tende a melhorar as propriedades do concreto à compressão, bem como a resultar numa melhor uniformidade da mistura, apesar de ocasionar uma redução na trabalhabilidade do compósito.

3.4. CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS POTENCIALMENTE ÚTEIS PARA GERAÇÃO DE COMPÓSITOS HÍBRIDOS

Como descrito no Capítulo 1, o projeto de pesquisa proposto prevê a análise de compósitos reforçados com fibras isoladas e combinações de fibras dispersas na matriz cimentícia. Para geração dos compósitos híbridos é necessário definir quais os tipos de fibra que seriam empregados. Para tanto, é necessário analisar as características de cada tipo de fibra, como discutido a seguir.

Bentur e Mindess (2007) observam que a otimização do desempenho de compósitos de matriz cimentícia pela combinação de diferentes tipos de fibras, sobretudo no que se refere à sua resistência e tenacidade, tem sido investigada por vários estudiosos. Analisando os estudos citados no item anterior, os pesquisadores envolvidos no tema utilizam, normalmente, combinações de fibras de asbestos, aço, carbono ou vidro, que apresentam módulo de elasticidade elevado, para incrementar a rigidez, com fibras de polipropileno e/ou polietileno, de reduzido diâmetro e que apresentam densidade menor e módulo de elasticidade mais baixo, cuja incorporação está mais voltada para o aumento da resistência pré-fissuração.

Considerando os resultados disponíveis na literatura, as experiências anteriores do Grupo de Pesquisa LEME/UFRGS relativas ao estudo de concretos com fibras e a disponibilidade

de fibras no mercado brasileiro, foram pré-selecionados cinco tipos de fibras para consideração como potenciais objetos de estudo: aço, carbono, aramida, vidro e polipropileno.

As fibras de asbesto foram desconsideradas, pois seu uso no Brasil está restringido, devido aos motivos explicitados no Capítulo 2. Já as fibras de polietileno não são usualmente comercializadas no país na forma de filamentos, sendo normalmente utilizadas na forma de tecidos para emprego em reforços de balística, próteses dentárias e mantas de impermeabilização, por exemplo. A aramida foi incorporada no conjunto de fibras potencialmente interessantes devido aos bons resultados obtidos em ensaios anteriores realizados no LEME/UFRGS (Bernardi, 2003).

A seguir, estão descritas as características básicas de cada um dos tipos de fibra considerados como potencialmente viáveis, conforme especificações dos fabricantes e resultados experimentais registrados na literatura.

3.4.1. Aramida

Bernardi (2003) observou que a incorporação de fibras de aramida ao concreto pode melhorar o desempenho mecânico destes compósitos cimentícios, trazendo benefícios como aumento na capacidade de carga, restrição da deformação sob cargas de impacto e acréscimo na ductilidade.

O estudo de fibras aramida se justifica na medida em que essas fibras apresentam certas propriedades atraentes, que explicam sua larga utilização nas indústrias química, mecânica, aeroespacial e subaquáticas, na produção de artigos balísticos, roupas antichama e partes de automóveis e de espaçonaves.

De acordo com Callister (1997), a aramida é quimicamente conhecida como poli-parafenileno-teraftalamida, e sua designação genérica decorre da junção dos termos poliamida-aromática. As fibras de aramida são polímeros semicristalinos, ou seja, compostos orgânicos formados pela ligação em cadeia de uma série de monômeros (segmentos), nos quais as moléculas são alinhadas na direção do eixo longitudinal das fibras, conferindo uma estrutura molecular com orientação perfeita, bastante estável e resistente, o que justifica a sua elevada resistência e rigidez.

Durante a síntese das fibras, as rígidas moléculas são alinhadas na direção longitudinal do material, como domínios de cristal líquido. Segundo Hancox e Mayer (1994), esta estrutura das fibras de aramida contribui para o seu desempenho relativamente fraco, quando submetida a esforços de compressão, e para que apresentem elevada retenção de água.

As fibras de aramida apresentam coloração amarelada e se caracterizam por um baixo peso específico e alta resistência à tração, em geral superior à do aço e à do vidro (YANG, 1993, apud BERNARDI, 2003; BERNARDI e SILVA FILHO, 2006). Além disso, não conduzem eletricidade, tampouco apresentam reações com agentes químicos, como ácidos, bases ou água do mar, sendo ainda resistentes a impactos e elevadas temperaturas (ROCHA, 2002, apud BERNARDI, 2003). Diante destas vantagens, seu emprego em matrizes cimentícias se torna viável, apesar do elevado custo relativo, frente às fibras de aço e polipropileno.

Criadas pela pesquisadora Stephanie Kwolek, as fibras de aramida foram introduzidas no mercado em 1965, pela companhia Du Pont, e apenas em 1972 tornou-se comercialmente disponível. O Kevlar – nome pelo qual ficou conhecida a fibra de aramida – foi originalmente desenvolvido com a finalidade de reforçar a cinta dos pneus radiais, passando, porém, a ser aplicada em cabos e artefatos destinados à confecção de embalagens de segurança, terminando por ser empregada em diversas áreas e funções. As marcas comerciais mais conhecidas atualmente são o Kevlar e o Nomex, produzidas pela Du Pont, a Technora e o Conex, produzidas pela Teijin e a Twaron, produzida pela Akzo.

Conforme Bernardi (2003), as fibras de aramida são habitualmente classificadas, em termos estruturais, como pára-aramidas (além do Kevlar, também representadas pelas marcas comerciais, Technora e Twaron), que apresentam esqueleto molecular linear; e meta-aramidas (representadas pelas marcas comerciais Conex e Nomex), cuja estrutura molecular se apresenta na forma de zigue-zague. Ambas podem ser fornecidas em diversas formas, tais como mantas e tecidos (a), fios (b), polpa (c) e mantas (d), como mostrado na Figura 3.4.

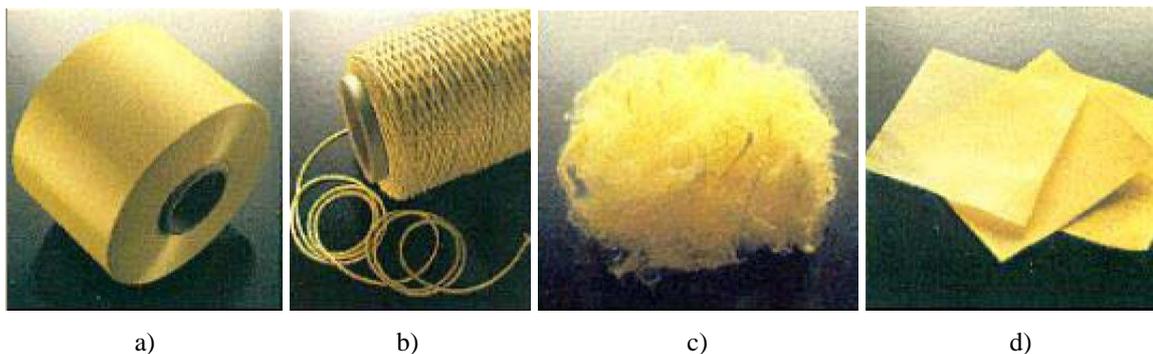


Figura 3.4 – Aparência de diversas formas de fornecimento da fibra aramida.

Para Tanesi e Agopyan (1997), embora as fibras de aramida não sejam muito suscetíveis ao meio alcalino, é relevante atentar para a possibilidade de problemas de aderência, devido à precipitação de produtos no interior da fibra. Outras desvantagens do seu emprego incluem a dificuldade no corte, devido à elevada resistência tangencial, que demanda o uso de ferramentas especiais. Além disto, apresentam uma característica higroscópica, o que pode criar problemas relacionados à aderência ou à durabilidade, uma vez que a presença da água na superfície da fibra resultará, em longo prazo, em um inchamento das partículas constituintes desta. A quantidade de umidade passível de ser absorvida por uma fibra depende de vários fatores, tais como a morfologia do núcleo e sua ligação com a superfície da fibra, as características das ligações ao longo da seção transversal da fibra, as impurezas químicas presentes e a umidade relativa.

3.4.2. Polipropileno

Como observam Bentur e Mindess (2007), a adição de fibras de polipropileno em compósitos de base cimentícia, como elemento de reforço à tração, tem obtido cada vez mais destaque.

Félix (2002) define a fibra de polipropileno como um polímero termoplástico derivado do monômero C_3H_6 , que pode ser obtido através do tratamento do petróleo, pela síntese de elementos orgânicos.

Bentur e Mindess (2007) explicam que este material apresenta uma microestrutura complexa, constituída por longas cadeias de elevado peso molecular e desenvolvimento helicoidal, o que o caracteriza como um compósito de matriz amorfa reforçada por microfibrilas cristalinas.

Como mencionado nas pesquisas desenvolvidas por Félix (2002) e Bentur e Mindess (2007), além da diversidade de tamanho, tipos e propriedades (inclusive mecânicas), são várias as formas com que são produzidas as fibras de polipropileno: monofilamentos (com apenas um filamento contínuo) multifilamentos ou feixes (formados pela união de pelo menos dois monofilamentos contínuos) ou filmes fibrilados.

Quanto à forma, Bentur e Mindess (2007) comentam que essas fibras podem assumir o formato de filamentos cilíndricos contínuos, filmes e fitas, que podem ser dispostas na forma de malhas de estrutura de seção retangular. A conformação de fibras de polipropileno fibrilado em estrutura de malha, segundo Félix (2002), propicia uma elevação na adesão entre a fibra e a matriz, devido ao seu intertravamento.

Apesar de considerar que as fibras de polipropileno podem atuar como reforço primário ou secundário de materiais compósitos de matrizes cimentícias, Félix (2002) observa que, mesmo apresentando boa resistência à tração, a maioria das fibras de polipropileno possui baixo módulo de elasticidade, em comparação com a matriz de cimento.

Por isto, segundo Lobão (2005) e Venâncio e outros (2013), o emprego das fibras de polipropileno não contribui significativamente na resistência do concreto tracionado. Por outro lado, sua incorporação colabora na ampliação da capacidade de deformação, rigidez, resistência ao impacto e no controle do processo de fissuração.

Outra importante aplicação das fibras de polipropileno em matrizes cimentícias, cuja eficiência é corroborada pelos estudos de Padron e Zollo (1990), consiste na sua mistura a misturas frescas de concreto, visando diminuir a ocorrência de fissuras de retração plástica.

As fissuras de retração plástica, segundo Wang, Surendra e Phuaksuk (2001) são provocadas pela alteração de volume ocorrido no concreto em estado plástico, ocorrendo antes do estado endurecido. Esse aumento de volume tem relação com as baixas taxas de exsudação, a alta retração autógena (retração que ocorre sem troca de massa com o meio ambiente, ou seja, sem que haja perda de água) e as elevadas pressões capilares oriundas do teor de finos dos materiais cimentícios. Bayasi e Dhaheri (2002) atribuem à presença das fibras de polipropileno uma redução da quantidade de água de exsudação, em virtude da obstrução dos vazios e capilaridades, normalmente encontrados no concreto.

A presença das fibras secundárias de polipropileno aumenta a coesão da mistura em estado fresco, o que, segundo Félix (2002), minimiza o processo de fissuração ocorrido no estágio

plástico e nas primeiras horas de endurecimento do concreto. Isto se dá, de acordo com Tanesi e Agopyan (1997), porque o concreto em estado fresco apresenta baixa resistência e baixo módulo de elasticidade. Neste estágio, as fibras de polipropileno, aleatoriamente dispersas na massa, em grande quantidade, passam a ter uma atuação eficaz como elemento de reforço na matriz.

Bentur e Mindess (2007) destacam que, além de serem hidrófugas, as fibras de polipropileno apresentam outras significativas vantagens, como alta resistência a álcalis, elevado ponto de fusão, baixa massa específica, reduzido risco de corrosão, boas propriedades de isolamento térmico (decorrente de sua baixa condutividade) e, por fim, baixo custo.

Suas maiores limitações são a reduzida resistência ao fogo, a sensibilidade à luz solar e à presença de oxigênio, a reduzida capacidade de aderência à matriz e, conforme comentado anteriormente, o baixo módulo de elasticidade.

Hannant (2002) e Lima (2005) acrescentam, como uma possível vantagem do emprego dessas fibras, a capacidade do aumento de resistência ao fogo. Como a fibra vaporiza antes dos 300°C, reduzindo consideravelmente de volume, a mesma gera canais que permitem o trânsito de vapores de água, o que contribui na redução das tensões internas.

3.4.3. Vidro

Pode-se considerar que a história das fibras de vidro começou em 1836, quando foi patenteado na Europa um método de tecer vidro maleável. Levou praticamente um século até que esse material ressurgisse no mercado mundial, quando passou a ser utilizado em isolamento de cabos e condutores elétricos. A partir de 1940, o desenvolvimento das resinas sintéticas permitiu a formação dos primeiros compósitos reforçados com fibras de vidro, promovendo diversos novos usos e gerando uma forte aplicação do mercado desse tipo de fibra (SBRT, 2006 apud GARCEZ, 2007).

A fibra de vidro é um dos materiais mais difundidos na fabricação de materiais compósitos. Como todos os tipos de fibras, a mesma apresenta vantagens e desvantagens. Dentre as várias aplicações, seu emprego na construção civil tem sido comumente voltado à produção de compósitos de baixo a médio desempenho. Apesar da fragilidade do material constituinte, propriedades como o baixo coeficiente de dilatação térmica,

resistência mecânica, um grande alongamento na ruptura e a facilidade de processamento, fazem com que as fibras de vidro atendam satisfatoriamente a algumas demandas específicas do mercado de construção civil.

De acordo com Chandramouli e outros (2010), as fibras de vidro contribuem na redução do escoamento, melhorando a homogeneidade e diminuindo a probabilidade de ocorrência de fissuras.

Casati (2002) considera que essas fibras possuem bom desempenho, quando inseridas em compósitos submetidos a altas temperaturas, uma vez que não são inflamáveis. O autor salienta, ainda, que, nessas condições, elas não absorvem umidade, bem como, não apresentam alterações na geometria e nas propriedades mecânicas. Além disso, possuem um baixo custo e não liberam partículas ou vapores nocivos.

O vidro, como matéria-prima, é um material transparente, relativamente resistente, inerte e biologicamente inativo, gerado a partir de uma grande variedade de técnicas industriais. A técnica mais usada para sua produção é o aquecimento de areia de quartzo, material facilmente encontrado na natureza, até seu ponto de fusão, com posterior resfriamento ao ar. As fibras de vidro tradicionais, fabricadas passando a massa fundida através de pequenos orifícios, apresentam superfícies lisas, o que tende a prejudicar a aderência da fibra e, conseqüentemente, o desempenho de compósitos, no que diz respeito ao controle da propagação de fissuras (BERNARDI, 2003).

O vidro na forma de fibra é bastante resistente. Quando embutida em uma matriz de plástico, é produzido um compósito com uma resistência específica muito alta e, dependendo das características da matriz, com elevada inércia química, o que resulta em um compósito resistente a vários ambientes corrosivos (CALLISTER, 1997).

De modo geral, as fibras de vidro possuem coloração esbranquiçada, elevada resistência e baixo custo, sendo estas suas principais vantagens. Suas desvantagens residem, sobretudo, nos seus baixos índices de dureza e de resistência à fadiga. Convém, ainda, destacar a possibilidade de deterioração, quando exposta a condições severas de umidade, e o fato de ser suscetível a álcalis.

Com relação à suscetibilidade a álcalis, a maioria das fibras de vidro convencionais apresenta uma resistência insatisfatória à alcalinidade da matriz cimentícia, o que tende a

prejudicar as propriedades mecânicas, provocando a perda da flexibilidade e da resistência à tração das fibras, fazendo com que o compósito se torne frágil.

Formulações especiais, resistentes a álcalis, foram desenvolvidas ao longo do tempo. Estão disponíveis hoje, comercialmente, vários tipos de fibras de vidro, que podem ser divididas, genericamente, em três categorias: E-glass¹, C-glass² e S-glass³. Conforme Daniel e Isha (1994), os tipos mais usados atualmente são o E-glass, que recebe adições para se tornar mais resistente a álcalis, e o S-glass.

Purnell et al (2000) consideram que a deterioração das fibras de vidro em meio alcalino é um mecanismo complexo. Segundo estes autores, o processo de hidratação da matriz cimentícia se estende por alguns anos, durante os quais se percebe a formação de cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dispostos sobre e em volta das fibras. A presença dos cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ provoca a perda de flexibilidade das fibras de vidro e, por conseguinte, do material compósito. A durabilidade reduzida das fibras de vidro em argamassas de cimento, segundo os autores, está relacionada a, pelo menos, três fatores: corrosão das fibras pelo óxido de cálcio, precipitação dos produtos da hidratação e densificação da matriz na interface, o que diminui também a flexibilidade das fibras.

Como alternativas para o combate desse processo de degradação das fibras de vidro no compósito, Purnell et al (2000) consideram necessário o emprego de fibras que apresentem alta resistência aos álcalis, bem como o aprimoramento de sua superfície e das matrizes cimentícias.

3.4.4. Aço

Dentre os elementos de reforço, as fibras de aço têm merecido destaque, sendo as mais utilizadas em argamassas e concretos. Segundo Cánovas (1997), isto se deve à sua elevada resistência mecânica, seu alto módulo de elasticidade, à boa aderência com a pasta de cimento, bem como à facilidade de mistura na massa de concreto fresca.

¹ *Electrical*: possuem essa denominação por terem sido originalmente desenvolvidas para serem utilizadas como material isolante em instalações elétricas, devido à sua baixa condutividade elétrica.

² *Chemical*

³ *High Tensile Strength*: fibras de vidro de alto módulo.

No Brasil, foi elaborada uma norma de especificação para fibras de aço, a ABNT NBR 15530:2007, com determinação da tipologia e classificação das fibras de aço, segundo o fator de forma e a resistência do aço (FIGUEIREDO, 2008; FIGUEIREDO, 2010).

Para Balaguru e Shah (1992), o propósito da adição de fibras de aço em matrizes de concreto, semelhantemente ao que ocorre nos casos das demais fibras apresentadas, é o de agregar melhores características mecânicas ao compósito, permitindo um maior controle do mecanismo de fissuração, além de melhorar a resistência à flexão, ao impacto, à fadiga, à compressão e ao cisalhamento, atuando na modificação do modo de ruptura do compósito, ou seja, que sua resposta, após o aparecimento das trincas, passe de quase frágil para dúctil. Além dessas vantagens, Balaguru e Shah (1992) salientam que o emprego de fibras metálicas como reforço amplia a capacidade de absorção de energia do compósito.

As fibras de aço podem ser obtidas por diversos processos, sendo o mais comum a sua fabricação por corte de arame trefilado de aço de baixo teor de carbono (CÁNOVAS, 1997). Embora a maioria das fibras de aço tenha como matéria prima o aço-carbono ordinário, é possível fabricar fibras a partir de ligas metálicas especiais, que apresentam maior resistência à corrosão e maior adequação para emprego em concretos refratários e em estruturas marítimas.

Esse processo de produção das fibras de aço pode dar origem a diferentes formatos e tamanhos de fibras, que podem, ainda, ser lisas ou corrugadas. As mesmas se subdividem, ainda, em fibras com e sem ancoragem geométrica (que apresentam ganchos, desvios de linearidade nas pontas, aumento de seção nas extremidades ou outros detalhes que objetivam, principalmente, a elevação da aderência da fibra à matriz). Segundo Bentur e Mindess (2007), as fibras de aço onduladas e deformadas podem apresentar essas ondulações tanto ao longo do comprimento, quanto apenas nas extremidades. Além disso, as fibras de aço podem ser coladas umas às outras, com a utilização de colas solúveis em água, que possam se dissolver no decorrer do processo de mistura, formando feixes de 10 a 30 fibras, a fim de facilitar o manuseio e a sua mistura no concreto. Essa disposição em formato de pente é, em geral, recomendada para fibras de diâmetros maiores.

As variações observadas na geometria das fibras são decorrentes da evolução do processo de produção industrial das fibras e/ou da necessidade de obtenção de um aprimoramento da ancoragem na matriz de cimento.

O boletim ACI 544.1R-96 (ACI, 2004) apresenta alguns dos modelos mais comuns de fibras de aço produzidas. As fibras de seção circular são geradas a partir do corte de arames com diâmetro da ordem de 0,25 a 1,0mm, e comprimento no intervalo entre 6,4 e 7,6mm, sendo curtas o bastante para se dispersarem de forma aleatória numa mistura de concreto fresco. As fibras achatadas, por sua vez, apresentam seção transversal retangular, com dimensões oscilando entre 0,15 e 0,41mm de espessura, e entre 0,25 e 0,90mm de largura.

Entretanto, dada a expansão da utilização do concreto reforçado com fibras de aço que já ocorre no Brasil há vários anos e a ausência de critérios mínimos para a produção de fibras de aço adequadas para este fim, a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, aprovou a NBR 15530:07 “Fibras de aço para concreto – Especificação”, que visa ao estabelecimento de parâmetros de classificação para as fibras de aço de baixo teor de carbono, assim como dispõe sobre os requisitos mínimos de forma geométrica, tolerâncias dimensionais defeitos de fabricação, resistência à tração e dobramento (FIGUEIREDO, 2009). Entretanto, Figueiredo (2009) afirma que esta norma não pretende regular a verificação do desempenho da fibra de aço no concreto, visto que este desempenho final do CRFA depende de uma gama de fatores ligados às características das fibras e do concreto, como também de sua interação (FIGUEIREDO, 2005).

Garcez (2002) comenta que a matéria-prima e o processo de produção das fibras de aço influenciam a obtenção de algumas propriedades desejáveis, como a tensão de tração, que pode variar de 345 a 2100 MPa; o módulo de elasticidade, que vai desde 200 até 210 GPa; e a deformação específica na ruptura, que varia dentro do intervalo de 0,5% a 35%. Ademais, as máximas tensões resistidas pelas fibras de aço variam entre 1.000 e 3.000 MPa, ao passo que suas deformações específicas últimas ficam entre 3,0 e 4,0%. A autora menciona, ainda, que a resistência à tração mínima requerida numa fibra deste tipo varia de acordo com a norma consultada, sendo de 345 MPa para a ASTM A820, e de 552 MPa, para a JSCE.

A despeito das várias características positivas das fibras de aço, o ACI (ACI 544.1R-96, 2004) nota que a frequência com que estas fibras são utilizadas pode, também, ter relação com a quantidade de pesquisas que as empregam ou simplesmente, com o fato de que as mesmas são mais acessíveis, em termos de mercado, comparadas a outros tipos de fibras.

3.4.5. Fibra de Carbono

Os primeiros registros de utilização de fibras de carbono datam de 1880, quando filamentos de carbono foram utilizados por Thomas Edison em seus experimentos para o desenvolvimento da lâmpada incandescente⁴.

O carbono é um elemento químico e sua forma mais estável, à temperatura ambiente, é o carbono cristalizado, ou grafite. As fibras de carbono são compostas de uma mistura de carbono nas formas amorfa e cristalina. Segundo Askeland e Phulé (2003), as mesmas são produzidas através de um processo de carbonização ou pirólise de um filamento orgânico, a temperaturas que variam de 1.000°C e 3.000°C. Ou seja, resultam da decomposição, pelo calor, de algum material rico em carbono, que retém a sua forma fibrosa através de tratamentos térmicos que resultam em carbonização com alto resíduo carbonáceo.

As fibras de carbono são normalmente produzidas a partir de três materiais orgânicos: rayon (polímero celulósico), poliacrilonitrila (PAN) e piche (alcatrão de petróleo ou de carvão). Os processos utilizados para fabricação e as características das fibras de carbono produzidas dependerão do material base usado para produzi-las.

O processo envolve uma série de tratamentos: estabilização, carbonização, grafitação e tratamento superficial. Para se produzir uma fibra carbônica, é necessário um processo de tratamento térmico e condições controladas de tensão, atmosfera, tempo e principalmente temperatura. Dependendo do tipo de tratamento recebido, é possível fabricar fibras de carbono em diversas configurações de resistência e módulo.

Em geral, as fibras de carbono apresentam coloração escura. Conforme especificado no Boletim 440.4R-04 do *American Concrete Institute* (ACI, 2004), fibras de carbono são estruturas nas quais os átomos de carbono são arranjos em planos paralelos, segundo um arranjo hexagonal. Os filamentos de fibra podem ser produzidos com orientações específicas, através de intervenções em fases críticas das etapas de produção. As fibras com maiores módulos de elasticidade podem ser obtidas com a utilização de temperaturas mais elevadas, durante o processo de fabricação. Contudo, o emprego de temperaturas mais elevadas faz com que a resistência à tração seja reduzida.

⁴ Joseph Wilson Swan foi o primeiro pesquisador a construir uma lâmpada incandescente, 1879, mas ele não conseguiu manter o vácuo dentro do bulbo da lâmpada. Thomas Edison resolveu este problema usando um filamento de carbono para iluminar o bulbo que funcionou continuamente por 40h. No final de 1880, ele produziu uma lâmpada de 16 watts que pôde ser utilizada por 1500 horas. A partir daí começou a comercializar sua invenção e obteve a patente da manufatura de filamentos de carbono para utilização em lâmpadas incandescentes (apud GARCEZ, 2007).

Além das aplicações na Engenharia Civil, as fibras de carbono têm inúmeras outras aplicações na indústria aeroespacial e automotiva, assim como em barcos, bicicletas e equipamentos esportivos, onde a elevada resistência à tração, aliada ao baixo peso, são requisitos fundamentais.

Diversas razões fazem das fibras de carbono uma boa alternativa para a formação de compósitos estruturais reforçados. Além de apresentar alto módulo de elasticidade e elevada resistência à tração, proporcionando boa rigidez ao compósito, as fibras de carbono possuem altíssima taxa resistência–peso, podendo ser cinco vezes mais leves que o aço, por exemplo, bem como apresentam grande durabilidade e facilidade de assumir formas complexas. De acordo com LE e outros (2013), a adição de fibras de carbono ao concreto melhoram a capacidade de deformação do concreto.

No aspecto químico, não são afetadas por solventes, ácidos ou bases à temperatura ambiente. Quando submetidas a elevadas temperaturas, são capazes de manter propriedades como módulo de elasticidade e resistência a esforços de tração, mas oxidam e se degradam.

A Tabela 3.1, contém valores característicos das propriedades básicas das fibras de carbono.

Tabela 3.1: Propriedades das fibras de carbono (ACI 440.2R-02, 2002)

| Fibra de Carbono | Módulo de Elasticidade (GPa) | Resistência à tração (GPa) |
|---------------------------|---|---------------------------------------|
| Uso geral | 220-240 | 2,05 - 3,79 |
| Resistência Elevada | 220-240 | 3,79 – 4,82 |
| Resistência Ultra-Elevada | 220-240 | 4,82 – 6,20 |
| Módulo Elevado | 340-520 | 1,72 – 3,10 |
| Módulo Ultra-Elevado | 520-690 | 1,38 – 2,40 |

Uma questão importante sobre este tipo de fibra, todavia, diz respeito ao seu elevado custo, que se constitui num forte obstáculo à sua aplicação. Segundo Hancox e Mayer (1994), quanto mais alto o módulo de elasticidade das fibras, melhor deve ser o alinhamento das fibras e mais elevado é o custo de produção do compósito.

3.5. ASPECTOS IMPORTANTES PARA SELEÇÃO DAS FIBRAS

Tendo discutido, no item anterior, as principais características de cada um dos tipos de fibra considerados como potencialmente mais atrativas para o desenvolvimento do presente estudo, pretende-se neste item, fazer uma análise comparativa, buscando estabelecer critérios que justifiquem a escolha das fibras selecionadas para este estudo.

Porém, critérios sólidos para seleção de fibras, e combinação de fibras para geração de compósitos híbridos, ainda necessitam ser desenvolvidos mais profundamente. Para tanto, foi necessário levar em conta diversos fatores para definir quais as fibras que foram usadas na composição final, como a influência da fibra na trabalhabilidade da mistura e na distribuição dos demais componentes na mesma, a alteração da estrutura da mistura decorrente da presença das fibras, o que gera novos arranjos internos, etc.

Apesar da falta de um procedimento específico de seleção de fibras, foram adotadas algumas premissas para a seleção das fibras a empregar neste estudo. Decidiu-se trabalhar com fibras de módulos bem distintos, com diferentes geometrias.

Com o objetivo de minimizar o efeito de perturbação da fibra sobre o arranjo dos agregados na mistura, optou-se em utilizar fibras flexíveis como reforço, com exceção da fibra metálica, que é uma fibra rígida. É sabido que a inclusão de fibras rígidas ao concreto exerce um efeito de perturbação, afastando os grãos dos agregados, enquanto que as fibras flexíveis se deformam e contornam os grãos. O efeito da adição é abordado por De Larrard (1999). Apesar de rígidas, se essas fibras forem curtas o suficiente, elas não perturbarão significativamente o arranjo dos grãos de agregados, podendo se ajustar nos vazios dos grãos maiores. A adição de fibras longas causa um maior efeito de perturbação nesta disposição dos grãos. Sabe-se ainda que as fibras rígidas permanecem com sua configuração original, provocando essa interferência entre os agregados e ao seu redor. Isso não acontece com as fibras flexíveis, que se moldam entre os contornos dos agregados, não perturbando a distribuição dos mesmos.

Embora as fibras possam, de fato, produzir melhorias no comportamento do concreto, é necessário ter uma visão realista quanto ao que realmente se pode esperar delas, em termos de custo necessário para utilizá-las como reforço de estruturas de concreto. Dependendo de seu tipo, as fibras são relativamente caras, provocando questionamentos quanto ao seu emprego em benefício do desempenho de uma estrutura de concreto com fibras. Associada

ao custo elevado das fibras, a falta de informações técnicas e estudos específicos sobre as suas características dificulta a sua utilização em maiores escalas.

A Figura 3.5 representa as margens de preço estimado para cada fibra pré-selecionada. Assim, é possível observar que as fibras de carbono e aramida são as mais caras, enquanto que as fibras de aço e polipropileno, bem como as fibras de vidro do tipo *E-glass*, são mais acessíveis, financeiramente.



Figura 3.5: Preço de 01 kg de fibra.

Vinculado ao preço, é importante avaliar as principais características das fibras, que podem ser visualizadas no diagrama de parâmetros de influência, apresentado no esquema a seguir – Fig. 3.6. A partir destas informações, pretende-se avaliar e justificar a escolha dessas fibras.

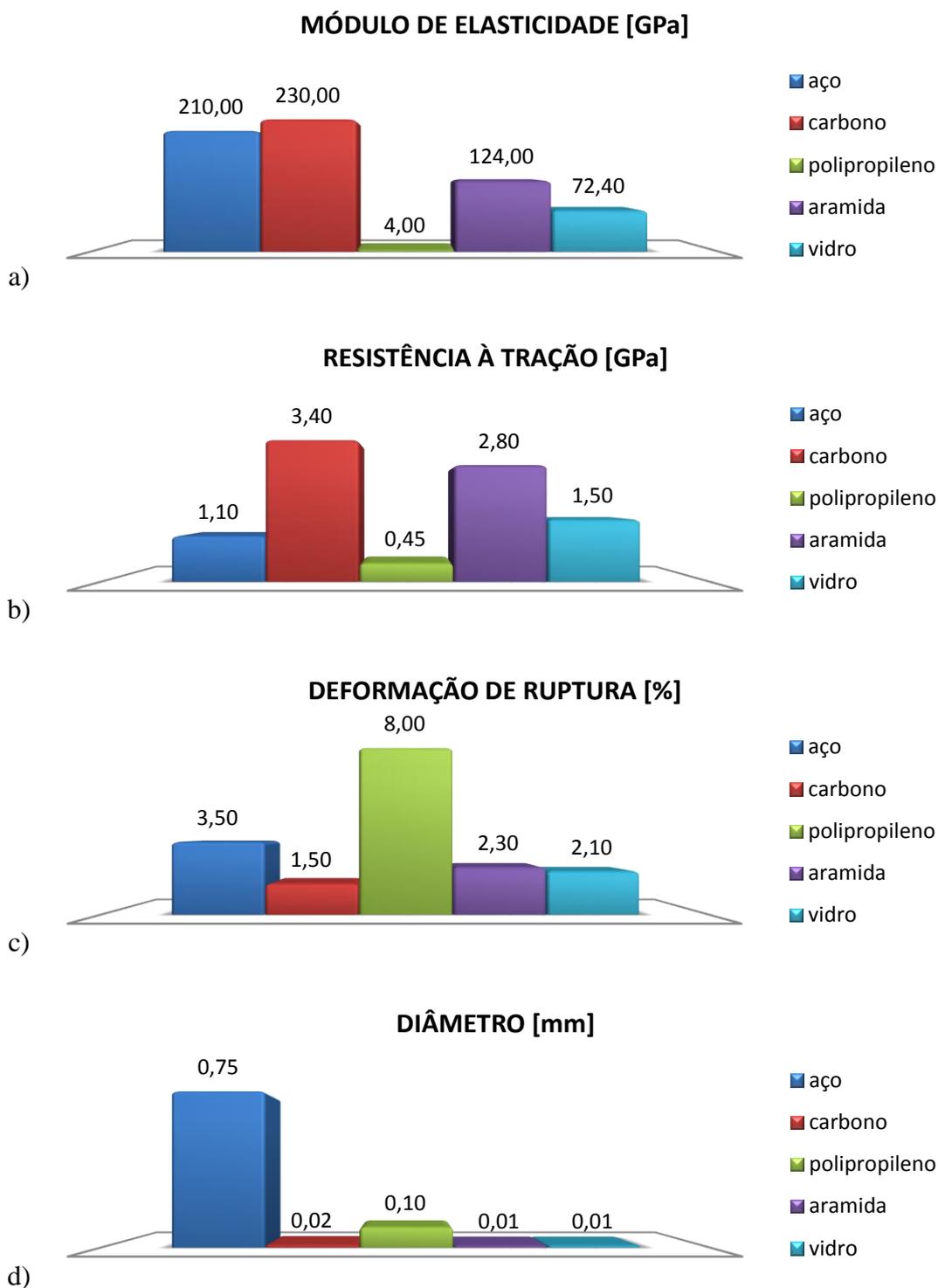


Figura 3.6 – Diagrama de parâmetros de influência das fibras.

Analisando os dados disponíveis decidiu-se trabalhar com as fibras metálicas, carbono e de polipropileno.

As fibras de aço foram escolhidas por serem as mais difundidas na área de reforço de matrizes cimentícias, em virtude dos inúmeros benefícios e a importância econômica deste material. As vantagens do emprego do concreto reforçado com fibras de aço são bem conhecidas do meio técnico, sendo conhecidas como fibras destinadas ao reforço primário da matriz, uma vez que desempenham uma função além do controle da fissuração. Assim como todas as fibras que apresentam alto módulo de elasticidade, as fibras de aço dificultam a propagação das fissuras, permitindo uma redistribuição dos esforços no material. Não obstante à sua rigidez, que prejudica o arranjo dos agregados no interior da estrutura, a fibra de aço propicia uma grande vantagem de acréscimo da capacidade portante pós-fissuração do compósito. Dentro do escopo do estudo, as mesmas representam macrofibras de alto módulo de elasticidade.

A principal vantagem de utilizar as fibras de carbono consiste no fato de que a mesma também apresenta valores elevados de propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e resistência à tração), mas tem dimensões muito reduzidas, em comparação com a fibra de aço. Ou seja, estas fibras se comportam como microfibras com um alto valor de módulo, equivalente ao do aço. Por isto, foi muito interessante mantê-las, apesar de seu alto custo. Além de quimicamente inertes, cabe salientar que estas fibras têm um manuseio mais fácil, comparadas às fibras de aramida e vidro, que são mais difíceis de cortar e manipular.

As fibras de vidro possuem uma resistência à tração e módulo de elasticidade mais baixa e um baixo custo. Além disto, apresentam elevado peso específico e capacidade de deformação reduzida. As mesmas poderiam ser enquadradas como micro ou mesofibras com baixo módulo.

As fibras de aramida, por sua vez, possuem propriedades mecânicas vantajosas, como uma resistência à tração elevada, mas apresentam baixa capacidade de se deformar até a sua ruptura. É importante ressaltar a excelente tenacidade quando inseridas no compósito, contribuindo com bons resultados em situações de ações de choque ou impacto, o que lhe confere uma posição de destaque. Porém, na presente pesquisa, são visados ensaios estáticos, não levando em consideração efeitos de inércia ou dinâmicos. Além do mais, o corte de seus fios, oriundos de tecidos pré-fabricados, é extremamente complicado, o que torna inviável, à medida que se pretende empregar filamentos de iguais comprimentos, mesmo apresentando diâmetros muito pequenos. Esse fenômeno está vinculado à sua excelente resistência ao cisalhamento. Aliado aos fatores citados, cabe salientar o custo de

produção também elevado, tanto em situações simples como as de aplicação de tecidos ou situações complexas nas quais os filamentos são incorporadas à matriz do compósito.

No caso das fibras de polipropileno, essas são inertes e compatíveis com todo o tipo de cimento. Esta inerticidade faz com que as fibras de polipropileno sejam bastante resistentes aos ataques da maioria dos agentes químicos. O custo reduzido do material no mercado é uma vantagem pertinente quando se pretende empregá-la como reforço da matriz. O baixo módulo de elasticidade e reduzida resistência à tração, são alguns pontos fracos destas fibras, mas a alta deformação na ruptura a torna interessante na aplicação em compósitos cimentícios, onde um acréscimo de desempenho promovido pelo aumento da deformabilidade é desejável. É pertinente destacar que o reforço da matriz em termos de capacidade de acumular energia mesmo após o processo de propagação de trincas não é o foco principal do emprego desta fibra. Mais um motivo em destaque na opção pelas fibras de polipropileno é o combate, ou no mínimo, a redução das fissuras oriundas de retração plástica.

Sabe-se que os mecanismos de pressões nos poros capilares desempenham papel importante na redução da retração e, conseqüentemente, das fissuras. Mas, as fibras, de um modo geral, são também responsáveis pela redução dos efeitos danosos da retração (PADRON e ZOLLO, 1990). Particularmente, as fibras de polipropileno, como material de reforço, atuam perfeitamente nos estágios de retração da mistura, isto é, nas primeiras idades quando o módulo de elasticidade da fibra é superior ao da pasta de cimento.

Tendo em vista as considerações acima, as fibras de polipropileno são uma opção muito atraente e, por isso, serão utilizadas na tentativa de produzir um compósito híbrido de boa qualidade.

O levantamento das características destas fibras tem por objetivo a identificação da dosagem de um coquetel de fibras (associações híbridas) que gere um compósito cimentício final com propriedades eficazes e custos aceitáveis na construção civil.

Consta no Capítulo 4, a descrição da metodologia de pesquisa empregada, na qual é proposto o procedimento experimental para determinação destas propriedades que venham a ajudar na obtenção do compósito de fibras híbridas. Além disso, é feita uma breve apresentação dos materiais empregados e dos ensaios de caracterização adotados.

MÉTODOS E MATERIAIS

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Como mencionado anteriormente, a presente pesquisa tem por principal objetivo verificar as vantagens e desvantagens do desenvolvimento de compósitos estruturais de base cimentícia reforçados com coquetéis de fibras de diferentes características.

A proposta de trabalho está focada na determinação de propriedades mecânicas, buscando oferecer subsídios para a definição de critérios adequados para formulação e dimensionamento de estruturas com essas características; bem como para a geração de dados confiáveis para confecção de modelos numéricos fundamentados em Métodos de Elementos Finitos, Discretos ou de Contorno.

Com o intuito de alcançar os objetivos propostos descritos anteriormente, bem como avaliar o comportamento de fissuração do concreto reforçado com combinações de fibras por meio de dados experimentais, foi desenvolvido o programa experimental, que será detalhado na sequência.

4.2. ESTRATÉGIA DE PESQUISA

Lawler et al (2003) consideram que a observação do processo de fratura é o método mais básico para a compreensão do mecanismo de fissuração em concretos reforçados com fibras, embora seja praticamente inviável, visto que é a evolução das microfissuras, pouco detectável, que governa esse processo. Diante dessa limitação, os mesmos recomendam que se avalie a influência de cada tipo de fibra no mecanismo da fratura dos compósitos de forma comparativa.

Pode-se estender esta estratégia para o estudo de compósitos híbridos de fibras. Ou seja, a variação no desempenho alcançado quando se combinam diferentes tipos de fibras será obtida por meio da comparação dos resultados de uma série de ensaios mecânicos, aos

quais serão submetidas amostras dos diversos compósitos gerados pela variação na proporção de fibras.

Portanto, para o desenvolvimento do programa experimental deste trabalho, considerou-se adequado propor a realização de diferentes ensaios em corpos de prova de concreto reforçado com fibras isoladas e combinadas, nos quais podem ser avaliados diversos parâmetros que influenciam o seu comportamento.

Para que estes dados experimentais possam ser validados como fontes de informação de modelos teórico-numéricos, foram definidos, *a priori*, quais os parâmetros de variação a serem investigados.

Dentre os vários parâmetros passíveis de variação, decidiu-se trabalhar com características associadas às fibras: o módulo de elasticidade; o teor total de fibras, que foi mantido constante; a geometria da fibra, que foi estabelecida em termos de diâmetros comerciais das fibras disponíveis; e a proporção entre fibras primária e secundária, que obedecerá a valores previstos a serem mais bem detalhados, a seguir, na descrição do programa experimental.

4.3. ORGANIZAÇÃO DO CAPÍTULO

Na primeira etapa do programa experimental são descritos os procedimentos de ensaio, mediante a apresentação da seleção dos testes envolvidos. Dentro desta etapa, os procedimentos serão detalhados, procurando expor os indícios que levaram à sua utilização e as devidas adaptações para a realização dos mesmos. De modo geral, a presente metodologia adotada possibilitou a determinação das propriedades do concreto com fibra, ora no estado fresco – em especial, a trabalhabilidade –, ora no seu estado endurecido, por meio de ensaios de investigação no que diz respeito à tenacidade, ao controle de aberturas de fissuras, à resistência à compressão e à tração, bem como ao impacto aos 28 dias.

Em seguida, são elencados os materiais empregados, inicialmente em termos de elementos de reforço, procurando justificar a escolha das fibras, seguido de uma breve descrição dos materiais constituintes da matriz. Além desses, são também relatados os procedimentos de mistura, de moldagem, controle e de preparação das vigas para os ensaios.

Na sequência, será apresentado o procedimento experimental como um todo, na forma de um fluxograma. Nesta etapa, foram avaliadas as possíveis formas de combinações de fibras a serem incorporadas na matriz de concreto, dentro das etapas de ensaio para cada conjunto de variáveis, visando à definição do tamanho da amostra a ser empregada e, conseqüentemente, à validação do programa experimental.

Finalmente, os dados obtidos serão analisados nos Capítulos 5, 6 e 7, e servirão de base para a delimitação de um critério de fator de eficiência das fibras, permitindo, assim, o seu emprego em simulações numérico-teóricas.

4.4. SELEÇÃO DE ENSAIOS

Para permitir a consecução dos objetivos estabelecidos para o trabalho e avaliação dos parâmetros envolvidos, foram selecionados procedimentos experimentais apresentados na literatura e em normas técnicas, com algumas adaptações, na medida em que se buscou avaliar todas as variáveis de estudo.

4.4.1. Caracterização básica dos compósitos

Neste item, a busca pela caracterização do concreto convencional, bem como dos compósitos gerados com a contribuição da adição de fibras são aspectos de grande importância. Foram realizados ensaios para avaliar quantitativamente parâmetros, como a resistência à compressão axial, a resistência à tração por meio de compressão diametral e o módulo de elasticidade. Para esses procedimentos são usados os métodos publicados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO e disponíveis na Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

4.4.1.1. Resistência à Compressão Axial – f_c^{CRF}

O objetivo principal pelo qual é aferida a resistência à compressão, f_c , é a obtenção de um valor potencialmente característico do compósito, cujo resultado servirá de referência para a verificação de sua eficiência.

Nesta etapa, a avaliação da resistência à compressão simples será feita seguindo as recomendações da norma brasileira *NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos cilíndricos* (ABNT, 1994).

A dimensão básica escolhida para os corpos de prova foi de 190 mm de altura e 95 mm de diâmetro. O diâmetro é decorrente da dimensão da broca utilizada no processo de extração dos corpos de prova e a altura de 190 mm para manter a relação 2:1 (altura x diâmetro) do corpo de prova.

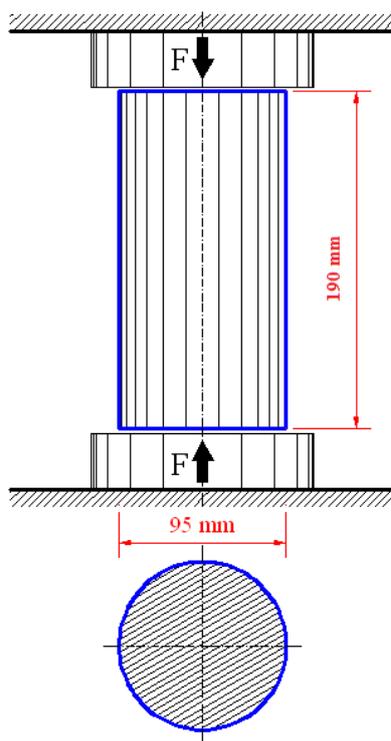


Figura 4.1 – Esquema de ensaio e dimensões – compressão simples.

A tensão de ruptura de compressão será obtida aos 28 dias, numa amostra total de 04 corpos de prova para cada concreto.

4.4.1.2. Resistência à Tração por Compressão Diametral - $f_{t,D}^{CRF}$

Para a realização dos ensaios de tração, foram desenvolvidos outros procedimentos de ensaio em alternativa ao ensaio de tração direta, dada a inviabilidade prática envolvida na realização deste tipo de ensaio. Um dos procedimentos adotados foi o ensaio de compressão diametral – ou “ensaio brasileiro”, conforme recomendação da *NBR 7222 – Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos* (ABNT, 1994), que permite avaliar a resistência à tração, adicionando este dado à caracterização do compósito.

No ensaio de compressão diametral, um corpo-de-prova cilíndrico é submetido a uma força de compressão aplicada em uma região reduzida em toda a sua extensão. À medida que a máxima resistência à tração, na direção ortogonal à força aplicada, é alcançada, ocorre a ruptura. Mediante a carga máxima, é obtida também a resistência à tração indireta do CRF.

A resistência à tração por compressão diametral é calculada pela seguinte expressão:

$$f_{t,D}^{CRF} = \frac{2.F}{\pi.d_{CP}.L_{CP}} \quad 4.1$$

Onde:

$f_{t,D}^{CRF}$: resistência à tração por compressão diametral do CRF;

F : carga máxima obtida em ensaio;

d_{CP} : diâmetro do corpo-de-prova;

L_{CP} : altura do corpo-de-prova.

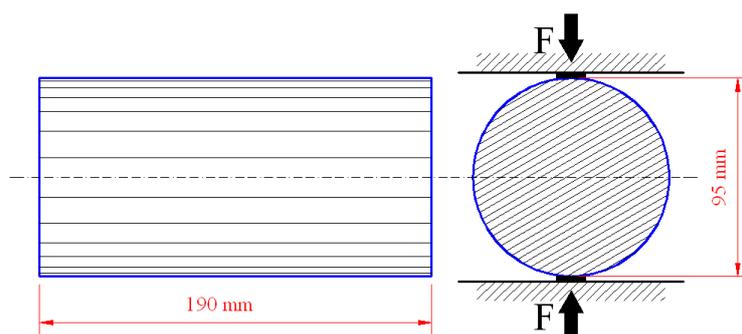


Figura 4.2 – Esquema de ensaio e dimensões – tração por compressão diametral

Assim como na resistência à compressão, a tensão de ruptura à tração será obtida aos 28 dias, numa amostra total de 04 corpos de prova para cada concreto.

4.4.2. Avaliação da Trabalhabilidade e Consistência

A adição de fibras provoca alterações em diferentes estágios da produção do concreto. Apesar do ganho de desempenho decorrente da inserção de fibras, sobretudo no que diz respeito à contenção da propagação de trincas no concreto em seu estado endurecido, a trabalhabilidade do concreto fica comprometida, visto que modifica as condições de consistência do concreto, na medida em que a adição de fibras aumenta também a área superficial, demandando água de molhagem.

Contudo, a trabalhabilidade do concreto não é uma propriedade a ser mensurada por um único método, tendo em vista sua natureza composta e a variação dependente do tipo de aplicação e dos métodos de lançamento, adensamento e acabamento. Ainda assim, embora seja possível a utilização de variados métodos para avaliar esta propriedade, este estudo adota o ensaio de abatimento do tronco de cone, geralmente empregado para aferir a consistência do concreto.

4.4.2.1. Ensaio de Abatimento do Tronco do Cone

A especificação de um método para determinar a consistência do concreto em seu estado fresco é dada pela *NBR NM 67 – “Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone”*, aplicável aos concretos plásticos e coesivos que apresentem um assentamento igual ou superior a 10 mm. Neste trabalho, o ensaio de abatimento do tronco de cone torna-se adequado para o controle da trabalhabilidade dos compósitos produzidos, ainda que a incorporação de fibras torne a consistência da mistura muito seca, como ocorre frequentemente. Ainda assim, este equipamento pode ter a sua utilização viabilizada pelo emprego de aditivo na mistura.

Este equipamento contém uma haste de compactação de seção circular, um tronco de cone metálico oco, com bases paralelas e abertas, além de uma placa de base.

Depois de preenchido, conforme indicação da norma, o tronco é removido, resultando na diminuição da altura do cone de concreto. Neste ínterim, o abatimento é avaliado subtraindo da altura do molde metálico a altura média do concreto desmoldado.

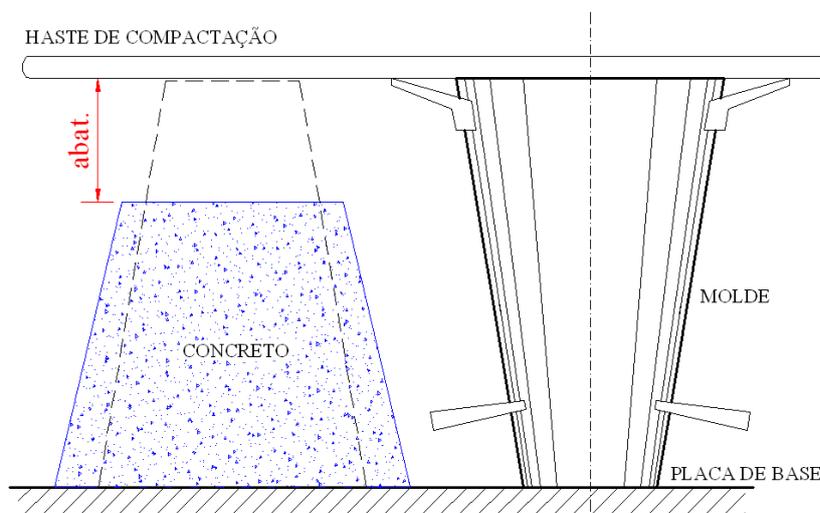


Figura 4.4 – Diferença após a retirada do molde no abatimento do tronco de cone.

4.4.2.2. Consistência fluida pelo espalhamento na mesa de Graff. NBR NM68

Apesar de a concentração volumétrica de fibras comprometer significativamente a trabalhabilidade do concreto com fibras, o fator de forma, o tipo de misturador empregado na fabricação da mistura, bem como o tipo e a quantidade de aditivos utilizados também se constituem como fatores que influenciam a diminuição da trabalhabilidade desse tipo de concreto.

De acordo com Balaguru e Shah (1992), na medida em que a adição de fibras se configura como um elemento redutor da trabalhabilidade dos concretos, sua adoção pode ocasionar prejuízos à compactação, comprometendo negativamente a durabilidade e o desempenho mecânico.

Conforme recomendação do ACI 544.3R-93 (2006), a avaliação da trabalhabilidade do concreto com fibras pode ser feita mediante a aplicação de três diferentes métodos: o abatimento do tronco de cone, o abatimento do tronco de cone invertido e o ensaio Vebe.

O primeiro método, apesar de ser mais simples em sua aplicação, pode não indicar adequadamente a consistência do concreto, caso haja um elevado teor de fibras. De acordo com o ACI 544.1R-96 (2006), mediante teores de fibra entre 0,25% e 2% em volume adicionado ao concreto o abatimento do tronco de cone tende a ser reduzido na faixa de 25mm a 100mm.

No caso do abatimento de tronco com cone invertido, o segundo método vislumbrado na avaliação da trabalhabilidade, um estudo realizado por Ceccato (1998, citado por Figueiredo, 2000) descarta este método como eficaz para a averiguação desta propriedade no concreto, independentemente do teor de fibra empregado. Apesar de visar à mensuração da fluidez do concreto com fibras submetidas à vibração, à medida que é forçado a descer por um cone de abatimento invertido, duas situações podem inviabilizar o ensaio: se o concreto é muito plástico, ele pode escoar pela extremidade inferior do cone, o que invalidaria o ensaio; e se o concreto é muito coeso, obstruindo esta extremidade inferior do cone e impossibilitando a obtenção de resultados do ensaio.

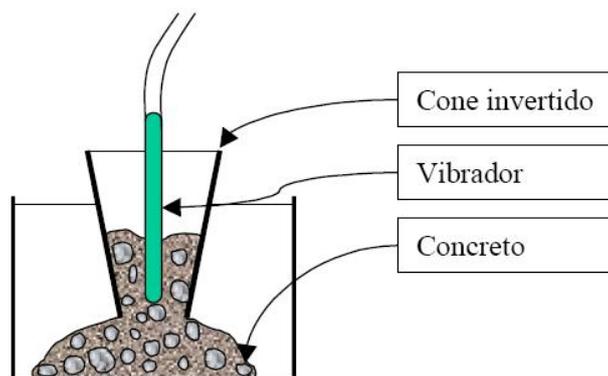


Figura 4.5 – Ensaio do abatimento de tronco com cone invertido.
Fonte: FIGUEIREDO, 2000.

O último método, considerado o mais adequado na avaliação da trabalhabilidade, é o ensaio Vebe. A medida de consistência do concreto é definida pelo tempo necessário para remoldar o concreto contido no equipamento da forma tronco cônica para a forma cilíndrica, definido como índice Vebe. No que tange à trabalhabilidade, quanto maior o índice Vebe, menor é a trabalhabilidade do concreto (Figueiredo, 2000).

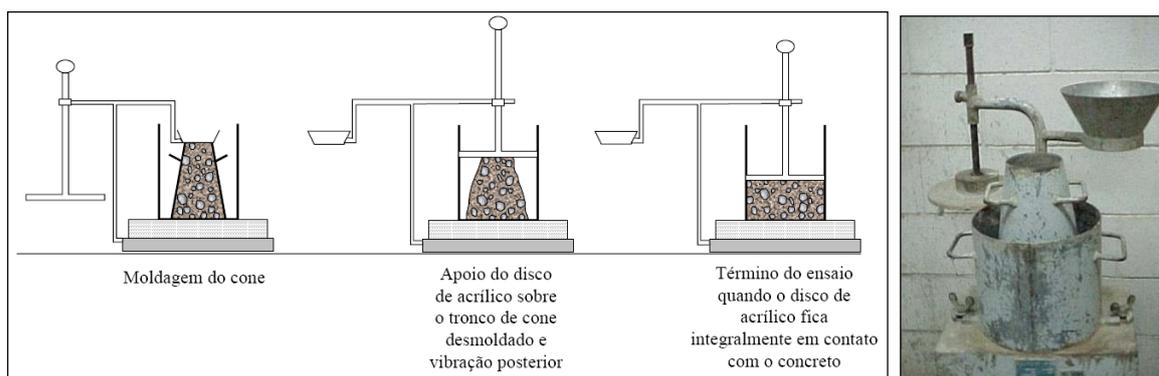


Figura 4.6 – Ensaio de Vebe.
Fonte: FIGUEIREDO, 2000.

Na medida em que é importante que a trabalhabilidade exigida se dê de tal modo que se preencham as fôrmas sem muita dificuldade, são empregados neste estudo, como elementos estruturais, corpos de prova confeccionados sem a presença de qualquer tipo de armadura.

Desta forma, esta investigação propõe a determinação da consistência do concreto via determinação da consistência da mistura, através do espalhamento da Mesa de Graff. Esse método é utilizável em misturas que atinjam o espalhamento mínimo de 350 mm, embora se limite seu uso a uma mesa de 700 mm.

A determinação da consistência do concreto por espalhamento do CRF é dada pelo conjunto composto por: uma fôrma tronco cônica metálica com 20 cm de diâmetro na base, 13 cm de diâmetro no topo e 20 cm de altura; uma base quadrada de madeira com tampo superior em aço (para que não haja absorção da água e atrito com o concreto); soquete de madeira (conforme Figura 4.7); uma espátula, uma concha côncava e uma trena para medir o espalhamento do concreto na fase de teste.



Figura 4.7 – Mesa de Graff para verificação do espalhamento da mistura.

A fim de evitar a absorção da água do concreto pela placa e pelo tronco de cone durante o ensaio, estes devem ser umidificados antes do manuseio do concreto. Após, a placa deve ser colocada sobre um piso firme e nivelado, com o tronco repousado e segurado firmemente no centro da base. Com a concha côncava, moldar em duas camadas iguais, adensadas com dez golpes, por meio do emprego do soquete de madeira. Depois de preenchido o cone, o excesso de concreto deve ser removido do topo do cone e da placa. Por fim, conforme determinação da norma, 15 golpes devem ser aplicados em 15 segundos.

Este processo possibilita uma observação empírica da presença ou ausência de qualquer tipo de segregação no CRF. Contudo, é importante averiguar se a mistura não apresenta aglomerações de agregados e/ou fibras na região central, ou ainda a formação de ouriços, no caso de apenas a argamassa ter fluido para as extremidades, o que implicaria em falhas na concretagem e, conseqüentemente, diminuição da resistência mecânica e durabilidade do concreto.

4.4.3. Resistência à flexão equivalente.

4.4.3.1. Tenacidade e resistência à flexão.

Devido à sua relativa facilidade de execução, o ensaio à flexão é o mais difundido, visto que representa a maioria das situações práticas. Além disso, este ensaio apresenta um maior grau de hiperstaticidade, evidenciando a ductilidade conferida pelo reforço fibroso, maior e mais representativa do que nos ensaios de compressão axial e de tração por compressão diametral.

Os ensaios de flexão são do tipo flexão em corpos de prova prismáticos (vigas) e ensaio de puncionamento sobre placas (circulares ou retangulares). Na flexão em vigas, a finalidade é a determinação da tenacidade fornecida pelas fibras no concreto. A tenacidade é a resistência mecânica necessária para levar um material à ruptura, devido à sua capacidade de dissipar energia de deformação.

Dentre as variadas metodologias de ensaio para a determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras, será empregada uma das normas que é muito utilizada e tem servido de referência para o concreto convencional reforçados com fibras de aço, que é a metodologia prescrita pela *Japan Society of Civil Engineers – JSCE – SF4* (1984).

A recomendação japonesa apresenta uma concepção baseada na flexão de vigas sem entalhe, carregados em três terços, cuja configuração do ensaio consiste em apoiar a viga em dois cutelos e aplicar o carregamento através de outros dois cutelos, posicionados na parte superior da viga, no terço médio do vão, como apresentado na Figura 4.6, a seguir.

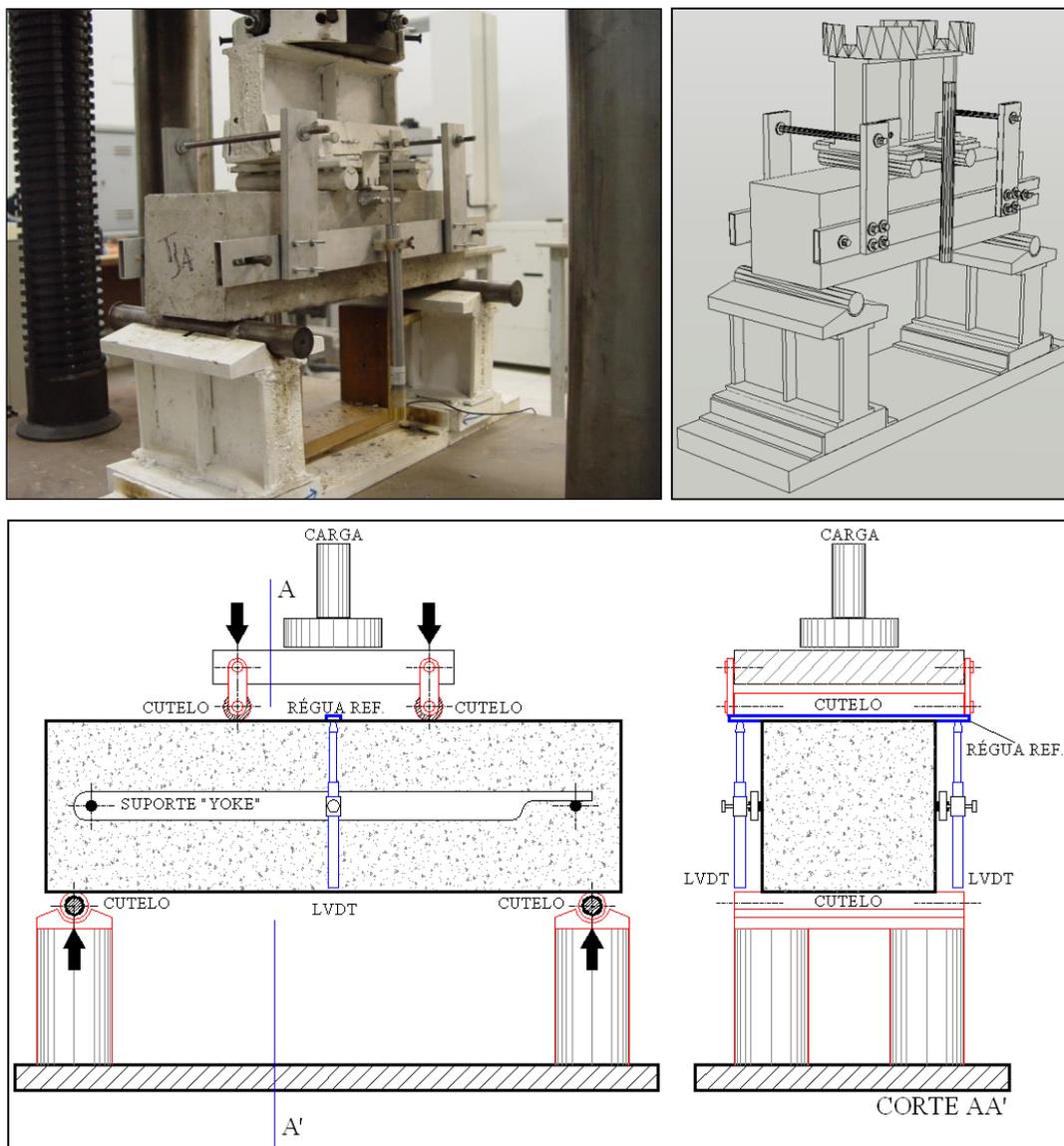


Figura 4.8 – Configuração de ensaio – JSCE SF4, 1984 – Flexão em quatro pontos.

Segundo a norma, os prismas podem ter $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}^3$, ensaiados com 300 mm de vão, ou $150 \times 150 \times 500 \text{ mm}^3$, ensaiados com 450 mm de vão. A dimensão do corpo-de-prova depende do tamanho da fibra utilizada no concreto (recomenda-se que a menor dimensão da seção transversal da viga seja, no mínimo, três vezes maior que o comprimento da fibra utilizada) (FIGUEIREDO, 2005).

Para este trabalho, serão confeccionados 04 corpos de prova com dimensões $150 \times 150 \text{ mm}^2$ de seção transversal, porém com 550 mm de comprimento e vão de 500 mm. Optou-se por essa adaptação na geometria das vigas, com o intuito de comparar os resultados oriundos das recomendações da RILEM TC 162 – TDF, descritos mais adiante, além de facilitar a moldagem dos corpos de prova, mantendo-os com as mesmas medidas.

De posse das características geométricas e dos dados do procedimento, a norma sugere a obtenção da curva carga por deslocamento e a consequente avaliação da tenacidade do concreto reforçado com fibras. Assim, para obter essa curva, faz-se necessário monitorar os deslocamentos da viga durante todo o tempo de realização do ensaio.

O deslocamento será medido por meio de dois transdutores de deslocamento, posicionados na parte superior central de cada um dos lados da viga, de forma que o deslocamento corresponde à média dos dois valores lidos que, por sua vez, são fixados com parafusos no sistema “yoke”, sendo este último fixado por meio de pinos colocados nas laterais da viga (Figura 4.8).

Para a aplicação da carga, será utilizada uma prensa da marca Shimadzu, por meio da qual é possível aplicar uma velocidade de deslocamento ou descida de pistão constante, com velocidade mínima de deslocamento de 0,5 mm/min (velocidade mínima do equipamento de ensaio disponível).

Com os equipamentos instalados, os dados de carga e deslocamento serão monitorados através de um sistema de aquisição contínua de dados SYSTEM 5000, cujo programa Win 5000 faz a parte de coleta com intervalo de tempo constante.

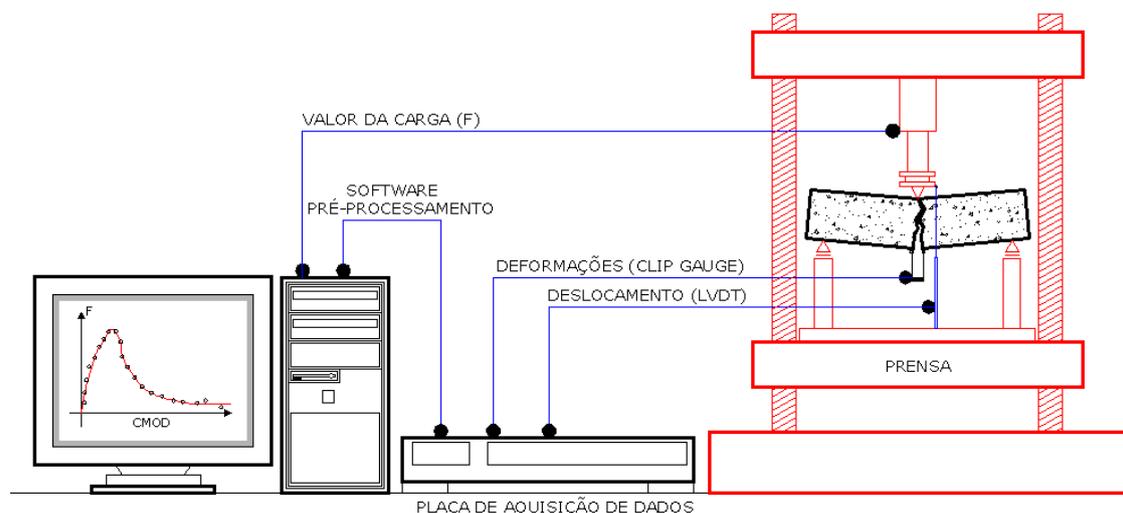


Figura 4.9 – Sistema de aquisição contínua de dados.

Com os dados de carga e deslocamento, plotados em uma curva, é possível obter o critério da *JSCE-SF4*: 1984 para a determinação da tenacidade. De posse da área total sob a curva (Tb) ilustrada na Figura 4.10, a referida norma calcula o parâmetro denominado de fator de tenacidade (FT), ou denominado também de resistência à flexão equivalente, que é definido pela equação 4.3:

$$FT = \frac{Tb}{\delta_{Tb}} \cdot \frac{L_v}{b_v \cdot h_v^2} \quad 4.3$$

onde:

FT = fator de tenacidade, ou resistência à flexão equivalente;

Tb = área sob a curva até o deslocamento equivalente de $L/150$;

δ_{tb} = deslocamento equivalente a $L/150$;

b_v = largura da viga;

h_v = altura da viga;

L_v = vão da viga durante o ensaio.

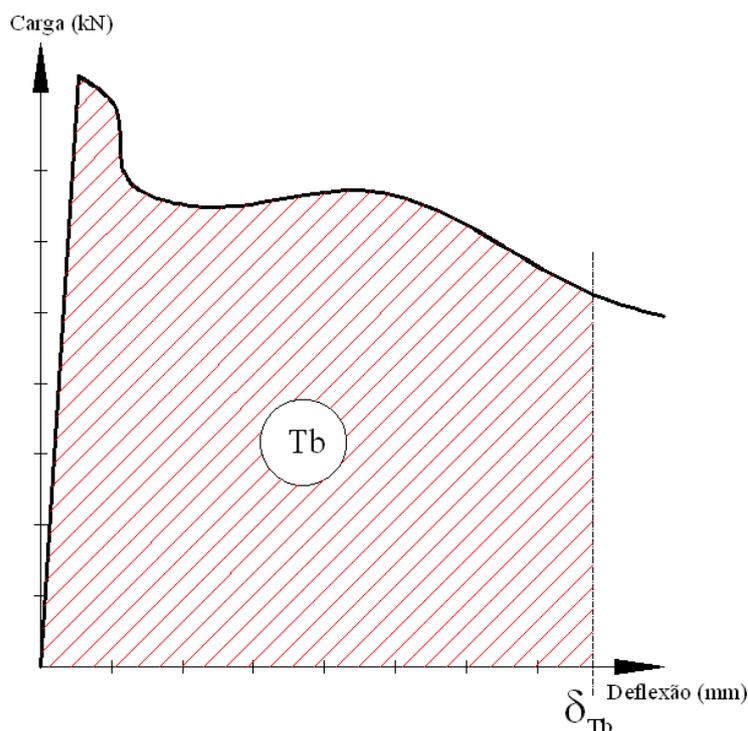


Figura 4.10 – Critério da JSCE SF-4 (1984) para a determinação da tenacidade
(Fonte: FIGUEIREDO, 2005).

Como Tb é dividido por δ_{tb} , que é a deflexão de referência para sua determinação, isto resulta no valor médio de carga a que o compósito suportou durante sua deformação.

Assim, como mencionado anteriormente, existem outros ensaios além da norma japonesa. É o caso do método proposto pelo comitê da RILEM TC 162 – TDF (2000b), que propõe

uma metodologia baseada na relação tensão x deformação ($\sigma \times \epsilon$), com fundamentação teórica semelhante à utilizada no dimensionamento do concreto reforçado convencional.

Por conseguinte, nesta investigação experimental, foram adotados, também, os procedimentos de ensaio recomendados pela RILEM TC 162 – TDF (2000a) para realização de ensaios de flexão de vigas de concreto reforçado com fibras diversas, embora tal metodologia tenha sido direcionada particularmente à aplicação de fibras metálicas.

Neste método, as vigas possuem as seguintes dimensões: 150 x 150 x 550 mm³ e um entalhe de 5,0 mm x 50,0 mm de abertura e comprimento iniciais, respectivamente. Neste trabalho, optou-se por utilizar as mesmas dimensões externas para as vigas ensaiadas na metodologia da JSCE SF-4 (1984), como ilustra a Figura 4.11.

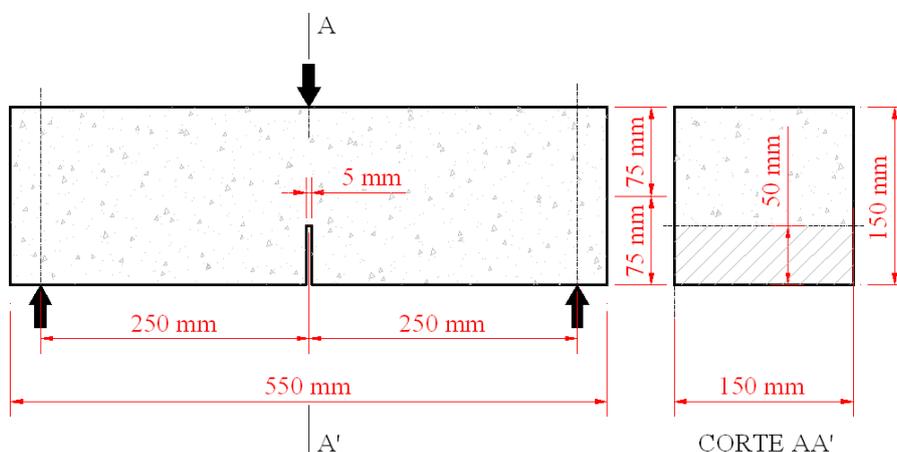


Figura 4.11 – Dimensões do corpo-de-prova prismático com entalhe no centro do vão.

Uma característica peculiar nesses corpos de prova prismáticos é a presença deste entalhe na face inferior, com o objetivo principal de reduzir o efeito de instabilidade pós-pico. A instabilidade pós-pico consiste numa superestimação da carga suportada pelo corpo-de-prova, imediatamente após a ruptura da matriz, ou seja, quando se atinge a carga de pico, uma vez que o teor de fibra deve estar abaixo do crítico. Neste momento ocorre a abrupta transferência de carga da matriz para a fibra com uma conseqüente elevação dos deslocamentos capturados pelos transdutores de deslocamento, os quais recebem um pequeno impacto.

O entalhe ameniza esse fenômeno e se resume a uma descontinuidade no sentido transversal, onde uma seção transversal menor é criada. Conseqüentemente, tal concentrador de tensões induz a nucleação e, posteriormente, a propagação da fissura nesta região, facilitando o acompanhamento da medida da abertura da fissura *CMOD* durante o

ensaio, contribuindo, inclusive, na menor variabilidade de valores. A confecção do entalhe pode ser feita de maneiras diferentes: ou por meio da alteração na configuração da fôrma em que será moldada a viga ou por processo de corte após o endurecimento do concreto. Diante das considerações observadas no laboratório, a confecção por meio do corte é mais eficaz, pois evita a formação de uma região mais fraca (nata de cimento) na ponta do entalhe, que é observada, no caso, onde o entalhe é moldado. Além disso, o corte do concreto evita o alinhamento das fibras na região do entalhe, o que pode causar uma superestimação da tenacidade do CRF. Desta forma, para a execução do entalhe, foi utilizado um disco de serra de 5,0 mm de espessura, com sistema de resfriamento a água.

De modo geral, este método RILEM TC 162 – TDF consiste no ensaio de tração na flexão em três pontos, ou seja, diferentemente do caso anterior, o carregamento é aplicado em um único ponto na face superior da viga no centro do vão, conforme a figura a seguir:

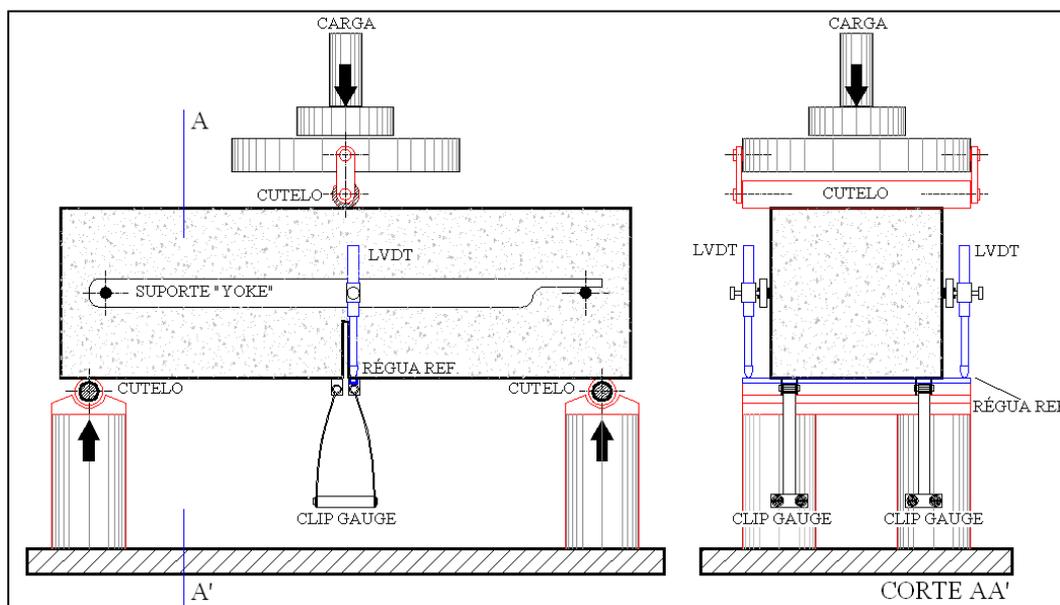


Figura 4.12 – Arranjo de ensaio previsto pela RILEM TC 162 – TDF – Flexão em três pontos.

Com o monitoramento da carga e dos deslocamentos, a medida da tenacidade é feita a partir do critério da determinação de áreas sob as curvas de carga por deflexão, equivalentes à absorção de energia proporcionada pelas fibras, calculadas segundo os diagramas apresentados na norma (ver Figura 4.12), dos quais só podem ser obtidos os valores de limite de proporcionalidade (F_u) e os valores de resistência de flexão equivalentes.

Na Figura 4.13, está representado o limite de proporcionalidade, definido como sendo o maior valor de carga na curva carga x deslocamento no intervalo compreendido de até 0,05 mm, que pode ser aferido em termos de deflexão ou *CMOD*.

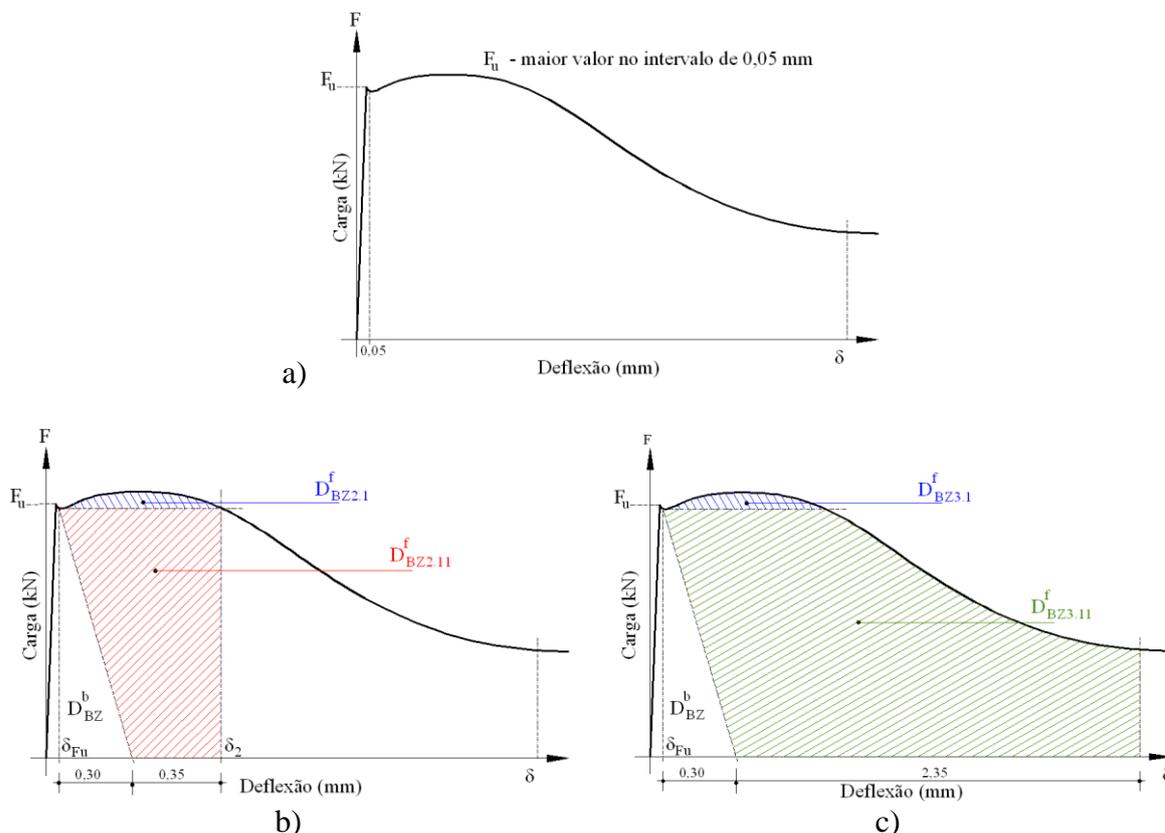


Figura 4.13 – Diagramas carga x deslocamento – áreas e energias absorvidas pelo CRF.

A partir das curvas, as resistências à flexão equivalentes – parâmetros utilizados para caracterizar o comportamento do concreto após a fissuração – são calculadas considerando dois limites de deslocamento da viga. Ou seja, a resistência à flexão equivalente ($f_{eq.2}$) corresponde à energia absorvida pelo CRF após a fissuração, para um deslocamento de até 0,7 mm, e a resistência à flexão equivalente ($f_{eq.3}$) corresponde à energia absorvida para um deslocamento de até 2,70 mm.

$$f_{eq.2} = \frac{3}{2} \left(\frac{D_{BZ2.1}^f}{0,65} + \frac{D_{BZ2.11}^f}{0,5} \right) \frac{L_v}{b_v h_{sp}^2} \quad 4.4$$

e;

$$f_{eq.3} = \frac{3}{2} \left(\frac{D_{BZ3.1}^f}{2,65} + \frac{D_{BZ3.11}^f}{2,5} \right) \frac{L_v}{b_v h_{sp}^2} \quad 4.5$$

Onde:

b_v = largura da viga;

h_{sp} = altura da viga, correspondente à distância entre a ponta do entalhe e o topo do corpo-de-prova;

L_v = vão livre da viga;

$D_{BZ2.I}^f$, $D_{BZ2.II}^f$, $D_{BZ3.I}^f$, $D_{BZ3.II}^f$ = áreas sob as curvas de carga por deflexão equivalentes à absorção de energia em virtude da contribuição das fibras.

Em termos de amostra de corpos de prova, decidiu-se, neste item 4.2.3.1, confeccionar oito exemplares no total, sendo distribuídos quatro corpos de prova – JSCE SF-4 (1984) e quatro corpos de prova – RILEM TC 162 - TDF.

4.5. SELEÇÃO DE MATERIAIS

A seguir, são apresentadas as características dos materiais utilizados na pesquisa, de acordo com dados de fabricantes ou de ensaios complementares realizados no laboratório.

4.5.1. Fibras

4.5.1.1. Fibras de Aço

As fibras metálicas empregadas são fornecidas pela Dramix[®], produzidas a partir de fios de aço trefilados, tendo como matéria prima o Fio Máquina Belgo, Grupo Arcelor.

Dentre as fibras mais tradicionais, foi selecionado um tipo de fibra metálica, cujo fator de forma é igual a 80 e comprimento igual a 60 mm. Essas características são apresentadas na Figura 4.14:

| ESPECIFICAÇÕES DO FABRICANTE | ILUSTRAÇÃO |
|--|--|
| <p>DRAMIX[®] RC 80/60 BN</p> <p>• Geometria</p>  <p>80 Classe: 80 Fator de forma: 80 (=l/d):80</p> <p>Comprimento: 60 mm Diâmetro: 0,75 mm</p> <p>4.600 fibras/kg Dosagem mínima: 10 kg/m³ (De acordo com a Teoria da Máxima Separação de McKee)</p> <p>Resistência à tração: - do arame: mínimo 1.100 N/mm² - baixo carbono conforme a: -DIN 17 140-D9 -EN 10016-2 -C9D</p> |  |

Figura 4.14 – Características das fibras de aço empregadas no programa experimental

Dados do fabricante: Densidade: $\rho^{aço} = 7,84 \text{ g/cm}^3$

Módulo de Elasticidade: $E^{aço} = 210,0 \text{ GPa}$

Resistência à Tração: $f_t^{aço} = \pm 1,1 \text{ GPa}$

As fibras apresentadas são identificadas com o prefixo *RC* e um sufixo *BN*. De acordo com o fabricante, a letra *R* na denominação indica dupla ancoragem nas extremidades; a letra *C* indica que as fibras são comercializadas na forma de pentes colados permitindo assim uma mistura rápida e uma distribuição perfeitamente homogênea sem a formação de “bolas” ou “ouriços”; a letra *B* indica que o aço é do tipo claro, sem cobertura e, por fim, a letra *N* significa que o aço tem baixo teor de carbono.

4.5.1.2. Fibras de Polipropileno

As fibras de polipropileno empregadas são fabricadas pela FITESA S.A., denominadas e comercializadas como fibras sintéticas corrugadas (*Polycrret CR*), para concreto, cuja função principal consiste em evitar fissuras de retração e aumentar a resistência ao impacto, atuando principalmente no estágio pré-fissuração. As fibras *Polycrret CR* são monofilamentos sintéticos obtidos através da extrusão, posteriormente ondulados e cortados, conformando uma fibra sintética com comprimento de 50,0 mm, diâmetro equivalente de 100 μm , fator de forma igual a 500.



Polycrét CR

Figura 4.15 – Ilustração da fibra sintética de polipropileno – FITESA

Dados do fabricante: Densidade: $\rho^{PP} = 0,90 \text{ g/cm}^3$
 Módulo de Elasticidade: $E^{PP} = 7,7 \text{ GPa}$
 Resistência à Tração: $f_t^{PP} = 0,75 \text{ GPa}$

4.5.1.3. Fibras de Carbono

Os filamentos de fibras de carbono utilizados nesta investigação são produzidos a partir do tecido das fibras M.Brace CF 130, cujo diâmetro de um único fio é de $0,02\mu\text{m}$. O comprimento adotado será igual à fibra de polipropileno, ou seja, de 50,0 mm.

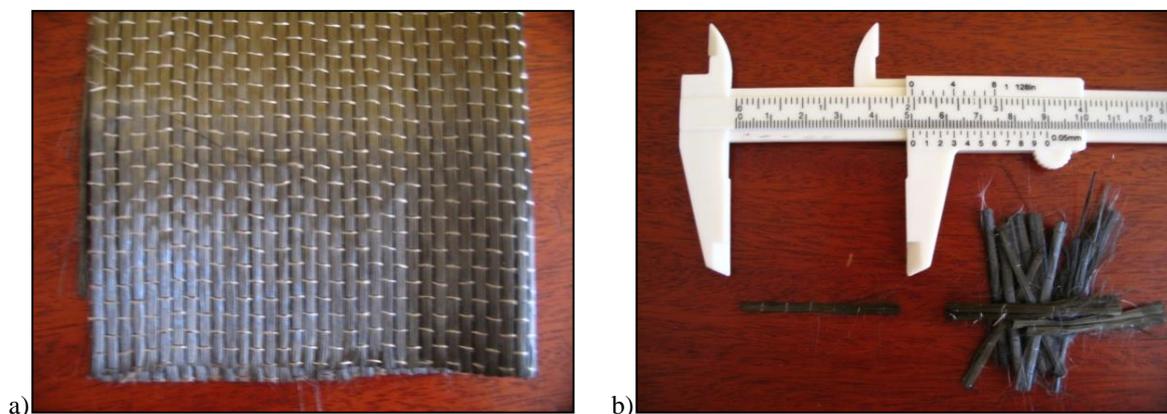


Figura 4.16 – Fibra de carbono MBrace CF 130. a) ilustração do tecido; b) fibras cortadas.

Dados do fabricante: Peso específico: 300 g/m^2 (considerando um tecido de espessura 0,165 mm).
 Módulo de Elasticidade: $E^{\text{carbono}} = 227,0 \text{ GPa}$
 Resistência à Tração: $f_t^{\text{carbono}} = 3,40 \text{ GPa}$

4.5.2. Concreto

Para confecção das matrizes, foi empregado um concreto de resistência à compressão nominal (f_{c28}) de 25 MPa. O traço utilizado, já empregado em outras pesquisas do gênero, apresentava inicialmente proporções de 1 : 2,12 : 2,88 (cimento Portland CP V – ARI: areia natural: agregado graúdo granítico), com relação água-cimento igual a 0,51. A trabalhabilidade especificada, medida pelo ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*), seguindo as recomendações da *NBR NM 67*, foi de 150 ± 10 mm.

No traço definitivo foram utilizados:

- a) Agregado miúdo do tipo areia simples de quartzo de rio, natural proveniente do Rio Jacuí, classificada como areia regular a média, cuja caracterização granulométrica foi realizada seguindo recomendações da norma técnica *NBR 7217 – Agregados – Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003)*.

A Tabela 4.1 e a Figura 4.17 ilustram os dados da caracterização do agregado miúdo empregado nesta investigação no que tange à distribuição granulométrica.

Tabela 4.1 – Características do agregado miúdo

| Abertura | % retida | % retida acumulada |
|---|----------|--------------------|
| 4,75 | 0,46 | 0,46 |
| 2,4 | 7,70 | 8,15 |
| 1,2 | 16,42 | 24,57 |
| 0,6 | 26,11 | 50,68 |
| 0,3 | 31,44 | 82,12 |
| 0,15 | 16,89 | 99,01 |
| Fundo | 0,99 | 100,00 |
| Total | 100 | 264,989 |
| Diâmetro Máximo = 4,8 mm | | |
| Módulo de finura = 2,65 | | |
| Massa específica = 2,61 g/cm ³ | | |

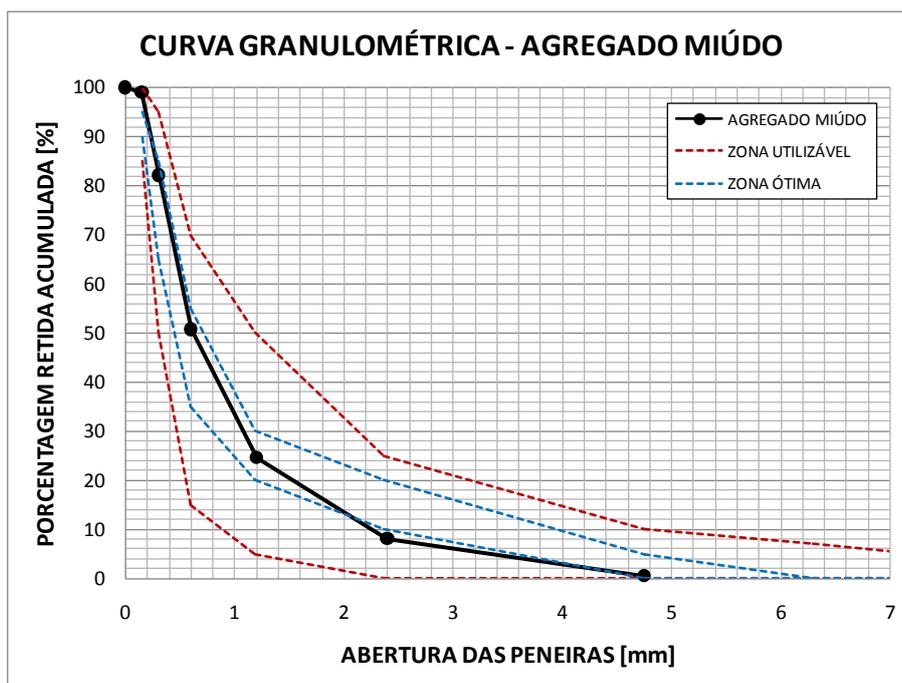


Figura 4.17 – Curva Granulométrica – Agregado Miúdo.

- b) Agregado graúdo de origem basáltica da região. A caracterização granulométrica foi feita segundo a NBR 7217:1987 (substituída pela NBR NM 248:2003) – *Agregados – Determinação da composição granulométrica*, permitindo classificá-la como brita 1.

A Tabela 4.2 e a Figura 4.18 apontam os valores característicos da distribuição granulométrica - % retida acumulada – e a curva do material selecionado, comparada as curvas limites da distribuição granulométrica (inferior e superior) do agregado graúdo de zona 9,5 mm – 25 mm, respectivamente.

Tabela 4.2 – Características do agregado graúdo

| Abertura | % retida | % retida acumulada |
|----------|----------|--------------------|
| 19,1 | 1,64 | 1,64 |
| 12,5 | 46,80 | 48,43 |
| 9,52 | 33,83 | 82,27 |
| 6,3 | 15,23 | 97,50 |
| 4,75 | 1,91 | 99,41 |
| 2,4 | 0,42 | 99,83 |
| 1,2 | 0,00 | 99,83 |
| 0,6 | 0,00 | 99,83 |
| 0,3 | 0,00 | 99,83 |
| 0,15 | 0,00 | 99,83 |
| Fundo | 0,17 | 100,00 |
| Total | 100 | |

Diâmetro Máximo = 19 mm

Módulo de finura = 6,82

Massa específica = 2,74 g/cm³

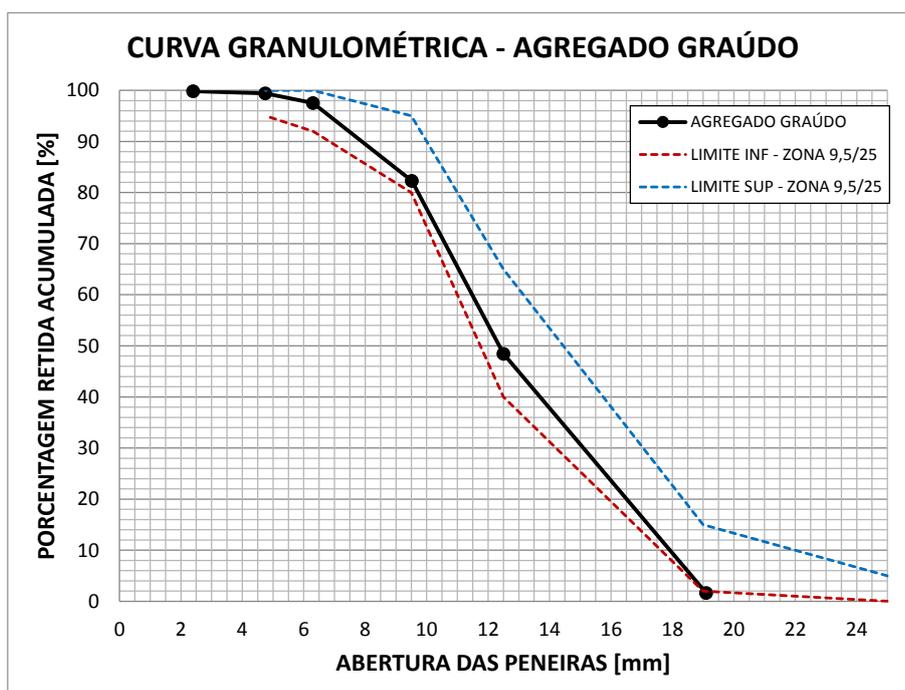


Figura 4.18 – Curva Granulométrica – Agregado Graúdo – Limites da zona d/D = 9,5 /25.

- c) O material aglomerante utilizado foi um cimento Portland CP V-ARI, cujas características físicas e químicas, repassadas pelo fabricante Cauê, se enquadram na *NBR 5733:1991 – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial*.

- d) Como se sabe, a trabalhabilidade do CRF é comprometida com a incorporação das fibras. Deste modo, como garantia de manuseio de mistura, optou-se pelo uso de um aditivo plastificante à base de policarboxilato *Glenium 51*, em quantidade suficiente para a obtenção de um abatimento do tronco de cone em torno de 150 mm \pm 10 mm, sem comprometer a relação água-cimento, obedecendo a um teor de 1,75% com relação à massa de cimento.
- e) E, finalmente, água da rede de abastecimento da companhia local.

Após o ajuste do traço, agora com 1 : 2,9 : 3,6 de proporção, e em função da classe de resistência desejada ($f_c > 25$ MPa), determinou-se a relação água-cimento 0,66, obedecendo ao requisito de uma trabalhabilidade de 75 a 125 mm.

O consumo dos materiais para a confecção de 1 m³ de concreto, para o referido traço, encontra-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Consumo de materiais por m³

| Material (kg) | Traço 25 MPa 1 : 2,9 : 3,6 |
|--------------------------|---------------------------------------|
| Cimento | 340,27 |
| Areia | 986,77 |
| Brita | 1.224,96 |
| Água | 224,58 |
| Aditivo | 0 |

Todo o concreto utilizado na moldagem das vigas e dos corpos de prova foi produzido em laboratório. Todos os materiais foram dosados em massa, onde a mistura foi executada mecanicamente, com auxílio de uma betoneira de eixo inclinado, com capacidade de 192 litros.

4.5.3. Fôrmas

Em geral, as fôrmas utilizadas foram confeccionadas em madeira compensada plastificada, com espessura de 17 mm. Todas as fôrmas foram adequadamente vedadas para evitar a fuga da nata de cimento, e receberam a aplicação de desmoldante do tipo óleo mineral antes da concretagem.

As fôrmas que serão utilizadas terão dimensões referentes aos corpos de prova, obedecendo às especificações das normas a que se referem. Na Figuras 4.16 e 4.17, é apresentada a maneira como as fôrmas foram esquematizadas para confecção dos corpos de prova.

O modelo de fôrmas representado pela Figura 4.19 é destinado à moldagem dos corpos de prova prismáticos utilizados nos ensaios de determinação dos parâmetros de tenacidade, conforme descrito anteriormente.

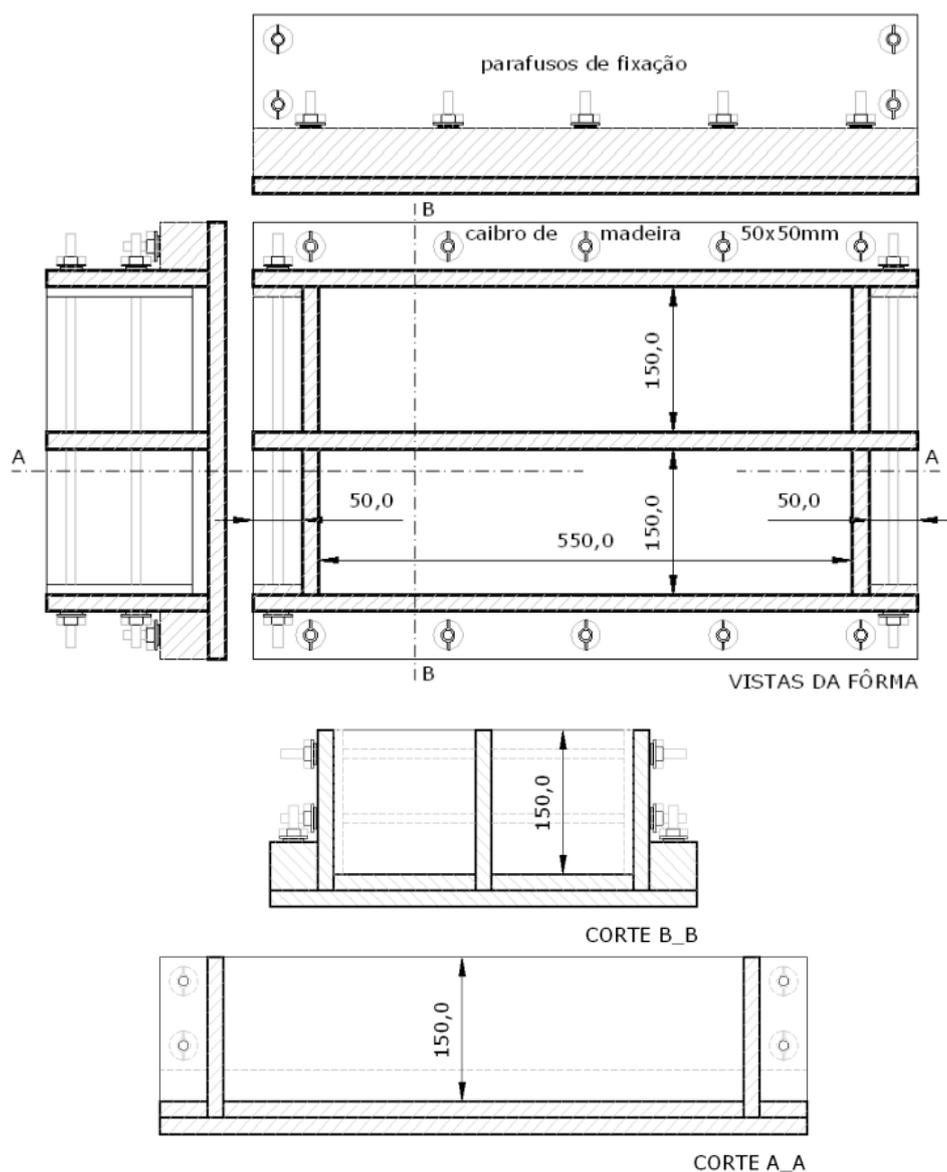


Figura 4.19 – Esquema de montagem das fôrmas – 02 células para moldagem de vigas com dimensões 550 x 150 x 150 mm.

Para os ensaios de caracterização básica dos compósitos, os corpos de prova cilíndricos serão obtidos por meio da extração de testemunhos de um bloco de CRF, mediante o emprego de ferramentas apropriadas.

A adoção desta metodologia tem por finalidade a confecção de corpos de prova que possuam uma melhor distribuição de fibras. Normalmente, os corpos de prova cilíndricos são obtidos a partir do preenchimento de moldes metálicos, que facilitam o processo da desmoldagem.

Em contrapartida, a vibração provoca um alinhamento preferencial das fibras na parte inferior dos corpos de prova que, associado ao pequeno espaço interior dos moldes, resulta em valores pouco confiáveis.

Desta forma, a fôrma para confecção do bloco de 440 x 300 x 200 mm é montada segundo o esquema da Figura 4.20. Outra vantagem desta alternativa diz respeito à não-necessidade de tratamento das faces superior e inferior dos corpos de prova. Ou seja, as superfícies planas e internas da fôrma garantem que as faces dos corpos de prova se mantenham paralelas e alinhadas, dispensando o capeamento dos mesmos.

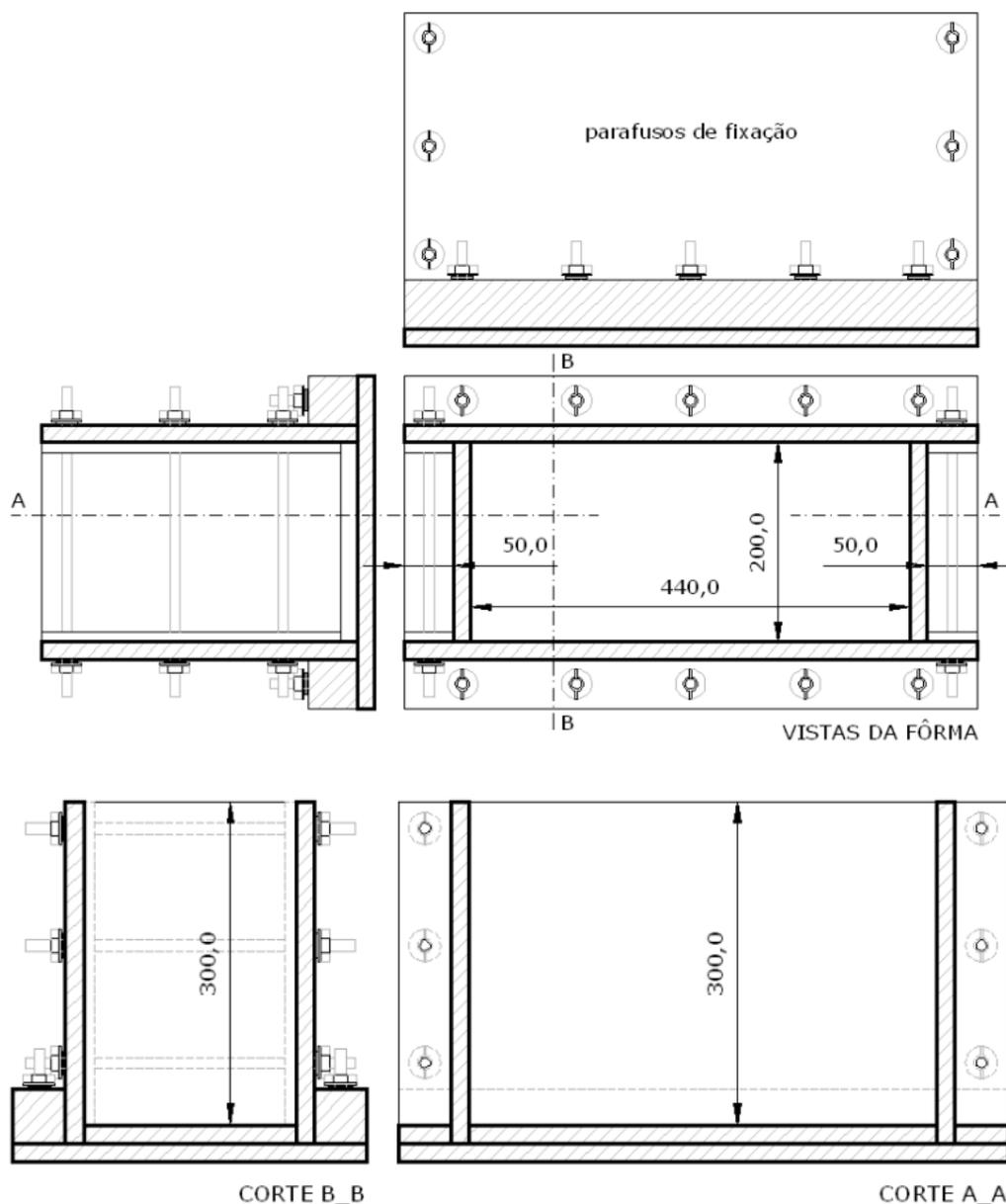


Figura 4.20 – Esquema de montagem das fôrmas – Bloco para extração de 06 corpos de prova cilíndricos 95 x 200 mm.

4.5.4. Moldagem, adensamento e cura

Seguindo as especificações da *NBR 5738:1984 – Moldagem e Cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto*, o lançamento do concreto nas fôrmas foi realizado em duas etapas. Na primeira etapa, a fôrma foi preenchida com a metade do volume de concreto necessário para o total preenchimento, sendo executado o adensamento com auxílio de um vibrador de imersão. O vibrador utilizado era do tipo agulha, com 420 mm

de comprimento, diâmetro de 25,4 mm e frequência de 3450 rpm. Após o adensamento da primeira camada, lançava-se o restante do volume do concreto e adensava-se novamente até o completo preenchimento das fôrmas.

Todos os corpos de prova foram mantidos em suas formas durante 72 horas. Neste período, os corpos de prova foram protegidos com recobrimento por meio de lonas plásticas e sacos de anagem rompidos e umedecidos para atenuar os efeitos de retração do concreto pela evaporação da água de amassamento nas primeiras horas ocasionada pela ação direta do calor ou vento.

Visando à qualidade do concreto e uma cura adequada, considerando que a hidratação promove concretos menos porosos, os corpos de prova já endurecidos são removidos das fôrmas e levados para câmara úmida com 90% de umidade relativa e 25 °C de temperatura ambiente até o dia anterior do ensaio, testados com idade acima de 28 dias

4.5.5. Controle tecnológico

Os corpos de prova cilíndricos têm a finalidade de caracterizar o material, bem como de controle tecnológico do concreto. Estes foram ensaiados na mesma data de realização dos demais ensaios dos protótipos, todos realizados numa prensa universal, marca SHIMADZU, com capacidade de 2.000 kN.

4.6. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Como foi mencionado no início deste capítulo, todo o procedimento experimental pode ser inserido em um esquema, no qual podem ser avaliadas as etapas desta pesquisa como um todo, principalmente no que diz respeito às etapas de ensaio na sequência gradual de atividades indicadas. Na Figura 4.21, a seguir, consta o fluxograma com a estratégia de pesquisa organizada e inserida no contexto desta pesquisa. Mais adiante são identificadas e detalhadas, inclusive, as variáveis investigadas e os testes realizados.

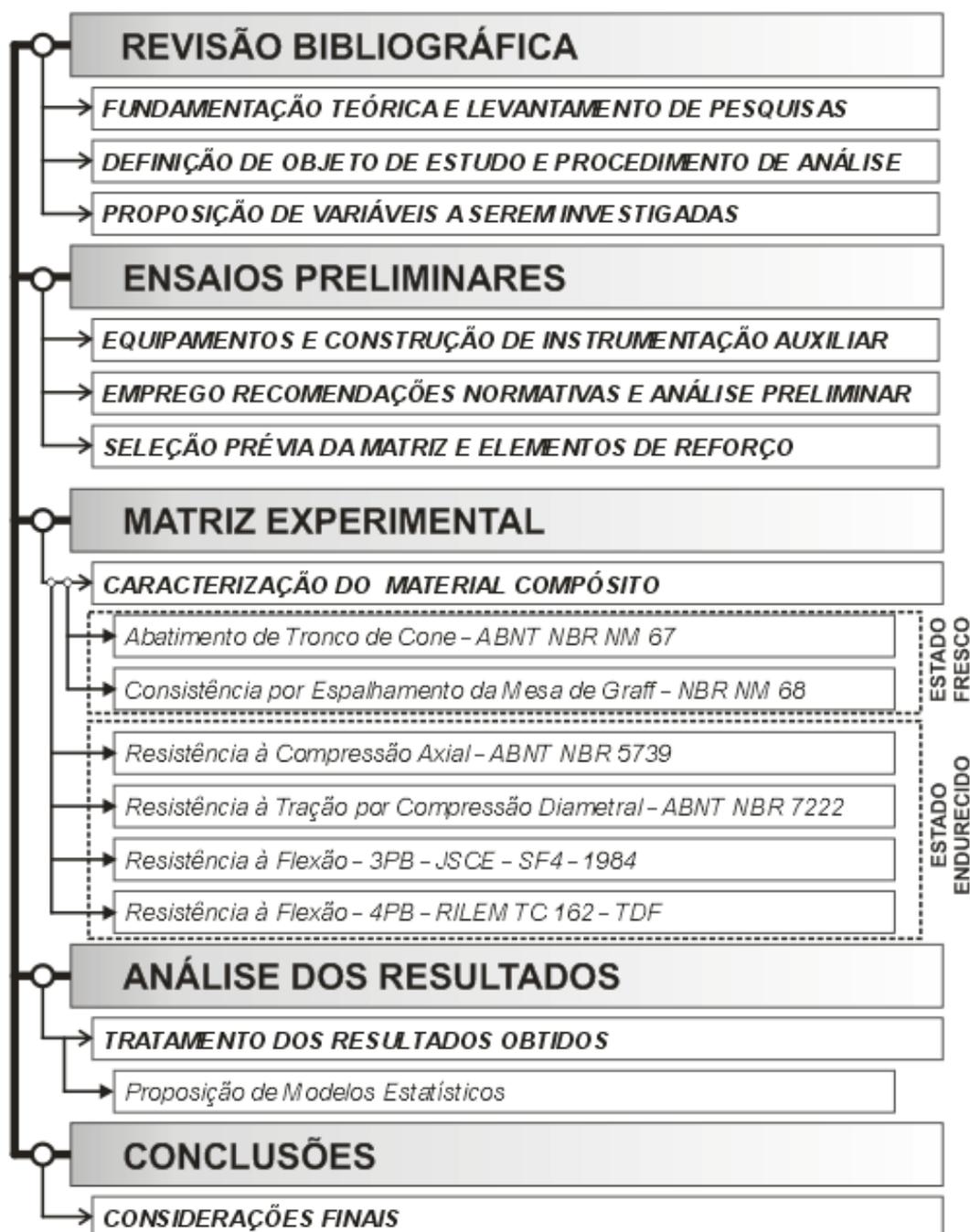


Figura 4.21 – Fluxograma de pesquisa adotado.

Além desta série de ensaios, as formas como os compósitos foram gerados contendo a incorporação de fibras isoladas, tal como ocorre com as combinações binárias e terciárias, são função de uma amostra representativa. Essa visualização é de grande importância para a fixação da quantidade de material que realmente será estudada, assim como para garantir o reconhecimento e validade da metodologia.

Com o objetivo de viabilizar a execução do programa experimental com todas as variáveis e níveis de interesse e definição do espaço amostral, faz-se necessário aplicar um planejamento de experimentos. Ou seja, a estratégia adotada consiste em empregar uma técnica de otimização, cujo objetivo principal reside em planejar o programa, distribuindo adequadamente os pontos experimentais, tendo em vista a definição dos dados a serem coletados, bem como a quantidade e as condições nas quais devem ser realizados.

Desta forma, a presente proposta do método estatístico fundamenta-se na metodologia de superfície de resposta, que por sua vez está baseada em uma simplificação de um Projeto Composto de Segunda Ordem (PSCO) para experimentos de três fatores e que pode ser representado graficamente, conforme a Figura 4.22.

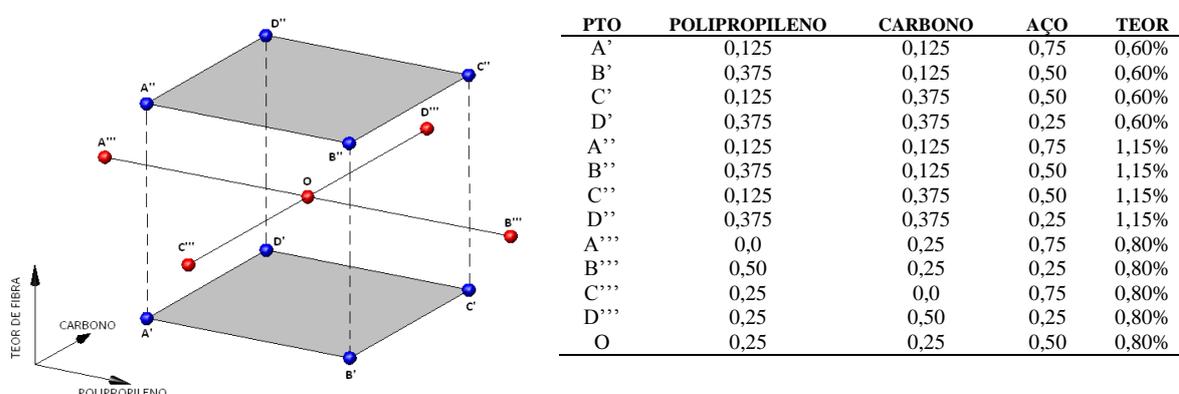


Figura 4.22 – Pontos de experimentos – definição do programa experimental.

No plano horizontal, os eixos representam a proporção das fibras secundárias de polipropileno e carbono e o eixo vertical o teor total de fibras adicionadas ao compósito. Os valores de proporção das fibras são explicados no próximo item, no qual as variáveis de estudo são apontadas separadamente.

Levando em consideração a disponibilidade de um pequeno período de tempo e de um custo elevado para a realização dos ensaios, elaborou-se um fracionamento eficiente e econômico, reduzindo o número total de experimentos, porém sem perda de informações.

Outro dado importante é a execução de quatro repetições, totalizando quatro exemplares para cada situação de análise.

4.7. DEFINIÇÃO DE VARIÁVEIS

É sabido que existem muitas variáveis que influenciam no desempenho de um compósito, tanto associadas à matriz, bem como ao elemento de reforço. Diante das investigações anteriormente mencionadas, uma gama de variáveis será de grande importância para o entendimento dos fenômenos dos CRF.

Sendo assim, com relação às variáveis de estudo, decidiu-se dividi-las em grupos, sendo fundamental destacar o seguinte:

4.7.1. Variáveis Independentes (controladas)

a) Tipo de fibra

Conforme mencionado anteriormente com mais detalhe, as fibras diferem quanto aos materiais constituintes. São eles: Aço, polipropileno e carbono.

b) Geometria das fibras

A mudança na geometria na fibra será evidenciada pela especificação do seu comprimento e diâmetro, de acordo com os dados dos fabricantes. Tanto no caso de fibras isoladas, como no caso de adições combinadas (binárias e/ou terciárias), apenas um comprimento de cada fibra será empregado na análise.

c) Teor de fibras

Para a combinação de fibras inseridas na mistura, foram estipulados três teores distintos. Segundo a Figura 4.18 (ver item anterior), os valores dos teores correspondem a 0,6%, 0,8% e 1,15% de volume de fibras com relação ao concreto. É importante destacar que os 13 pontos de experimentos são estrategicamente posicionados, de modo que quatro pontos são estudados para teores de 0,6%, quatro pontos, para teores de 1,15%, enquanto que os pontos centrais (estrela do cubo) são investigados quando o teor é de 0,8%.

d) Combinações / proporções

Como descrito anteriormente, para que o programa experimental fosse validado, foi necessário definir qual o tamanho da amostra a ser empregada. Em função desta distribuição escolhida, as fibras foram devidamente combinadas, de maneira que as suas proporções foram fixadas (ver tabela indicada na Figura 4.19). A proporção das fibras de

aço advém da parcela complementar da combinação das fibras de polipropileno e carbono, somando uma taxa 1,0 de fibras de um determinado teor a ser investigado.

4.7.2. Variáveis Dependentes

Exemplificando as variáveis dependentes dos compósitos obtidos das combinações e adoções de parâmetros acima mencionados, tem-se:

Resistência à tração por compressão diametral (f_t^{CRF}) e a resistência característica do compósito (f_c^{CRF}) à compressão axial; verificação da consistência e trabalhabilidade da mistura; Fator de tenacidade dos compósitos no seu estado endurecido (FT^{CRF}) e resistência à flexão equivalente ($f_{eq.2}, f_{eq.3}$).

4.7.3. Variáveis constantes

Convém salientar que, nesta pesquisa, decidiu-se concentrar a atenção em variáveis associadas às fibras, sendo então definida e mantida constante uma matriz de concreto de referência ($f_c = 25$ MPa).

4.8. INSTRUMENTAÇÃO

A análise do comportamento estrutural foi realizada com base nos dados obtidos através do monitoramento de parâmetros, como as cargas, deslocamentos e deformações. Todas essas informações foram armazenadas em sistemas de aquisição de dados controlados via computador. A seguir, discute-se como foram efetuadas as medidas de cada uma destas grandezas.

4.8.1. Sistema de medição de deslocamento

Segundo a descrição feita no item 4.4.1.3, nos ensaios para obtenção do módulo de deformação deste capítulo, *LVDTs* (*Linear Voltage Differential Transducer*) foram devidamente posicionados com o intuito de capturar a evolução dos deslocamentos axiais do corpo-de-prova, no decorrer de todo o ensaio.

Para garantir uma maior acuidade no levantamento das curvas carga x deslocamento e, conseqüentemente, calcular a tenacidade do compósito e resistência equivalente à flexão, citados anteriormente nos procedimentos de ensaio de flexão, faz-se necessário monitorar o deslocamento da viga durante todo o tempo de realização do mesmo, onde é comum a sua aferição no centro do vão. Para tanto, foram também utilizados os transdutores de deslocamento, tipo *LVDT*, sendo estes da marca *SENSOTEC*, com curso de $\pm 50,8$ mm e precisão de 0,01 mm.

4.8.2. Abertura de entalhe

Para medição das aberturas *CMOD* (*Crack Mouth Open Displacement*), mencionado nos ensaios de flexão em três pontos, foi montado em laboratório um *clip gauge*. O princípio básico do sensor tipo *clip gauge* funda-se na aferição de aberturas de fissuras que se propagam na mesma direção do seu eixo. Ou seja, as aberturas características do modo I de fratura, podem ser facilmente monitoradas pelas lâminas paralelas que formam o *clip gauge*.

Diversos *clips* são encontrados no mercado, mas para o presente trabalho, um sensor, com tais características, foi construído à base na resposta de *strain gauge*. As lâminas paralelas que o compõe são construídas de um material elástico linear que não se plastifique, do tipo aço mola. Na ponta de cada lâmina foi conformado um olhal que funcionou como uma rótula, com o intuito de não transferir efeitos de momento localizado e a permitir que a peça ficasse submetida somente a esforços perpendiculares ao seu eixo, isto é, comportamento de uma viga simplesmente engastada com uma carpa perpendicular na extremidade livre. Pode-se perceber nas figuras abaixo, o princípio de funcionamento e calibragem do mesmo.

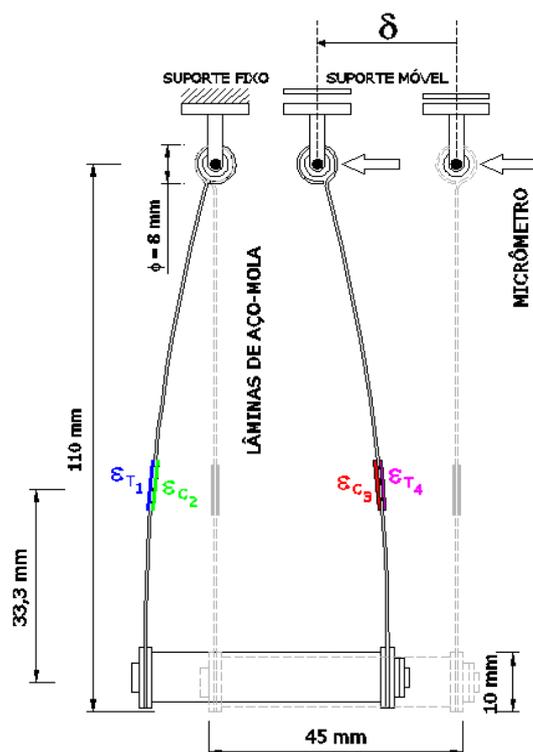


Figura 4.23 – *Clip gauge* instrumentado – dimensões, condições de contorno, disposição dos *strain gauge*

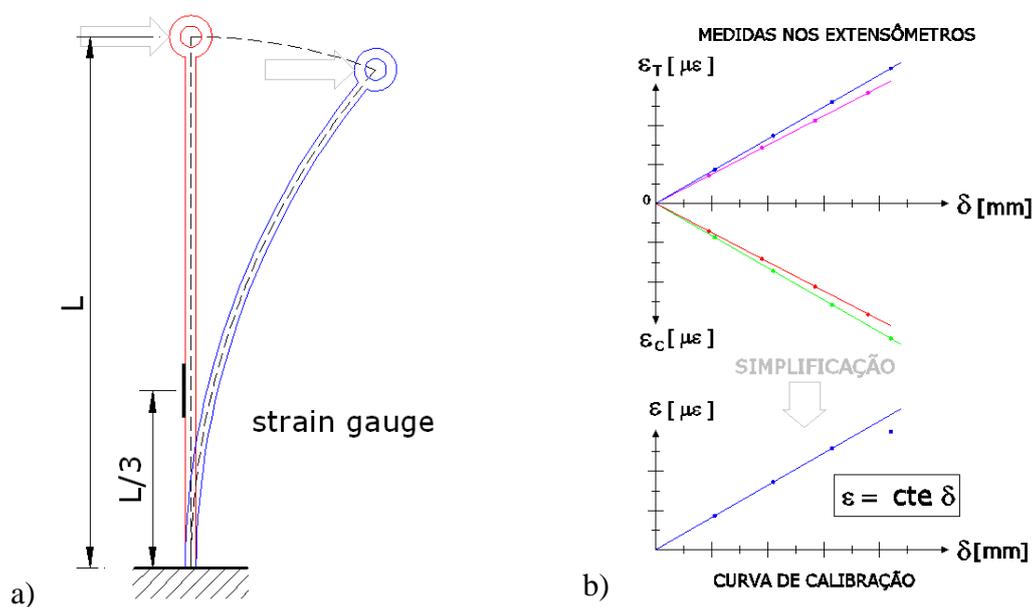


Figura 4.24 – a) Simplificação viga monoengastada, *strain gauge* localizados a 1/3 das lâminas b) Comportamento $\delta \times \varepsilon$ aço mola (média das deformações).

Para a calibração, partiu-se da tentativa de medir os deslocamentos aplicados em uma das extremidades, mantendo a outra fixa, a fim de ter controle das aberturas e/ou fechamento no *clip*.

De acordo com as imagens apresentadas na Figura 4.25, um micrômetro, com precisão de 0,01 mm, foi devidamente posicionado para medir o deslocamento compreendido entre os pontos de rótulas, ao mesmo tempo em que os sinais de tensão dos *strain gauge* tinham seus valores convertidos em unidades de deformação específica e posteriormente gravados pelo sistema de aquisição de dados, conforme descrito anteriormente. Foram variados os deslocamentos prescritos num intervalo compreendido entre 0,0 a 25,0 mm, num passo de 0,5 mm.

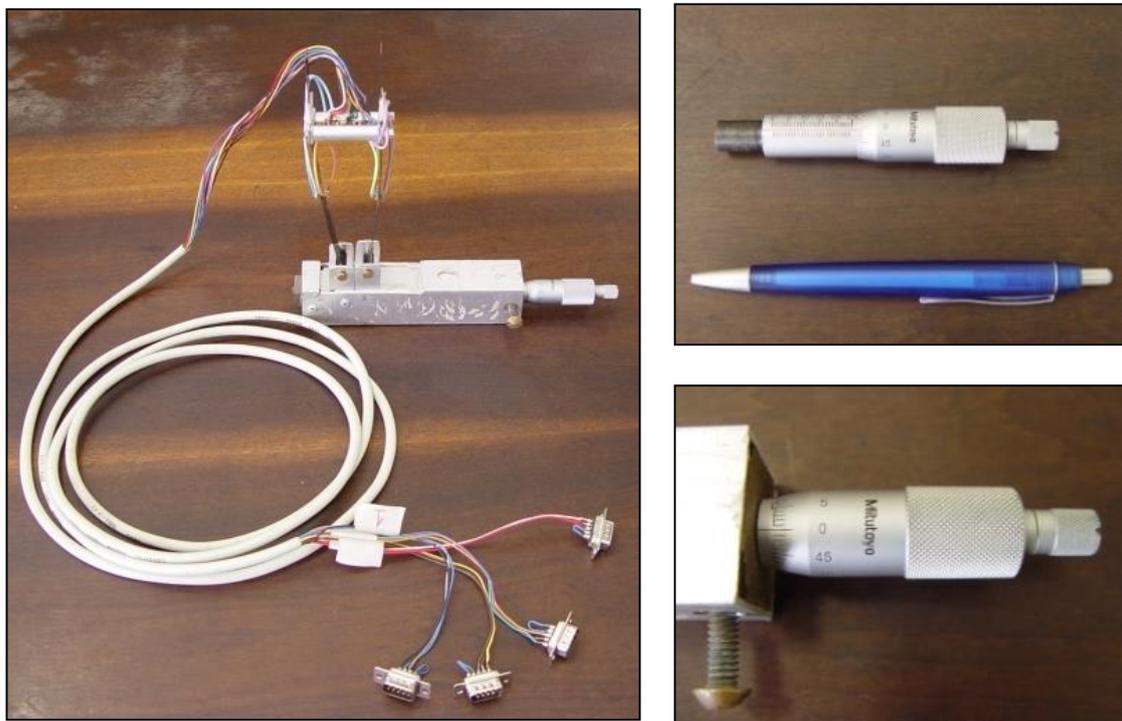


Figura 4.25 – Dispositivo de calibração dos *clip gauges*.

De posse destes dados, uma curva de calibração foi formulada para cada *clip gauge*, possibilitando percorrer o caminho inverso, em que, para cada valor de deformação indicada no *strain gauge*, um valor de abertura é correspondido. Vale ressaltar que as curvas foram obtidas pegando o valor médio das deformações, em módulo, dos quatro sensores, posicionados na mesma distância com relação ao engaste das hastes de aço. Assim sendo, as retas podem ser visualizadas na Figura 4.26, a seguir.

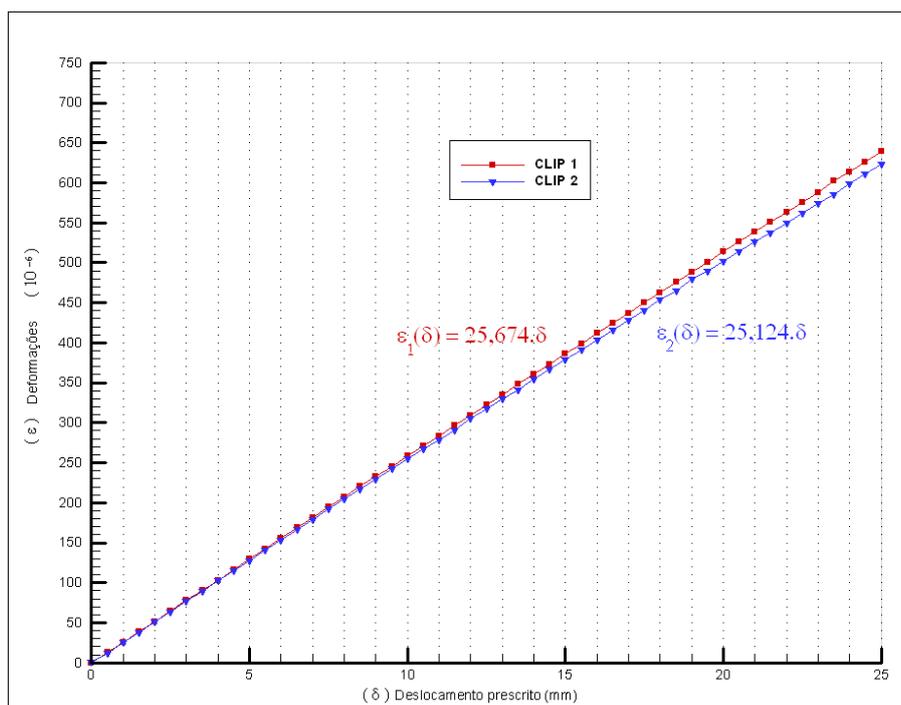


Figura 4.26 – Curvas de calibração para os *clip gauges* 01 e 02.

Na busca de uma confirmação, no que se refere à validade desses dispositivos, um modelo numérico, com base no Método dos Elementos Finitos, foi discretizado com elementos 3D do tipo hexaédrico de oito nós (*BRICK 45*), para material elástico linear e condições de contorno similares ao protótipo.

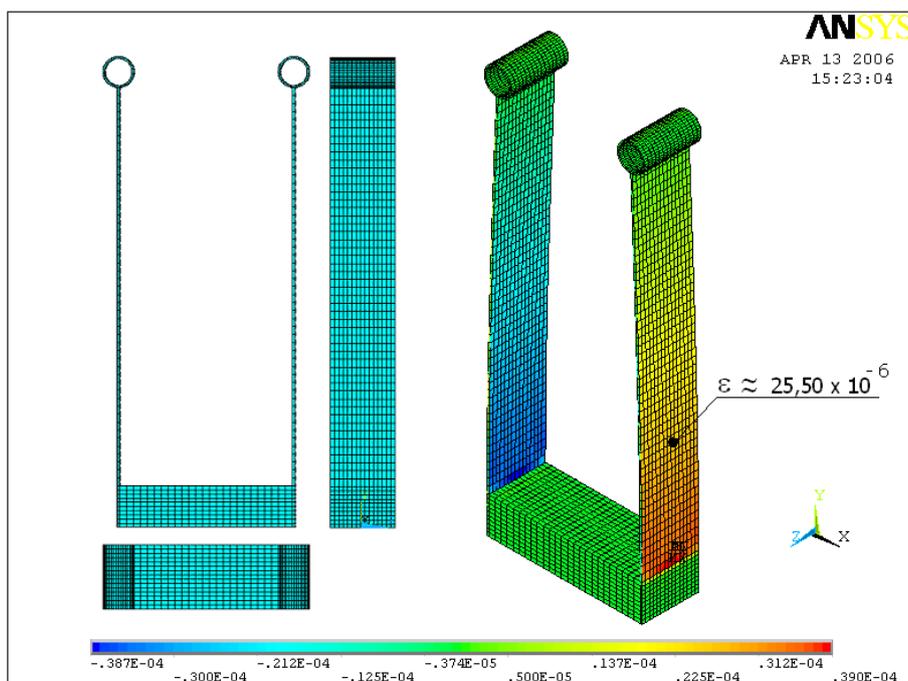


Figura 4.27 – Simulação numérica MEF (ANSYS) - $\varepsilon(33,5\text{mm}) = 25,50 \times 10^{-6}$.

Para um deslocamento de 1,0 mm de fechamento, por exemplo, os valores de deformações encontrados foram de, aproximadamente, $25,50 \mu\epsilon$. De acordo com curvas de calibração, para um $\delta = 1,0$ mm, os valores encontrados são:

$$\epsilon_{CLIP 1} = 25,874 \mu\epsilon ; \epsilon_{CLIP 2} = 25,003 \mu\epsilon$$

4.8.3. Deformações específicas

O monitoramento das deformações específicas foi realizado através de extensômetros elétricos de resistência – *strain gages* – da marca KYOWA, com base de medição de 5 mm colados diretamente sobre o material de interesse.

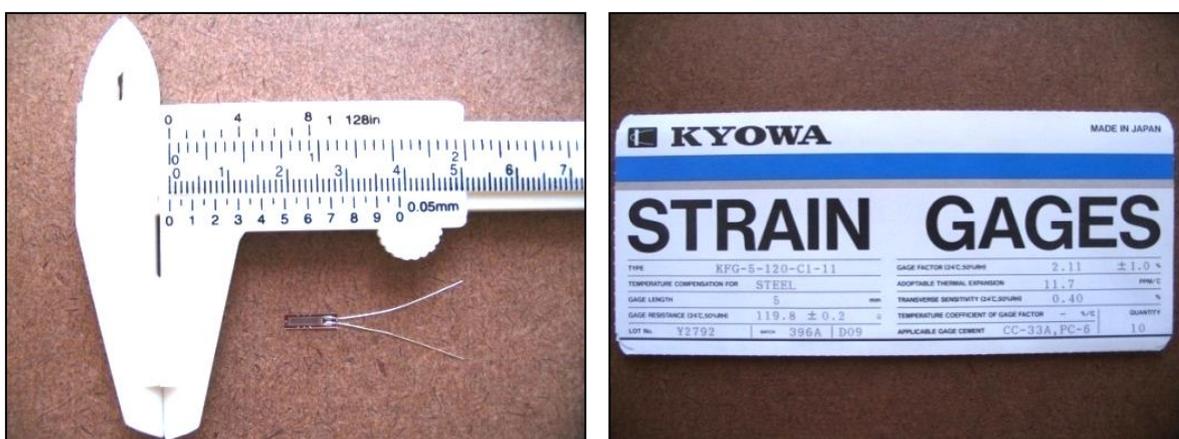


Figura 4.28: detalhe do *strain gauge* utilizado na montagem do *clip gauge*.

Um detalhe de um *strain gage* colado sobre uma das lâminas de aço que constitui o *clip gauge* pode ser observado na figura 4.29.

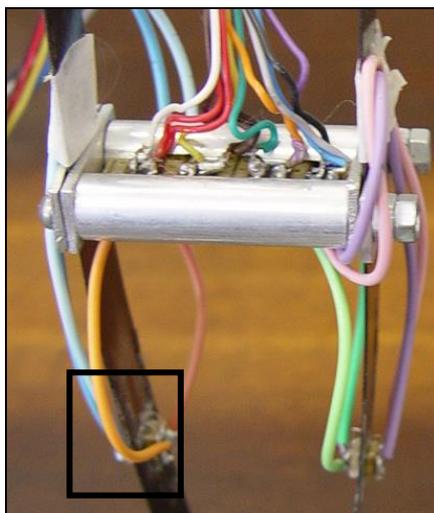


Figura 4.29: detalhe do *strain gauge* colado a superfície da lâmina do *clip gauge*.

ESTUDOS PRELIMINARES

Os resultados apresentados neste capítulo são oriundos dos testes realizados na fase inicial desta pesquisa, de acordo com a metodologia proposta no Capítulo 4. Apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de compressão simples de concretos reforçados com fibras de aço, distintas entre si no que tange à sua geometria. A trabalhabilidade das misturas foi investigada. Além disso, ensaios de flexão em três pontos foram realizados em matrizes não reforçadas, como também em matrizes com adições de fibras de aço e polipropileno, separadamente. As curvas obtidas nestes ensaios são apresentadas. Esses dados subsidiaram as definições relativas à fase principal da pesquisa.

5.1. RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES

Neste item, se apresentam os resultados dos ensaios de compressão simples realizados em corpos de prova cilíndricos, confeccionados a partir de concreto simples, em comparação com os resultados referentes ao concreto reforçado com fibras de aço.

Para esta etapa do trabalho, três diferentes fibras metálicas foram empregadas (65/35, 65/60 e 80/60, confeccionadas pela Dramix®), com o intuito de definir qual seria a fibra primária a ser usada na etapa seguinte do programa experimental. As características básicas das mesmas, conforme o fabricante, são apresentadas na Figura 5.1.

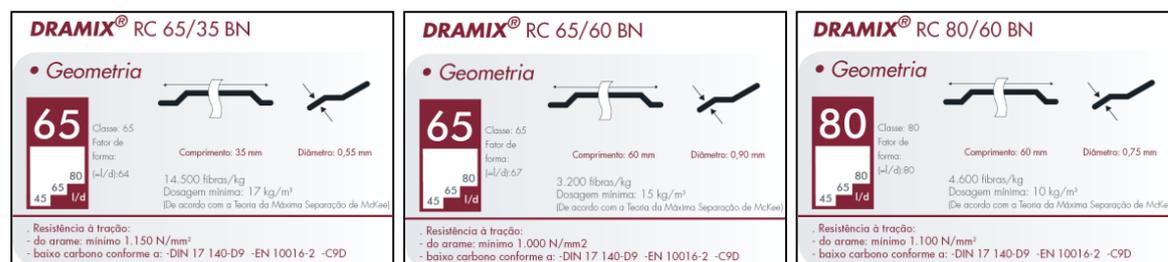


Figura 5.1: Propriedades das fibras metálicas empregadas.

Com a variação dos teores totais de fibras nos patamares de 0,6%, 0,8% e 1,15%, é possível observar a mudança de comportamento dos compósitos, em duas idades distintas (14 e 28 dias), por meio dos gráficos das Figuras 5.2 a 5.4.

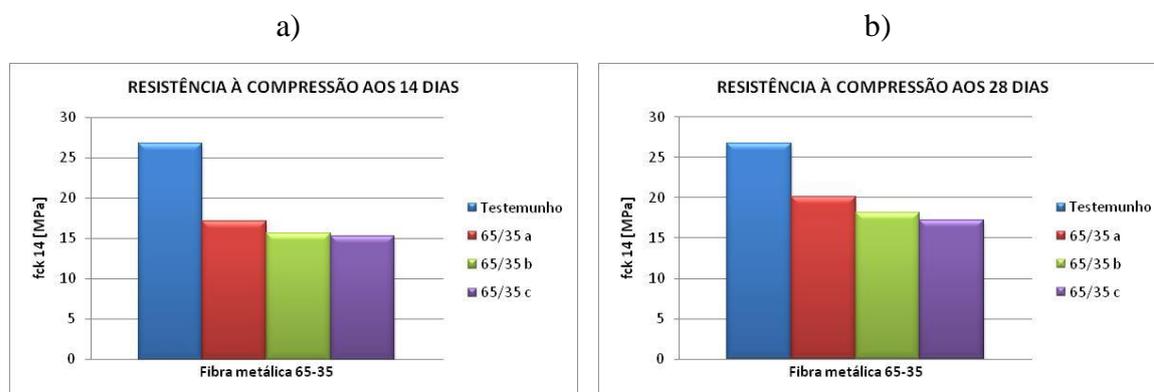


Figura 5.2: Evolução da resistência à compressão do concreto reforçado com fibras 65-35. a) aos 14 dias ; b) aos 28 dias.

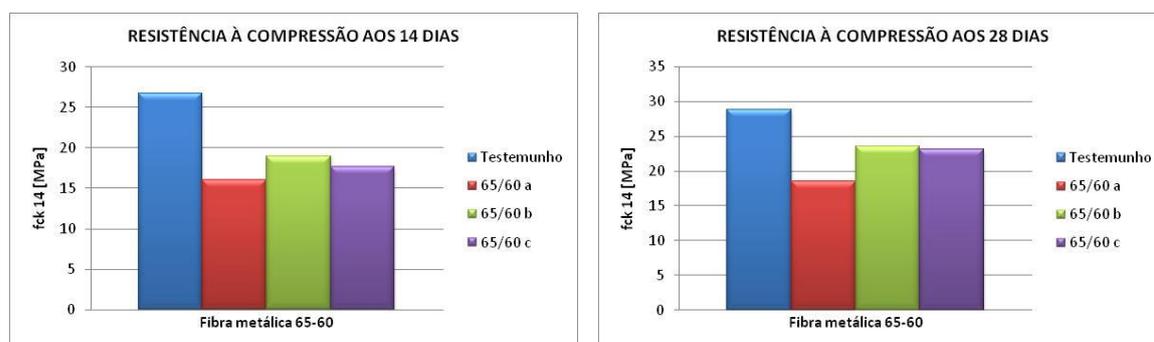


Figura 5.3: Evolução da resistência à compressão do concreto reforçado com fibras 65-60. a) aos 14 dias; b) aos 28 dias.

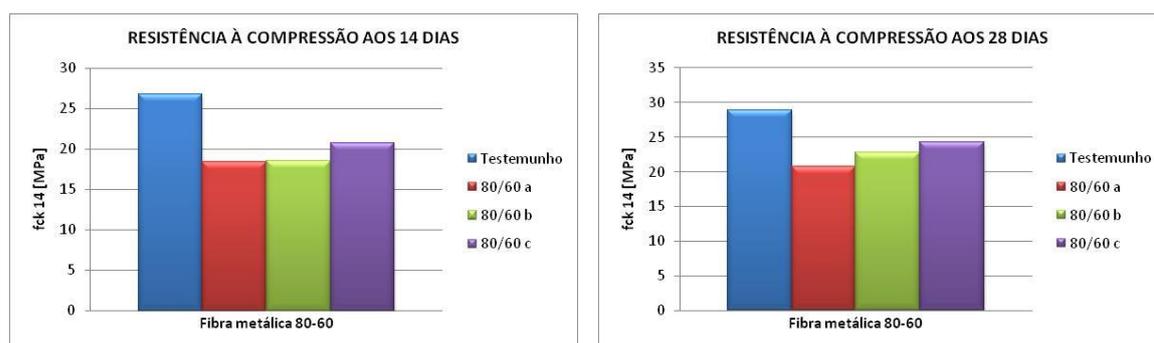


Figura 5.4: Evolução da resistência à compressão do concreto reforçado com fibras 80-60. a) aos 14 dias; b) aos 28 dias.

Sabe-se que a presença das fibras melhora pouco ou até prejudica os valores de resistência à compressão dos compósitos. Como observado nos gráficos acima, a incorporação de fibras causou perdas de resistência em relação ao testemunho, para todas as fibras metálicas empregadas. Esse comportamento pode estar relacionado ao processo de moldagem dos CPs,

que ocorreu em moldes metálicos convencionais com dimensões de 95 x 190 mm. A moldagem nesses cilindros de dimensões reduzidas pode causar um alinhamento das fibras na direção paralela à altura da forma (e de aplicação de carga durante o ensaio de compressão), o que faz com que o efeito das mesmas como elementos de resistência à deformação transversal seja muito reduzido. Por esse motivo, para a fase principal do estudo, com os 3 tipos de fibra, foi adotada a prática de extração dos corpos de prova a serem ensaiados de um corpo de prova prismático de maiores dimensões, conforme mencionado no capítulo anterior.

Apesar da dificuldade de identificar um comportamento dominante nos resultados acima, considerou-se que, no geral, a fibra tipo 80-60 foi a que apresentou o comportamento mais estável e favorável, especialmente em teores mais elevados. Essa foi a principal razão para a escolha dessa como a fibra metálica a ser usada na fase principal, quando se testaram as combinações híbridas de fibras.

5.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRABALHABILIDADE

O diagrama apresentado na Figura 5.5 ilustra a principal desvantagem ocasionada pela incorporação das fibras nas misturas de concreto: a redução da trabalhabilidade. Conforme esperado, ocorre uma redução da fluidez do concreto com o incremento da quantidade de fibras imersas na mistura, causando problemas de trabalhabilidade que podem comprometer seriamente o emprego das misturas resultantes. Com o objetivo de assegurar a viabilidade de emprego dos concretos com fibras, foi adotada a adição de superplastificante tipo Glenium 51, para compensação das perdas de trabalhabilidade. Na maior parte dos casos, uma adição de 0,25%, em relação ao peso de cimento, foi suficiente para esse fim, salvo no caso da mistura com fibra 80-60 em teor de 90 kg/m³ de concreto (quantidade correspondente a uma adição de 1,15% por volume). Nesse caso a quantidade de aditivo teve que ser elevada para 0,50%.

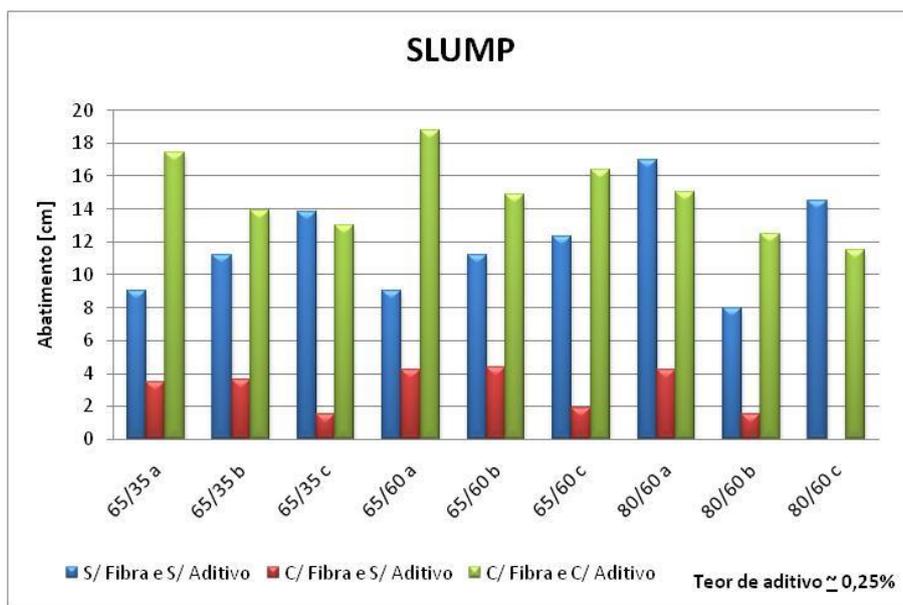


Figura 5.5: Abatimento de tronco de cone – concreto reforçado com fibras de aço.

5.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO

Os resultados dos ensaios de flexão em três pontos em prismas fabricados com os dois concretos inicialmente estudados, um com $f_c = 25$ MPa e outro com $f_c = 50$ MPa são apresentados nesse item. Esta investigação foi levada a cabo com o objetivo de definir qual seria a melhor faixa de resistência da matriz a ser usada para os estudos de hibridização de fibras de interesse dessa pesquisa.

Com base na norma RILEM TC-89 foram determinados os parâmetros de fratura dessas matrizes, sendo os resultados comparados com dados disponíveis na literatura.

O comportamento à flexão de concretos com adição de fibras de polipropileno e aço também foi estudado. Decidiu-se nessa etapa estudar o efeito de cada fibra em separado, buscando identificar tendências de comportamento associadas ao uso de macro e microfibras.

5.3.1. Resultados de Flexão - Concreto Simples

Em geral, o concreto simples apresenta um comportamento frágil na ruptura. Nas vigas submetidas à flexão desta pesquisa, este comportamento foi reproduzido satisfatoriamente. Como se pode observar no exemplo da Figura 5.6, as vigas de concreto simples romperam abruptamente, logo após a nucleação da trinca a partir do vértice do entalhe.



Figura 5.6: Ruptura brusca da matriz – comportamento frágil do concreto

Apesar dessa ruptura abrupta, o sistema de medição de abertura da trinca foi capaz de registrar adequadamente o comportamento de ruptura das vigas, conforme pode ser visto nas curvas das Figuras 5.7 e 5.8. Observa-se com clareza a evolução dos valores de CMOD (crack mouth open displacement) desde a fase inicial de carregamento, passando pelo processo de “enfraquecimento” do material e, finalmente, de formação e propagação de uma trinca ao longo de toda a altura da viga.

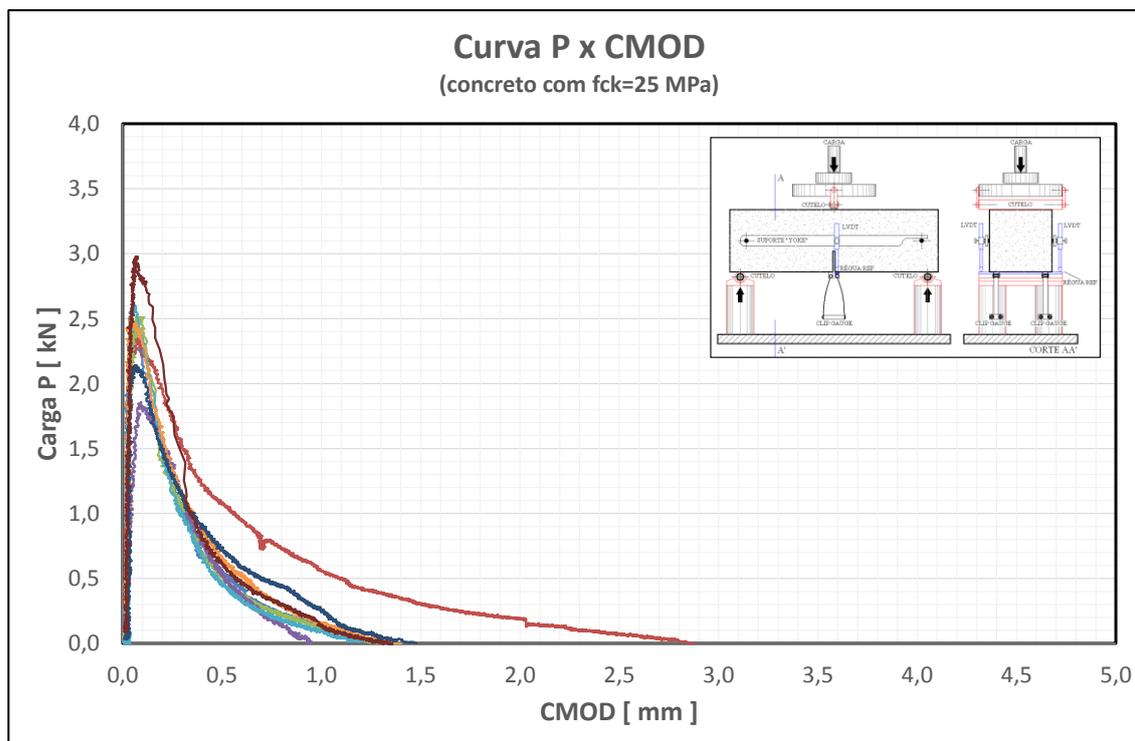


Figura 5.7: Curvas P vs CMOD – vigas de concreto simples ($f_c = 25$ MPa)

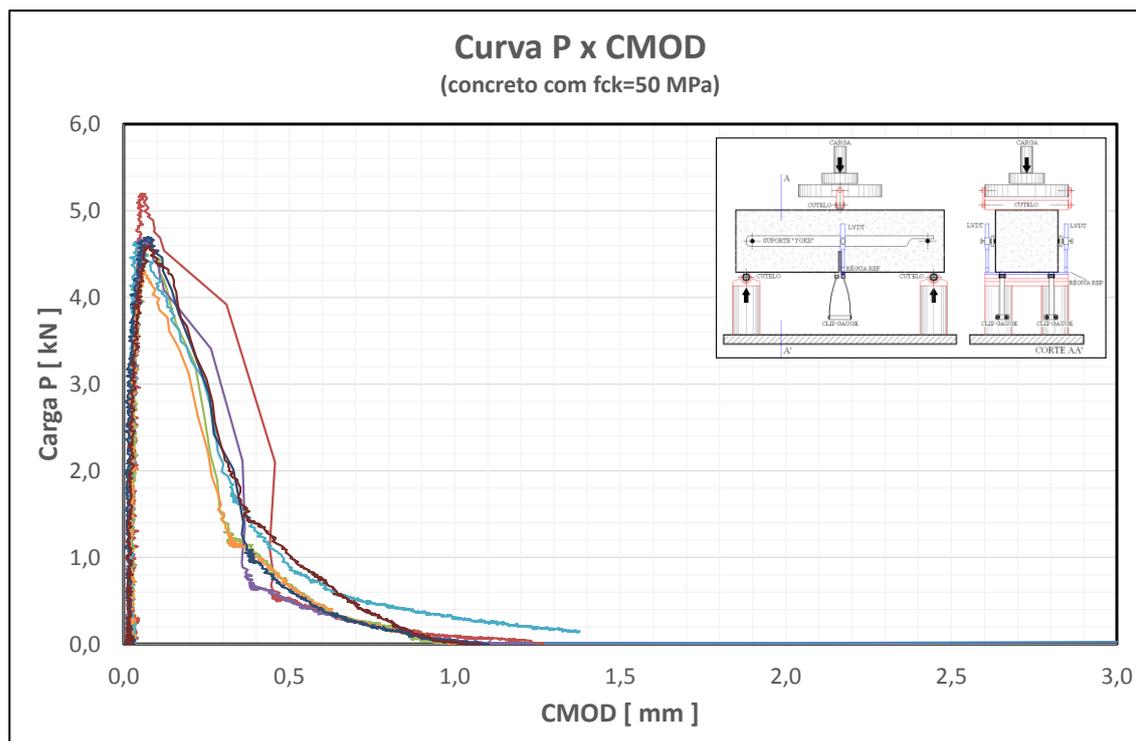


Figura 5.8: Curvas P vs CMOD – vigas de concreto simples ($f_c = 50$ MPa)

Os “saltos” que podem ser observados nas curvas da Figura 5.8 representam bem a ruptura brusca e repentina da matriz, comportamento típico quando se usam matrizes com resistência mais elevada (no caso, matriz de 50 MPa).

Essa liberação de energia elevada, num intervalo de tempo muito curto, pode causar um problema, quando se pretende reforçar o concreto com fibras. Sabe-se que as fibras funcionam como pontes de transmissão de esforços, e, dessa forma, como elementos inibidores da formação, nucleação (microtrincas) e propagação (macrofibras) de fissuras e trincas no interior do compósito. As fibras são mobilizadas à medida em que a energia é transferida da matriz para o reforço. Quando a energia acumulada é elevada e a transferência é rápida (caso das matrizes de resistência mais elevada), a atuação do reforço pode ser prejudicada, pois a fibra pode se romper precocemente, se possuir um baixo módulo ou resistência à tração, ou escorregar e ser arrancada, em virtude da energia liberada superar a resistência de aderência fibra-matriz.

Esse poderia ser um importante fator de ruído que dificultaria a análise comparativa de desempenhos durante o estudo das combinações híbridas de fibras. Por esta razão, a matriz de $f_c = 25$ MPa foi selecionada para a continuidade do programa experimental.

Segundo o modelo proposto por JENQ & SHAH, 1995 pode-se, com base nas curvas acima, estimar os valores de Módulo de Elasticidade (E), o Fator de Intensidade de Tensões (K_{IC}) e o Deslocamento Crítico de Abertura da Ponta da Trinca ($CTOD_C$), de acordo com a norma RILEM TC 89.

Adotando-se essa abordagem, chega-se aos valores que são apresentados abaixo, nas tabelas 5.1 a 5.4.

a) Módulo de Elasticidade e comprimento crítico efetivo

Tabela 5.1: Valores de a_c para os Concretos de 25 MPa e 50MPa.

| VIGA | $f_c = 25 \text{ MPa}$ | | | $f_c = 50 \text{ MPa}$ | | |
|------|---------------------------------|------------------------------|-----------------|---------------------------------|------------------------------|-----------------|
| | C_u | E | a_c | C_u | E | a_c |
| | $10^5 [\text{mm} / \text{N}]$ | $[\text{N} / \text{mm}^2]$ | $[\text{mm}]$ | $10^5 [\text{mm} / \text{N}]$ | $[\text{N} / \text{mm}^2]$ | $[\text{mm}]$ |
| VT-1 | 3,107 | 25865,736 | 87,085 | 2,155 | 47829,053 | 92,957 |
| VT-2 | 3,976 | 25865,642 | 92,906 | 1,876 | 47828,263 | 89,732 |
| VT-3 | 3,822 | 25866,336 | 91,996 | 2,246 | 47830,368 | 93,894 |
| VT-4 | - | - | - | 2,021 | 47828,787 | 91,479 |
| VT-5 | 3,328 | 25865,912 | 88,743 | 1,591 | 47829,101 | 85,749 |
| VT-6 | 5,231 | 25866,401 | 98,936 | 2,182 | 47829,419 | 93,238 |
| VT-7 | 3,869 | 25865,386 | 92,280 | 2,005 | 47828,831 | 91,293 |
| VT-8 | 3,817 | 25865,487 | 91,968 | 2,507 | 47828,957 | 96,341 |

b) Fator de Intensidade de Tensões Crítico

Tabela 5.2: Valores de K_{IC} (10% a 25%) para os Concretos de 25 MPa e 50MPa.

| VIGA | $K_{IC} (f_c = 25 \text{ MPa})$ | | | $K_{IC} (f_c = 50 \text{ MPa})$ | | |
|------|---------------------------------|--------|--------|---------------------------------|--------|--------|
| | $[\text{N/mm}^{3/2}]$ | | | $[\text{N/mm}^{3/2}]$ | | |
| | | -10% | -25% | | -10% | -25% |
| VT-1 | 35,148 | 31,634 | 28,119 | 98,962 | 89,066 | 79,170 |
| VT-2 | 38,817 | 34,936 | 31,054 | 78,565 | 70,708 | 62,852 |
| VT-3 | 41,569 | 37,412 | 33,255 | 81,451 | 73,306 | 65,161 |
| VT-4 | - | - | - | 76,368 | 68,731 | 61,095 |
| VT-5 | 40,159 | 36,144 | 32,128 | 65,355 | 58,819 | 52,284 |
| VT-6 | 43,260 | 38,934 | 34,608 | 74,260 | 66,834 | 59,408 |
| VT-7 | 41,407 | 37,267 | 33,126 | 76,563 | 68,907 | 61,250 |
| VT-8 | 48,235 | 43,411 | 38,588 | 85,958 | 77,362 | 68,767 |

c) Deslocamento de Abertura Crítico na Ponta da Trinca

Tabela 5.3: Valores de $CTOD_C$ (10% a 25%) para os Concretos de 25 MPa e 50 MPa.

| VIGA | $CTOD_C (f_c = 20 \text{ MPa})$ | | | $CTOD_C (f_c = 50 \text{ MPa})$ | | |
|------|---------------------------------|-------|-------|---------------------------------|-------|-------|
| | $[\text{mm}]$ | | | $[\text{mm}]$ | | |
| | | -10% | -25% | | -10% | -25% |
| VT-1 | 0,025 | 0,023 | 0,020 | 0,044 | 0,040 | 0,036 |
| VT-2 | 0,032 | 0,028 | 0,025 | 0,033 | 0,030 | 0,026 |
| VT-3 | 0,033 | 0,030 | 0,027 | 0,037 | 0,033 | 0,030 |
| VT-4 | - | - | - | 0,033 | 0,030 | 0,027 |
| VT-5 | 0,030 | 0,027 | 0,024 | 0,025 | 0,023 | 0,020 |
| VT-6 | 0,040 | 0,036 | 0,032 | 0,033 | 0,030 | 0,027 |
| VT-7 | 0,033 | 0,030 | 0,027 | 0,033 | 0,030 | 0,026 |
| VT-8 | 0,039 | 0,035 | 0,031 | 0,041 | 0,037 | 0,033 |

d) Energia Específica de Fratura

Tabela 5.4: Valores de G_f (10% a 25%) para os Concretos de 25 MPa e 50 MPa.

| VIGA | $G_f (f_c = 25 \text{ MPa})$ | | | $G_f (f_c = 50 \text{ MPa})$ | | |
|------|------------------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|-----------------|-----------------|
| | [N/mm] | | | [N/mm] | | |
| | | $p/K_{IC-10\%}$ | $p/K_{IC-25\%}$ | | $p/K_{IC-10\%}$ | $p/K_{IC-25\%}$ |
| VT-1 | 0,048 | 0,039 | 0,031 | 0,205 | 0,166 | 0,131 |
| VT-2 | 0,058 | 0,047 | 0,037 | 0,129 | 0,105 | 0,083 |
| VT-3 | 0,067 | 0,054 | 0,043 | 0,139 | 0,112 | 0,089 |
| VT-4 | - | - | - | 0,122 | 0,099 | 0,078 |
| VT-5 | 0,062 | 0,051 | 0,040 | 0,089 | 0,072 | 0,057 |
| VT-6 | 0,072 | 0,059 | 0,046 | 0,115 | 0,093 | 0,074 |
| VT-7 | 0,066 | 0,054 | 0,042 | 0,123 | 0,099 | 0,078 |
| VT-8 | 0,090 | 0,073 | 0,058 | 0,154 | 0,125 | 0,099 |

Para fins de verificação, efetuou-se, também, uma determinação indireta da energia específica de fratura, de acordo com o critério simplificado adotado pelo CEB-FIP (2010), que correlaciona G_f com a tensão máxima de compressão, e com o tamanho máximo do agregado.

$$G_F = 73. f_{cm}^{0,18} \text{ [N/m]} \quad (5.1)$$

Onde, f_{cm} é a resistência média à compressão, em MPa.

Tabela 5.5: Valores básicos da energia de fratura G_{F0} [N/mm].

| $d_{\text{máx}}$ (mm) | G_{F0} (N/mm) |
|-----------------------|-----------------|
| 8,0 | 0,025 |
| 16,0 | 0,030 |
| 32,0 | 0,058 |

Fonte: CEB-FIP (2010)

Usando este critério, foram obtidas as respectivas estimativas de valores de G_F :

$$p/ f_c = 25 \text{ MPa} \rightarrow f_{cm} = 33 \text{ MPa} \rightarrow G_{F25} = 0,137 \text{ N/mm}$$

$$p/ f_c = 50 \text{ MPa} \rightarrow f_{cm} = 58 \text{ MPa} \rightarrow G_{F50} = 0,152 \text{ N/mm}$$

Observa-se que o valor médio de G_F , obtido usando os dados experimentais e o modelo da norma TC-89 foi de 0,066 N/mm para o concreto de 25 MPa, abaixo à estimativa do CEB-FIP. Analisando os dados individuais, observa-se que as diferenças de valores em relação à estimativa do CEB-FIP são menores que 10%. Em um corpo de prova (VT-1) a diferença é de 8,9%. As diferenças para os demais estão inseridas num intervalo de 4,7% (VT-8) a 7,9% (VT-2).

Já para o concreto de 50 MPa a média das estimativas pela norma (0,1345 N/mm) se aproxima mais da estimativa do CEB-FIP (0,152 N/mm). Analisando os valores individuais

vemos que o valor do VT-8 se aproxima do valor estimado pelo CEB-FIP. Os corpos de prova (VT-1, VT-4, VT-5, VT-6 e VT-7) apresentam valores cerca de 2,9 a 6,3% diferentes, enquanto os demais (VT-2, VT-3, VT-8), apresentam diferenças de 0,2 a 2,3% em relação ao valor ao CEB-FIP. Em geral, os valores obtidos são próximos aos estimados pelo CEB-FIP, o que vem a favor da segurança, caso se use o critério simplificado.

Essa análise validou a decisão de selecionar a matriz de 25 MPa como referência para o estudo, pois apresenta valores de energia menores, não comprometendo a integridade do reforço na medida em que as tensões são transferidas para as fibras que estiverem presentes no plano de ruptura.

5.3.2. Resultados de Flexão - Concretos com fibras

O comportamento do concreto reforçado com fibras de polipropileno e aço sob flexão em três pontos é discutido nos itens seguintes.

Vigas de concreto com fibras de polipropileno

Duas fibras de polipropileno, fabricadas pela FITESA S.A., foram pré-selecionadas para teste como reforço da matriz de concreto de 25 MPa: a) fibras sintéticas tipo estrutural (*Polycrret ES*); b) fibras sintéticas tipo corrugada (*Polycrret CR*). Ambas são monofilamentos sintéticos, porém com espessuras e formatos bem diferenciados, como se pode observar na Figura 5.9. Dadas essas características diferenciadas, o comportamento de ambas como elemento de reforço é distinto.



a) *Polycrret ES* (25% de índice de ondulação)

b) *Polycrret CR*

Figura 5.9: Fibras sintéticas de polipropileno.

A sequência de fotos da Figura 5.10 ilustra as etapas de propagação da fissura de uma matriz de concreto reforçada com fibras de polipropileno corrugada – *Polycrret CR*.

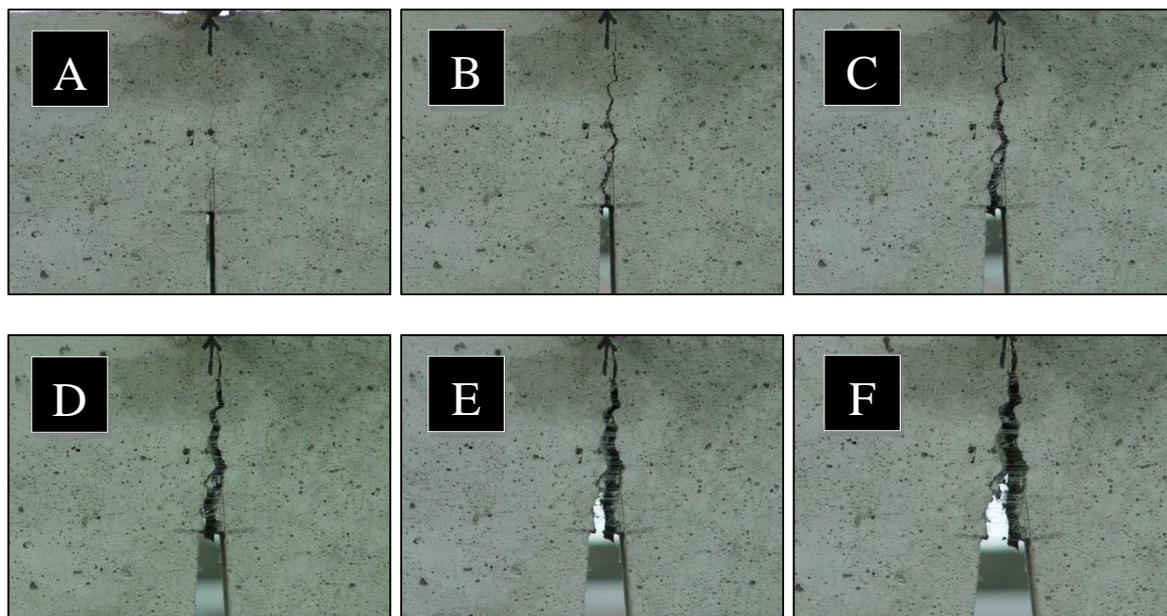


Figura 5.10: Propagação da fissura no CRF de polipropileno – *Polycrret CR*.

Observa-se que a matriz de concreto se rompe, com nucleação de uma trinca na ponta do entalhe (Fig.5.10-A). O crescimento da trinca formada inicialmente se dá de maneira estável, em virtude das pontes de transferência formadas pelas fibras de polipropileno (Fig.5.10-B), (Fig.5.10-C), (Fig.5.10-D) e (Fig.5.10-E).

Mesmo na fase em que a matriz está completamente rompida (Fig.5.10-F), as fibras continuam a atuar como elementos de reforço e a viga continua a sustentar carga, bem como atingir deslocamentos cada vez maiores. A ruptura total só se configura quando a grande maioria das fibras se rompe ou escorregam, o que em muitos casos não acontece.

De modo a compreender, graficamente, o processo de ruptura da viga e o controle de propagação da fissura ao longo da matriz de concreto, em termos da relação constitutiva que há entre a carga aplicada e evolução da abertura do entalhe na viga, a Figura 5.11 procura identificar as fases de A a F (identificadas na figura anterior) ao longo da curva $P \times \text{CMOD}$ para uma das vigas ensaiadas, cuja matriz foi reforçada com fibras de polipropileno *Polycrret CR*. Independentemente da concentração de fibras sintéticas adicionadas à mistura, os comportamentos dos compósitos para este tipo de ensaio se assemelham entre si em termos de morfologia do gráfico. Evidentemente, as misturas com maior concentração de filamentos

no plano de ruptura são beneficiadas em termos de área abaixo da curva (energia a ser consumida). A fase compreendida entre os pontos caracterizados como A e D, é destacada pelo rápido decréscimo na capacidade de carga do compósito. Na medida em que a fissura assume valores de abertura maiores as fibras se tornam mais solicitadas e, por sua vez, inibem seu crescimento, permitindo que a propagação da fissura se dê de maneira estável, estendendo o patamar até um ponto E.

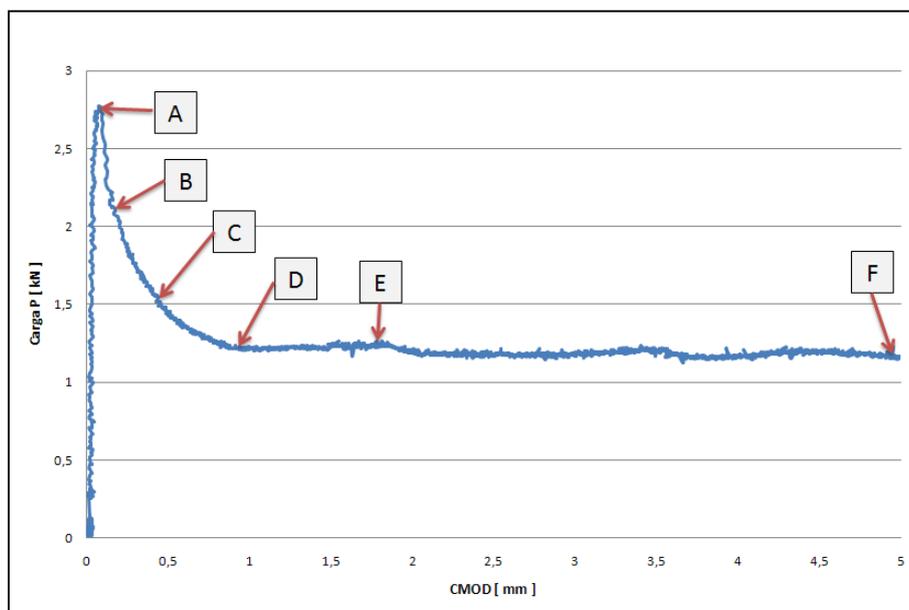


Figura 5.11: Evolução da propagação da fissura no CRF de polipropileno – *Polycrét CR*.

O intervalo compreendido entre os pontos E e F é caracterizado por um comportamento no qual as cargas não mais assumem valores crescentes devido ao fato das fibras sintéticas possuírem baixa resistência à tração. Apesar do atrito entre a superfície da fibra polimérica e a matriz de concreto garantir, predominantemente, uma ancoragem eficiente entre si, essas fibras não são apropriadas para aumento de desempenho estrutural da peça, pois os filamentos rompem à tração, cujo resultado é o comprometimento da resistência do material. Neste sentido, uma maior quantidade de filamentos menores na seção rompida se torna uma opção mais interessante quando comparado ao caso em que uma menor quantidade de fibras de maiores diâmetros é utilizada para controlar o processo de propagação das falhas.

Comparando matrizes reforçadas com fibras *Polycrét CR* e *Polycrét ES*, com participação de 6 kg de fibra para cada m³ de volume de concreto, é possível observar na Figura 5.12 que os compósitos com os filamentos corrugados são mais eficientes, uma vez que o patamar

pós-pico da carga é superior àquele correspondente ao concreto reforçado com fibras poliméricas do tipo *ES*.

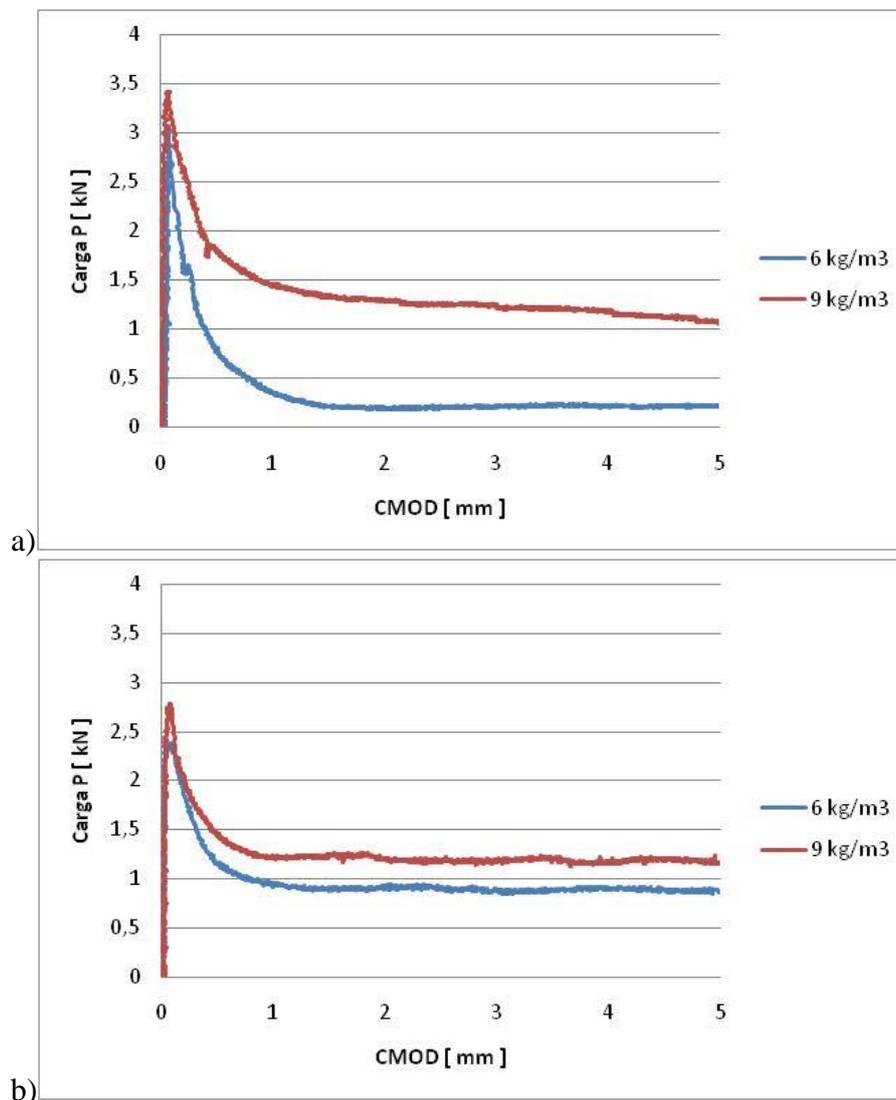


Figura 5.12: Curvas P vs CMOD – Concreto reforçado com fibras de polipropileno
a) Estrutural b) Corrugada.

Vigas de concreto com fibras metálicas

Verificando as curvas P vs CMOD para o concreto reforçado com as fibras de aço pré-selecionadas, mostradas nas Figuras 5.13 a 5.15, pode-se observar que as fibras especificadas como 65-60 e 80-60 apresentaram comportamentos semelhantes. Verifica-se, ainda, que o incremento do teor total de fibras contribui para o ganho de tenacidade do compósito. À medida em que se eleva a quantidade de fibras no plano de ruptura, maior é a capacidade portante do compósito. Esse fenômeno é facilmente identificado pelo comportamento das

curvas ilustradas nas figuras, principalmente quando a abertura das fissuras atinge valores próximos ao comprimento da fibra.

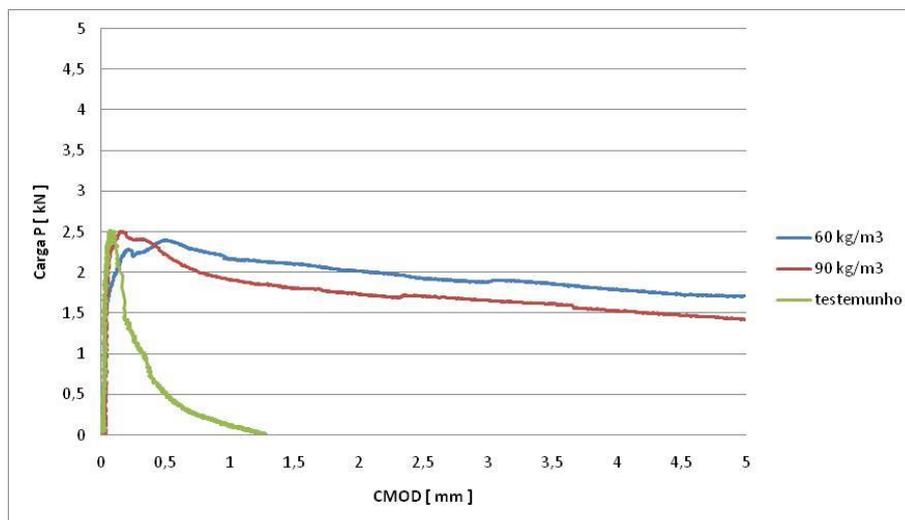


Figura 5.13: Curvas P vs CMOD – Concreto reforçado com fibras metálicas tipo 65-35

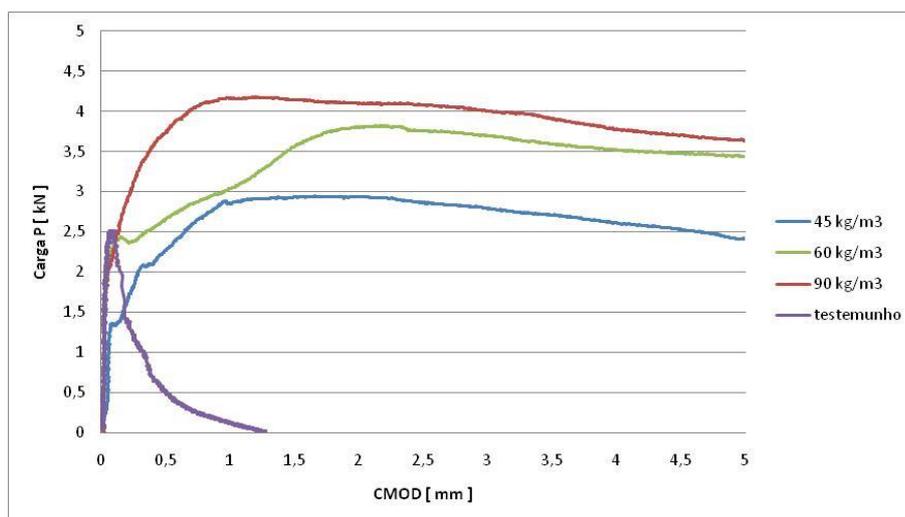


Figura 5.14: Curvas P vs CMOD – Concreto reforçado com fibras metálicas tipo 65-60

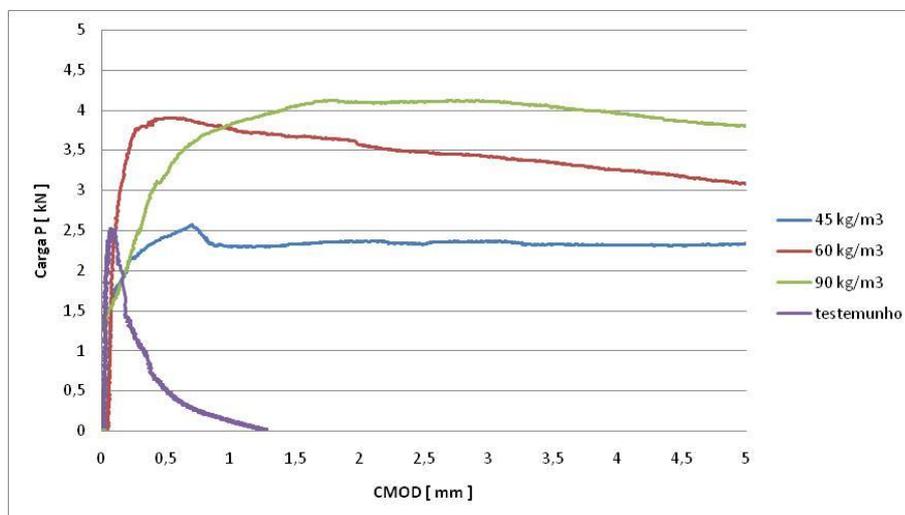


Figura 5.15: Curvas P vs CMOD – Concreto reforçado com fibras metálicas tipo 80-60

No concreto reforçado com as fibras mais curtas – Figura 5.13 – as vigas não apresentaram um ganho tão elevado de resistência, quando comparado CPs com fibras de maior comprimento. Desta maneira, pode-se justificar a escolha da fibra 80-60. Além de possuir maior comprimento, essa fibra também apresenta um maior fator de forma.

Diante das observações e consideração apontadas acima, é possível definir uma característica da matriz, bem como tipos e geometrias de fibras que possuem a função de reforçar o concreto.

De um modo geral, tanto as fibras de aço como as poliméricas, sendo elas consideradas macro ou microfibras, possuem uma grande variação na sua aplicação como reforço de matrizes cimentícias. Entretanto, deve ser levada em consideração a faixa de domínio em que cada uma é mais eficiente. As microfibras, por sua vez, são eficientes na inibição das fissuras iniciais, que ocorrem ao longo das 24h iniciais. Apesar de possuírem uma resistência à tração reduzida, os filamentos de polipropileno do tipo *Polycret CR*, atuando em maior quantidade no plano de ruptura (mesmo para teores baixos), contribuem positivamente para o controle das fissuras de retração, sendo mais eficientes que a *Polycret ES* (fibras com maiores dimensões, o que resulta em uma menor quantidade de filamentos no plano de ruptura).

No que se refere às macrofibras de aço, a presença de qualquer uma destas fibras estruturais (65-35, 65-60 e 80-60) promove, de fato, o aumento da tenacidade do compósito, principalmente para aquelas com maior comprimento (80-60). Por essa razão, esta foi a macrofibra adotada para o estudo experimental definitivo.

RESULTADOS

Os resultados apresentados neste capítulo são oriundos dos testes realizados na fase final desta pesquisa, ou seja, obtidos a partir da execução do programa experimental principal. São apresentados resultados de verificação da consistência e trabalhabilidade das misturas, bem como dados dos ensaios de compressão axial de corpos de prova cilíndricos e valores derivados dos ensaios de tração indireta por flexão, conforme os procedimentos propostos pelas especificações da JSCE e RILEM.

6.1. CONCRETO FRESCO - TRABALHABILIDADE E CONSISTÊNCIA

Dada a expectativa de redução da trabalhabilidade em função da incorporação das fibras, o processo de mistura e adensamento dos concretos reforçados foram acompanhados com cuidado. Problemas na dispersão das fibras na matriz, ou no ajuste da trabalhabilidade, podem ocasionar a formação de aglomerados de fibras (“ouriços”) ou provocar segregação das partículas sólidas e/ou exsudação. Quando esses fenômenos foram notados, como mostrado na Figura 6.1, as misturas foram descartadas e o traço ajustado, normalmente pela alteração de ordem de mistura ou da quantidade de aditivo utilizado. Os dados apresentados correspondem às misturas finais.



a) Ponto B'' – Teor de fibra: 1,15%
(3/8 Polip + 1/8 Carb + 1/2 Aço)



b) Ponto A'' – Teor de fibra: 1,15%
(1/8 Polip + 1/8 Carb + 3/4 Aço)

Figura 6.1 – Vista de fenômenos de a) aglomeração de fibras (“ouriços”) e b) segregação da mistura de concreto fresco.

Buscando reduzir os problemas, a introdução de fibras na betoneira foi feita manualmente, controlando visualmente a quantidade de fibras despejadas durante o tempo de mistura.

No caso das misturas com combinações híbridas, as fibras de polipropileno e carbono foram introduzidas mais cedo, em pequenas quantidades, começando logo após o início da mistura. Esse cuidado era importante, pois essas fibras tendem a reduzir a trabalhabilidade da mistura ao adsorver água e aumentar a consistência da massa. As fibras metálicas, que causam menor efeito na trabalhabilidade, foram adicionadas ao final, atentando para uma boa dispersão, para evitar a formação de aglomerados.

Na Figura 6.2 é possível observar a aparência de algumas das misturas de concreto fresco com teores e proporções de fibras diferentes. Observa-se o aspecto visual (a) e (b), a presença das fibras (c) e o reduzido abatimento do traço (d), em função da presença das fibras, como esperado.



a) Ponto B'' – Teor de fibra: 1,15%
(3/8 Polip + 1/8 Carb + 1/2 Aço)



b) Ponto O – Teor de fibra: 0,80%
(1/4 Polip + 1/4 Carb + 1/2 Aço)



c) Ponto A''' – Teor de fibra: 0,80%
(0 Polip + 1/4 Carb + 3/4 Aço)



d) Ponto C'' – Teor de fibra: 1,15%
(1/8 Polip + 3/8 Carb + 1/2 Aço)

Figura 6.2 – Concreto fresco reforçado com fibras – aparência da mistura.

Como discutido no Capítulo 4, as propriedades do concreto fresco foram verificadas através do abatimento de tronco de cone e pela determinação da consistência da mistura, pelo espalhamento na Mesa de Graff

O abatimento do tronco de cone foi verificado em 2 momentos: quando a mistura estava isenta de fibras (antes) e após a adição das mesmas (depois), sem a presença do aditivo superplastificante.

Já a verificação da consistência na Mesa de Graff foi efetuada com a presença das fibras e sem aditivo superplastificante (1ª verificação) e após a inclusão do mesmo (2ª verificação).

Os dados obtidos estão apresentados na Tabela 6.1, que contém também algumas considerações sobre as misturas obtidas.

Tabela 6.1 – Propriedades das misturas de concreto fresco.

| AMOSTRA | ABATIMENTO TRONCO DE CONE | | ESPALHAMENTO MESA DE GRAFF | | CONSIDERAÇÕES E OBSERVAÇÕES | TEOR DE FIBRAS |
|------------|---------------------------|----------------|----------------------------|----------------|---|----------------|
| | 1A.CONCRETAGEM | 2A.CONCRETAGEM | 1A.CONCRETAGEM | 2A.CONCRETAGEM | | |
| TESTEMUNHO | ANTES | DEPOIS | 45 | 49 | COMPORTAMENTO NORMAL, ESPERADO PARA AMBOS OS TESTES. | 0% |
| | 19 | - | 47.5 | 52 | | |
| | 19.5 | - | 46.25 | 50.5 | | |
| C' | ANTES | DEPOIS | 46 | 47.5 | NESTA COMPOSIÇÃO, APESAR DA HIBRIDIZAÇÃO CONTAR COM A PARTICIPAÇÃO EFETIVA DAS FBRAS, O TEOR TOTAL DE 0,6%, AMOSTRA DE FÁCIL ADENSAMENTO. | 0.60% |
| | 15.5 | 8 | 48 | 48 | | |
| | 18.5 | 8.5 | 47 | 47.75 | | |
| D' | ANTES | DEPOIS | 42.5 | 42 | APESAR DO BAIXO TEOR DE FIBRAS, A PRESENÇA DA FIBRA DE CARBONO CONSOME BOA PARTE DA ÁGUA DE AMASSAMENTO, DIMINUINDO O ABATIMENTO. | 0.60% |
| | 15.5 | 9.5 | 41.5 | 44 | | |
| | 18.5 | 5.5 | 42 | 43 | | |
| O | ANTES | DEPOIS | 39.5 | 40 | COM UM TEOR DE 0.80%, A MATRIZ SE COMPORTA BEM A FIBRA DE AÇO É A MAIOR PARTE DE REFORÇO, NÃO COMPROMETENDO O CONSUMO DA ÁGUA NO TRAÇO. | 0.80% |
| | 17.5 | 7.5 | 42 | 39.5 | | |
| | 17.3 | 4.5 | 40.75 | 39.75 | | |
| A''' | ANTES | DEPOIS | 43 | 45 | S/ POLIPROPILENO NA HIBRIDIZAÇÃO E BAIXA PROPORÇÃO DE CARBONO, O CONCRETO NÃO APRESENTOU MUDANÇAS SIGNIFICATIVAS NO ESTADO FRESCO. | 0.80% |
| | 12 | 17 | 42 | 43.5 | | |
| | 16.5 | 16.5 | 42.5 | 44.25 | | |
| B''' | ANTES | DEPOIS | 44.5 | 45.5 | COMPORTAMENTO S/ OBSERVAÇÕES QUE APONTEM COMPROMETIMENTO DA PLASTICIDADE DA AMOSTRA. | 0.80% |
| | 16 | 15.5 | 44 | 42.5 | | |
| | 16.5 | 18 | 44.25 | 44 | | |
| D''' | ANTES | DEPOIS | 38.2 | 37 | APARÊNCIA SECA MAS COM ESPALHAMENTO NORMAL ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE BAIXO, MAS NA PRESENÇA DE VIBRAÇÃO, FÁCIL ESPALHAMENTO. | 0.80% |
| | 18 | 3.5 | 39.5 | 38.5 | | |
| | 18.5 | 5.5 | 38.85 | 37.75 | | |
| C'' | ANTES | DEPOIS | 28 | 23 | SEM ABATIMENTO NO TESTE ESTÁTICO DE ABATIMENTO NO TESTE DINÂMICO DA MESA DE GRAFF, ESPALHAMENTO MÍNIMO, COM INÍCIO DE SEGREGAÇÃO. | 1.15% |
| | 18.5 | 1 | 25 | 26 | | |
| | 18 | 2 | 26.5 | 24.5 | | |
| D'' | ANTES | DEPOIS | 35 | 35.5 | ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE MÍNIMO, MAS COM UM BOM ESPALHAMENTO. MATERIAL COESO E UNIFORME. | 1.15% |
| | 18.5 | 5.5 | 37 | 32 | | |
| | 19 | 4 | 36 | 33.75 | | |

I. VALORES MEDIDOS EM CENTÍMETROS.

ii. O TESTE DE ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE FOI REALIZADO PARA CADA AMOSTRA, ANTES DA ADIÇÃO DO ADITIVO E DAS FIBRAS, BEM COMO APÓS A INSERÇÃO DAS FIBRAS, OBEDECENDO O TEOR TOTAL DE FIBRAS E A QUANTIDADE DE ADITIVO CONFORME A MASSA DE CIMENTO UTILIZADA NO TRAÇO.

iii. O TESTE DE ESPALHAMENTO FOI REALIZADO NA MATRIZ DE CONCRETO NA PRESENÇA DAS FIBRAS, COM O INTUITO DE AFERIR A TRABALHABILIDADE NESTA SITUAÇÃO.

Foram escolhidos para cada teor, como casos com fortes tendências a apresentarem problemas de consistência, os compósitos apresentados na Tabela 6.1. Como esperado, as misturas com menor teor de fibra apresentaram uma importante redução no abatimento de tronco de cone, mas ao submeter ao efeito de impacto da Mesa de Graff, o espalhamento aponta para um material com boa consistência e comportamento muito próximo ao espalhamento referente ao concreto simples. Diferente das misturas com 0,8% de teor total de fibra, os concretos reforçados com teor máximo de 1,15% foram negativamente influenciados com a hibridização das fibras. A presença da alta concentração de fibras reduziu o espalhamento, mas não comprometeu o adensamento das peças.

Na Figura 6.3 pode-se observar o processo de adensamento do concreto fresco. Com os ajustes de trabalhabilidade as misturas se espalharam adequadamente, especialmente com auxílio do estímulo dinâmico representado pela aplicação de vibrador mecânico tipo agulha na face externa das fôrmas. Ao final do adensamento o excesso de concreto era removido e a face superior desempenada.



Figura 6.3 – Lançamento da mistura nas fôrmas de madeira.

Os corpos de prova foram mantidos nas formas por 72 horas. Durante esse período, foram protegidos com lonas plásticas e sacos de aniagem umedecidos para evitar a evaporação da água pela ação direta de calor ou vento.

Visando proporcionar uma cura padrão, os corpos de prova endurecidos, após remoção das fôrmas, foram colocados em uma câmara úmida com $90\% \pm 5\%$ de umidade relativa e $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura ambiente, até os dias anteriores aos ensaios, que ocorreram sempre em idade superior a 28 dias.

6.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL - f_c^{CRF}

Nesse item são apresentados dados tabelados, curvas e gráficos contendo os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial dos concretos ensaiados. Os ensaios foram realizados com aplicação de velocidades de deslocamento entre $10 \mu\text{m/s}$ e $30 \mu\text{m/s}$.

Cabe destacar que todos os corpos de prova testados foram gerados a partir da extração de cilindros dos prismas (blocos) concretados. Como explicado no capítulo 5, esse cuidado foi tomado para evitar efeitos de alinhamento de fibras durante a concretagem de corpos de prova cilíndricos de pequena dimensão.

Em função do diâmetro da broca disponível para extração, os corpos de prova cilíndricos ficaram com uma seção transversal com diâmetro de 95 mm, aproximadamente. A altura dos mesmos foi ajustada para 190 mm, visando respeitar a relação 2:1 (altura:diâmetro). Para evitar eventual fissuração e irregularidades, causadas pelo excesso de vibração do equipamento e atrito entre a broca e a matriz endurecida, o equipamento foi operado na sua menor velocidade de rotação

Para reduzir qualquer efeito de borda foi adotado um afastamento mínimo de 25 mm entre os pontos de extração e as bordas do prisma. Além disso, buscando monitorar a possível influência de variações ao longo da altura de concretagem, que pudessem ocasionar ruído experimental, se mapeou onde ocorreu a extração de cada corpo de prova como ilustrado na Figura 6.4. Em teoria, os corpos de prova localizados na região superior do prisma poderiam conter uma menor concentração de fibras, bem como um maior número de vazios, menor quantidade de agregados graúdos e maior quantidade de nata de cimento.

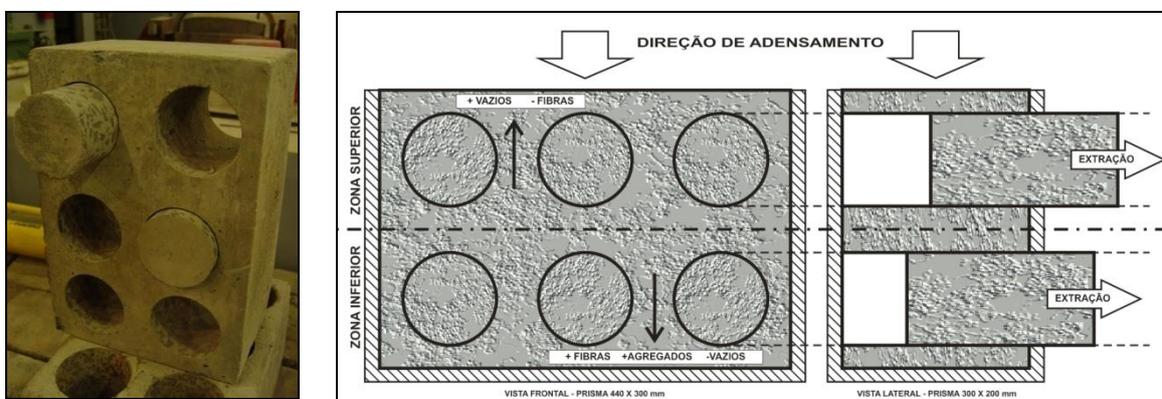


Figura 6.4: Bloco 440 x 300 x 200 mm e corpos de prova cilíndricos extraídos

Todavia, durante a extração foi verificada uma boa dispersão de fibras e a formação de uma matriz predominantemente homogênea e uniforme ao longo da altura dos blocos. Análises exploratórias efetuadas após a coleta dos resultados indicaram que a posição de extração não era um fator que gerava diferenças importantes. O mesmo foi, portanto, desconsiderado, para fins das análises desse capítulo, sendo todos os corpos de prova extraídos de um mesmo bloco considerados como equivalentes.

Para cada traço gerado foi gerada uma amostra composta de 04 corpos de prova para os ensaios de compressão. Os resultados, apresentados e analisados a seguir, foram organizados por teor total de fibra. Cabe lembrar que, conforme a literatura, a presença de fibras não tem grande efeito na compressão. Mas, graças à restrição que a mesma acaba gerando às deformações transversais, se não houver problemas de trabalhabilidade, podem se obter pequenos ganhos, como observado nos resultados de muitas misturas testadas nesse trabalho.

Teor total de fibras de 0,6%

Na Tabela 6.2, por exemplo, é possível encontrar todos os valores de f_c^{CRF} para cada um dos pontos que possuem reforço com teor total de fibras de 0,60%.

Tabela 6.2 – Valores de f_c^{CRF} – Teor total de fibra = 0,60%

| TEOR(%) | PONTO | POLIPR. | CARB. | AÇO | f_c^{CRF} [MPa] |
|---------|-------|---------|-------|--------|-------------------|
| 0.6 | A' | 0.125 | 0.125 | 0.75 | 26.482 |
| | | | | | 30.008 |
| | | | | | 20.836 |
| | | | | | 23.615 |
| | B' | 0.375 | 0.125 | 0.5 | 28.626 |
| | | | | | 29.174 |
| | | | | | 31.276 |
| | | | | | 30.164 |
| | C' | 0.125 | 0.375 | 0.5 | 28.010 |
| | | | | | 27.055 |
| | | | | | 27.193 |
| | | | | | 26.603 |
| D' | 0.375 | 0.375 | 0.25 | 21.965 | |
| | | | | 22.138 | |
| | | | | 9.606 | |
| | | | | 10.535 | |

Após tratamento estatístico, realizado com o intuito de eliminar valores espúrios, os resultados médios para os pontos A', B', C' e D' podem ser comparados aos resultados da amostra de corpos de prova sem fibra (testemunhos), como mostrado na Figura 6.5.

Vale salientar que, para definir a média dos valores obtidos para 04 corpos de prova para cada mistura, foi feita uma análise de tratamento de espúrios. A definição dos valores considerados válidos foi possível através de observações visuais e informações acerca do processo de confecção dos corpos de prova, ou seja, elementos que apresentaram maior ocorrência de falhas de concretagem, não planicidade das seções em virtude do procedimento de extração, bem como efeito de impacto no instante de aplicação de carga junto ao equipamento de ensaio exemplificam os aspectos que conduziram a eliminação de valores considerados não pertinentes.

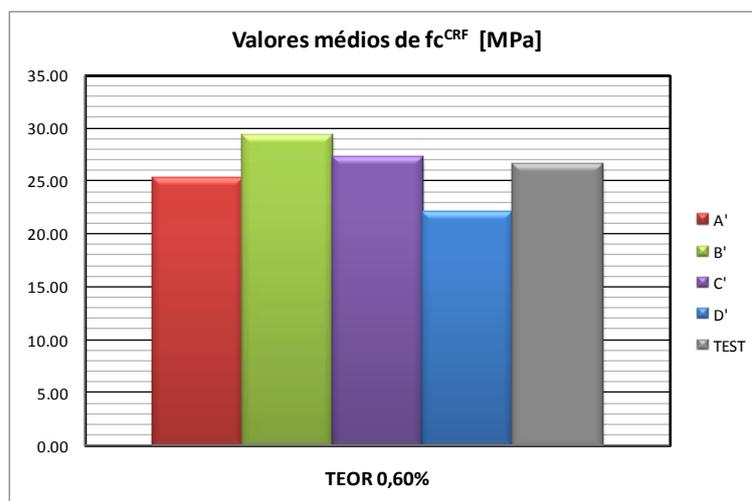


Figura 6.5: Resistência à Compressão Axial – valores médios (teor de fibra = 0,60%).

Para complementar a análise, na Figura 6.6 são apresentadas curvas representativas do comportamento força vs deslocamento para todas as matrizes de concreto reforçadas com teor total de fibra equivalente a 0,60%, com variação nas proporções entre as fibras de aço, polipropileno e carbono, conforme apresentado no capítulo de metodologia.

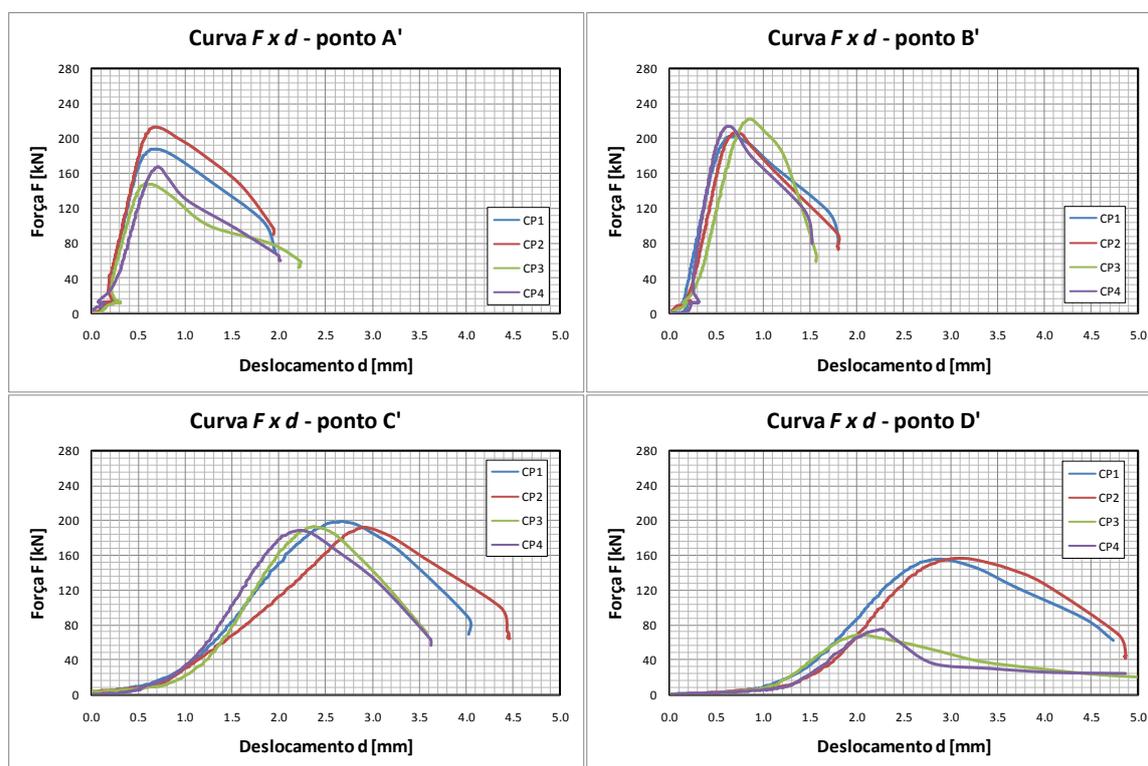


Figura 6.6: Curvas Força x Deslocamento – Compressão Axial
Pontos A', B', C' e D' – Teor de fibra de 0,60 %.

Analisando as Figuras verifica-se que a maior resistência à compressão foi obtida com a mistura B', que contém 50% de fibra de aço e 37,5% de fibra de polipropileno. O mesmo

atinge resistência levemente superior ao traço A', que contém 75% de fibra de aço, o que indica que a hibridização pode efetivamente ser uma alternativa interessante de maximizar os efeitos das fibras. A maior ductilidade, todavia, foi registrada na mistura D', que ficou abaixo da resistência à compressão do testemunho.

Teor total de fibras de 0,8%

A Tabela 6.3 contém dos dados referentes ao teor total de fibra de 0,80%. Os resultados médios para os pontos A''', B''', C''', D''' e O podem ser visualizados na Figura 6.7.

Tabela 6.3 – Valores de f_c^{CRF} – Teor total de fibra = 0,80%.

| TEOR(%) | PONTO | POLIPR. | CARB. | AÇO | f_c^{CRF} [MPa] |
|---------|-------|---------|-------|--------|-------------------|
| 0.8 | A''' | 0 | 0.25 | 0.75 | 11.743 |
| | | | | | 12.220 |
| | | | | | 12.455 |
| | | | | | 11.135 |
| | B''' | 0.5 | 0.25 | 0.25 | 9.927 |
| | | | | | 9.580 |
| | | | | | 7.904 |
| | | | | | 9.250 |
| | C''' | 0.25 | 0 | 0.75 | 36.939 |
| | | | | | 35.367 |
| | | | | | 27.506 |
| | | | | | 27.437 |
| | D''' | 0.25 | 0.5 | 0.25 | 19.315 |
| | | | | | 20.828 |
| | | | | | 17.935 |
| | | | | | 20.479 |
| O | 0.25 | 0.25 | 0.5 | 26.533 | |
| | | | | 28.705 | |
| | | | | 29.783 | |
| | | | | 26.221 | |

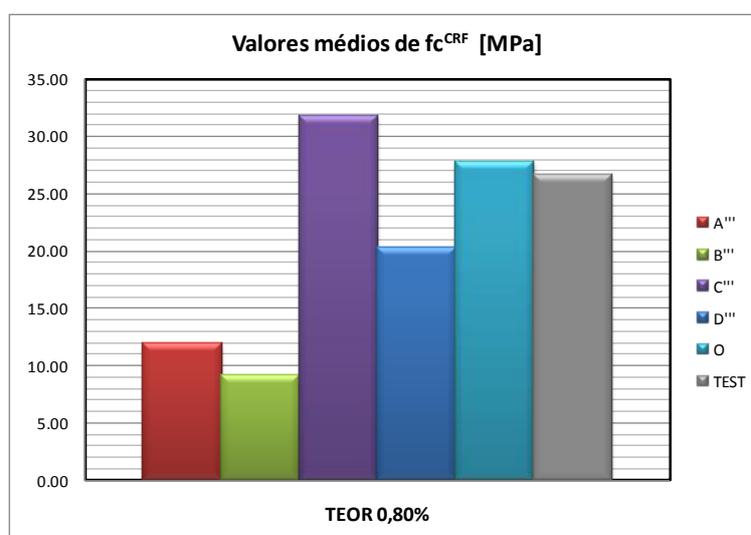


Figura 6.7: Resistência à Compressão Axial – valores médios (teor de fibra = 0,80%).

Verifica-se, numa análise desses dados, que algumas misturas (A''', B''', e D''') tiveram quedas de resistência significativas em relação ao testemunho.

O melhor desempenho foi obtido quando se combinou 75% de fibra de aço com 25% de fibra de polipropileno. A adição de fibra carbono não foi positiva, na maior parte dos casos, embora a combinação de 25% de fibra de polipropileno, 25% de fibra carbono e 50% de fibra de aço também tenha mostrado bom resultado. Mais uma vez, os dados parecem indicar que o melhor desempenho é obtido pela adequada hibridização, com um teor considerável de macrofibra (fibra de aço) e uma porção importante de microfibras, especialmente polipropileno.

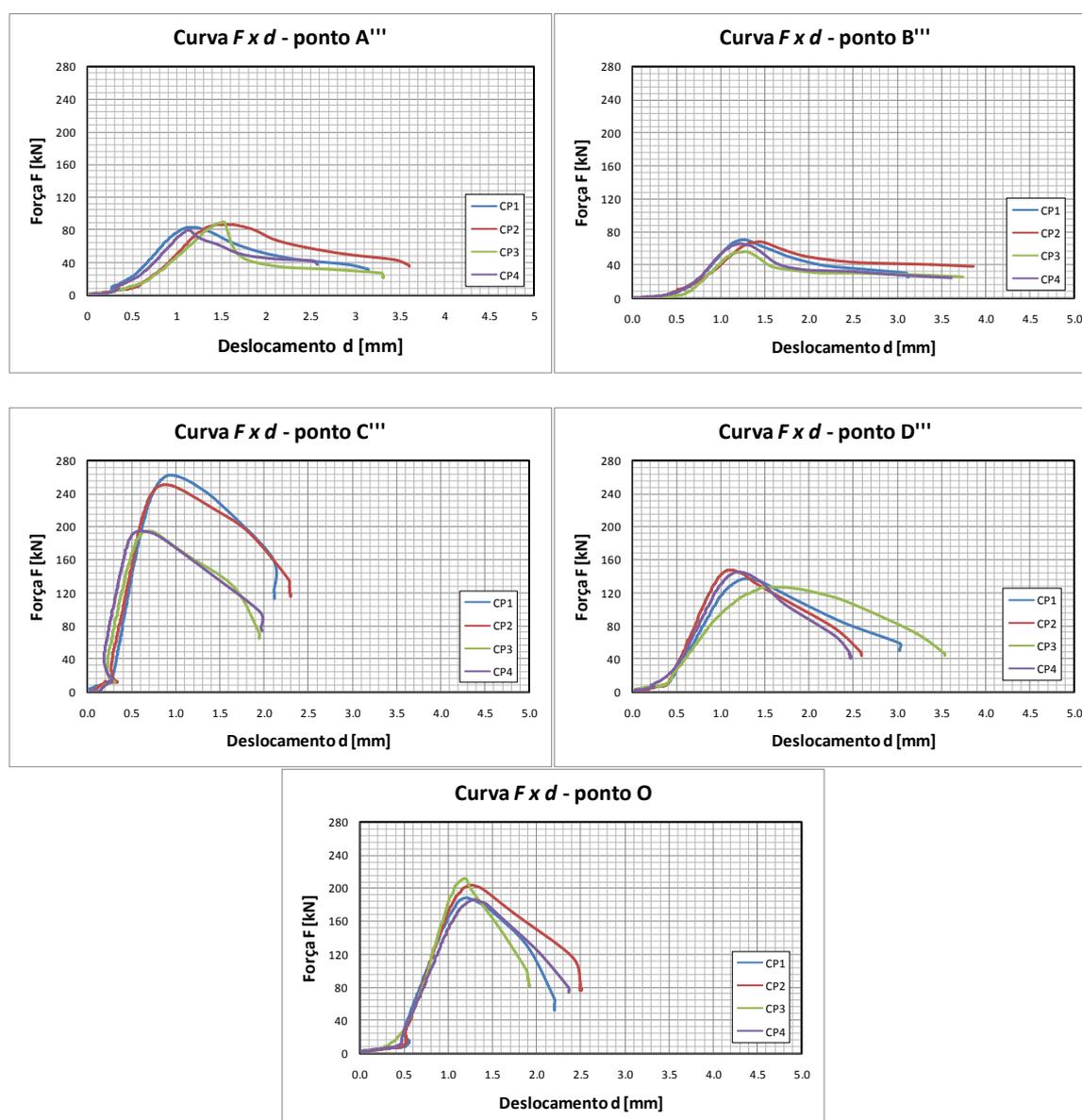


Figura 6.8: Curvas Força x Deslocamento – Compressão Axial Pontos A''', B''', C''', D''', e O – Teor de fibra de 0,80 %.

Na Figura 6.8 são apresentadas as curvas de comportamento força vs deslocamento de cada mistura. Verifica-se que a mistura D'', com a maior quantidade de microfibras (25% de polipropileno e 50% de carbono), e menor quantidade de macrofibra de aço, parece visualmente apresentar uma ductilidade um pouco superior às demais. Uma análise estatística efetuada para constatar a validade dessa tendência é apresentada no Capítulo 7.

Teor total de fibras de 1,15%

Para os pontos que representam o comportamento da matriz reforçada com teor total de fibra de 1,15% frente à compressão axial, a Tabela 6.4 reúne os seguintes valores:

Tabela 6.4 – Valores de f_c^{CRF} – Teor total de fibra = 1,15%

| TEOR(%) | PONTO | POLIPR. | CARB. | AÇO | f_c^{CRF} [MPa] |
|---------|-------|---------|-------|------|-------------------|
| 1.15 | A'' | 0.125 | 0.125 | 0.75 | 24.727 |
| | | | | | 27.993 |
| | | | | | 34.325 |
| | | | | | 31.197 |
| | B'' | 0.375 | 0.125 | 0.5 | 31.502 |
| | | | | | 33.638 |
| | | | | | 30.285 |
| | | | | | 28.175 |
| | C'' | 0.125 | 0.375 | 0.5 | 16.588 |
| | | | | | 25.135 |
| | | | | | 18.439 |
| | | | | | 26.585 |
| | D'' | 0.375 | 0.375 | 0.25 | 13.697 |
| | | | | | 16.546 |
| | | | | | 14.122 |
| | | | | | 15.712 |

No que se refere às curvas força vs deslocamento para as matrizes de concreto reforçadas com teor total de fibra equivalente a 1,15%, considerando o fracionamento híbrido entre as fibras, os gráficos indicados na Figura 6.9 ilustram a lei constitutiva destas matrizes.

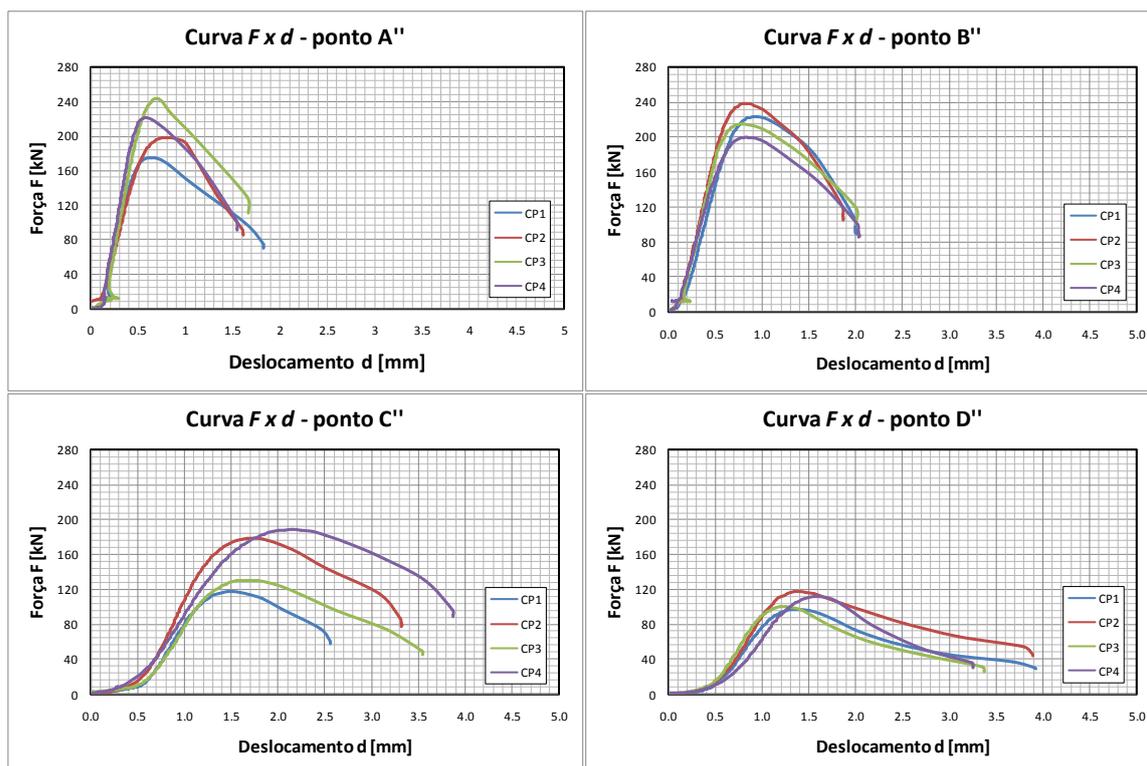


Figura 6.9: Curvas Força x Deslocamento – Compressão Axial
Pontos A'', B'', C'' e D'' – Teor de fibra de 1,15 %

Os resultados médios para os pontos A'', B'', C'' e D'', bem como os resultados provenientes dos corpos de prova sem fibra (testemunhos), podem ser visualizados na Figura 6.10.

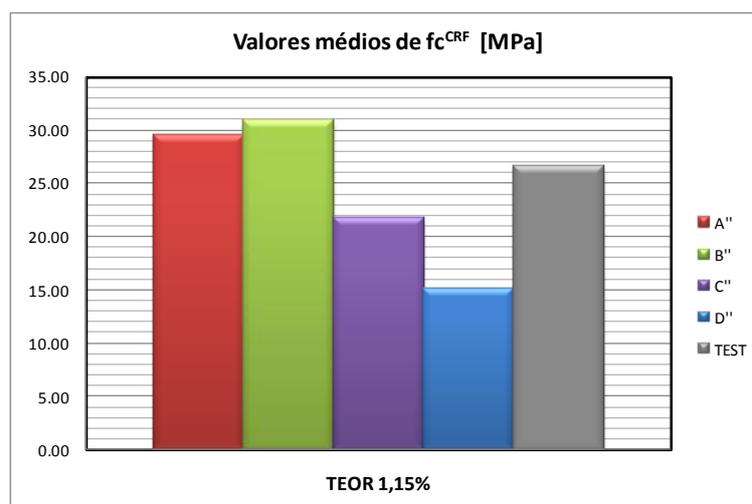


Figura 6.10: Resistência à Compressão Axial – valores médios (teor de fibra = 1,15%)

Teor total de fibras de 0%

Da mesma forma que foram testados todos os pontos em que a matriz havia a presença do reforço com adição e combinações de fibras, o concreto simples foi investigado quando submetido à compressão simples, cujo comportamento $F \times d$ pode ser representado pelas curvas da Figura 6.11.

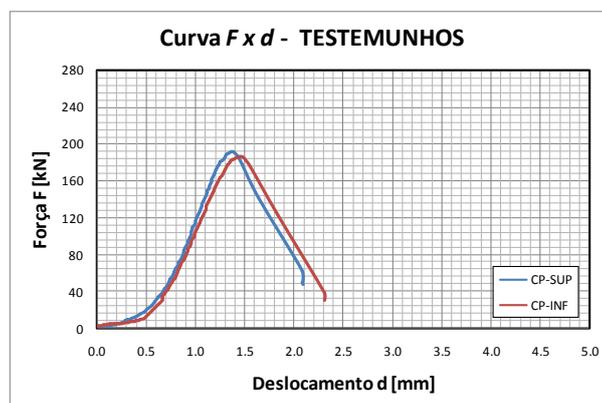


Figura 6.11: Curvas Força x Deslocamento – Compressão Axial
Concreto Simples – Testemunhos – 0%

Sabe-se que a capacidade de absorção de energia (área sob a curva) aumenta com a quantidade de fibras inseridas na matriz. Entretanto, a partir de uma análise preliminar das figuras, constata-se que o aumento desta propriedade do material com a quantidade de reforço é função da combinação das fibras.

6.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL - f_{tD}^{CRF}

A seguir são apresentados, agrupados pelo teor total de fibra usado, os resultados provenientes dos ensaios de verificação da tração por compressão diametral. Este teste visa a determinação indireta do comportamento à tração, conforme a *NBR 7222 – Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos* (ABNT, 1994). Em princípio, vale destacar que este ensaio é mais apropriado para testes quando as matrizes são frágeis, conforme aponta a literatura, apresentando problemas quando usado para misturas com fibras. Apesar desta constatação, sua inclusão visava verificar se esse seria o comportamento observado também quando se usam misturas híbridas.

Teor total de fibras de 0,6%

A Tabela 6.5 contém as cargas máximas de ruptura, bem como as estimativas de resistência a tração obtidas do ensaio de compressão diametral, das misturas com teor total de fibras equivalente a 0,60%. Os resultados médios de f_{td}^{CRF} para os pontos A', B', C' e D' são apresentados na Figura 6.12. As curvas que ilustram a relação existente entre a carga F aplicada e os deslocamentos obtidos podem ser visualizadas na Figura 6.13.

Tabela 6.5 – Valores de f_{td}^{CRF} – Teor total de fibra = 0,60%

| TEOR(%) | PONTO | POLIPR. | CARB. | AÇO | F [kN] | f_{td}^{CRF} [MPa] |
|---------|-------|---------|-------|------|---------|----------------------|
| 0.6 | A' | 0.125 | 0.125 | 0.75 | 82.865 | 2.923 |
| | | | | | 112.410 | 3.965 |
| | | | | | 73.323 | 2.586 |
| | | | | | 67.290 | 2.373 |
| | B' | 0.375 | 0.125 | 0.5 | 100.840 | 3.557 |
| | | | | | 116.840 | 4.121 |
| | | | | | 96.410 | 3.400 |
| | | | | | 94.255 | 3.324 |
| | C' | 0.125 | 0.375 | 0.5 | 63.411 | 2.236 |
| | | | | | 83.543 | 2.947 |
| | | | | | 63.411 | 2.236 |
| | | | | | 92.900 | 3.277 |
| | D' | 0.375 | 0.375 | 0.25 | 37.369 | 1.318 |
| | | | | | 67.905 | 2.395 |
| | | | | | 88.899 | 3.135 |
| | | | | | 43.402 | 1.531 |

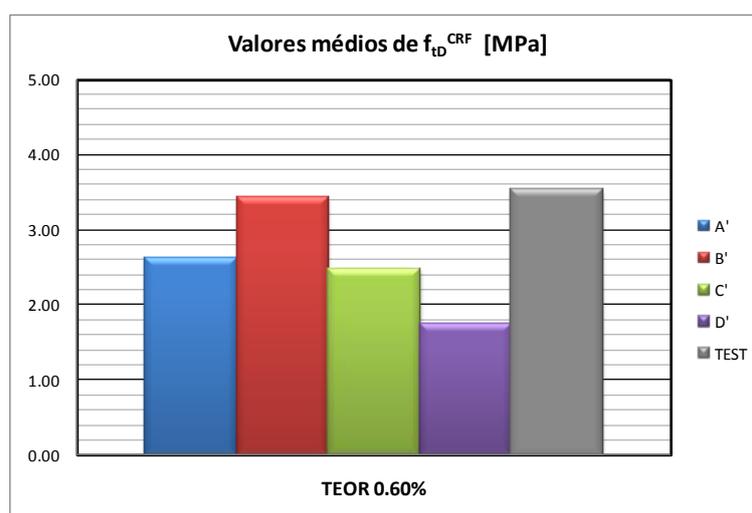


Figura 6.12: Resistência à Tração por Compressão Diametral. Valores médios (teor de fibra = 0,60 %).

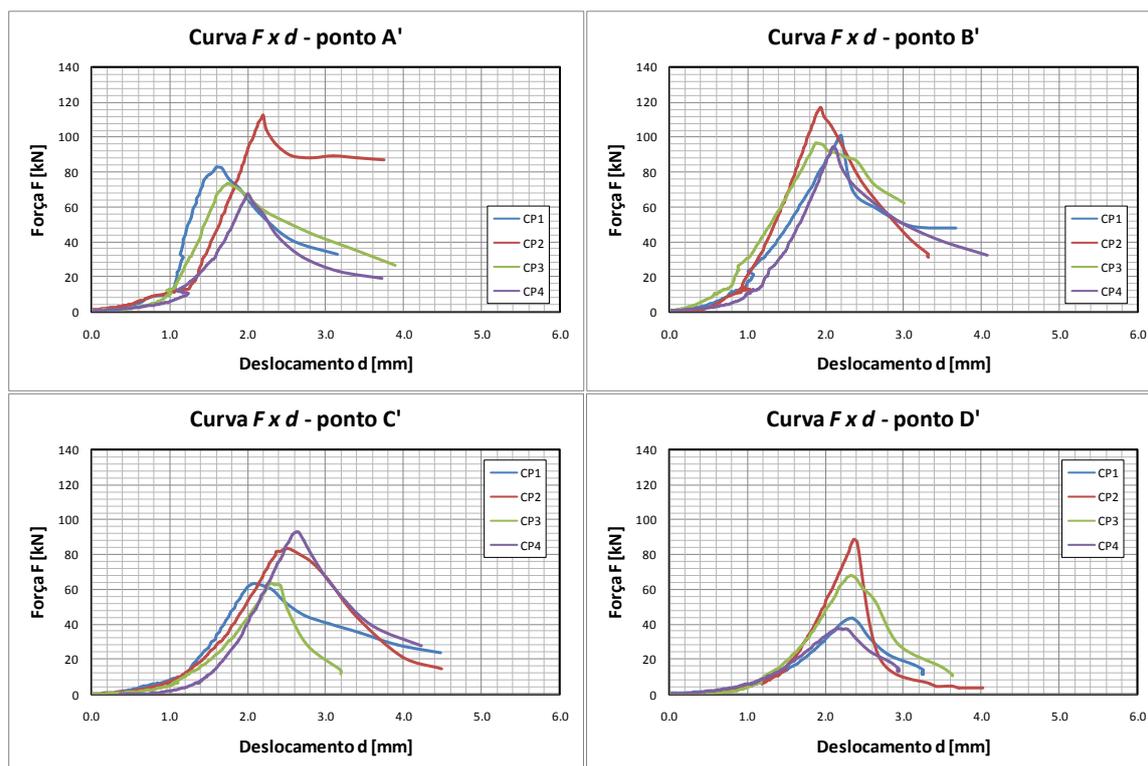


Figura 6.13: Curvas Força x Deslocamento. Ensaio de Tração por Compressão Diametral Pontos A', B', C' e D. Teor total de fibras de 0,60 %.

Observa-se que todas as misturas com fibras levaram a estimativas de resistência à tração inferiores à do testemunho, indicando que o ensaio não consegue, de fato, capturar a contribuição das fibras para o controle da fissuração.

É interessante notar, todavia, que o melhor desempenho das misturas com fibra foi registrado para a combinação contendo 50% de fibra de aço e 37,5% de fibra de polipropileno, assim como havia ocorrido no caso da resistência à compressão. As misturas com maior quantidade de fibra carbono foram as que tiveram menor ductilidade, indicando que essa fibra não teve boa interação com a matriz, talvez pelo reduzido comprimento.

Teor total de fibras de 0,8%

Os resultados das misturas com teor total de fibras igual a 0,80% estão compilados na Tabela 6.6. Após a remoção de espúrios, os valores médios foram obtidos e graficados na Figura 6.14. A Figura 6.15 contém as curvas $F \times d$ para cada combinação híbrida de fibras de aço, carbono e polipropileno resultando no teor total de 0,80% de fibras.

Tabela 6.6 – Valores de f_{tD}^{CRF} – Teor total de fibra = 0,80%

| TEOR(%) | PONTO | POLIPR. | CARB. | AÇO | F [kN] | f_{tD}^{CRF} [MPa] |
|---------|-------|---------|-------|------|---------|----------------------|
| 0.8 | A''' | 0 | 0.25 | 0.75 | 42.848 | 1.511 |
| | | | | | 50.482 | 1.780 |
| | | | | | 75.601 | 2.666 |
| | | | | | 34.968 | 1.233 |
| | B''' | 0.5 | 0.25 | 0.25 | 32.075 | 1.131 |
| | | | | | 29.181 | 1.029 |
| | | | | | 37.123 | 1.309 |
| | C''' | 0.25 | 0 | 0.75 | 108.780 | 3.837 |
| | | | | | 98.626 | 3.479 |
| | | | | | 125.460 | 4.425 |
| | D''' | 0.25 | 0.5 | 0.25 | 115.240 | 4.064 |
| | | | | | 63.103 | 2.226 |
| | | | | | 63.842 | 2.252 |
| | O | 0.25 | 0.25 | 0.5 | 65.935 | 2.326 |
| | | | | | 113.150 | 3.991 |
| | | | | | 103.180 | 3.639 |
| 113.700 | | | | | 4.010 | |
| | | | | | 86.128 | 3.038 |

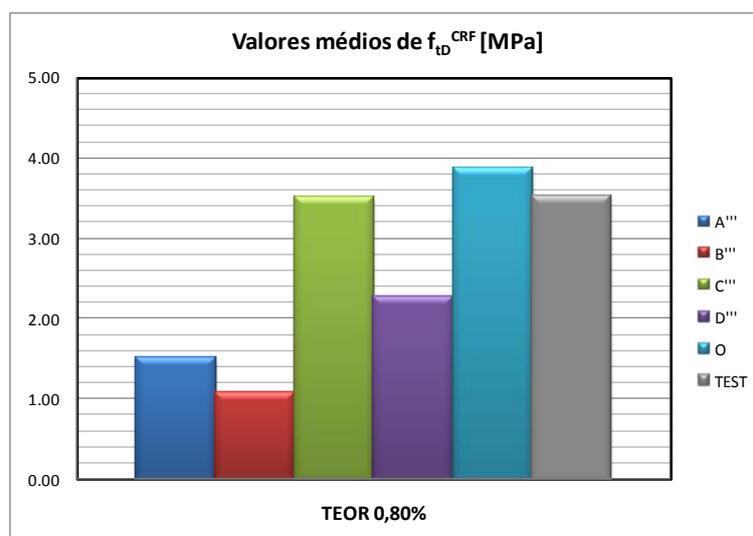


Figura 6.14: Resistência à Tração por Compressão Diametral valores médios (teor de fibra = 0,80 %)

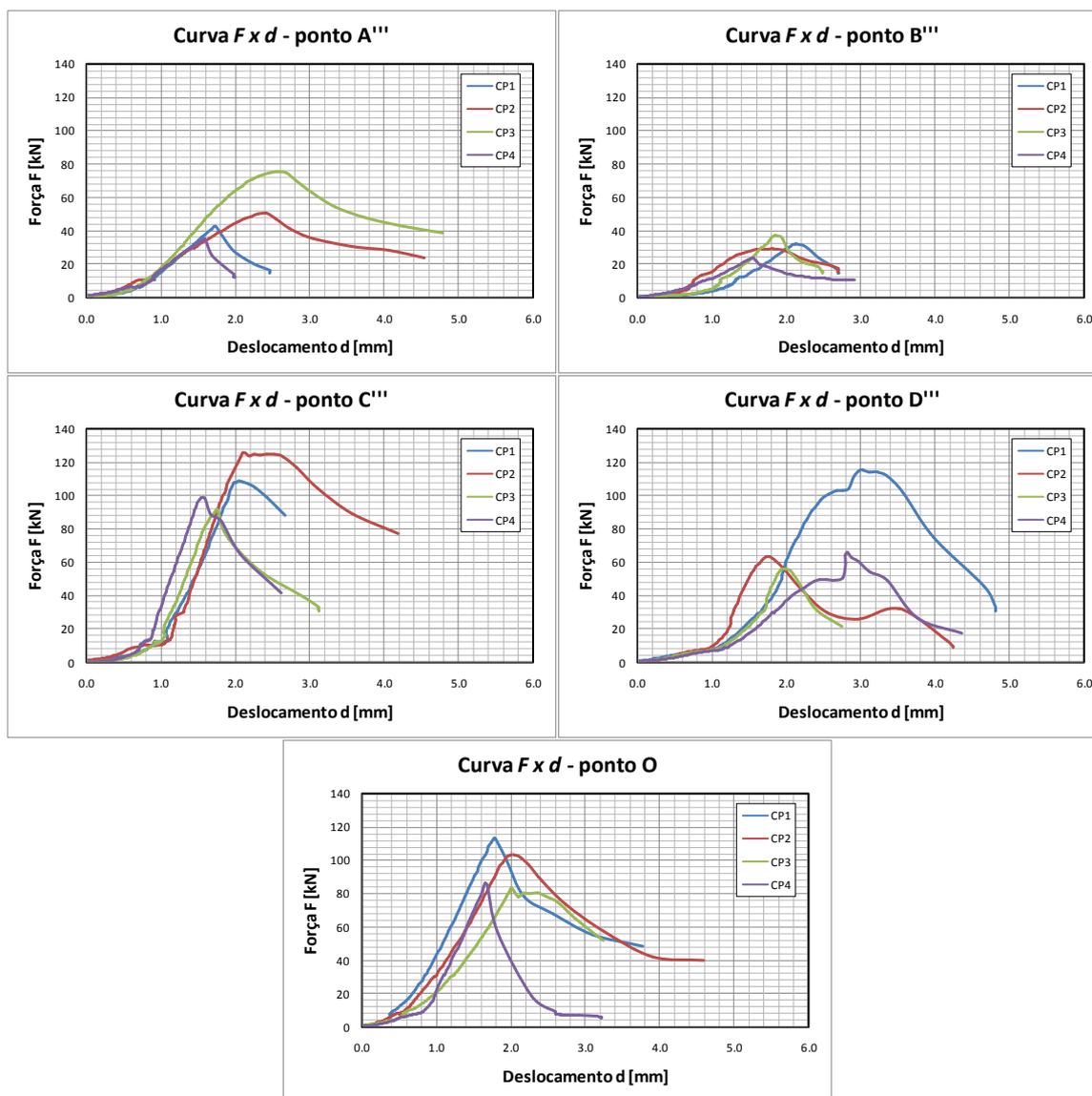


Figura 6.15: Curvas Força x Deslocamento – Tração por Compressão Diametral Pontos A''', B''', C''', D''' e O – Teor de fibra de 0,80 %

Para esta concentração total de fibras, pode-se constatar que as misturas definidas pelas nomenclaturas C''' e O se comportaram melhor, uma vez que atingiram valores de carga máxima superiores ao concreto sem fibras. Da mesma forma que foi observada na compressão axial, a hibridização de fibras nas misturas A''' e B''' prejudicou, notoriamente, a resistência do compósito.

Teor total de fibras de 1,15%

De maneira similar aos casos anteriores, os resultados finais de f_{tD} , as médias, bem como as curvas de Fxd para os casos em que o reforço total de fibras atingiu 1,15% são apresentados na Tabela 6.7 e nas Figuras 6.16 e 6.17, mostradas a seguir.

Tabela 6.7 – Valores de f_{tD}^{CRF} – Teor total de fibra = 1,15%

| TEOR(%) | PONTO | POLIPR. | CARB. | AÇO | F [kN] | f_{tD}^{CRF} [MPa] | |
|---------|-------|---------|-------|------|---------|----------------------|-------|
| 1.15 | A'' | 0.125 | 0.125 | 0.75 | 137.350 | 4.844 | |
| | | | | | 102.620 | 3.619 | |
| | | | | | 105.640 | 3.726 | |
| | | | | | 92.716 | 3.270 | |
| | B'' | 0.375 | 0.125 | 0.5 | 83.543 | 2.947 | |
| | | | | | 103.180 | 3.639 | |
| | | | | | 94.378 | 3.329 | |
| | C'' | 0.125 | 0.375 | 0.5 | 89.884 | 3.170 | |
| | | | | | 95.979 | 3.385 | |
| | | | | | 53.438 | 1.885 | |
| | D'' | 0.375 | 0.375 | 0.25 | 121.150 | 4.273 | |
| | | | | | 84.589 | 2.983 | |
| | | | | | 88.591 | 3.125 | |
| | | | | | 73.877 | 2.606 | |
| | | | | | | 72.523 | 2.558 |
| | | | | | | 33.367 | 1.177 |

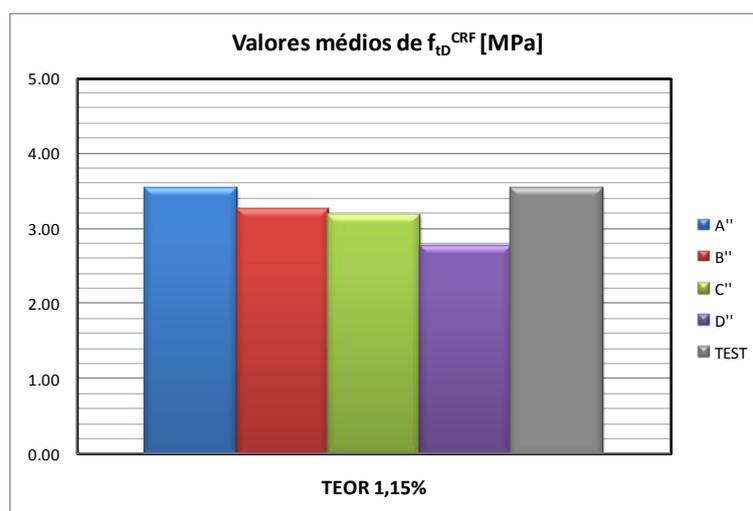


Figura 6.16: Resistência à Tração por Compressão Diametral.
Valores médios (teor de fibra = 1,15 %)

Com uma breve observação das imagens acima, bem como da Figura 6.17, correspondente aos resultados das misturas com 1,15% de teor total de fibra adicionado, nota-se a influência positiva do alto teor de fibra de aço e a sua associação com o polipropileno (misturas A'' e B''), resultando em valores superiores à média dos valores desta propriedade para os testemunhos. Porém, quando a fibra metálica é inserida em teores baixos combinadas às frações de fibras de carbono e polipropileno, a contribuição para o reforço da matriz se mostrou menos eficiente (mistura D'').

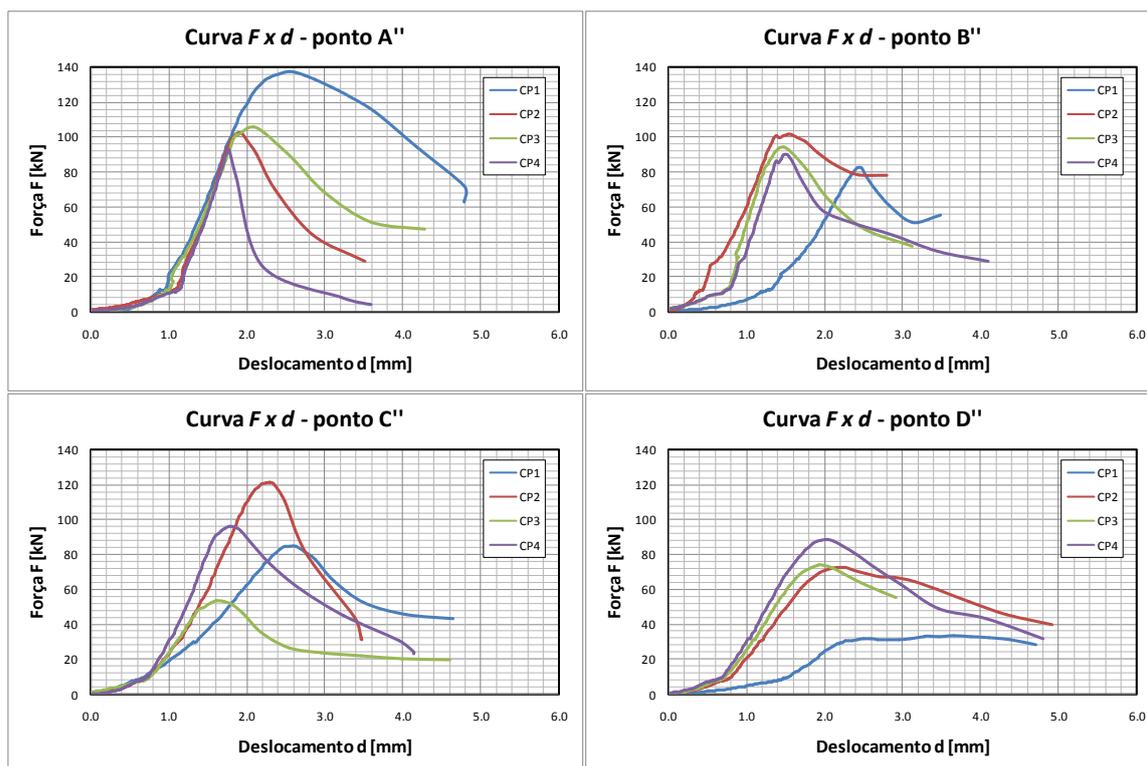


Figura 6.17: Curvas Força x Deslocamento – Tração por Compressão Diametral Pontos A'', B'', C'' e D'' – Teor de fibra de 1,15 %.

Teor total de fibras de 0%

O comportamento da mistura com ausência de fibras durante o ensaio de compressão diametral vale ser registrado. A Figura 6.18 ilustra a relação entre a força aplicada e o deslocamento de resposta dos testemunhos. Verifica-se que, na medida em que a matriz se rompe, há uma queda pertinente da capacidade portante deste compósito, pois o concreto simples possui características predominantemente frágeis.

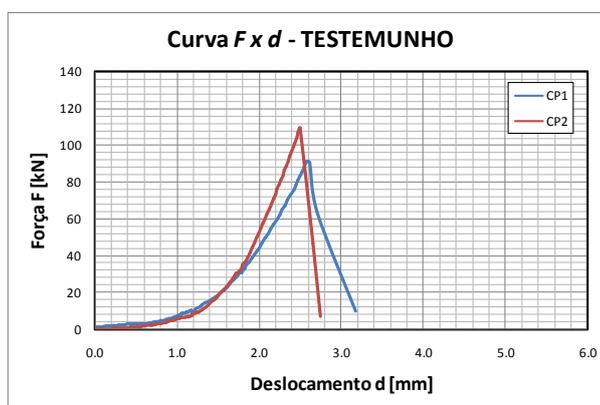


Figura 6.18: Curvas Força x Deslocamento – Tração por Compressão Diametral Concreto Simples – Testemunhos – 0%

6.4. FATOR DE TENACIDADE E RESISTÊNCIA À FLEXÃO EQUIVALENTE

Conforme a metodologia apresentada, a tenacidade e a resistência à flexão podem ser obtidas a partir do emprego das normas *JSCE – SF4*, 1984 e RILEM TC 162 – TDF. Para isso, faz-se necessário o conhecimento das curvas carga x deslocamento durante o ensaio de flexão, parâmetro inicial no cálculo da energia de ruptura ou tenacidade das peças.

A seguir são apresentadas as curvas que representam o comportamento à fissuração das vigas, obedecendo aos critérios das normas supracitadas.

6.4.1. Teste de flexão (flexão em 04 pontos) - *Japan Society of Civil Engineers – JSCE – SF4, 1984*

Teor total de fibras de 0,60%

A Figura 6.19 a seguir, ilustra o comportamento dos compósitos que são reforçados com 0,60% de teor de fibra, quando submetido ao ensaio de flexão para determinação da resistência à flexão equivalente.

Observa-se, inicialmente, que para o caso em que a mistura é denominada de D' (canto inferior direito da Figura 6.19), apenas três curvas são ilustradas. A razão da ausência da curva de um quarto elemento é devida ao comprometimento do corpo de prova ocasionado por um dano à amostra na fase de retirada da forma.

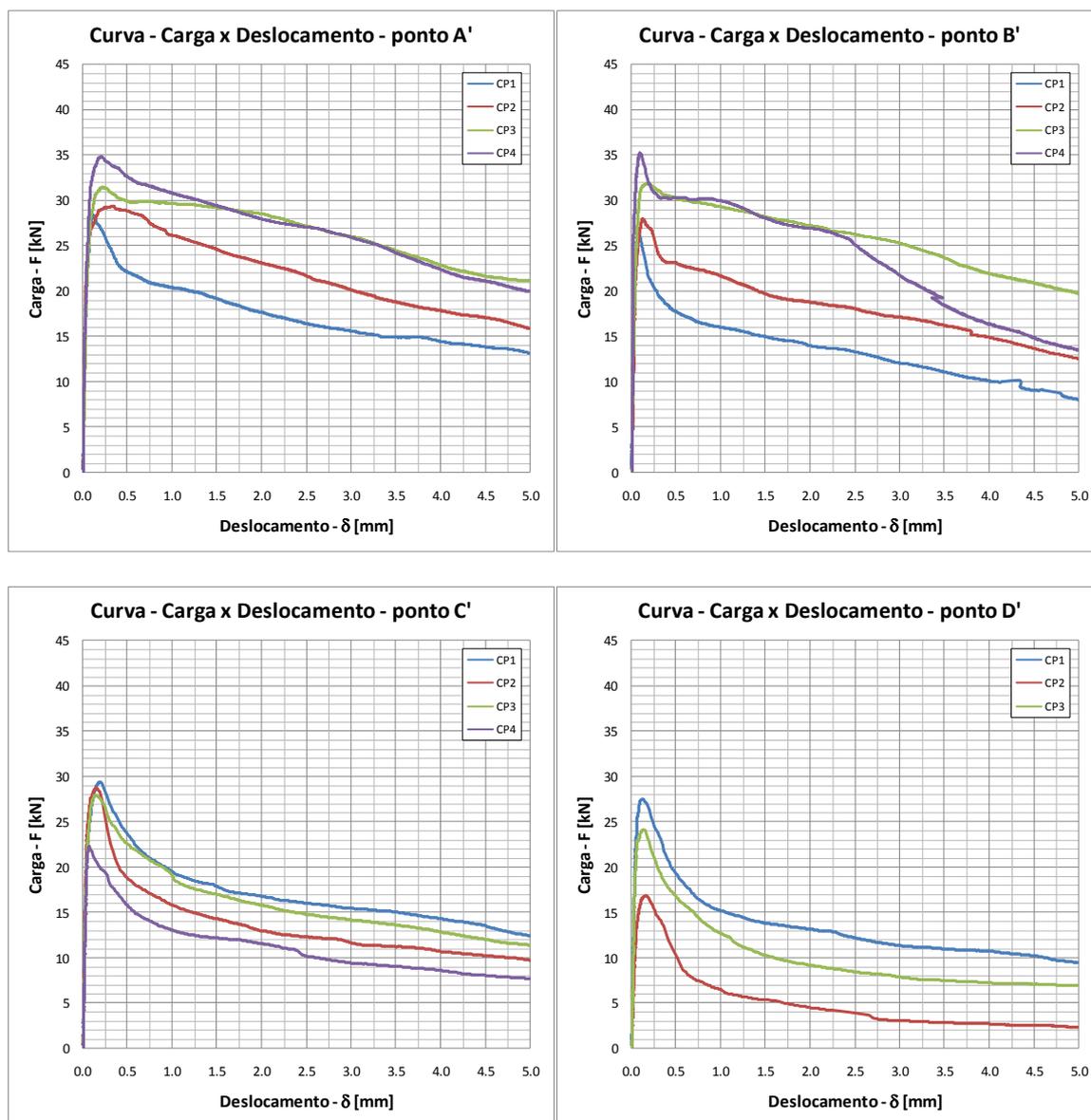


Figura 6.19: Curvas Força x Deslocamento – Flexão: JSCE – SF4 - teor de 0,60%

A partir das curvas de comportamento F vs d , pode-se extrair o valor de carga máxima de ruptura e o deslocamento correspondente a este, bem como a área sob a curva e, conseqüentemente, o valor da resistência à flexão equivalente, aplicando a formulação da referida norma.

Salienta-se, inclusive, que os valores obtidos e determinados são apresentados na Tabela 6.8, na qual os resultados são tabulados para cada um dos pontos, respeitando as proporções de fibras distintas, características de cada combinação, conforme evidenciado no capítulo de metodologia. Novamente, os resultados considerados espúrios não são contemplados para a obtenção dos valores médios representativos.

Tabela 6.8 – Valores de FT – Teor total de fibra = 0,60%

| TEOR(%) | PONTO | POLIPR. | CARB. | AÇO | $f_{m\acute{a}x}$ [kN] | δ [mm] | Tb [kN.mm] | FT [MPa] |
|---------|-------|---------|-------|------|------------------------|---------------|------------|----------|
| 0.6 | A' | 0.125 | 0.125 | 0.75 | 29.4 | 0.322 | 92.577 | 4.526 |
| | | | | | 31.5 | 0.20821 | 110.104 | 5.383 |
| | | | | | 28.4 | 0.10751 | 73.227 | 3.580 |
| | | | | | 34.8 | 0.18862 | 112.367 | 5.493 |
| | B' | 0.375 | 0.125 | 0.5 | 26.2 | 0.0881 | 57.822 | 2.827 |
| | | | | | 28 | 0.12847 | 77.283 | 3.778 |
| | | | | | 31.9 | 0.16361 | 107.688 | 5.265 |
| | | | | | 35.3 | 0.09686 | 102.247 | 4.999 |
| | C' | 0.125 | 0.375 | 0.5 | 29.4 | 0.18285 | 72.382 | 3.539 |
| | | | | | 28.8 | 0.14805 | 58.093 | 2.840 |
| | | | | | 27.9 | 0.12968 | 68.157 | 3.332 |
| | | | | | 22.3 | 0.07282 | 47.915 | 2.343 |
| | D' | 0.375 | 0.375 | 0.25 | 27.5 | 0.11299 | 57.146 | 2.794 |
| | | | | | - | - | - | - |
| | | | | | 24.2 | 0.13394 | 43.726 | 2.138 |
| | | | | | - | - | - | - |

Com o intuito de visualizar, comparativamente, o comportamento destes materiais, a Figura 6.20, abaixo, procura distinguir os valores de resistência à flexão equivalente para cada amostra, colocando-os frente ao testemunho. Percebe-se, notoriamente, o ganho desta propriedade na presença dos elementos de reforço.

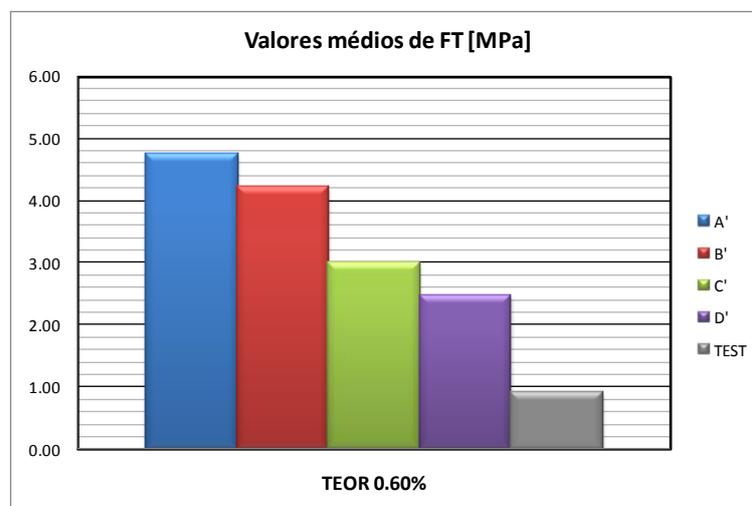


Figura 6.20: Fator de Tenacidade ou Resistência à Flexão Equivalente valores médios (teor de fibra = 0,60%)

Teor total de fibras de 0,80%

De maneira similar aos pontos reforçados com teor de fibra de 0,60%, a Figura 6.21 ilustra as curvas de comportamento para os pontos de amostra que possuem 0,80% de teor de fibra adicionada à matriz, oriundas do ensaio de flexão da JSCE SF4.

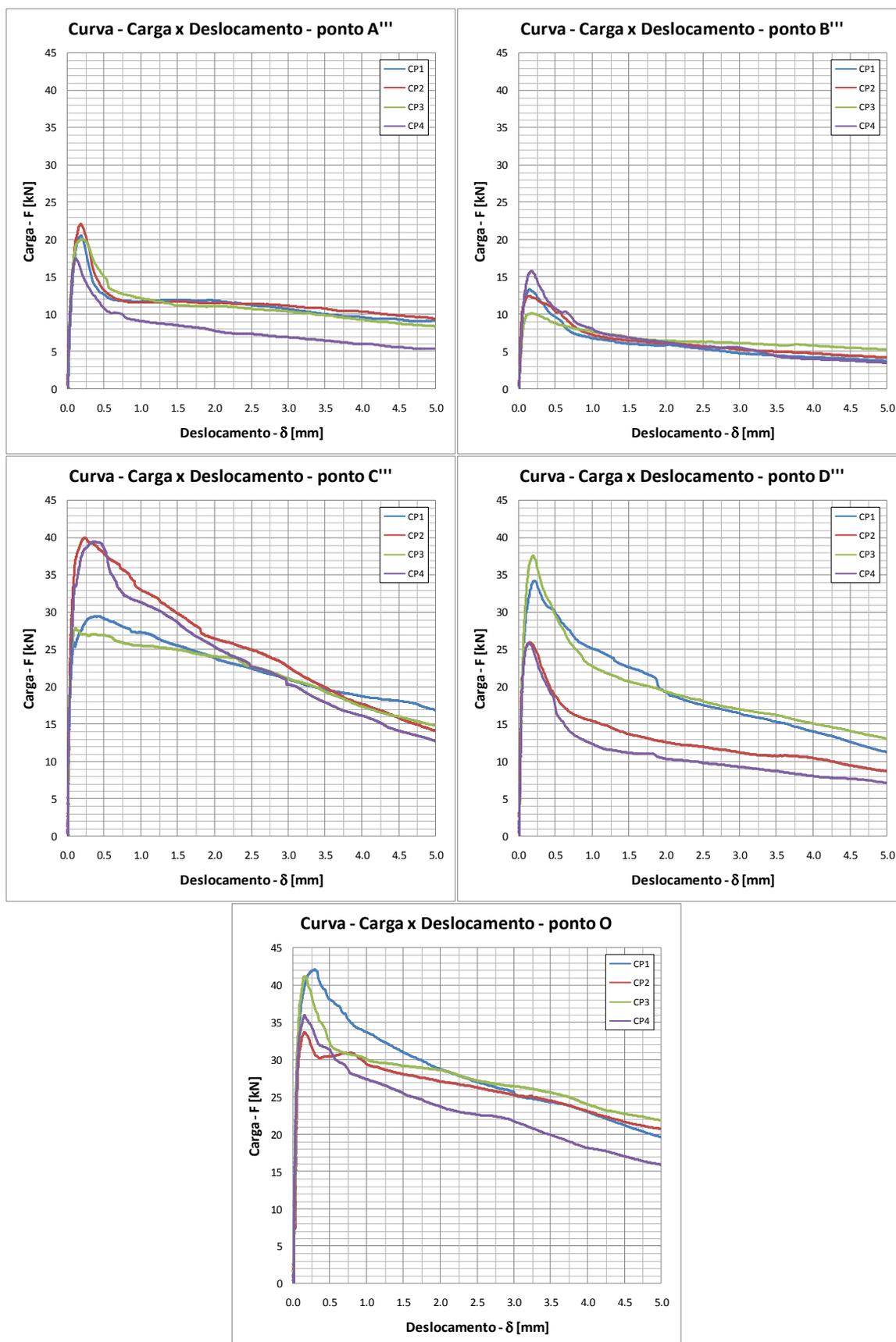


Figura 6.21: Curvas Força x Deslocamento – Flexão: JSCE – SF4 - teor de 0,80%

A Tabela 6.9 reúne os valores característicos de f_{\max} , δ , T_b e FT para as matrizes reforçadas com teor de 0,80% - A''', B''', C''', D''' e O.

Tabela 6.9 – Valores de FT – Teor total de fibra = 0,80%

| TEOR(%) | PONTO | POLIPR. | CARB. | AÇO | f_{\max} [kN] | δ [mm] | T_b [kN.mm] | FT [MPa] |
|---------|-------|---------|-------|------|-----------------|---------------|---------------|------------|
| 0.8 | A''' | 0 | 0.25 | 0.75 | 20.6 | 0.17565 | 46.909 | 2.293 |
| | | | | | 22.1 | 0.17367 | 48.289 | 2.361 |
| | | | | | 20.1 | 0.18866 | 46.978 | 2.297 |
| | | | | | 17.5 | 0.10786 | 33.948 | 1.660 |
| | B''' | 0.5 | 0.25 | 0.25 | 13.3 | 0.13212 | 25.515 | 1.247 |
| | | | | | 12.5 | 0.12731 | 27.252 | 1.332 |
| | | | | | 10.1 | 0.14111 | 28.088 | 1.373 |
| | | | | | 15.8 | 0.16281 | 28.153 | 1.376 |
| | C''' | 0.25 | 0 | 0.75 | 29.5 | 0.35774 | 95.321 | 4.660 |
| | | | | | 40 | 0.22069 | 110.608 | 5.408 |
| | | | | | 28 | 0.10806 | 93.234 | 4.558 |
| | | | | | 39.5 | 0.34219 | 103.852 | 5.077 |
| | D''' | 0.25 | 0.5 | 0.25 | 34.2 | 0.20168 | 84.033 | 4.108 |
| | | | | | 26 | 0.1446 | 56.002 | 2.738 |
| | | | | | 37.6 | 0.18839 | 83.815 | 4.098 |
| | | | | | 25.9 | 0.13093 | 47.538 | 2.324 |
| O | 0.25 | 0.25 | 0.5 | 42.1 | 0.28895 | 119.063 | 5.821 | |
| | | | | 33.7 | 0.15051 | 108.769 | 5.318 | |
| | | | | 41.2 | 0.16306 | 115.237 | 5.634 | |
| | | | | 36 | 0.15233 | 98.454 | 4.813 | |

A Figura 6.22, resume os valores médios obtidos para a resistência à flexão equivalente para os pontos mencionados na Tabela acima. Cabe destacar que o ponto O corresponde ao centro do cubo-estrela (ver metodologia), o que justifica esse ponto adicional para teor de fibra igual a 0,80%.

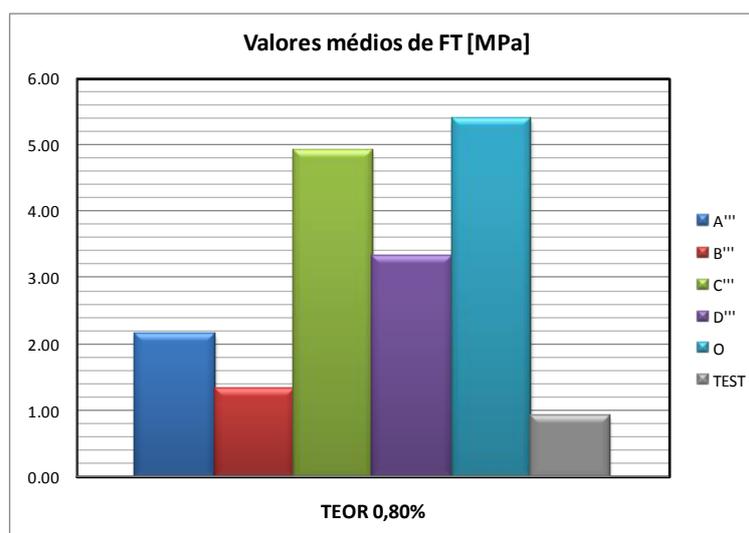


Figura 6.22: Fator de Tenacidade ou Resistência à Flexão Equivalente valores médios (teor de fibra = 0,80%)

Teor total de fibras de 1,15 %

Os pontos que representam matrizes reforçadas com teor de fibra de 1,15% são ensaiados e têm seus comportamentos representados pelas curvas dos gráficos plotados na Figura 6.23.

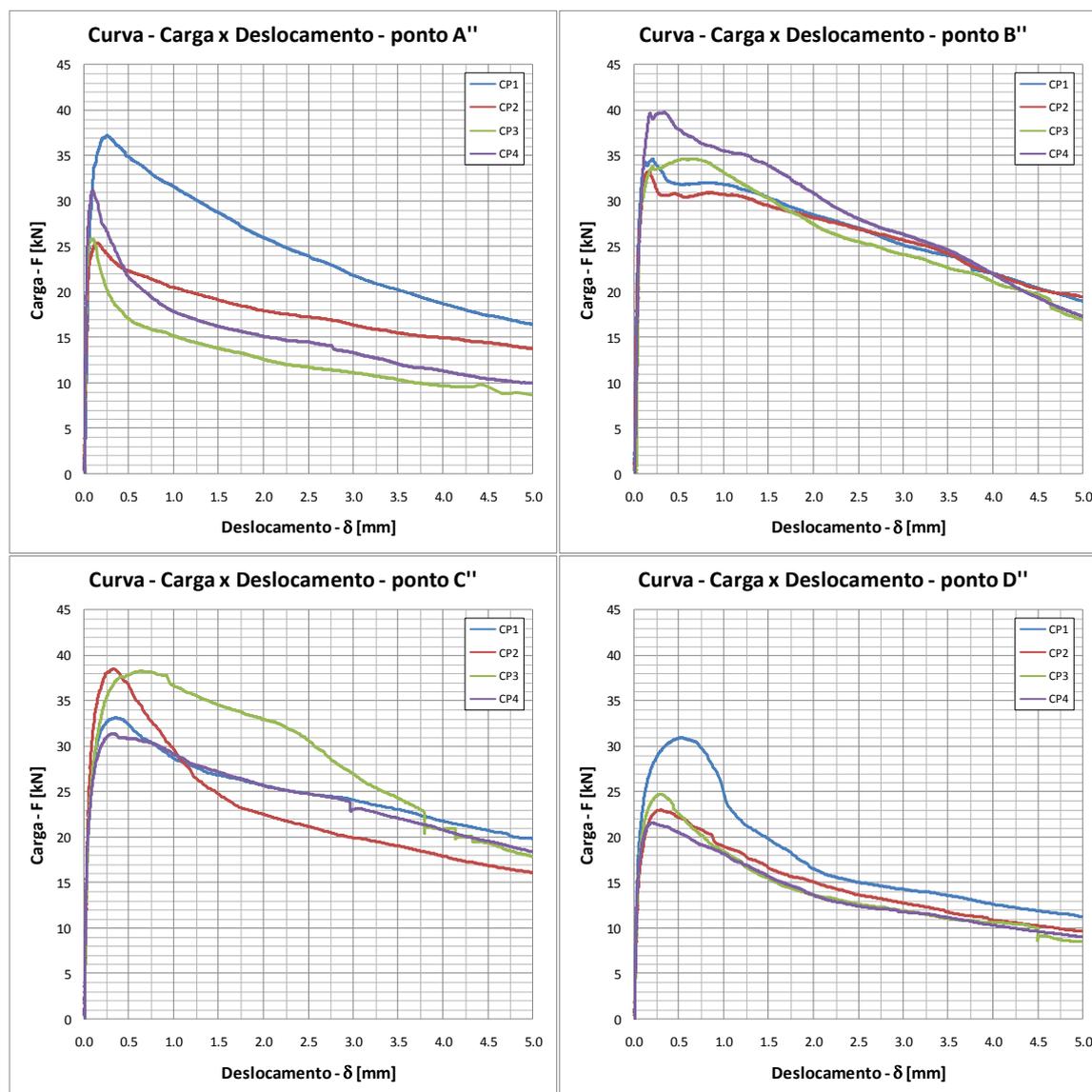


Figura 6.23: Curvas Força x Deslocamento – Flexão: JSCE – SF4 - teor de 1,15%

Na medida em que os gráficos são tratados e analisados conforme as orientações estabelecidas pela referida norma, é possível obter os resultados, da mesma forma que foram extraídos para os demais pontos já mencionados. Neste sentido, a Tabela 6.10 e Figura 6.24 reúnem os principais valores destinados à caracterização das matrizes com 1,15 % de teor de fibra.

Tabela 6.10 – Valores de FT – Teor total de fibra = 1,15%

| TEOR(%) | PONTO | POLIPR. | CARB. | AÇO | $f_{m\acute{a}x}$ [kN] | δ [mm] | Tb [kN.mm] | FT [MPa] |
|---------|-------|---------|-------|------|------------------------|---------------|------------|----------|
| 1.15 | A'' | 0.125 | 0.125 | 0.75 | 37.2 | 0.24729 | 105.947 | 5.180 |
| | | | | | 25.4 | 0.13619 | 74.163 | 3.626 |
| | | | | | 25.8 | 0.05648 | 54.255 | 2.652 |
| | | | | | 31.2 | 0.08705 | 65.427 | 3.199 |
| | B'' | 0.375 | 0.125 | 0.5 | 34.6 | 0.19452 | 112.687 | 5.509 |
| | | | | | 33.3 | 0.16249 | 110.701 | 5.412 |
| | | | | | 34.7 | 0.65207 | 111.148 | 5.434 |
| | | | | | 39.8 | 0.32452 | 122.331 | 5.981 |
| | C'' | 0.125 | 0.375 | 0.5 | 33.2 | 0.34608 | 104.969 | 5.132 |
| | | | | | 38.5 | 0.31427 | 98.729 | 4.827 |
| | | | | | 38.3 | 0.61454 | 124.030 | 6.064 |
| | | | | | 31.4 | 0.292 | 103.431 | 5.057 |
| | D'' | 0.375 | 0.375 | 0.25 | 31 | 0.51396 | 76.589 | 3.744 |
| | | | | | 23 | 0.26491 | 63.288 | 3.094 |
| | | | | | 24.8 | 0.28847 | 60.738 | 2.969 |
| | | | | | 21.6 | 0.18359 | 59.139 | 2.891 |

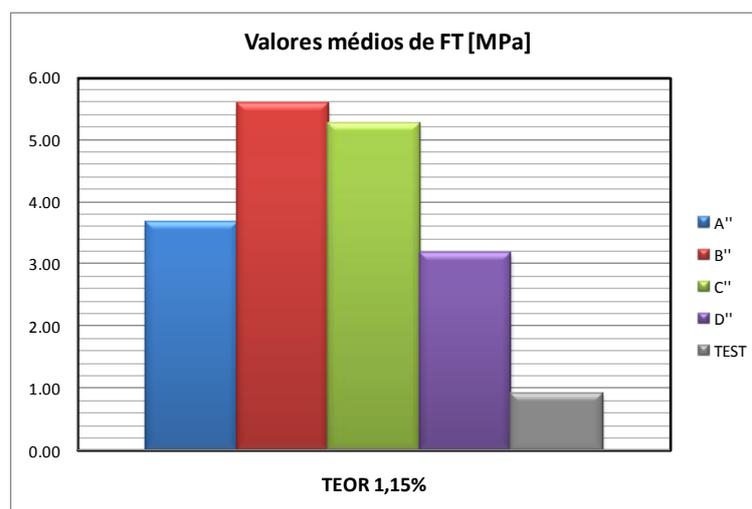


Figura 6.24: Fator de Tenacidade ou Resistência à Flexão Equivalente valores médios (teor de fibra = 1,15%)

Analisando as figuras 6.19, 6.21 e 6.23, nota-se que há uma variação na resistência à flexão para as misturas. As misturas definidas pelas siglas A' e B' (para teor total de 0,60%), C''' e O (para teor total de 0,80%) e B'' e C'' (para teor total de 1,15%) tendem a apresentar desempenhos superiores. A principal razão deste ganho de capacidade deve estar associada à hibridização de frações de fibra de aço com maior combinação de fibras de polipropileno, o que aponta para um sistema de reforço com tendências ao acréscimo de tenacidade.

Teor total de fibras de 0%

Com o intuito de verificar a eficiência para cada configuração de reforço, faz-se necessária a obtenção de não apenas as curvas de comportamento para cada mistura de fibras, mas também da representação da curva F vs d para a matriz sem reforço. A Figura 6.25 ilustra o comportamento, predominantemente, frágil dos testemunhos, quando submetidos ao teste de flexão.

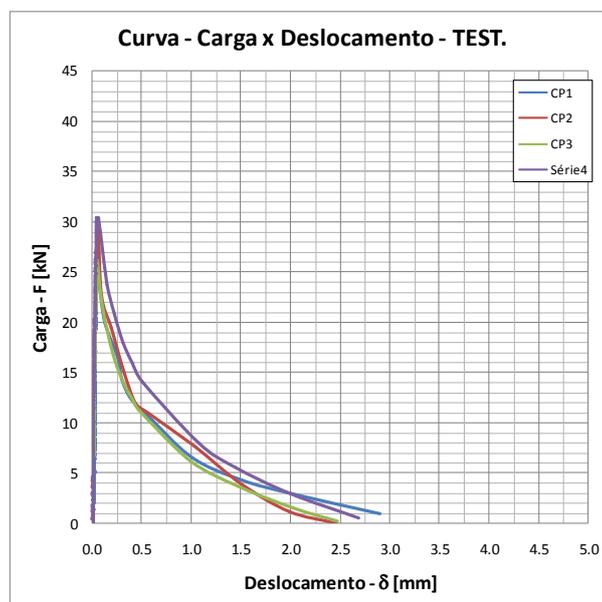


Figura 6.25: Curvas Força x Deslocamento – Flexão: JSCE – SF4 – TESTEMUNHO.

De forma a ilustrar as aparências das vigas após a realização do ensaio, na Figura 6.26 é possível observar a morfologia das fissuras oriundas da aplicação da carga de flexão em 4 pontos. A ausência do entalhe promove que a fissura inicie sua nucleação em qualquer região no terço médio central da face tracionada da viga.

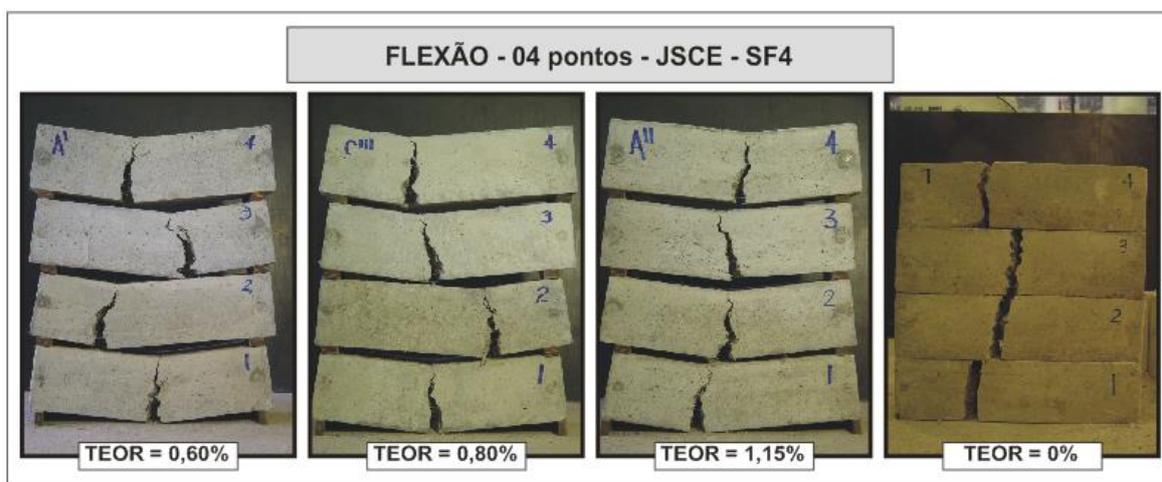


Figura 6.26: Aparência dos corpos de prova fissurados – Flexão: JSCE – SF4.

6.4.2. Teste de flexão (flexão em 03 pontos) - RILEM TC 162 – TDF

Na medida em que foram obedecidas às especificações estabelecidas pela norma RILEM TC 162 – TDF para medição dos deslocamentos CMOD e δ_L , bem como determinação das curvas de comportamento F vs d, carga máxima limite de proporcionalidade e obtenção das áreas que equivalem à capacidade de absorção de energia do concreto e influencia das fibras como reforço após a ruptura, têm-se os resultados conforme apresentados junto às Figuras e Tabelas apresentadas ao longo deste item.

Inicialmente, a Figura 6.27 ilustra as curvas que relacionam a carga aplicada e abertura normal na extremidade do entalhe para as amostras que possuem 0,60% de teor de fibra incorporado. Os gráficos estão divididos de forma a apresentar as diferenças e variações entre os pontos A', B', C' e D', conforme definidos na metodologia deste trabalho.

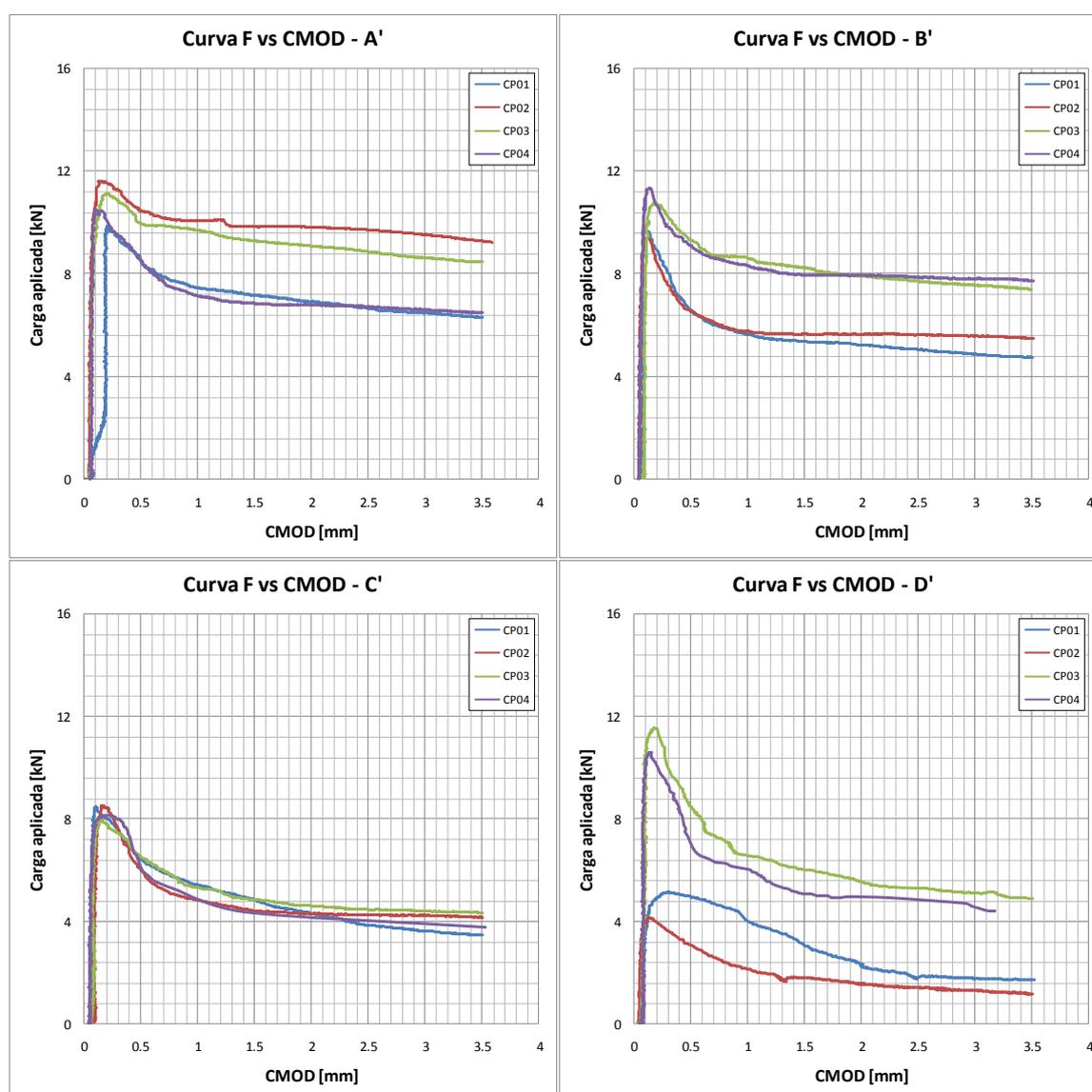


Figura 6.27: Curvas F x CMOD – Flexão: RILEM TC 162 – TDF – teor de 0,60%.

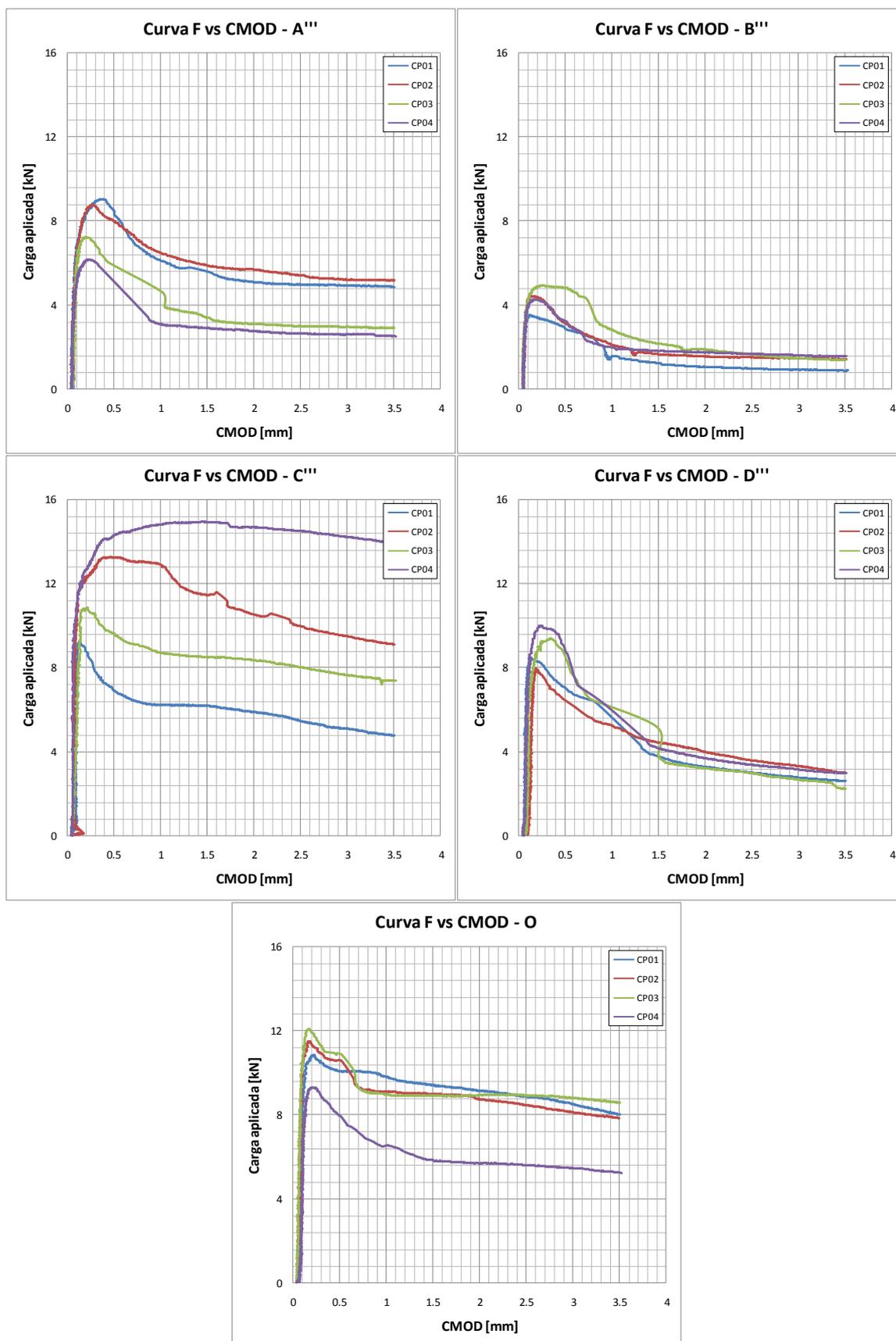


Figura 6.28: Curvas F x CMOD – Flexão: RILEM TC 162 – TDF – teor de 0,80%.

De maneira muito similar, a Figura 6.28 esclarece o comportamento à flexão, através das curvas F vs CMOD para os pontos de amostra com teor de fibra equivalente a 0,80%, na qual as amostras relacionadas às denominações A''', B''', C''', D''' e O apresentaram as curvas conforme ilustradas.

As curvas F vs CMOD que representam o desempenho das matrizes definidas como A'', B'', C'' e D'' – teor de fibra adicionado de 1,15% – frente ao ensaio de flexão, conforme as especificações da RILEM TC 162 – TDF são representadas na Figura 6.29, como segue.

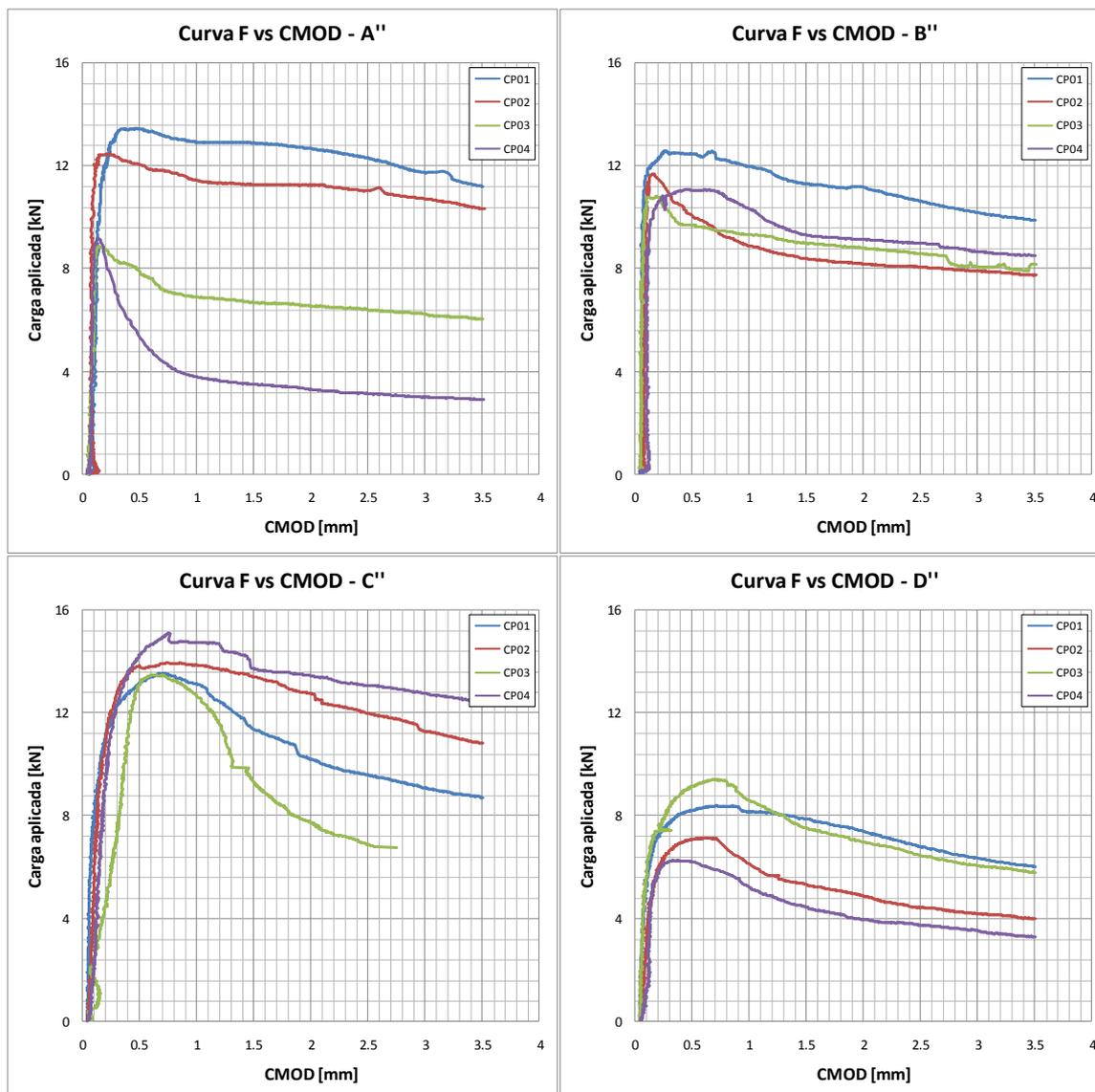


Figura 6.29: Curvas F x CMOD – Flexão: RILEM TC 162 – TDF – teor de 1,15%.

Baseados nas curvas F vs CMOD extraídas dos corpos de prova entalhados, apresentadas nas Figura 6.27, Figura 6.28 e Figura 6.29, são definidos os parâmetros correspondentes à

carga máxima de ruptura [$f_{m\acute{a}x}$] e deflexão no limite da proporcionalidade [δ_L], bem como as tensões de resistência à flexão equivalentes [f_{eq2} e f_{eq3}], as quais são assumidas à partir da determinação das áreas sob as curvas, sendo estas interpretadas como energias dissipadas durante o processo de fratura e/ou na resistência residual, medidas em intervalos de abertura da fissura.

Na Tabela 6.11 e Figura 6.30, podem ser visualizados os resultados referentes aos corpos de prova que possuem um teor de fibra igual a 0,60% [A', B', C' e D'].

Tabela 6.11 – Valores de $f_{m\acute{a}x}$, δ_L , f_{eq2} e f_{eq3} – Teor total de fibra = 0,60%

| TEOR(%) | PONTO | POLIPR. | CARB. | AÇO | $f_{m\acute{a}x}$ [kN] | δ_L [mm] | $f_{eq.2}$ [MPa] | $f_{eq.3}$ [MPa] |
|---------|-------|---------|-------|------|------------------------|-----------------|------------------|------------------|
| 0.6 | A' | 0.125 | 0.125 | 0.75 | 9.854 | 0.149 | 4.160 | 4.500 |
| | | | | | 11.629 | 0.097 | 5.380 | 6.118 |
| | | | | | 11.126 | 0.118 | 4.260 | 4.802 |
| | | | | | 10.548 | 0.048 | 4.840 | 5.224 |
| | B' | 0.375 | 0.125 | 0.5 | 9.695 | 0.038 | 3.570 | 4.130 |
| | | | | | 9.412 | 0.082 | 3.740 | 4.308 |
| | | | | | 10.751 | 0.102 | 4.860 | 5.348 |
| | | | | | 11.335 | 0.070 | 5.050 | 5.518 |
| | C' | 0.125 | 0.375 | 0.5 | 8.484 | 0.059 | 3.380 | 3.386 |
| | | | | | 8.534 | 0.079 | 3.210 | 3.596 |
| | | | | | 8.011 | 0.112 | 3.040 | 3.398 |
| | | | | | 8.153 | 0.120 | 2.970 | 3.424 |
| | D' | 0.375 | 0.375 | 0.25 | 5.155 | 0.251 | 2.290 | 1.964 |
| | | | | | 4.159 | 0.102 | 1.480 | 1.490 |
| | | | | | 11.562 | 0.128 | 4.170 | 4.724 |
| | | | | | 10.610 | 0.071 | 3.970 | 4.304 |

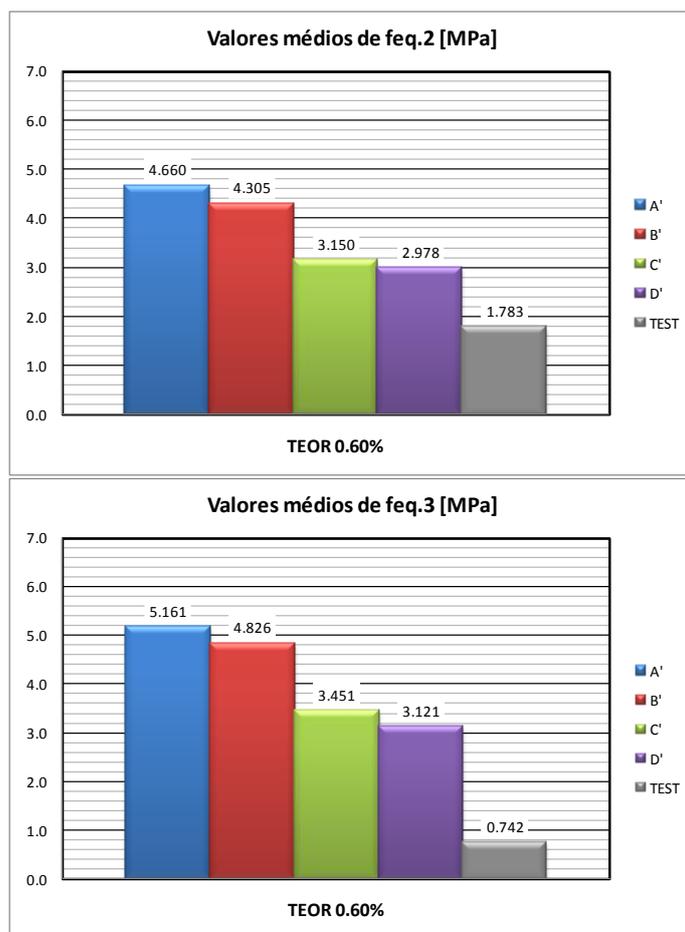


Figura 6.30: Valores médios de resistência à flexão feq₂ e feq₃[MPa] RILEM TC 162 – TDF – teor de 0,60%.

Na Tabela 6.12 e Figura 6.31, tem-se os resultados correspondentes aos testes aplicados junto aos corpos de prova com um teor de fibra igual a 0,80% [A''', B''', C''', D''' e O].

Tabela 6.12 – Valores de $f_{m\acute{a}x}$, δ_L , feq₂ e feq₃ – Teor total de fibra = 0,80%

| TEOR(%) | PONTO | POLIPR. | CARB. | AÇO | $f_{m\acute{a}x}$ [kN] | δ_L [mm] | feq.2[MPa] | feq.3[MPa] |
|---------|-------|---------|-------|--------|------------------------|-----------------|------------|------------|
| 0.8 | A''' | 0 | 0.25 | 0.75 | 9.056 | 0.336 | 3.440 | 3.880 |
| | | | | | 8.779 | 0.219 | 3.550 | 3.888 |
| | | | | | 7.243 | 0.140 | 2.840 | 2.832 |
| | | | | | 6.174 | 0.166 | 2.320 | 2.544 |
| | B''' | 0.5 | 0.25 | 0.25 | 3.539 | 0.068 | 1.450 | 1.260 |
| | | | | | 4.442 | 0.090 | 1.560 | 1.624 |
| | | | | | 4.939 | 0.205 | 1.810 | 1.752 |
| | | | | | 4.282 | 0.126 | 1.400 | 1.638 |
| | C''' | 0.25 | 0 | 0.75 | 9.240 | 0.075 | 3.760 | 4.078 |
| | | | | | 13.282 | 0.357 | 6.580 | 6.584 |
| | | | | | 10.874 | 0.167 | 4.780 | 5.184 |
| | | | | | 14.972 | 1.400 | 6.830 | 7.926 |
| | D''' | 0.25 | 0.5 | 0.25 | 8.491 | 0.065 | 3.512 | 2.426 |
| | | | | | 7.974 | 0.133 | 2.850 | 2.393 |
| | | | | | 9.406 | 0.285 | 3.696 | 2.132 |
| | | | | | 10.026 | 0.186 | 3.960 | 2.423 |
| O | 0.25 | 0.25 | 0.5 | 10.861 | 0.185 | 5.260 | 5.462 | |
| | | | | 11.488 | 0.110 | 4.880 | 5.580 | |
| | | | | 12.084 | 0.116 | 5.180 | 6.294 | |
| | | | | 9.308 | 0.145 | 3.740 | 4.152 | |

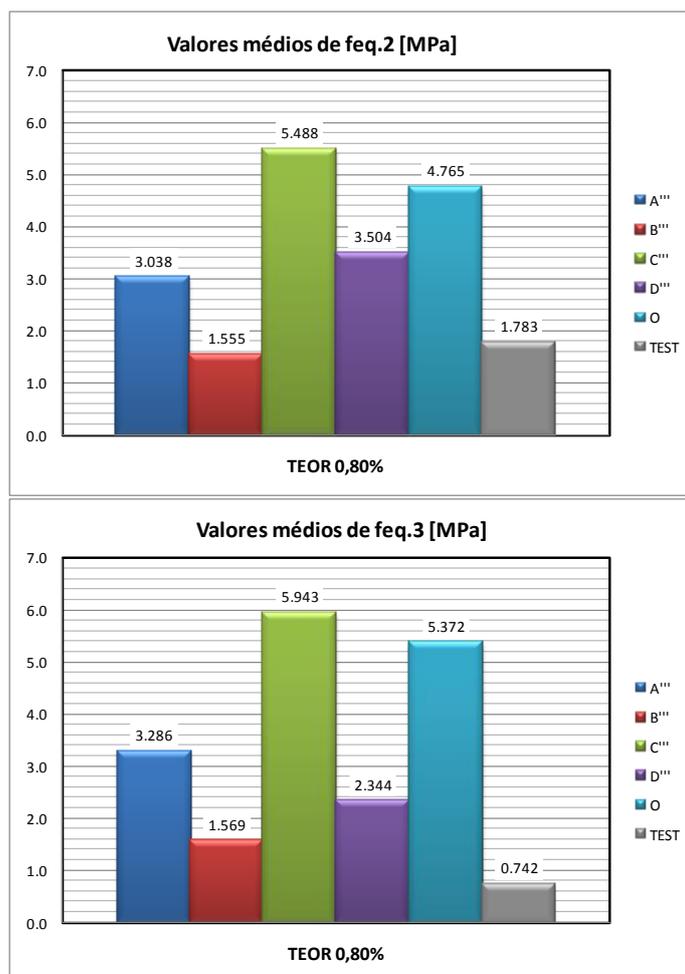


Figura 6.31: Valores médios de resistência à flexão feq₂ e feq₃[MPa] RILEM TC 162 – TDF – teor de 0,80%.

Por fim, os parâmetros experimentais obtidos para os corpos de prova definidos como sendo os pontos A'', B'', C'' e D'', são contemplados na Tabela 6.13 e graficados na Figura 6.32, os quais são reforçados com teor de fibra igual a 1,15%.

Tabela 6.13 – Valores de $f_{máx}$, δ_L , feq₂ e feq₃ – Teor total de fibra = 1,15%

| TEOR(%) | PONTO | POLIPR. | CARB. | AÇO | $f_{máx}$ [kN] | δ_L [mm] | feq.2[MPa] | feq.3[MPa] |
|---------|-------|---------|-------|-------|----------------|-----------------|------------|------------|
| 1.15 | A'' | 0.125 | 0.125 | 0.75 | 13.460 | 0.288 | 6.930 | 7.326 |
| | | | | | 12.477 | 0.132 | 6.020 | 6.784 |
| | | | | | 8.871 | 0.094 | 3.880 | 4.278 |
| | | | | | 9.172 | 0.098 | 2.880 | 3.314 |
| | B'' | 0.375 | 0.125 | 0.5 | 12.594 | 0.198 | 5.120 | 5.450 |
| | | | | | 11.697 | 0.090 | 6.030 | 6.320 |
| | | | | | 10.818 | 0.064 | 5.200 | 5.498 |
| | | | | | 11.089 | 0.327 | 4.990 | 5.404 |
| | C'' | 0.125 | 0.375 | 0.5 | 13.546 | 0.590 | 6.510 | 6.336 |
| | | | | | 13.952 | 0.708 | 6.690 | 6.818 |
| | | | | | 13.497 | 0.244 | 5.970 | 5.786 |
| | | | | | 15.107 | 0.696 | 7.510 | 7.968 |
| D'' | 0.375 | 0.375 | 0.25 | 8.398 | 0.667 | 4.090 | 4.042 | |
| | | | | 7.157 | 0.599 | 3.030 | 3.058 | |
| | | | | 9.418 | 0.667 | 4.520 | 4.370 | |
| | | | | 6.267 | 0.282 | 2.760 | 2.724 | |

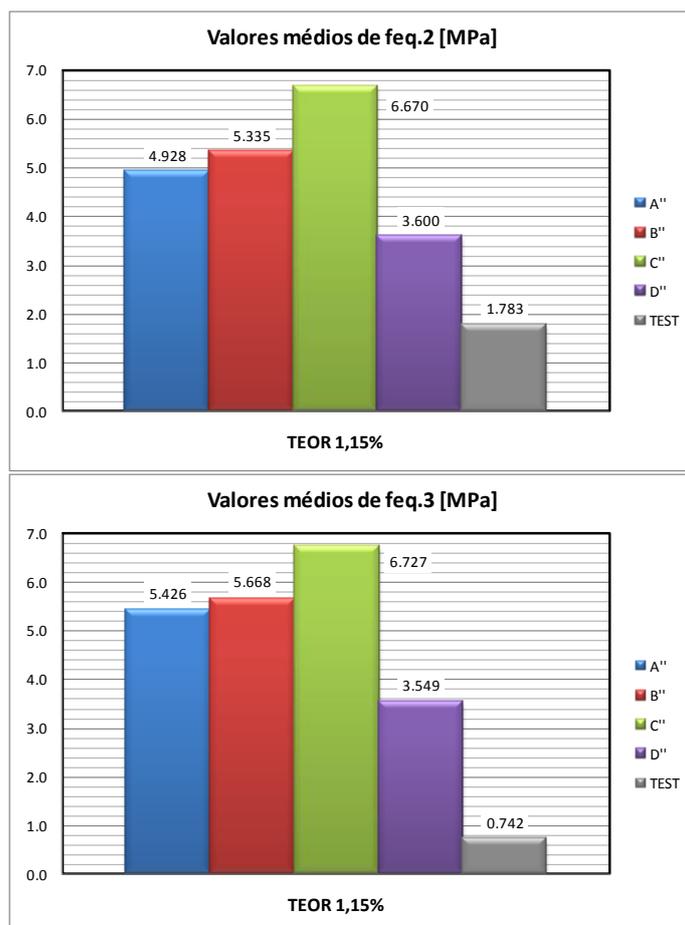


Figura 6.32: Valores médios de resistência à flexão feq_2 e feq_3 [MPa] RILEM TC 162 – TDF – teor de 1,15%.

A partir das ilustrações compreendidas entre as Figuras 6.27 e 6.32 é possível identificar as misturas que melhor se comportaram em termos de desempenho à flexão. Os compósitos resultantes da aplicação de 0,60% de teor total de fibra, definidas como A' e B' se destacam pelo melhor acréscimo neste aspecto. Os compostos definidos pelas misturas C'' e O, se destacam em termos de resistência à flexão da matriz não reforçada, da mesma forma evidenciada pelo método anterior. Quando a fração de fibras equivale a 1,15%, todas as misturas superam a capacidade portante do compósito de referência, mas o ganho é mais perceptível nos compósitos referentes aos pontos B'' e C'', pois excedem os efeitos dos demais.

Apesar das especificações previstas pela RILEM TC 162 TDF estarem direcionadas às matrizes reforçadas com fibra na sua constituição, decidiu-se ensaiar vigas testemunhos (concreto sem fibra) obedecendo ao mesmo procedimento da referida norma. Esta intervenção permitiu uma comparação direta entre estas e as vigas reforçadas,

evidenciando a influência do reforço em cada caso testado. As curvas que mostram o comportamento para estas matrizes estão destacadas na Figura 6.33.

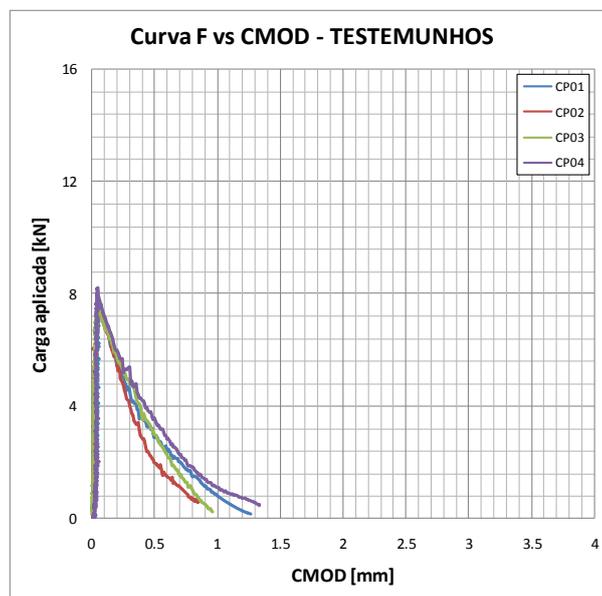


Figura 6.33: Curvas Força x CMOD – Flexão: RILEM TC 162-TDF – TESTEMUNHOS.

Sabe-se que a presença do entalhe na borda tracionada da viga –oposta à face de aplicação da carga – induz a nucleação de uma fissura discreta na sua extremidade, resultante da elevada concentração de tensões desta zona. Por isso, a morfologia do plano de ruptura tende a ser muito semelhante para todas as combinações de reforço. Evidentemente, para aqueles casos em que há uma eficiência maior da fibra, decorrente de sua natureza e quantidade inserida na matriz frágil, bem como a casualidade de um obstáculo causado pela presença de um agregado graúdo, a propagação da fissura é dificultada e, por esses motivos, justificam a sensível diferença que, eventualmente, surgem na forma da fissura final.

Exemplificando, a Figura 6.34 reúne a configuração de ruptura de algumas vigas com teores e combinações de fibras diferentes. Como esperado, o concreto que não possui reforço interno não ofereceu resistência significativa na propagação da fissura, possibilitando que percorresse a altura da viga em linha reta.

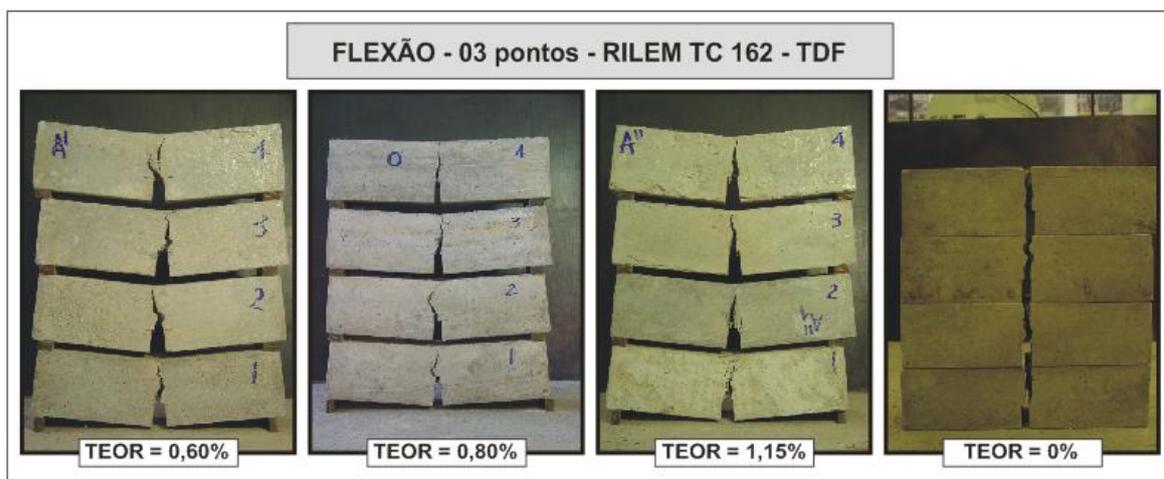


Figura 6.34: Aparência dos corpos de prova fissurados – Flexão: RILEM TC 162 – TDF

ANÁLISE E MODELAGEM DOS RESULTADOS

Tomando como base os resultados apresentados no capítulo anterior, nesse capítulo se efetua uma análise estruturada do comportamento dos compósitos estudados, visando a sua caracterização, e a eventual proposição de modelos que representem, apropriadamente, a influência das variáveis de pesquisa analisadas.

A compreensão e domínio dos principais comportamentos de resposta dos compósitos gerados com a adição e diversas combinações de fibras foram realizadas através do emprego da análise multivariada. Dessa forma se buscou extrair as tendências estatísticas possíveis da base de dados, bem como elucidar as inter-relações entre os fatores de estudo – resistência à compressão axial [f_c^{CRF}], resistência à tração por compressão diametral [f_{ID}^{CRF}], carga máxima e resistência à flexão na primeira fissuração [$f_{m\acute{a}x}$ e $\sigma_{m\acute{a}x}^{CRF}$], fator de tenacidade [F_T] e resistência à flexão equivalente [f_{eq}].

Tomando cada um dos fatores acima como variável dependente, relacionada às variáveis independentes do estudo (teor total e proporção de cada fibra utilizada), foram efetuadas, também, análises de regressão, visando determinar a magnitude da contribuição de cada uma dela na resposta mensurada em cada caso. Visto que os fenômenos subjacentes são complexos e não lineares, foi efetuada uma análise de regressão não linear, com o emprego do software *Statgraphics*.

Dessa forma, se buscou definir modelos (expressões empíricas) que pudessem ser usados para a estimação do valor esperado de cada grandeza avaliada, para diferentes teores e combinações de fibras. Considerando, conceitualmente, que a análise de regressão não-linear está baseada na determinação de coeficientes de ajuste, que colaboram na obtenção de mínimos valores para o somatório do quadrado dos resíduos, a determinação destes modelos foi realizada levando em conta a investigação dos resíduos padronizados que, por sua vez, são provenientes da razão entre o resíduo de cada ponto experimental (diferença entre valor real e valor predito) e o desvio-padrão dos demais resíduos.

A principal vantagem desta consideração ao longo da análise está associada à decisão sobre um possível descarte de dados considerados espúrios, como explicam HAIR et al. (2005).

A seguir se apresentam os resultados, organizados conforme a propriedade mecânica monitorada. A ordem de apresentação no tratamento dos resultados foi definida de forma a facilitar a compreensão do leitor e, por isso, alguns conceitos e ideias, causas e justificativas tiveram que ser repetidas em diversas partes deste capítulo.

7.1. MODELAGEM DOS DADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL - f_C^{CRF}

A partir do tratamento dos resultados, e mediante o ajuste de um modelo de regressão múltipla linear para descrever a relação $\log(FC/26,67)$ e as variáveis independentes, obteve-se a seguinte equação, tomada como modelo de comportamento para explicar o efeito da presença das diversas combinações de fibras na resistência à compressão do compósito resultante:

$$\log\left(\frac{FC}{26,67}\right) = 0,725.P - 1,616.A^2 - 4,947.C^2 - 13,935.P^2 + 12,405.A.P + 9,694.C.P$$

Onde:

FC – resistência à compressão axial do CRF (f_C^{CRF}), em MPa;

A – teor de fibra de aço adicionado à mistura, em %;

C – teor de fibra de carbono adicionado à mistura, em %;

P – teor de fibra de polipropileno adicionado à mistura, em %.

O *valor-p* obtido com esse modelo foi menor que 0,01, o que permite constatar que há uma relação estaticamente significativa entre as variáveis, em um nível de confiança de 99%. O valor de R^2 ajustado, oriundo da análise estatística para este modelo e considerado como o mais adequado para a comparação de modelos com vários números de variáveis independentes, foi de 91,0815%. Além disso, o erro padrão da estimativa aponta um desvio padrão dos resíduos de 0,132102, bem como erro médio absoluto de 0,10199. A autocorrelação residual foi avaliada e, no processo de tratamento dos dados e obtenção de um modelo capaz de representar o comportamento do CRF, no que tange à compressão axial, o parâmetro estatístico Durbin-Watson foi superior a 1,4, evidenciando que não há qualquer autocorrelação grave nos resíduos.

Em termos estatísticos, com a preocupação de validar o modelo encontrado, cabe salientar que, ao verificar a possibilidade de uma simplificação do modelo, observou-se que o maior *valor-p* relativo às variáveis independentes foi de 0,0534, para o teor de fibra de polipropileno. Uma vez que o *valor-p* é próximo de 0,10, esse termo pode ser considerado estatisticamente significativo, para um nível de confiança de 90%. Dado esse resultado, e dependendo do nível de confiança que se deseja, pode-se remover a variável referente ao teor de polipropileno do modelo.

A partir da equação obtida para o modelo foram construídas as curvas mostradas na Figura 7.1. Na mesma, o valor de f_c^{CRF} é expresso como função de uma única fibra atuando como elemento de reforço (fibra isolada), Ou seja, não se consideram os efeitos da hibridização.

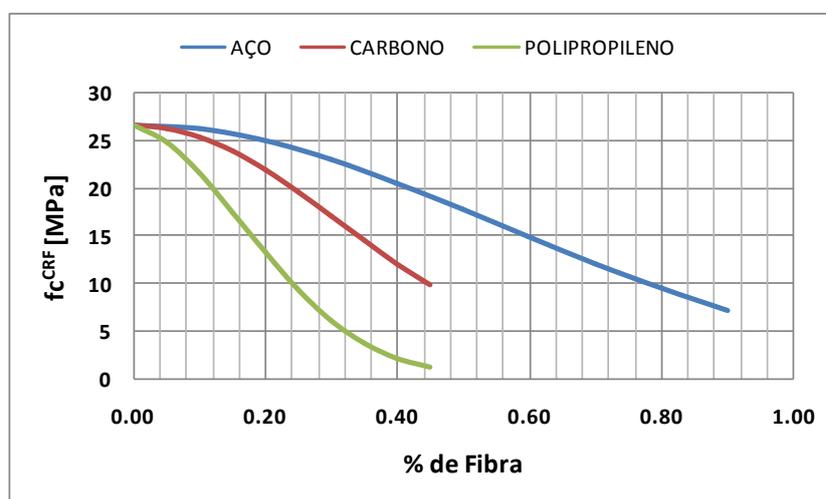


Figura 7.1 – Resistência à compressão axial – f_c^{CRF} – ação isolada de cada tipo de fibra.

Analisando o gráfico acima, percebe-se que o modelo indica que as fibras sintéticas de polipropileno têm mais dificuldade de reforçar a matriz. Isso ajuda a explicar por que os concretos reforçados com altos teores de polipropileno apresentaram desempenhos inferiores, em relação à resistência à compressão, do que aqueles que apresentavam maior quantidade de fibras metálicas, como discutido no Capítulo 6.

Conforme mencionado na revisão teórica, sabe-se que o uso de fibras de polipropileno pode ajudar a controlar a retração plástica e a mitigar o aparecimento de microfissuras durante a fase de endurecimento do concreto, principalmente em peças estruturais, nas quais há grandes superfícies expostas. Nesse sentido, a mesma pode ajudar a incrementar a

durabilidade. Mas, como se espera de uma microfibras, não consegue impactar a resistência mecânica de forma significativa, pelo menos nos teores estudados.

Um fator importante a ser destacado é que nesse estudo foram usadas fibras de polipropileno não estruturais, de baixo módulo e reduzida dimensão. Nessa forma, as fibras apresentam aderência limitada com a matriz, e, dado o grande número de filamentos, acarretam dificuldades de dispersão, que podem afetar a homogeneidade do compósito.

No que concerne à influência das microfibras de carbono, nota-se um efeito semelhante ao verificado no caso das fibras sintéticas de polipropileno, mas com menor impacto negativo nos valores de f_c^{CRF} dos compósitos gerados, possivelmente porque as fibras, mais curtas e de maior módulo, não afetam tanto a trabalhabilidade da matriz.

Como esperado, as fibras metálicas são as que apresentam melhor desempenho em termos de reforço da matriz à compressão, de acordo com o modelo gerado. Porém, da mesma forma do que observado para as demais fibras, com o incremento da concentração de fibras, o modelo tende a estimar uma queda crescente na resistência à compressão do compósito, também para a fibra metálica usada de forma isolada.

As estimativas do modelo, considerando combinações de duas das fibras inseridas como reforço da matriz de concreto simples, podem ser observadas na figura 7.2.

É pertinente destacar que, na figura 7.2a, as proporções de fibras metálicas e as fibras de carbono são adotadas em intervalos condizentes àqueles adotados no programa experimental. De maneira similar, na figura 7.2b, a fibra de polipropileno é combinada com a fibra metálica para compor o conjunto de curvas que expressam o comportamento obtido para a matriz de concreto com reforço binário dessas fibras. A figura 7.2c representa o efeito causado pela ação conjunta das duas microfibras (polipropileno e carbono) uma combinação que não se mostra favorável para o reforço da matriz (a melhor técnica consiste em combinar macro e microfibras, para poder fazer um controle da tendência à fissuração em diferentes momentos).

Essa tendência é representada pelo modelo, que estima melhores resultados nos casos em que existe fibra metálica na composição (aço+carbono e aço+polipropileno). Na figura 7.2b nota-se que a hibridização entre as fibras metálicas e as fibras de polipropileno se mostra positiva, resultando, inclusive, num ganho de resistência à compressão, em relação ao testemunho.

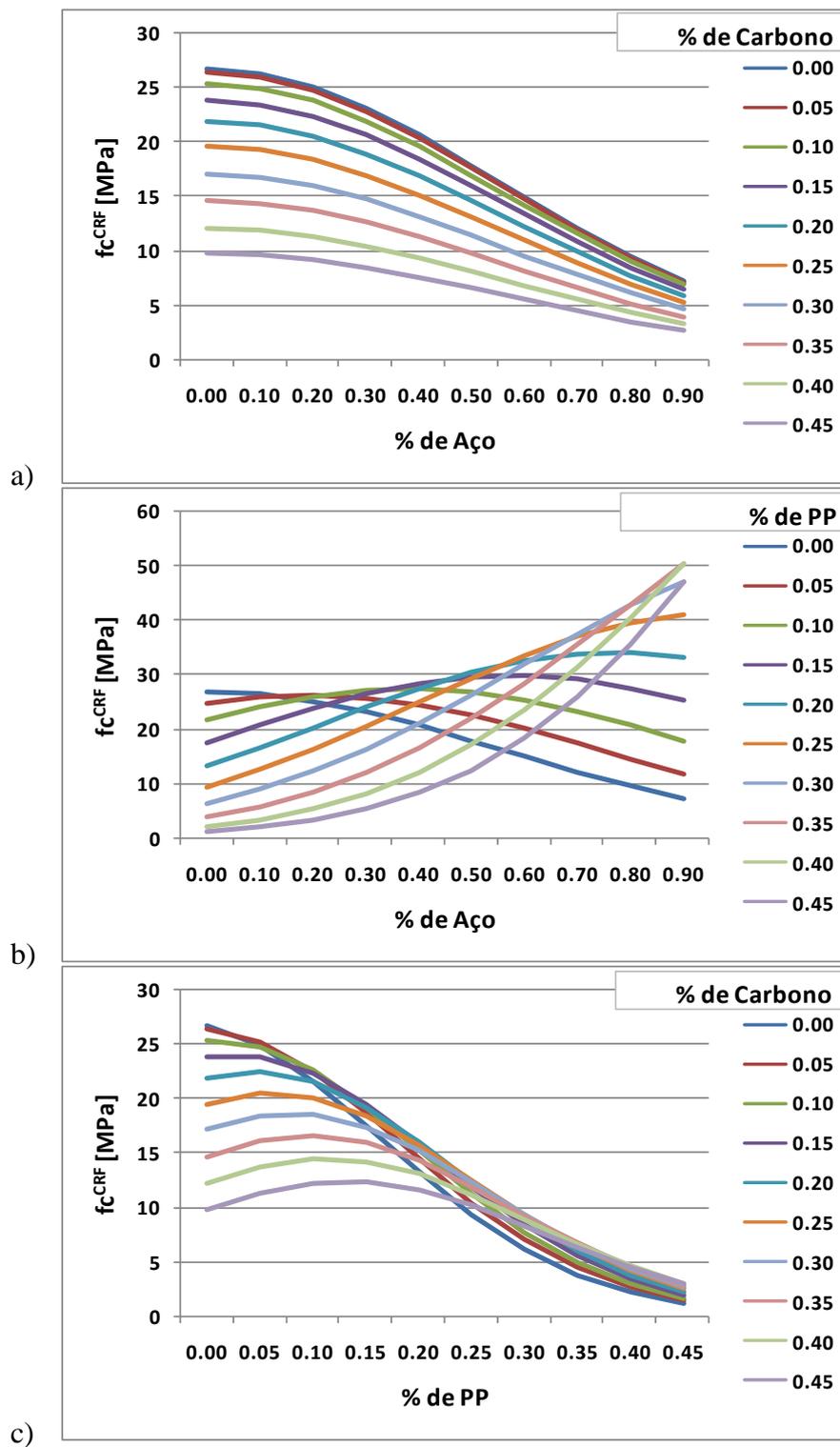


Figura 7.2 – Resistência à compressão axial – f_{cCRF} – para combinações binárias de fibras: a) Aço+Carbono; b) Aço+Polipropileno; c) Polipropileno+Carbono.

Um dado interessante é que o modelo, reproduzindo tendências experimentais registradas e discutidas no Capítulo 6, indicam que, na medida em que se incrementa o teor fibras metálicas, é interessante aumentar de forma correspondente a quantidade de polipropileno, obedecendo às devidas proporções entre si, de modo a contribuir com o reforço.

Ao avaliar a combinação entre as fibras de polipropileno e carbono - figura 7.2c – percebe-se que combinações somente de microfibras não geram resultado positivo. Isso pode ser explicado pelo fato de que ambas possuem fatores de forma reduzidos e atuam numa região localizada (micro ou meso) da matriz, sendo incompatíveis com as dimensões dos agregados graúdos do concreto, associado ao fato de não apresentarem aderência ideal com os demais elementos do material composto.

A combinação se mostra ainda mais ineficaz quando se empregam teores elevados de fibras, como se pode observar na figura 7.2c. Para teores elevados de fibras, o modelo indica uma considerável redução da capacidade portante do compósito.

Para avaliar a validade do modelo, decidiu-se comparar os valores de resistência à compressão estimados pelo mesmo, para os teores e combinações de fibras usados nos ensaios. Uma comparação dos valores do modelo e dos resultantes do programa experimental é apresentada na figura 7.3.

Nota-se que modelo estima, de forma razoavelmente satisfatória, o comportamento experimental em termos de resistência à compressão, para as misturas estudadas, tanto para combinações binárias quanto terciárias.

O modelo se mostra conservador, sendo que todas as estimativas são superiores aos valores medidos. As menores diferenças aparecem nos traços C' e A''', que apresentam teores elevados de fibra metálica.

Para os compósitos com teor total de fibra de 0,60% (figura 7.3a), todos os pontos estimados apresentaram resistência à compressão superior à resistência do concreto sem fibras, com destaque para o ponto B', no qual a mistura com 50% de fibra metálica e de 37,5% de fibra de polipropileno atingiu o maior valor de f_c^{CRF} , tanto no caso da estimativa do modelo quanto no caso dos dados experimentais.

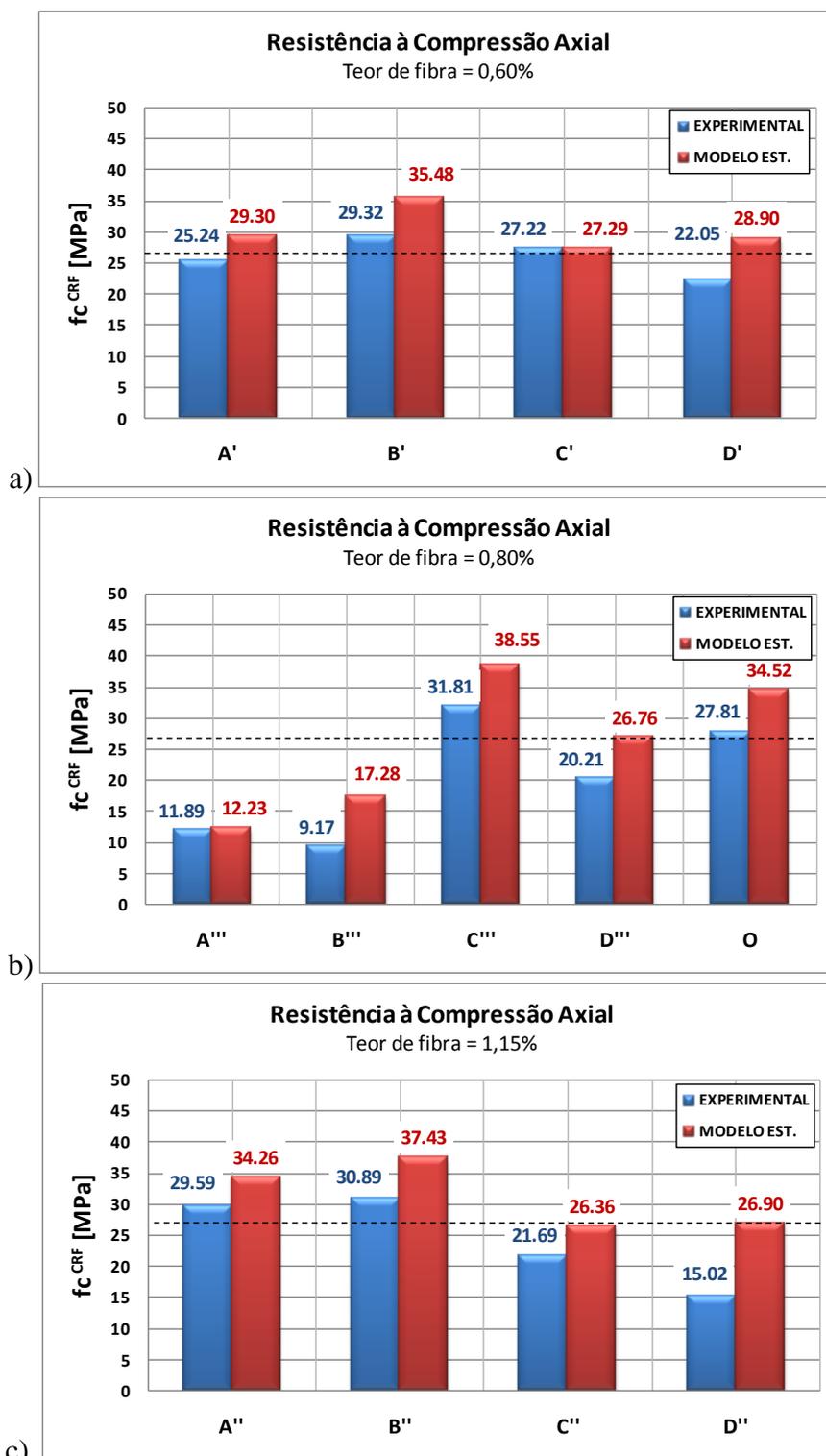


Figura 7.3 – Valores de Resistência à compressão axial – f_c^{CRF} – para combinações terciárias de fibras – comparação entre estimativas provenientes do modelo proposto e dados experimentais. Teor de fibras: a) 0,6%. b) 0,8%. c) 1,15%.

No que diz respeito às misturas com teor total de fibras de 0,8% (figura 7.3b), os pontos C''' e O apresentam os maiores valores de resistência à compressão axial. Tais misturas

possuem, em suas composições, frações de fibras metálicas de 75% e 50%, respectivamente, ambas com uma adição de 25% de polipropileno, evidenciando novamente que a hibridização, quando executada de forma adequada, pode trazer efeitos positivos.

Entretanto, na mistura referente ao ponto A''', apesar da parcela de 75% de fibras metálicas, semelhante ao que acontece no ponto C''', os valores de resistência foram muito inferiores aos do concreto simples. Uma das razões levantadas para esse comportamento é a ausência de fibras de polipropileno na combinação. Os compósitos definidos pelos pontos B''' e D''', cujas resistências também foram menores ao do testemunho, foram confeccionados com uma proporção de fibras de aço equivalente a 50% do teor total de 0,8% e frações de polipropileno de, respectivamente, 0,5 e 0,25.

Finalmente, observando a Figura 7.3c (teor total de fibras de 1,15%), percebe-se, novamente, que o emprego de um elevado percentual de fibra de aço (igual ou maior que 50% do teor total de fibras), em associação a um teor complementar de polipropileno (igual ou maior que 25% do total de fibras), resultam nos compósitos híbridos com maiores valores de resistência à compressão. É o que acontece nos pontos A'' e B'', nos quais tanto as estimativas do modelo quanto os resultados experimentais ultrapassam o patamar de 26,67 MPa, referente à média dos valores de f_c^{CRF} dos testemunhos. A mistura correspondente ao ponto A'' contém 75% de fibra de aço e 12,5% de fibra de polipropileno, enquanto o ponto B'' contém 50% de fibras metálicas e 37,5% de fibras de polipropileno (ou seja, em ambos os casos somente 12,5% de fibras carbono). Quando o teor de fibra metálica é reduzido, os compósitos acabam tendo perdas na resistência à compressão, em relação ao testemunho, mesmo que o teor total de fibra dessas misturas seja relativamente elevado, É o que acontece, por exemplo, no ponto D'', que contém 25% de fibra de aço e 37,5% de fibra de polipropileno, e atingiu o menor valor experimental de f_c^{CRF} . Nesse caso, o modelo acabou superestimando a resistência.

7.2. MODELAGEM DOS DADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL - f_{tD}^{CRF}

Procedendo de maneira similar ao que se fez para os dados de resistência à tração por compressão diametral, gerou-se o seguinte modelo de regressão múltipla linear para estimativa da resistência à tração por compressão diametral - f_{tD}^{CRF} :

$$\log \left(\frac{FT}{3,28} \right) = -1,999.C - 0,950.A^2 - 13,274.P^2 + 9,736.A.P + 9,446.C.P$$

Onde:

FT – resistência à tração por compressão diametral do CRF (f_{ID}^{CRF}), em MPa;

A – teor de fibra de aço adicionado à mistura, em %;

C – teor de fibra de carbono adicionado à mistura, em %;

P – teor de fibra de polipropileno adicionado à mistura, em %.

Dado que o valor-p calculado é menor que 0,01, é possível considerar a equação como estatisticamente significativa para explicação dos valores de f_{ID}^{CRF} , para um nível de confiança de 99%. O parâmetro R^2 ajustado foi de 70,93% e o erro padrão da estimativa obtido aponta para um desvio padrão dos resíduos de 0,251457 e para um erro médio absoluto de 0,190687, sem que haja qualquer autocorrelação grave nos resíduos. Tendo em vista que a significância é elevada, para um nível de confiança de 99%, todas as variáveis do modelo foram mantidas.

De posse da expressão para estimativa de f_{ID}^{CRF} , foram analisados os efeitos da variação das quantidades de fibras de aço, carbono e polipropileno, consideradas isoladamente como elementos de reforço da matriz. Os resultados estão registrados na figura 7.4, que o modelo proposto aponta para uma tendência ao comprometimento da resistência do compósito à proporção que há o acréscimo de fibras, sobretudo para o caso em que há elevados teores da fibra sintética de polipropileno, similar ao que foi notado no comportamento à compressão axial.

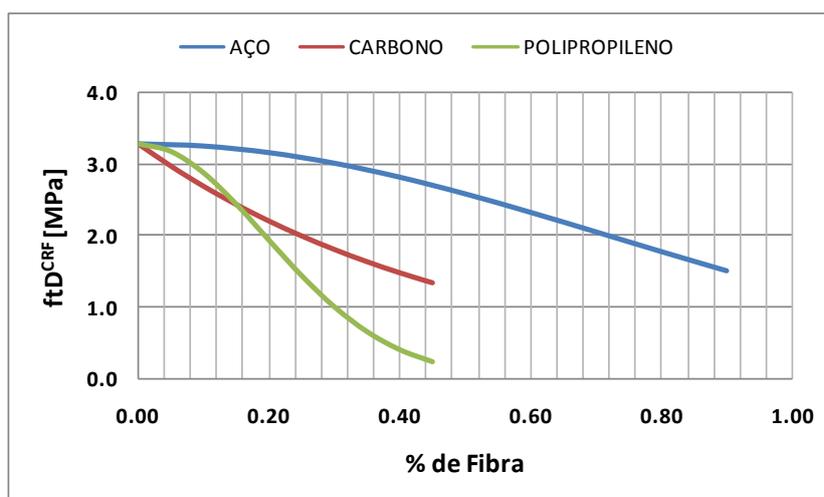


Figura 7.4 – Resistência à tração por compressão diametral – f_{ID}^{CRF} - ação isolada da fibra.

Como este ensaio consiste na determinação da resistência à tração, função da capacidade que um cilindro tem de suportar esforços de compressão, mesmo que na direção transversal, é de se esperar que haja uma similaridade entre a morfologia destas últimas curvas e tendências de desempenho com o comportamento do compósito frente à compressão axial.

Desta maneira, considerando que, como são fibras curtas e a matriz tende a aumentar sua porosidade, bem como, conseqüentemente, reduzir a sua resistência, pode-se observar que a contribuição das fibras de aço para a resistência à tração é maior quando comparada à aço das demais fibras, pois possui rigidez maior que a matriz.

Para as fibras de polipropileno e carbono, cuja rigidez é menor que a matriz, a redução da resistência à tração não consegue ser compensada pelo reforço, resultando em perda de resistência para o compósito, principalmente para teores elevados.

Os efeitos causados pelas combinações binárias de fibras frente à resistência à tração por compressão diametral podem ser visualizados na figura 7.5, a seguir.

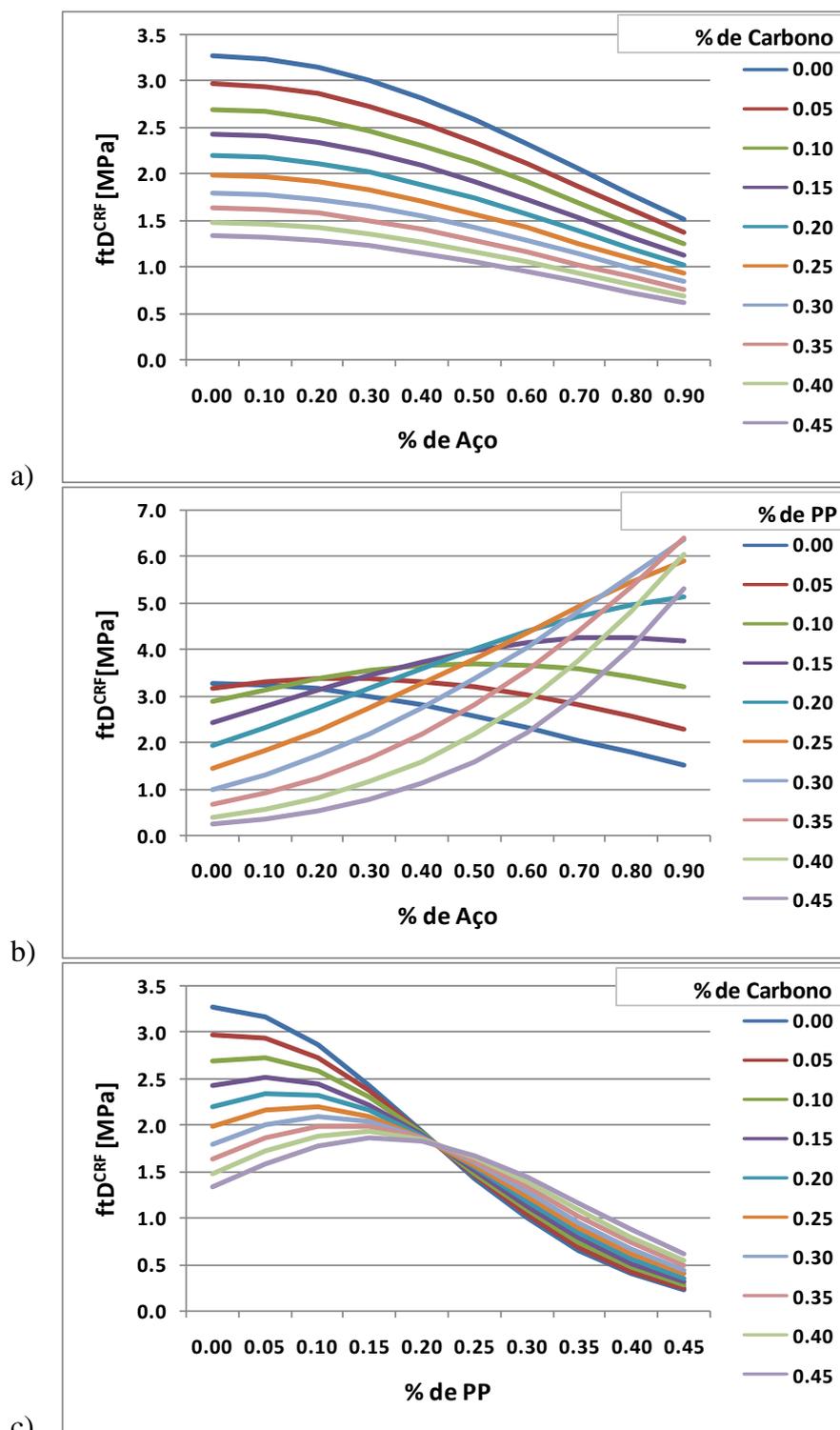


Figura 7.5 – Resistência à tração por compressão diametral – f_{tD}^{CRF} – para combinações binárias de fibras:

a) Aço+Carbono; b) Aço+Polipropileno; c) Polipropileno+Carbono.

Para avaliar, novamente, a habilidade do modelo teórico em prever o comportamento do concreto reforçado com fibras de aço, polipropileno e carbono, frente ao ensaio de tração

por compressão diametral, fez-se a comparação entre os resultados experimentais e os teóricos para as amostras, conforme apresentado na figura 7.6.

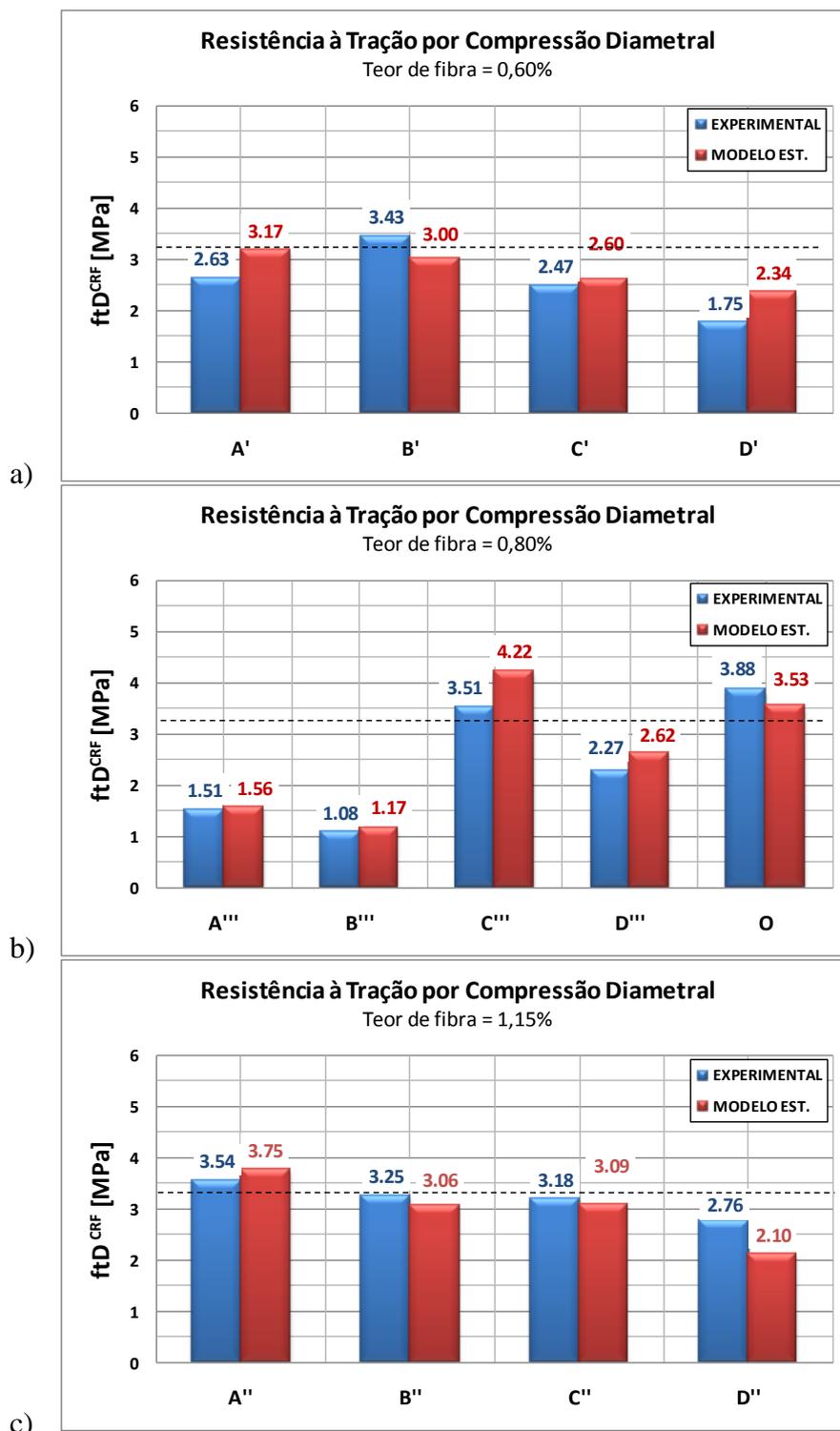


Figura 7.6 – Resistência à tração por compressão diametral – f_{tD}^{CRF} – para combinações terciárias de fibras – comparação entre valores obtidos com o modelo proposto e dados experimentais.

a) Teor de fibras = 0,6% - b) Teor de fibras = 0,8% - c) Teor de fibras = 1,15%.

Ao apresentar as curvas das figuras 7.5 e 7.6, a intenção é observar as tendências demonstradas pelos resultados dos ensaios, bem como os valores gerados com o modelo proposto.

Como se pode notar, as tendências observadas no ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral, manifestaram-se igualmente àquelas obtidas para os ensaios de determinação de resistência à compressão axial, mas para amplitudes menores, conforme esperado. Sabe-se, ainda, que no ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral, as regiões do cilindro submetidas à tração ao longo do diâmetro também são submetidas a tensões de compressão, fazendo com que as deformações nesta zona sejam resultantes da combinação das tensões de tração e de compressão atuantes. Com base nos resultados acima apresentados, constata-se que a carga de ruptura verificada no ensaio de compressão diametral pode ser definida pelo comportamento do material em uma região comprimida ou que não necessariamente possui tração atuante ao longo do diâmetro do cilindro, o que afeta a máxima carga registrada no ensaio necessária para a determinação do parâmetro de resistência à tração.

7.3. MODELAGEM DOS DADOS DE FATOR DE TENACIDADE E RESISTÊNCIA À FLEXÃO EQUIVALENTE

7.3.1. Teste de flexão – 04 pontos – *Japan Society of Civil Engineers – JSCE – SF4, 1984*

O ensaio de determinação da resistência à tração indireta à flexão tem assumido uma posição de destaque, tornando-se o mais difundido devido à sua relativa facilidade de execução, além de apresentar a maioria das situações práticas, em que as peças são, predominantemente, solicitadas aos momentos fletores.

A aplicabilidade deste procedimento é justificada, inclusive, devido ao maior grau de hiperestaticidade interna do mesmo, que coloca em ênfase a propriedade dúctil ocasionada pela presença das fibras, contribuindo para o reforço da matriz, que por sua vez tem características de material frágil. Essa concepção de análise se torna muito mais representativa do que no ensaio de tração por compressão diametral.

A partir dos dados experimentais decorrentes do ensaio de flexão, segundo as recomendações da JSCE-SF4, tem-se a análise em termos de dois parâmetros principais: um deles referente à carga máxima (resistência máxima à tração na flexão ou na primeira fissura) e outro destinado a avaliar o fator de tenacidade do material compósito na flexão.

7.3.1.1. Carga máxima - $f_{m\acute{a}x}$ - e resistência à flexão na primeira fissuração - $\sigma_{m\acute{a}x}^{CRF}$

Inicialmente, é pertinente mencionar que esse importante parâmetro é o ponto da primeira fissuração, a partir do qual as fibras começam a dar sua própria contribuição. Sabe-se, ainda, que a formação da primeira fissura está associada, na maioria dos casos, à perda de linearidade da curva carga x deslocamento.

Baseando-se nesta consideração para extrair os valores de $f_{m\acute{a}x}$ e tratamento estatístico dos dados de laboratório, o modelo de regressão para descrever a relação entre $\log(FM/28,01)$ e as variáveis independentes é definida pela equação ajustada como sendo:

$$\log\left(\frac{FM}{28,01}\right) = 0,758.A - 1,254.P - 1,843.A^2 - 9,497.P^2 - 1,566.A.C + 9,974.A.P + 5,783.C.P$$

Onde:

FM – carga máxima na primeira fissura do CRF ($f_{m\acute{a}x}$), em kN;

A – teor de fibra de aço adicionado à mistura, em %;

C – teor de fibra de carbono adicionado à mistura, em %;

P – teor de fibra de polipropileno adicionado à mistura, em %.

Como resultado do tratamento estatístico dos dados experimentais, tem-se que, na medida em que a probabilidade de significância é expressa pelo valor-p menor que 0,01, é possível justificar uma relação significativa entre as variáveis para a $f_{m\acute{a}x}$, em um nível de confiança de 99%.

O parâmetro estatístico R^2 indica que o modelo justifica 87,7838% de variabilidade em $\log(FM/28,01)$ e o ajustado, que é mais adequado para a comparação de modelos com diferentes variáveis independentes, foi de 86,0387%. No que se refere aos resíduos, não há qualquer autocorrelação grave entre si, uma vez que o desvio padrão da estimativa obtido aponta para um valor de 0,117493 e erro médio de 0,0898478.

Da mesma maneira que foi investigada nos casos anteriores, ao verificar a possibilidade de o modelo ser simplificado, foi observado que o maior valor para parâmetro *valor-p* sobre as

variáveis foi de 0,0091, pertencente ao teor de polipropileno, inferior ao limite de 0,01. Diante disto, optou-se por manter todas as variáveis no modelo proposto.

Recomenda a JSCE-SF4 calcular a resistência máxima à tração na flexão na primeira fissura pela expressão a seguir, em que se multiplica o valor de $f_{m\acute{a}x}$ à constante geométrica (L/bh^2):

$$\sigma_{m\acute{a}x}^{CRF} = f_{m\acute{a}x} \cdot \frac{L}{b \cdot h^2}$$

Onde:

$\sigma_{m\acute{a}x}^{CRF}$ – resistência à flexão na primeira fissuração do CRF;

$f_{m\acute{a}x}$ – força máxima ou na primeira fissura;

L , b e h – vão, largura e altura da viga prismática;

A figura 7.7 contempla a variação de resistência à flexão na primeira fissura quando se aplica o efeito causado pela mudança de uma única fibra no modelo. A partir da imagem, é possível notar a eficiência no processo de reforço resultante da contribuição da fibra metálica que, por sua vez, possui módulo elevado e dimensões maiores. Os patamares de valores superiores, mesmo para teores elevados desta macrofibra, são uma ênfase da real contribuição no reforço. A fibra de carbono, que também possui um módulo maior que a matriz, não influenciou nesta propriedade, conforme apresentado na imagem mencionada. Suas mínimas dimensões, associadas à incompatibilidade dimensional com os agregados e demais partículas, bem como a reduzida aderência com a matriz, devem ter contribuído para a ineficiência do reforço.

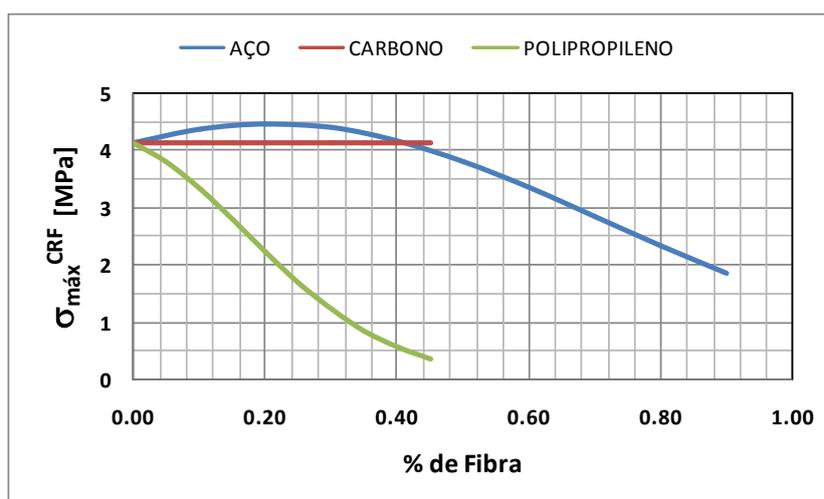


Figura 7.7 – Resistência à flexão na primeira fissura – $\sigma_{m\acute{a}x}^{CRF}$ - ação isolada da fibra. Similar ao fenômeno causado nas propriedades mecânicas investigadas nos itens anteriores, a fibra de polipropileno – fibra de baixo módulo – causou uma brusca redução na capacidade

resistente do compósito. É sabido que, no estado fresco, a nucleação das microfissuras é reduzida com a presença destas fibras de baixo módulo, como é o caso do polipropileno. Entretanto, com o avanço da idade, aparecem novas fissuras na matriz no estado endurecido e, assim, será necessária a combinação com fibras de alto módulo para contribuir com o reforço, uma vez que o aumento do teor de fibras de polipropileno não se mostrou como a solução recomendada, pois prejudica a resistência do compósito.

Neste sentido, quando o interesse é avaliar o desempenho do compósito frente à interação entre duas fibras, têm-se as curvas apresentadas na figura 7.8, as quais são respostas obtidas na medida em que as combinações são lançadas no modelo proposto.

Na figura 7.8a, é possível observar a variação da $\sigma_{\text{máx}}^{\text{CRF}}$ em que o reforço é definido pela combinação de duas fibras de alto módulo – macrofibra de aço e microfibras de carbono. O aumento da quantidade de fibra de carbono pouco interferiu na resistência do compósito, sendo o aço o principal responsável pela resistência à flexão. Obviamente, a inserção de elevados teores desta fibra causa uma redução significativa desta propriedade.

Em seguida, a figura 7.8b ilustra o comportamento do concreto reforçado com duas fibras bem distintas em termos de rigidez – fibras rígidas de aço e fibras flexíveis de polipropileno. Esta combinação provocou uma influência mútua interessante, uma vez que as curvas deste modelo possuem tendências ao ganho de resistência, principalmente quando a fração de fibras metálicas é cuidadosamente acumulada, à medida que a quantidade das fibras de polipropileno também aumenta. É importante destacar que o acréscimo na inserção de fibra de polipropileno é prejudicial ao desempenho do compósito, devendo essa combinação binária aço+polipropileno ser empregada com cautela.

A figura 7.8c considera a mistura de duas fibras com dimensões reduzidas, sendo uma de alto módulo (carbono) e outra de baixo módulo (polipropileno). Facilmente, percebe-se que a quantidade de filamentos de fibra de polipropileno possui uma significância importante, pois afeta negativamente as características do material final, sobretudo quando inserida em grande quantidade. Além disso, interessante notar que há um discreto efeito de mudança de comportamento referente à mistura com as fibras curtas de carbono. Provavelmente, fatores como a adoção da baixa resistência nominal e composição da matriz, a dificuldade relacionada à homogeneidade no processo de dispersão destes filamentos no estado fresco, bem como o aspecto geométrico adotado e a quantidade estabelecida para a fibra de carbono justificam tal efeito.

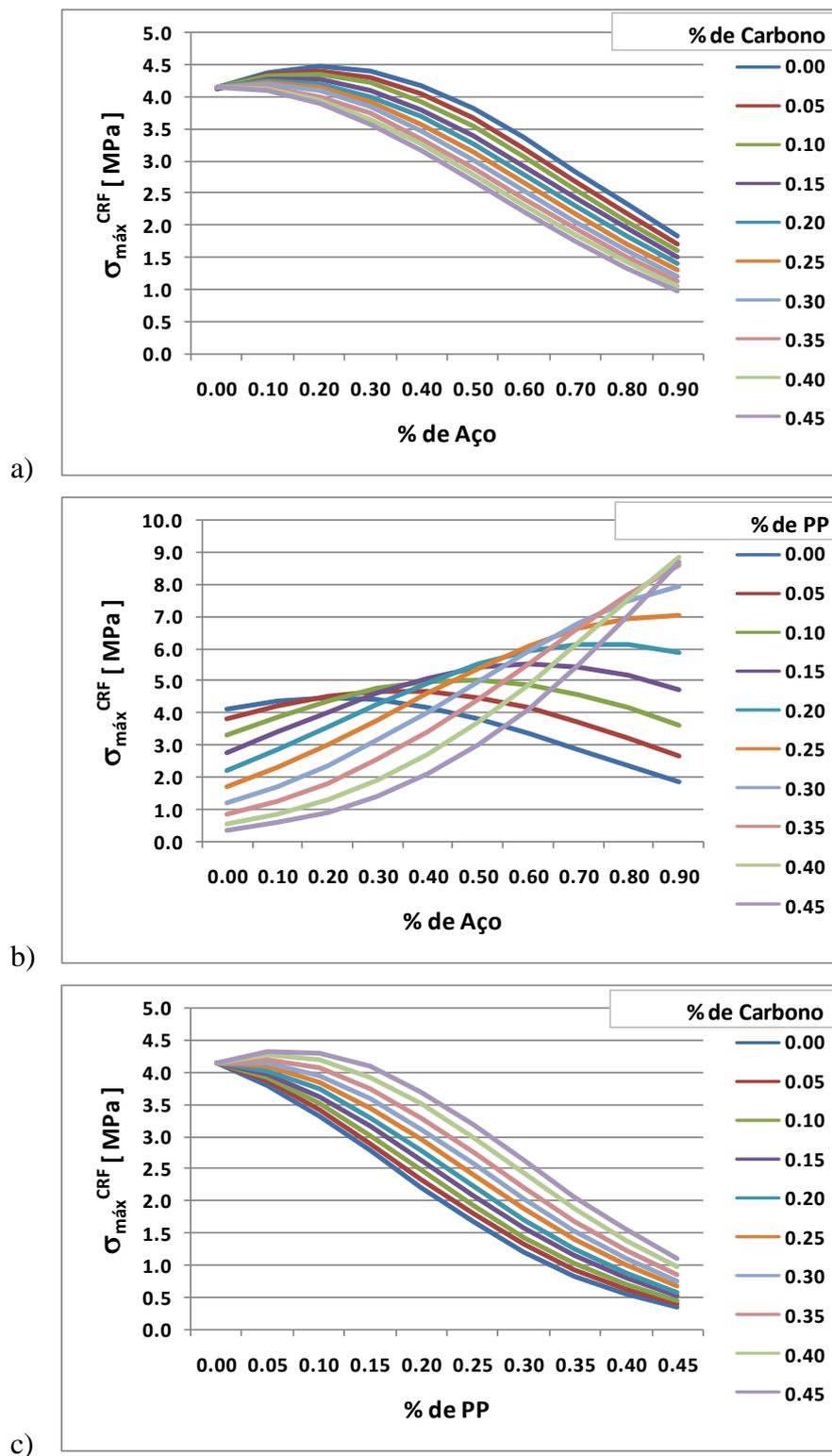


Figura 7.8 – Resistência à flexão na primeira fissura – $\sigma_{\text{máx}}^{\text{CRF}}$ para combinações binárias de fibras:
a) Aço+Carbono; b) Aço+Polipropileno; c) Polipropileno+Carbono.

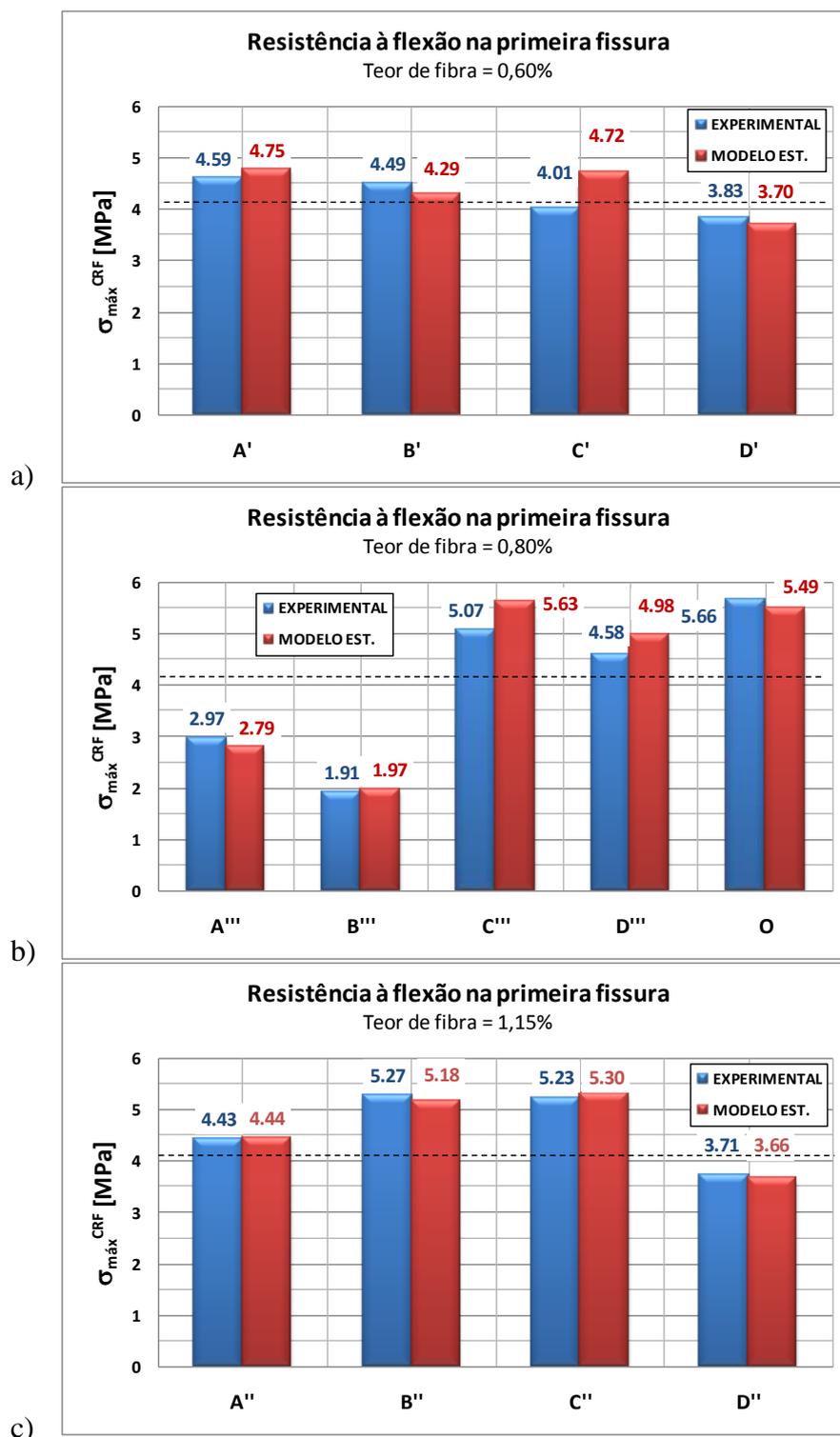


Figura 7.9 – Resistência à flexão na primeira – $\sigma_{\text{máx}}^{\text{CRF}}$ – para combinações terciárias de fibras – comparação entre valores obtidos com o modelo proposto e dados experimentais.

a) Teor de fibras = 0,6% - b) Teor de fibras = 0,8% - c) Teor de fibras = 1,15%.

As resistências à flexão dos compósitos obtidas, experimentalmente, para cada uma das misturas confeccionadas podem ser vistas na figura 7.9 acima, definidas pelas colunas da esquerda. Em consideração à aplicabilidade do modelo proposto, na tentativa de reproduzir

os valores encontrados nos testes, os resultados provenientes da equação que expressam a propriedade $\sigma_{m\acute{a}x}^{CRF}$, são graficados nesta mesma ilustração.

A comparação entre as resistências calculadas para os dados experimentais e os resultados do modelo proposto para os diferentes tipos de combinações terciárias de fibras que foram adotadas, indica que a expressão sugerida para prever o comportamento é capaz de reproduzir a influência das fibras na resistência à flexão na primeira fissura, com um significativo grau de confiabilidade.

Sendo assim, do mesmo modo que foi indicado anteriormente ao analisar o comportamento do material compósito submetido às demais solicitações, as fibras de aço apresentaram uma maior influência na resistência. A manutenção ou acréscimo na resistência à flexão na primeira fissura para as misturas ensaiadas estão ligadas, particularmente, não somente ao volume de fibras de aço que foi empregado, mas também à combinação ideal com as fibras sintéticas de polipropileno. As misturas D' (ver figura 7.9a), B''' (ver figura 7.9b) e D'' (ver figura 7.9c) são aquelas que, dentro de cada teor total de fibras, possuem a menor fração de fibras de aço na combinação. É importante mencionar que o ponto referente à mistura A''' (figura 7.9b), o teor total de fibra usado é de 0,80% com relação ao volume de concreto. No entanto, não há a participação da fibra de polipropileno na hibridização.

7.3.1.2. Fator de tenacidade ou resistência à flexão equivalente - F_T .

Como apresentado no capítulo anterior, para caracterizar o fator de tenacidade ou tensão de resistência à flexão faz-se necessário traçar os diagramas de carga \times deslocamento, as quais refletem o efeito das fibras na rigidez do compósito e no potencial controle das fissuras. Salienta-se, por isso, a importância de obter a curva do material, pois há uma relação com a captura do comportamento pós-fissuração, o que não foi considerado nas propriedades mecânicas apresentadas no início deste capítulo.

Após a primeira nucleação das primeiras microfissuras, assume-se que as fibras são interceptadas pelo plano de ruptura e, neste caso, a geometria do filamento, bem como o atrito característico da zona de interface existente entre fibra e matriz estão associados não somente com um aumento na eficiência do reforço, mas também com o controle da propagação das fissuras e, conseqüentemente, na mudança do modo de ruptura (fissura discreta e bem definida ou distribuição uniforme de microfissuras). É preferível, nesta ocasião, que a energia consumida para romper a fibra seja muito maior que a energia gerada durante o escorregamento entre a fibra e matriz.

Baseado neste fenômeno, as fibras de alto módulo (aço e carbono) possuíram a tendência de escorregar quando solicitada, enquanto que as sintéticas de polipropileno (baixo módulo) se partiram no processo de ruptura do compósito. A consequência desses efeitos pode ser observada a partir das análises feitas a seguir.

Como resultante do tratamento dos resultados, a partir do ajuste de um modelo de regressão múltipla linear para descrever a relação $\log(Tb/18,88)$ e as variáveis independentes, tem-se a equação do modelo como sendo:

$$\log\left(\frac{Tb}{18,88}\right) = 5,235.A + 2,139.P - 5,796.A^2 - 15,118.P^2 - 1,932.A.C + 9,293.A.P + 6,377.C.P$$

Onde:

Tb – área sob a curva até o deslocamento equivalente de L/150;

A – teor de fibra de aço adicionado à mistura, em %;

C – teor de fibra de carbono adicionado à mistura, em %;

P – teor de fibra de polipropileno adicionado à mistura, em %.

Como resultado do tratamento estatístico dos dados experimentais, tem-se que, na medida em que a probabilidade de significância é expressa pelo valor-p menor que 0,01, é possível justificar uma relação significativa entre as variáveis para a Tb , em um nível de confiança de 99%.

O parâmetro estatístico R^2 indica que o modelo justifica 99,0359% de variabilidade em $\log(Tb/18,88)$ e o ajustado, que é mais adequado para a comparação de modelos com diferentes variáveis independentes, foi de 98,8876%. No que diz respeito aos resíduos, não há qualquer autocorrelação importante entre si, uma vez que o desvio padrão da estimativa obtido aponta para um valor de 0,145955 e erro médio de 0,109659.

Da mesma maneira que foi investigada nos casos anteriores, ao verificar a possibilidade do modelo ser simplificado, foi observado que o maior valor para parâmetro *valor-p* sobre as variáveis foi de 0,0025, pertencente ao termo do produto *aço x carbono*, inferior ao limite de 0,01. Decidiu-se, desta forma, manter todas as variáveis no modelo proposto.

De posse da expressão para a área total sob a curva (Tb), deslocamento no centro do vão da viga, função dos dados de da geometria do corpo de prova adotado (viga prismática), o fator de tenacidade (FT) teórico, ou também denominado de resistência à flexão equivalente, para as possíveis combinações de fibras podem ser visualizados a partir das figuras 7.10, 7.11 e 7.12, a seguir.

Ao analisar o modelo sugerido para cálculo de FT, percebe-se que não há a parcela referente à contribuição simples da fibra de carbono na expressão, sem interagir com as demais. Como resultado, é possível notar, na figura 7.10, na qual são avaliados os efeitos das fibras atuando isoladamente como reforço, a reta constante destinada a quantificar o fator de tenacidade do CRF referente à variação do teor de carbono. Esse fato foi identificado para análise da resistência na primeira fissura. Assume-se, neste caso, em que o interesse é interpretar a eficiência do reforço no regime de pós-fissuração e que o elemento ensaiado está submetido ao esforço de flexão, que as propriedades das fibras de carbono, em termo de aspecto geométrico e/ou baixos teores que foram estabelecidos na metodologia proposta, são incompatíveis com as características da matriz, na medida em que se pretende avaliar o acréscimo de energia que precisa ser consumida para romper o compósito.

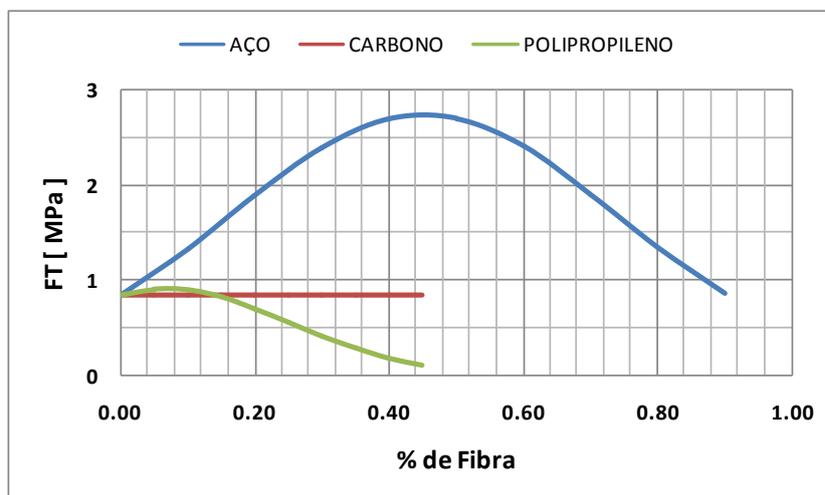


Figura 7.10 – Fator de tenacidade – FT - ação isolada da fibra.

A resistência à flexão do CRF com baixos volumes de fibra de polipropileno ($< 0,20\%$) se mantém, praticamente, constante. Porém, quando o teor desta fibra sintética se eleva, a resistência da matriz tende a ser seriamente comprometida – ver figura 7.10.

Ainda avaliando a figura 7.10, é possível constatar a evidente eficiência da macrofibra de aço, comparada às fibras sintéticas, se mostrando mais eficaz para o reforço do material. Concentrações de fibras metálicas em torno de 0,5% geraram compósitos que necessitam uma maior energia total absorvida para completar a separação das peças.

A influência da hibridização binária de fibras no comportamento teórico do CRF pode ser visualizada nas imagens da figura 7.11.

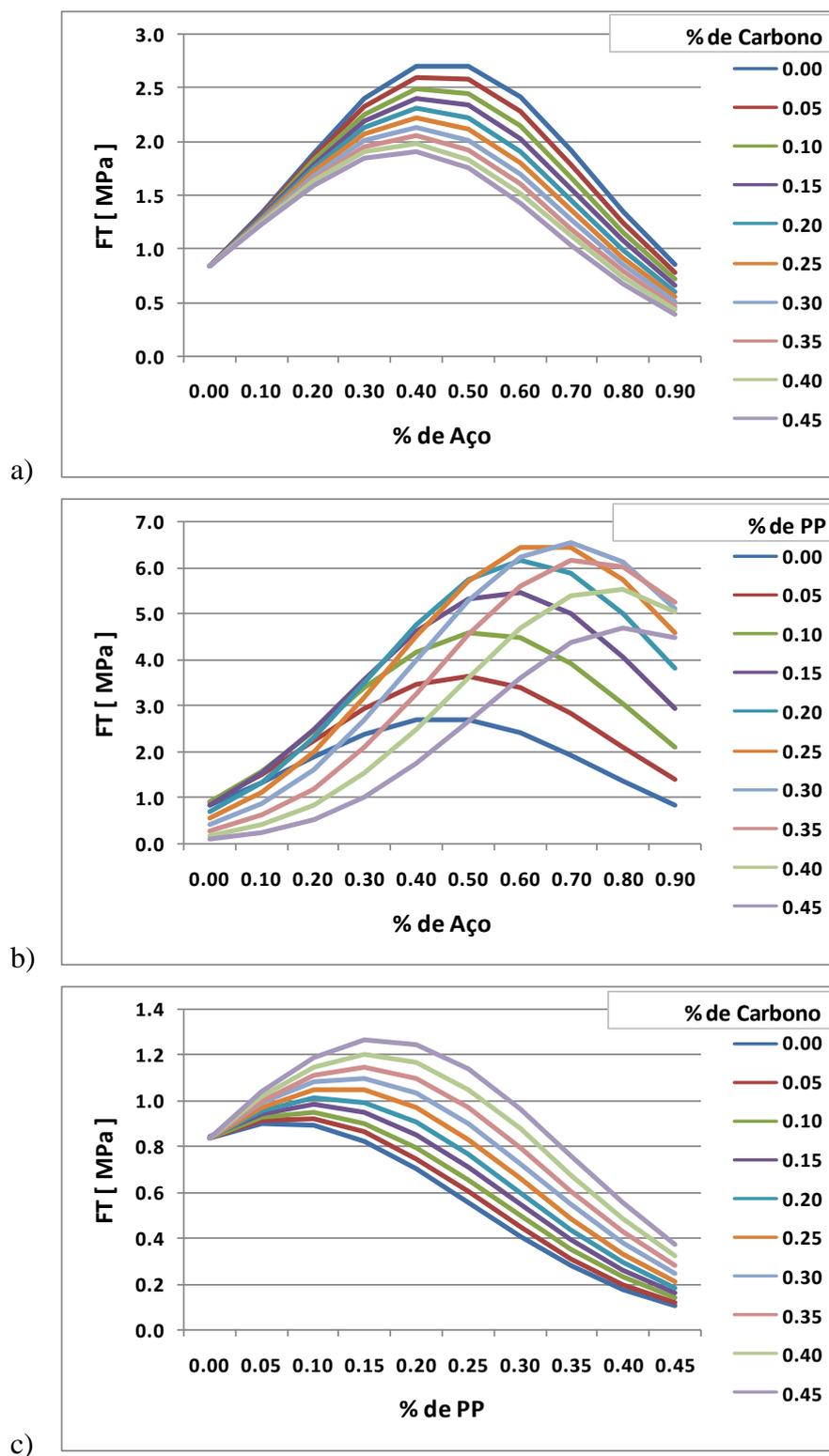


Figura 7.11 – Fator de Tenacidade – FT para combinações binárias de fibras:
 a) Aço+Carbono; b) Aço+Polipropileno; c) Polipropileno+Carbono.

Quando comparados com os valores com a resposta do concreto não reforçado, a combinação binária apresenta bons resultados na resistência à flexão após a primeira fissura, principalmente quando as fibras metálicas são unidas às fibras de polipropileno, conforme a

figura 7.11b. Este resultado está de acordo com a tendência observada nas outras propriedades mecânicas apresentadas nos itens iniciais deste capítulo, devendo ser enfatizado que a resistência à flexão é melhor quando a combinação é definida por, aproximadamente, 3/4 de aço e 1/4 de polipropileno.

Mais uma vez, o efeito significativo das fibras metálicas na resistência à flexão se mantém pertinente e deve-se, provavelmente, ao fato de estas fibras inibirem a evolução das fissuras que ocorrem na flexão, resultando no acréscimo de resistência, principalmente na fase de pós-pico.

Por outro lado, as fibras sintéticas provocaram um efeito baixo na resistência à flexão. As fibras de polipropileno e carbono não contribuíram para a ductilidade do material. Após o surgimento das primeiras fissuras essas fibras não garantem o controle da fissuração, da mesma forma quando há fibra metálica na mistura. Nesta pesquisa, as fibras sintéticas usadas não possuem dispositivos de ancoragem em suas extremidades, superfícies deformadas ou aparência rugosa para avaliar uma boa ancoragem com a matriz. Possivelmente, essas evidências devem colaborar com a ineficácia deste tipo de reforço binário – ver figura 7.11c.

Por fim, conforme sugerido nas seções anteriores deste capítulo, sobre a interação estabelecida entre as fibras de aço e carbono, as quais possuem módulo maior que o da matriz, a microfibras de carbono pouco influencia na resposta do material. A característica dúctil deste compósito é, predominantemente, definida pela quantidade de fibra metálica (ver figura 7.11a).

A figura 7.12 mostra os resultados experimentais de resistência à flexão para todas as misturas definidas no programa experimental, comparando-os aos valores obtidos através do emprego do modelo teórico, com a finalidade de comprovar a sua aplicabilidade em reproduzir o desempenho das misturas com hibridização das três fibras.

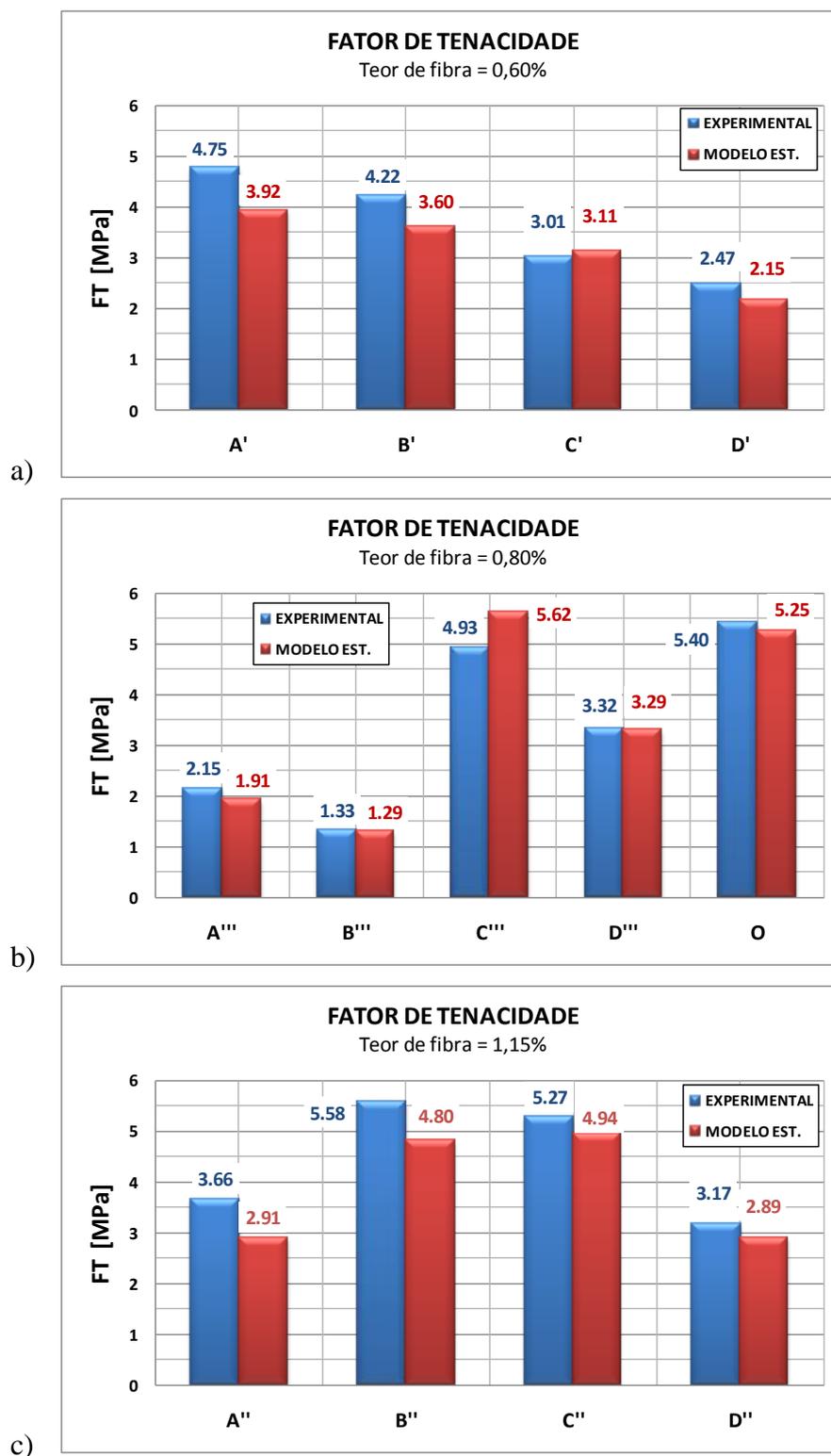


Figura 7.12 – Fator de Tenacidade – FT – para combinações terciárias de fibras – comparação entre valores obtidos com o modelo proposto e dados experimentais.

a) a) Teor de fibras = 0,6% - b) Teor de fibras = 0,8% - c) Teor de fibras = 1,15%.

Obviamente, houve uma importante variação na resistência à flexão para as misturas. Em alguns casos, proporcionando o aumento da resistência à tração, com destaque para as

misturas definidas pelas siglas A' e B' (para teor total de 0,60%); C''' e O (para teor total de 0,80%); e B'' e C'' (para teor total de 1,15%). Nestes casos, a hibridização de frações de fibra de aço com maior combinação de fibras de polipropileno tende a ser um reforço com tendências ao acréscimo de tenacidade. Este fenômeno ocorreu ao longo da resistência à compressão, tração por compressão diametral e na obtenção da resistência à flexão na primeira fissura. No caso particular da flexão, tal fato pode ser causado, parcialmente, devido ao aumento substancial no número destas fibras de alto módulo e maiores dimensões atravessando a seção de ruptura.

7.3.2. Teste de flexão (flexão em 03 pontos) - RILEM TC 162 – TDF

Para avaliar a possibilidade de reprodução dos resultados para resistência à flexão do CRF, utilizou-se o método proposto pela RILEM TC 162 – TDF, comparando os resultados obtidos com aqueles que foram encontrados com a metodologia da JSCE SF4, uma vez que seus procedimentos são baseados na fase de pós-fissuração.

Um ponto que merece ser salientado, conforme visto na metodologia já apresentada, está associado às diferenças entre os procedimentos e recomendações especificadas pelas referidas normas. Apesar de o corpo de prova usado para ambos procedimentos possuir as mesmas dimensões principais, os prismas empregados para os testes da RILEM TC 162 TDF têm um entalhe na face inferior central do vão e a flexão é imposta a partir de uma configuração de carga em três pontos. Neste último caso, a altura útil resistente da viga é reduzida e, por esse motivo, a carga máxima na primeira fissura para os elementos testados será menor quando confrontada com a carga correspondente obtida pela norma japonesa. No entanto, esse fator não interfere na resistência à flexão equivalente do compósito.

Adicionalmente, esta etapa da pesquisa permitiu não apenas obter a resistência à flexão do compósito, mas também validar o emprego do *clip gauge*, dispositivo desenvolvido para capturar a evolução da abertura normal na extremidade do entalhe à medida que a carga era incrementalmente aplicada sobre a viga. A precisão como os deslocamentos foram medidos por esse transdutor permitiu gerar os gráficos já apresentados no capítulo anterior e, conseqüentemente, as curvas carga x deslocamentos que serviram de base para a adequada aquisição da resistência equivalente para as misturas definidas.

A partir da análise das figuras listadas ao longo deste capítulo, é possível compreender melhor as observações acima mencionadas.

7.3.2.1. Força máxima – $f_{máx}$ – e Resistência à flexão equivalente- f_{eq} .

Como esperado, as forças máximas obtidas no processo de ruptura definido pelo procedimento de ensaio da norma RILEM TC 162 TDF foram menores, devido à presença do entalhe no centro vão das vigas que obedecem a este método.

De modo geral, as formas dos gráficos são bem similares, com as mesmas variações na máxima força e combinações de fibras, o que reforça a aplicabilidade de ambos procedimentos normativos em destaque. Vale ressaltar que os ensaios foram realizados em etapas distintas e os instrumentos empregados foram calibrados em momentos diferentes.

Nas figuras 7.13a, 7.13b e 7.13c nota-se a proximidade com os valores das forças máximas decorrentes dos testes realizados com os testemunhos, os quais não tinham fibras reforçando a matriz. De fato, essa propriedade é mais fortemente influenciada pela capacidade da matriz, ou seja, as fibras que, por ventura, estejam presentes na mistura atuam mais pertinentemente após o aparecimento das fissuras. O comportamento com aspecto frágil dominante da matriz define essa resistência inicial.

Naturalmente, sob cargas moderadas, inferiores à de ruptura do concreto simples, o comportamento do material é tal que não se produz fissuras no corpo de prova durante o ensaio de flexão, independente da presença ou da qualidade de fibras.

Neste sentido, quando o teor total de fibra incorporado ao compósito não compromete as propriedades do material, impedindo que haja uma boa homogeneidade do concreto, causando dificuldades na mistura ou prejudicando a sua produção, essa similaridade das forças máximas do CRF com a referência é facilmente identificada.

Por outro lado, sabe-se que o conjunto de fatores, a exemplo do excesso de reforço associado à combinação inadequada dos tipos de fibras ou incompatibilidade existente entre os filamentos e demais componentes do compósito podem abater a resistência final do material. A combinação de todos esses aspectos e a ultrapassagem destes limites foram prejudiciais e, desta maneira, podem ter acontecido no processo de produção das misturas D' (teor de fibra de 0,60% - figura 7.13a), B'' (teor de fibra de 0,80% - - figura 7.13c) e D'' (teor de fibra de 1,15% - figura 7.13c).

Fazendo uma relação com o modelo experimental sugerido para caracterizar a resistência à flexão para a primeira fissura do CRF proposto no item anterior, pode-se afirmar que o mesmo possui uma significativa aplicabilidade, uma vez que é função da $f_{m\acute{a}x}$.

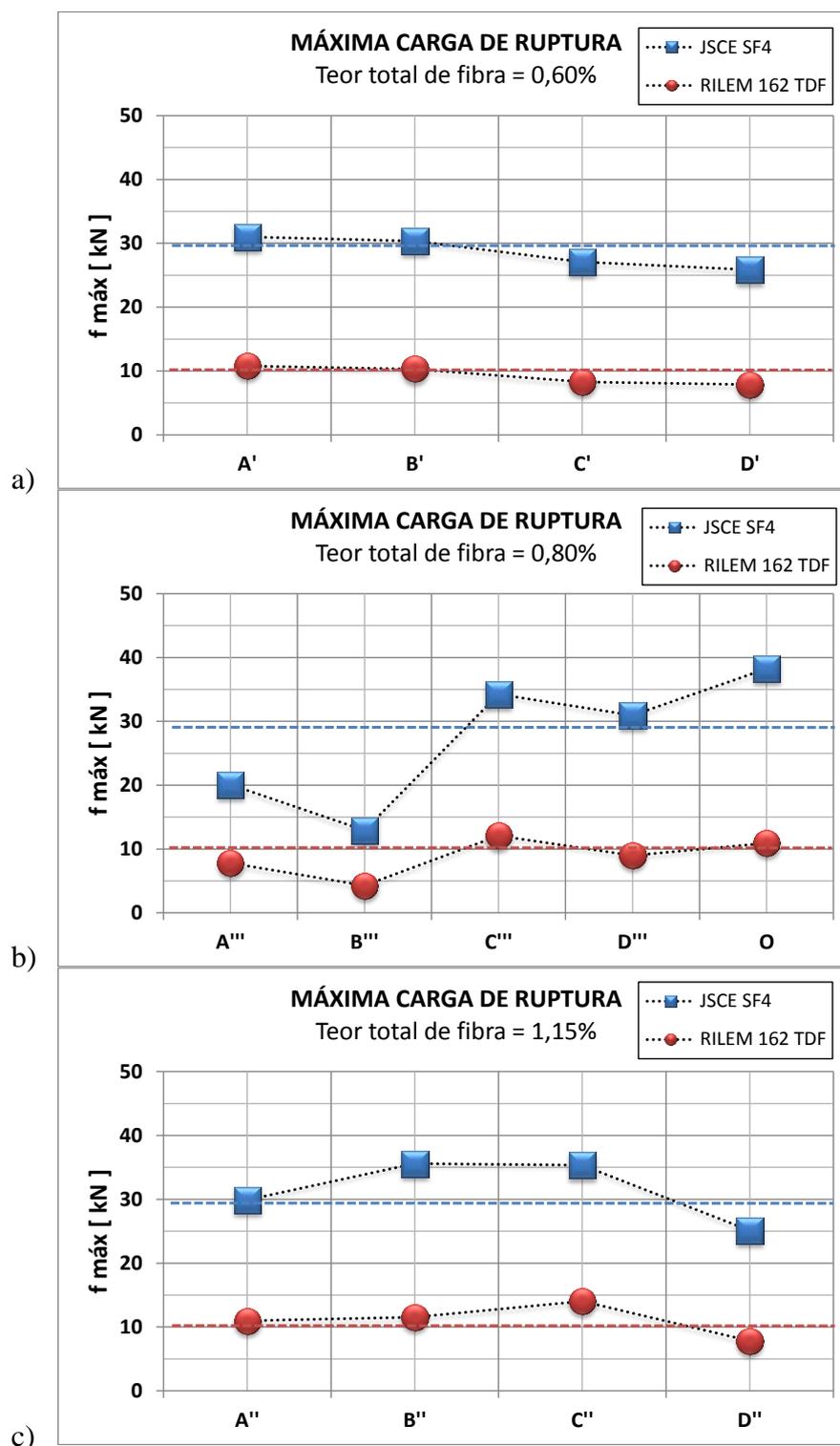


Figura 7.13 – Máxima carga de ruptura – $f_{m\acute{a}x}$ – para as misturas ensaiadas. Comparação entre os resultados obtidos a partir da RILEM TC 162 TDF e JSCE SF4. a) Teor de fibras = 0,6% - b) Teor de fibras = 0,8% - c) Teor de fibras = 1,15%.

A figura 7.14 a seguir, mostra os valores das resistências à flexão equivalentes calculadas a partir da aplicação das especificações recomendadas pela RILEM TC 162 TDF.

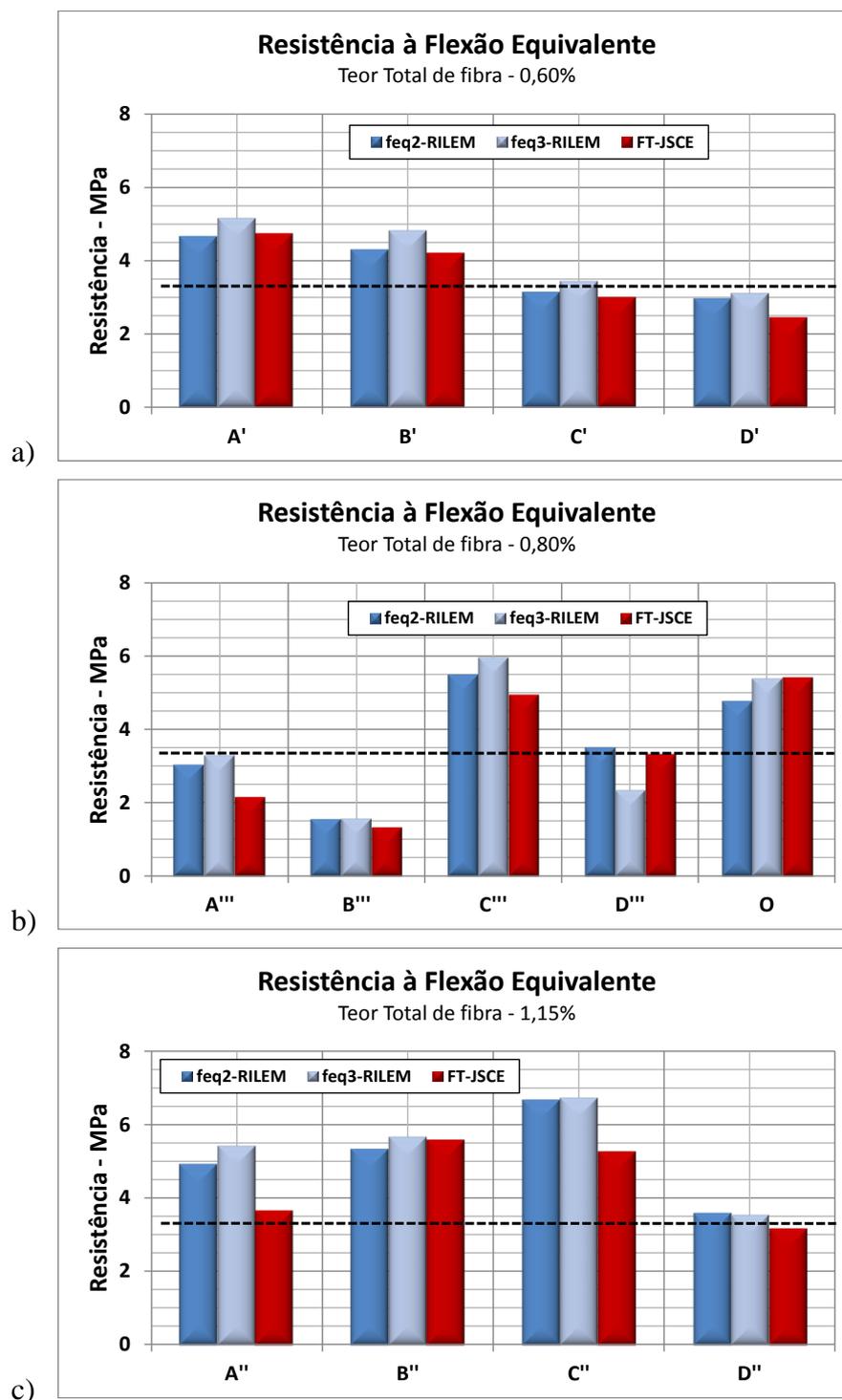


Figura 7.14 – resistência à flexão equivalente para as misturas ensaiadas. Comparação entre os resultados obtidos a partir da JSCE SF4 e da RILEM TC 162 TDF.
a) Teor de fibras = 0,6% - b) Teor de fibras = 0,8% - c) Teor de fibras = 1,15%.

É possível notar que, além de comparar os resultados de f_{eq} (RILEM TC 162 –TDF) com os resultados avaliados com as formulações da JSCE SF4, a figura 7.14 vem colaborar para a aplicabilidade do modelo proposto para a obtenção da resistência à flexão apresentada no item anterior, bem como contribuir na quantificação desta propriedade para as misturas ensaiadas com ambas as metodologias.

A linha tracejada que aparece nas imagens é referente à resistência à flexão de uma viga de concreto simples, sem reforço, recorrendo aos dados de forças máximas no instante da ruptura e às aproximações das formulações da resistência dos materiais (tensões atuantes em vigas fletidas), sem a presença do entalhe, cujo valor se aproxima ao correspondente da resistência à tração por compressão diametral (ensaio brasileiro). Vale salientar que as tensões que surgem no vértice do entalhe (vigas empregadas no ensaio da RILEM) tendem a ser muito elevadas devidas à sua concentração nesta região, de forma que sua determinação implicaria no emprego de relações fundamentais da mecânica da fratura ou emprego de modelos numéricos. Por esse motivo, não são levadas em consideração na definição de referência para a matriz não reforçada.

Diante das considerações acima mencionadas, decidi verificar a influência da hibridização de fibras na resistência à flexão, adotando este como o principal parâmetro em que o reforço de fibra é notado.

Na figura 7.14a, os resultados das resistências à flexão para a aplicação de 0,60% de teor total de fibra são apresentados e as misturas que são definidas como A' e B' se destacam pelo melhor acréscimo neste aspecto. Para o ponto A', por exemplo, as resistências à flexão equivalentes obtidas pela norma da RILEM, f_{eq2} e f_{eq3} , apontam para um aumento de 49% e 65%, respectivamente, com relação ao concreto sem reforço. Com tendência parecida, a resistência à flexão, conforme a JSCE, esse aumento atinge um rendimento de 52%. No caso da mistura nomeada como B', essas relações são, respectivamente, próximos de 38% e 54%, bem como 35%, respectivamente.

Para as misturas com 0,8% de teor total de fibra – ver figura 7.14b – as misturas denominadas de C''' e O, são aquelas que mais se distanciam em termos de resistência à flexão da matriz não reforçada, frente aos dois métodos enfatizados neste item. Perante as especificações da RILEM, o CRF indicado por C''' apresentou um aumento na resistência equivalente f_{eq2} de 75% e da resistência f_{eq3} de 90%. Segundo as orientações da JSCE, a resistência deste mesmo material compósito elevou em 57%. Muito próximo destes patamares (52% de aumento em

f_{eq2} , 72% de acréscimo em f_{eq3} e 72% no parâmetro da norma japonesa), o ponto O possui quantidade e combinações de fibras que fazem desta mistura um compósito com característica distinta.

Quando o teor total de fibras passa a ser de 1,15%, o maior volume de fibras empregado nesta pesquisa, todos os compósitos deste grupo tendem a superar a capacidade portante do compósito de referência, como pode ser notado na figura 7.14c. Embora esse ganho seja perceptível nestas misturas, os valores experimentais de resistências à flexão referentes aos pontos B'' e C'' excedem os efeitos dos demais. Com ênfase, as resistências à flexão destinadas a caracterizar o material chamado de B'' de acordo com as normas adotadas, atingem valores, aproximadamente iguais entre si. As resistências equivalentes f_{eq2} e f_{eq3} para a mistura em questão são, respectivamente, 70% e 81% maiores à resistência do testemunho e o fator de tenacidade calculado para este mesmo ponto sugere uma resistência à flexão que chega a ser 78% maior ao medido para a matriz sem fibras. Contudo, essa similaridade entre os índices derivados das normativas - RILEM TC 162 TDF e JSCE SF4 - não foi encontrada para o ponto C''. Conforme a norma européia, esse ganho foi de, aproximadamente, 114%, enquanto que para a norma japonesa, esse valor foi um pouco menor de 70%.

Retomando a caracterização dos pontos das amostras apresentadas no capítulo 4 – Materiais e Métodos (figura 7.15), é plausível observar a importância das fibras de aço, combinadas às fibras de polipropileno como um ajuste propício ao melhoramento da resistência do compósito.

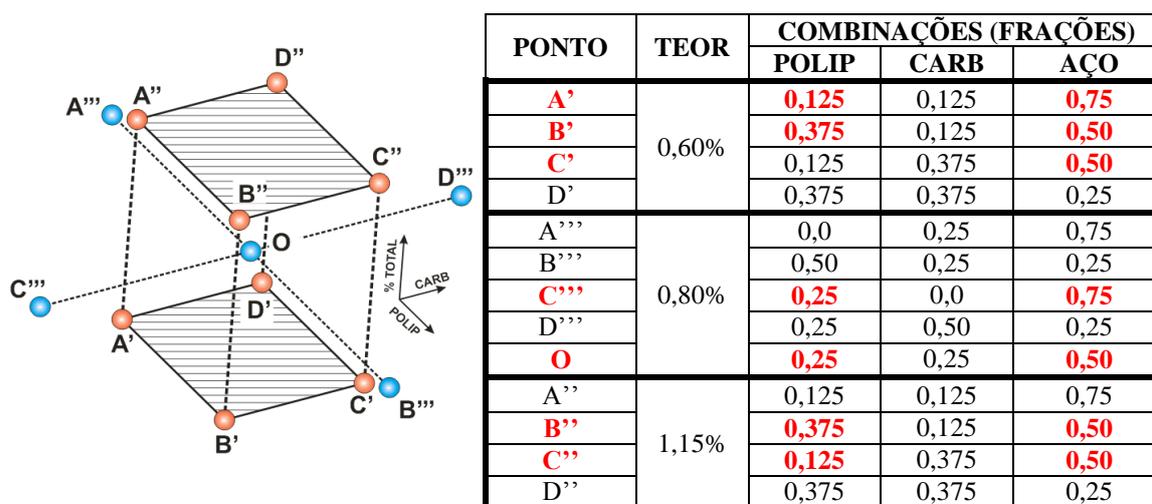


Figura 7.15 - Pontos de experimentos – misturas definidas no programa experimental

Na maioria dos casos acima destacados, as frações referentes às fibras de aço na combinação foram as de maiores valores. No caso do ponto A''', a fração de fibra metálica adotada para a mistura foi de 3/4 dos 0,80% de teor total de fibra, mas a ausência de fibras de polipropileno deve ter, provavelmente, comprometido o seu desempenho. Já para o teor de 1,15%, mistura com frações de 3/4 de fibras de aço e 1/8 de fibras poliméricas, considerado um volume elevado de fibras no concreto – o ponto A'', mostrou que não é a melhor opção de reforço para o concreto investigado.

Sabe-se que o acréscimo de resistência é, fundamentalmente, associado ao consumo de fibras. Além disso, a concentração de fibras desse compósito requer uma maior quantidade de água que, por sua vez, favorece a perda de mobilidade no concreto no estado fresco. Neste caso, a porção de fibras, atuando como um redutor da fluidez do concreto, gera problemas como a segregação das partículas sólidas e exsudação, o que reforça os prejuízos na compactação, durabilidade e desempenho mecânico. Por isso, na medida em que o teor total de fibra é considerado alto, com maior participação de fibras metálicas, maior foi o impacto na resistência à flexão do compósito.

Relacionando as observações destacadas no Capítulo 6, das misturas confeccionadas com a maior concentração de fibras, a consistência do CRF correspondente à amostra A'' (maiores frações de fibra de aço) apresentou visíveis problemas. Por esse motivo, o processo de mistura deste compósito precisou ser reiniciado com a preocupação em adicionar as fibras em intervalos de tempo mais alongados, o que permitiu obter uma mistura ausente de aglomerações de fibras. Mesmo assim, a partir das razões acima mencionadas, fica fácil entender a reduzida performance evidenciada pelos valores experimentais para este caso.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A motivação fundamental do trabalho proposto para esta tese consistia em contribuir para o entendimento dos fenômenos envolvidos no desempenho de concretos com misturas híbridas de fibras. Para tanto se trabalhou com o estudo de compósitos formados por uma matriz de concreto tradicional de moderada resistência (25 MPa) reforçada por combinações de micro (de polipropileno e carbono) e macro fibras (de aço), em diferentes proporções, totalizando 3 teores de fibras em volume (0,6%; 0,8% e 1,15%), correspondendo a matrizes com pouca, média e elevada quantidade de fibras. Nesse item são apresentadas algumas considerações finais, as principais conclusões que podem ser derivadas da análise dos dados coletados e algumas sugestões para trabalhos futuros.

A partir do tratamento dos resultados, e mediante o ajuste de um modelo de regressão

8.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE O TRABALHO E SUAS CONTRIBUIÇÕES

Ao longo do trabalho foi possível coletar informações sobre como a mudança nas proporções e tipos de fibras usadas afetavam as propriedades mecânicas controladas – resistência à compressão, tração e flexão, o que contribui de forma significativa para que se possa entender os efeitos da hibridização de misturas de fibras nestas propriedades.

A escolha de três fibras com diferentes características e dimensões (uma macrofibra de aço e duas microfibras, de polipropileno e carbono, com diferentes valores de módulo) permitiu gerar um conjunto amostral de situações abrangendo variados teores totais e frações de fibra. A partir daí, buscou-se obter modelos estatísticos explicativos do comportamento observado. Algumas observações efetuadas ao longo do estudo merecem destaque, como discutido a seguir.

- a) *Em relação ao efeito de incorporação das fibras na trabalhabilidade*

Apesar de não ser um dos focos principais de interesse do estudo, bastante atenção foi dada à eventual alteração na consistência das misturas (com impactos na trabalhabilidade) em função da incorporação das fibras. Problemas com a trabalhabilidade podem causar perturbações na dispersão das fibras e na homogeneidade da matriz, gerando defeitos que comprometem, seriamente, o desempenho do compósito resultante. Em algumas moldagens iniciais observou-se que algumas misturas tiveram problemas dessa natureza, quando se empregaram teores totais de fibra elevados. Para superar essa dificuldade se trabalhou com a ordem de incorporação de materiais (para garantir uma boa homogeneização, a ordem de adição dos filamentos precisou obedecer a uma sequência na qual as fibras sintéticas eram adicionadas logo após a composição do concreto fresco, sendo introduzidas mais tarde as fibras metálicas) e o uso de superplastificante. Cabe ressaltar que, embora se tenha buscado usar teores baixos, o emprego do aditivo superplastificante acarretou em alguma incorporação de ar, o que impactou a massa específica e pode ter tido efeito no desempenho de algumas misturas. Dado que o uso do aditivo foi considerado necessário para viabilizar essas misturas, considerou-se que não seria natural incorporar esse efeito na análise comparativa do desempenho das mesmas. Deve-se registrar, portanto, que o desempenho mecânico das misturas registrado nesse estudo poderia eventualmente ser melhorado se fosse usado um aditivo que causasse menor incorporação de ar.

Com as correções de trabalhabilidade efetuadas se obtiveram, para todos os teores de fibras testados, misturas adequadamente trabalháveis, não sendo registrada segregação ou formação de aglomerados de fibras nos compósitos resultantes.

b) Em relação ao monitoramento da trabalhabilidade

Como esperado, o monitoramento da trabalhabilidade por meio de ensaios de abatimento do tronco de cone não foi eficaz, sendo que a determinação da consistência das misturas através da medição do espalhamento na Mesa de Graff resultou em dados mais apropriados. Evidentemente, o espalhamento foi menor para as misturas com elevado teor de fibras, porém, mesmo nesses casos, pode-se perceber que as misturas tinham boa homogeneidade e consistência adequada para as operações de lançamento e adensamento nas formas.

De um modo geral, o efeito da adição de microfibras com um considerável volume de fibras de aço não comprometeu a consistência das misturas, sendo, portanto, uma maneira eficaz de reforçar a matriz frágil, em todas as suas fases, sem que as propriedades finais do composto sejam depreciadas.

c) *Em relação aos sistemas de controle de deslocamentos para os ensaios de flexão*

O controle de deslocamentos adotado nos ensaios de flexão, com uso de dispositivos tipo *LVDT* ancorados em dispositivos do tipo *yoke* para medição das translações da linha neutra e com a criação de um sistema de medição especial, tipo *clip gauge*, para controle da abertura na boca do entalhe foi muito exitoso. O sistema tipo *clip gauge*, construído e calibrado ao longo desta pesquisa, teve um excelente desempenho durante os ensaios das vigas submetidas à flexão em três pontos. Recomenda-se seu uso em investigações dessa natureza.

d) *Em relação ao desempenho das fibras carbono*

Em geral, as fibras de carbono usadas nessa pesquisa não se mostraram capazes de colaborar significativamente com o reforço da matriz, nem se mostraram adequadas para complementar a ação das demais fibras (os melhores desempenhos foram obtidos em misturas com pouca ou nenhuma fibra carbono).

Esse desempenho pode estar relacionado a vários fatores, especialmente ligados às características das fibras empregadas, que apresentam propriedades particulares em termos de dimensões, baixa rugosidade superficial, módulo e resistência à tração.

Cabe lembrar que a fibra de carbono utilizada foi obtida a partir do corte de filamentos derivados de tecidos de fibra carbono usados em reforço estrutural. Não era uma fibra comercial nem tinha mecanismos de ancoragem. Conforme destacado ao longo das análises apresentadas, as dimensões dos filamentos de carbono escolhidos, bem como a sua rigidez e textura de superfície não favoreceram ao controle do processo de fissuração ou reforço da matriz. Apesar de possuir um comprimento de 50 mm, o reduzido diâmetro do fio (0,02 μm) não se mostrou eficiente, fazendo com que a área de contato entre a fibra e a matriz fosse muito pequena. Sobrepondo esse aspecto ao fato da rugosidade da superfície da fibra ser muito baixa, bem como às propriedades mecânicas (elevada resistência à tração e alto módulo) quando comparadas às características da matriz de concreto, o arrancamento dos filamentos foi, provavelmente, facilitado e as pontes de transferência de tensões na interface não se mostraram eficientes.

Dessa forma, se considera que os resultados obtidos não devem ser tomados como indicação de que se deve descartar totalmente sua utilidade, mas sim como indicativos que, na forma como foi utilizada, a mesma não se mostra eficiente nem capaz de fazer uso de seu alto módulo para ajudar a reforçar a matriz.

Recomenda-se que sejam feitos estudos complementares, com fibras carbono com outros fatores de forma e comprimentos maiores.

8.2. CONCLUSÕES

A seguir se apresentam as principais conclusões derivadas da análise dos dados coletados ao longo do desenvolvimento do trabalho, de acordo com cada tipo de ensaio empregado.

a) Resistência à compressão

A resistência à compressão foi o primeiro parâmetro a ser analisado e os dados coletados indicaram, como esperado, que não se obtém ganhos significativos nessa propriedade com a inserção de fibras, seja em misturas simples ou híbridas.

As combinações de fibras que melhor contribuíram para o reforço da matriz, apresentando os melhores desempenhos em termos de resistência à compressão axial, foram:

- a. Para o teor total de fibra de 0,60%, a mistura com 50% de fibras de aço, 37,5% de fibra de polipropileno e 12,5% de fibra de carbono obteve-se um acréscimo de, aproximadamente, 10% na resistência, em relação ao testemunho;
- b. Para o teor total de fibra de 0,80%, a mistura com 25% de fibras de polipropileno e 75% de fibras de aço teve um ganho um pouco maior que 19%, em relação ao testemunho;
- c. Finalmente, para os compósitos com teor total de fibra de 1,15%, novamente a mistura com 50% de fibra de aço 37,5% de fibra de polipropileno e 12,5% de fibra de carbono obteve o melhor desempenho, com valores médios em torno de 15% superiores ao testemunho.

Ou seja, os melhores resultados foram obtidos para misturas com elevada participação de fibra de aço (>50%), associada a frações de fibra de polipropileno de, pelo menos, 25%. Para essa faixa, obtiveram-se pequenos ganhos na resistência à compressão, em relação aos testemunhos (o que já é um resultado bastante positivo, quando se recorda que houve incorporação de ar), associado a expressivos ganhos em termos de ductilidade (o que é muito interessante, sob o ponto de vista estrutural). Além disso, próximo à ruptura registrou-se uma tendência para o comportamento de múltipla fissuração, com formação de várias fissuras de

menor dimensão (outra característica positiva, em termos de segurança estrutural e, eventualmente, de durabilidade).

Em suma, apesar de não ocasionar ganhos significativos em termos de resistência à compressão, o uso de misturas híbridas de fibras com proporções adequadas permitiu gerar compósitos com características de desempenho muito interessante para certas aplicações, potencialmente mais seguros, dúteis e duráveis que as matrizes originais.

b) Resistência à tração por compressão diametral

Paralelamente à verificação da resistência à compressão simples foram empregados 2 ensaios para obtenção de estimativas da resistência à tração do concreto: os ensaios de tração por compressão diametral e os de flexão. Nesse item se apresentam os resultados dos ensaios de tração por compressão diametral, realizados de acordo com o procedimento descrito na norma brasileira ABNT:NBR 7222:1994.

Como discutido anteriormente, o uso do ensaio de compressão diametral para o caso de concretos reforçados com fibras é desaconselhado pois, além das matrizes com fibras não apresentarem a ruptura frágil que determina o momento de cálculo da resistência à tração nos concretos simples, o método não leva em consideração o rearranjo na distribuição das tensões após o surgimento das fissuras iniciais da matriz, devido à interação com as fibras. Isto introduz variabilidade nos resultados obtidos com esse método, aumentando a dispersão.

Sabe-se que, em ensaios de tração indireta por compressão diametral, para concretos simples (ausência de fibra), na medida em que a resistência do material é atingida, o colapso do corpo de prova é evidenciado por um plano discreto de ruptura, em que se observa a formação de uma única trinca principal ao longo do diâmetro solicitado, cujo o início se dá nos pontos submetidos à uma deformação máxima, sob os frisos previstos nas recomendações da referida norma. Com o efeito de reforço das fibras (micro, meso e macro) na matriz, há o efeito de formação de microfissuras em diversas regiões do corpo de prova e o enfraquecimento do material compósito é destacado pela distribuição das fissuras, não mais pela concentração das tensões em um único plano preferencial de ruptura. Salienta-se, desta forma, que a expressão da norma destinada à obtenção da resistência à tração por compressão diametral não leva em consideração esse efeito de ramificação das fissuras, o que favorece à variabilidade nos resultados e, por essa razão, o modelo estatístico gerado possui um reduzido coeficiente de correlação.

Apesar desses reconhecidos problemas, decidiu-se incorporar esse ensaio ao programa experimental porque se considera que o mesmo é um ensaio simples, de baixo custo, que mesmo assim pode gerar dados interessantes para a análise de compósitos com fibras. Procurou-se, portanto, demonstrar essa hipótese nesse estudo.

Em geral, analisando os dados, nota-se tendências de comportamento similares às registradas nos ensaios de determinação de resistência à compressão axial. Novamente, as misturas com maior concentração de macrofibras metálicas acabam resultando no melhor desempenho, especialmente quando combinadas com uma certa proporção de microfibras de polipropileno. As melhores misturas foram

- a. Para teor total de fibra de 0,60%, aquela com 50% de aço, 37.5% de polipropileno e 12.5% de carbono, que apresentou um suave acréscimo, de aproximadamente 5 %, em relação ao testemunho;
- b. Para o teor total de fibra de 0,80%, a mistura com 75% de fibra de aço e 25% de fibra de polipropileno, sem fibra carbono, foi novamente a que teve melhor desempenho, com um ganho de resistência à tração indireta de 7%, em relação ao testemunho;
- c. Para o teor total de fibra igual a 1,15%, a mistura com 75% de fibra de aço, 12,5% de fibra de polipropileno e 12.5% de fibra carbono teve o melhor desempenho, com incremento na resistência perto de 8%, em relação ao testemunho.

A única diferença, em relação à resistência à compressão, ocorreu no teor total de fibra de 1.15%, mas a mistura que se destacou também se enquadra, em termos gerais, na faixa de combinações de fibras considerada como a mais apropriada, a partir dos dados desse trabalho.

c) Ensaios de Flexão

A avaliação do comportamento à tração dos compósitos, considerando o estágio referente à pós-fissuração, foi efetuada por meio do uso de ensaios de flexão. Foi utilizado tanto o procedimento da JSCE-SF4, com flexão a quatro pontos em vigas de seção cheia, como o recomendado na RILEM TC 162 TDF, com aplicação da carga em três pontos, em vigas com entalhe central.

Com base nos resultados provenientes dos testes de flexão nos corpos de prova prismáticos reforçou-se a conclusão obtidas nos ensaios anteriores.

As vigas constituídas de compósitos com uma percentagem mais elevada de fibras metálicas (de 50% ou superior), combinadas com frações de polipropileno de 25% ou superiores, novamente resultaram no melhor comportamento superior, para todos os teores totais de fibras avaliados (0,60%, 0,80% e 1,15%).

Notou-se claramente que, com o incremento do teor de fibras, houve um incremento no valor de carga correspondente à formação da primeira fissura. Essa melhoria, em grande parte, está associada à presença de uma elevada quantidade de fibras de aço no plano de ruptura, que restringem movimentos que induzem a propagação e aumento da abertura da fissura.

As melhores respostas foram obtidas para misturas híbridas com maior participação de aço e polipropileno, que resultaram em ganhos na resistência à flexão na primeira fissura, sendo que os ganhos mais expressivos foram obtidos quando se empregaram teores totais de fibra acima de 0,80%.

Nesse sentido, para o menor teor total de fibra empregado (0,60%), o acréscimo de resistência à flexão ficou compreendido num intervalo de 8 a 10%, em relação ao testemunho. Esse ganho chegou a atingir valores acima de 30% em misturas com maior total de fibras, como, por exemplo, no caso da mistura com 0,80% de teor total de fibra e combinação híbrida com 50% de aço, 25% de polipropileno e 25% de carbono.

Foi efetuada, também, a avaliação da tenacidade dos compósitos, a partir do comportamento pós-fissuração. O tratamento dos resultados obtidos mostra claramente o efeito positivo da hibridização de fibras nessa propriedade. Analisando as curvas carga vs deslocamento das misturas ensaiadas fica evidente que, na medida em que a proporção de fibras de aço aumenta, a tenacidade do compósito também aumenta, em todos os casos.

O efeito positivo da presença de maiores quantidades de fibra de aço pode ser associado ao efeito de retardo que essas fibras exercem no processo instável de abertura das fissuras quando a peça está submetida à flexão, resultando numa melhoria no comportamento pós-pico, sobretudo quando há maior quantidade de fibras passando pelo plano de ruptura.

A adição de fibras de polipropileno tem implicação menor no melhoramento do comportamento pós-fissuração, mas sua presença ajuda a melhorar os efeitos das fibras metálicas. Acredita-se que isso ocorre porque a presença de um grande número de fibras sintéticas de pequena dimensão nas extremidades das fibras metálicas pode ajudar a melhorar a ancoragem, ao distribuir esforços e mobilizar maiores porções da matriz. Acabam

por se gerar zonas de ancoragem extremamente reforçadas, o que dificulta o deslizamento ou arrancamento da macrofibra de aço, potencializando seus efeitos.

Isso ajuda a explicar porque, nos casos das amostras com baixa concentração de fibras de aço, ou naquelas misturas nas quais as fibras de aço eram combinadas com mínimas frações de fibras sintéticas, os compósitos apresentaram pouca ductilidade.

Sobre a adição de fibras de carbono, notou-se que as mesmas pouco influenciaram o desempenho dos compósitos no estágio pré-fissuração, e sua presença no estágio pós-pico não resultou em alterações perceptíveis de comportamento.

Em suma, as misturas híbridas de fibras que apresentaram os melhores desempenhos, em termos da resistência à flexão, foram:

- a. Para o teor total de fibra igual a 0,60% (com 3/4 de fibra de aço), os acréscimos de resistência à flexão pelas normas JSCE e RILEM foram de 52% e 65%, respectivamente;
- b. Com relação às mesmas normas, para teor total de fibra igual a 0,80% (com 50% de fibra de aço), os acréscimos de resistência à flexão foram, respectivamente, de 57% e 90%;
- c. Com adição do teor total de fibra igual a 1,15% (com 75% de fibras de aço), esses mesmos indicadores de incrementos de resistência à flexão equivalente foram ainda maiores, pois atingiram as porcentagens de 68% e 115%.

A comparação entre os resultados obtidos usando os diferentes procedimentos de ensaio a flexão indica que, apesar da natureza diferenciada dos ensaios, há forte correspondência entre os valores obtidos a partir de cada um deles, sendo viável, inclusive, estabelecer comparações entre os mesmos.

d) Conclusões Gerais

De forma geral, considera-se que o trabalho foi exitoso e que os objetivos propostos, especificados no capítulo inicial, foram alcançados, permitindo a coleta e análise de dados experimentais que ajudam a esclarecer como a hibridização de misturas pode afetar as propriedades do compósito resultante.

Os resultados obtidos e analisados nesta tese apontam, de modo geral, para o potencial emprego do concreto reforçado com fibras híbridas em estruturas, quando tomados alguns

cuidados ao longo de sua produção, quer seja na escolha ideal das fibras e de suas proporções, ou no processo de confecção, propriamente dito.

Ficou demonstrado que o uso de misturas híbridas de fibras, com combinações de macrofibras e microfibras, é uma alternativa interessante para atingir o melhor desempenho possível do compósito, em termos mecânicos, que merece continuar a ser investigada.

Conforme apontado por diversos pesquisadores no assunto, a análise dos dados coletados nesta investigação constatou que a adição de fibras ocasiona aumentos de resistência mais significativos nos valores de resistência à flexão, e na tenacidade, do que nos valores de resistência à compressão. Mas, mesmo assim, com algumas misturas híbridas adequadamente proporcionadas, foi possível ocasionar ganhos mesmo na resistência à compressão.

De acordo com os dados do trabalho, para as fibras estudadas, combinações contendo teores na ordem de 50% a 75% das fibras metálicas, complementadas com teores na ordem de 25 a 37.5% de fibra de polipropileno, permitem obter os melhores resultados.

A explicação para a concentração de bons resultados nessa faixa possivelmente está baseada no fato de que as fibras de polipropileno, em maior quantidade, se distribuem por toda a matriz, formando uma rede tridimensional que distribui esforços, acaba por retardar a formação e coalescência das microfissuras, e pode restringir parcialmente os deslocamentos diferenciais que ocorrem no interior da matriz, durante a formação e propagação de fissuras. Já as fibras metálicas, de maior dimensão e com melhor ancoragem, “costuram” o material, retardando o crescimento da abertura e extensão das fissuras e combatendo a desagregação do elemento. Em conjunto e em proporções adequadas as mesmas acabam resultando no compósito com melhor desempenho.

Com base nos dados coletados foram propostos modelos de ajuste, relacionando as propriedades investigadas (resistência por compressão axial, tração indireta por compressão diametral e flexão) e as proporções, tipos e teores totais de fibras usadas nas misturas. Esses modelos, que mostraram ser capazes de gerar valores com boa aproximação aos resultados experimentais, permitem que sejam estimadas as propriedades mecânicas esperadas para uma grande faixa de variação de misturas, feitas com diferentes combinações das fibras estudadas.

Importante enfatizar que, embora as tendências indicadas na proposição dos modelos encontrados tenham se mostrado suficientes para prever os comportamentos das respostas investigadas (resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e à flexão), essas necessitam ser aplicadas para dentro da amplitude dos valores das variáveis preditoras utilizadas no estudo. Por esse motivo, a aplicação destes modelos requer cautela, sobretudo no que diz respeito à generalização das considerações apontadas neste trabalho para pontos que não reproduzem as características da amostra. Dessa maneira, podem ser empregados para estimar valores das propriedades mecânicas, para ajustes de leis constitutivas e/ou realização de simulações numéricas, desde que dentro dos limites do estudo.

Diante dos promissores resultados obtidos, considera-se fundamental continuar os estudos sobre o uso de misturas híbridas de fibras para reforço de matrizes de concreto. Apesar de o âmbito desta pesquisa ser limitado, o que restringe a validade de algumas conclusões aos dados experimentais muito particulares, a definição da metodologia empregada para avaliar o comportamento do CRF, sob distintas condições de sollicitação, se mostrou apropriada para demonstrar a vantajosa contribuição da aplicação destes compósitos, atenuando o aspecto frágil do concreto convencional.

8.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Embora os resultados obtidos apontem inequivocamente para o efeito positivo da combinação de fibras em misturas híbridas, muitos estudos complementares serão necessários para que se possa entender os vários aspectos desse fenômeno, avaliar as diferenças de comportamento quando se usam outros tipos de fibras, e determinar uma forma adequada de desenvolver dosagens com misturas híbridas de fibras.

A seguir se apresentam algumas sugestões de trabalhos complementares.

A incorporação das fibras, ora atuando em minúsculas zonas do concreto, ora controlando o processo de fissuração numa fase cujas partículas possuem maiores dimensões, promove melhorias em várias propriedades associadas à fissuração da matriz, o que sugere a realização de novas pesquisas destinadas a investigar a influência da hibridização em concretos de alta resistência ou para os casos em que se almeja otimizar a diminuição da fissuração por retração da matriz, avaliar a ocorrência do ar incorporado ou aprimorar o desempenho do composto quando exposto às altas temperaturas.

Em acréscimo, sabendo que vários dos critérios de falha existentes voltados à resistência dos materiais, implicam algumas restrições que impedem sua aplicação àqueles que apresentam a anisotropia e heterogeneidade na sua natureza, sugere-se como importante a investigação das propriedades mecânicas do concreto reforçado com adições híbridas de fibras sujeito às tensões biaxiais, de modo a avaliar o modo de ruptura, bem como estabelecer relações que existem entre as tensões de resistência frente aos demais tipos de esforços e as respectivas deformações, bem como o comportamento das microfissuras.

Considerando que não existe pleno consenso quanto à aplicação mais adequada para descrever as ações desenvolvidas pelas combinações híbridas de fibras como reforço de matrizes cimentícias, cabe, ainda, destacar a necessidade de abrir frentes de pesquisa dedicadas a avaliar os impactos do uso dessa técnica na vida útil das estruturas.

ANEXOS

Tratamento dos dados – parâmetros estatísticos, análise de variância e modelos ajustados:

i. Resistência à Compressão Axial – f_c^{CRF}

| Multiple Regression Analysis | | | | | |
|---|----------------|----------------|-------------|---------|---------|
| Dependent variable: LOG(Fc/26,66) | | | | | |
| Parameter | Estimate | Standard Error | T Statistic | P-Value | |
| PP | -0,725387 | 0,365866 | -1,98266 | 0,0534 | |
| Aco^2 | -1,61570 | 0,127935 | -12,6291 | 0,0000 | |
| Carb^2 | -4,94688 | 0,68119 | -7,26211 | 0,0000 | |
| PP^2 | -13,9350 | 1,15452 | -12,07 | 0,0000 | |
| Aco*PP | 12,4046 | 0,710653 | 17,4552 | 0,0000 | |
| Carb*PP | 9,69397 | 1,46737 | 6,60635 | 0,0000 | |
| Analysis of Variance | | | | | |
| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
| Model | 9,17648 | 6 | 1,52941 | 87,64 | 0,0000 |
| Residual | 0,802742 | 46 | 0,0174509 | | |
| Total | 9,97922 | 52 | | | |
| R-squared = 91,9559 percent | | | | | |
| R-squared (adjusted for d.f.) = 91,0815 percent | | | | | |
| Standard Error of Est. = 0,132102 | | | | | |
| Mean absolute error = 0,10199 | | | | | |
| Durbin-Watson statistic = 1,78457 | | | | | |

ii. Resistência à tração por compressão diametral - f_{tD}^{CRF}

| Multiple Regression Analysis | | | | | |
|---|----------------|----------------|-------------|---------|---------|
| Dependent variable: LOG(Ft/3,28) | | | | | |
| Parameter | Estimate | Standard Error | T Statistic | P-Value | |
| Carb | -1,99876 | 0,400928 | -4,98535 | 0,0000 | |
| Aco^2 | -0,950154 | 0,262662 | -3,61741 | 0,0007 | |
| PP^2 | -13,2736 | 1,48846 | -8,9177 | 0,0000 | |
| Aco*PP | 9,73597 | 1,22489 | 7,94842 | 0,0000 | |
| Carb*PP | 9,44625 | 2,05105 | 4,60556 | 0,0000 | |
| Analysis of Variance | | | | | |
| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
| Model | 8,5841 | 5 | 1,71682 | 27,15 | 0,0000 |
| Residual | 3,16153 | 50 | 0,0632306 | | |
| Total | 11,7456 | 55 | | | |
| R-squared = 73,0833 percent | | | | | |
| R-squared (adjusted for d.f.) = 70,93 percent | | | | | |
| Standard Error of Est. = 0,251457 | | | | | |
| Mean absolute error = 0,190687 | | | | | |
| Durbin-Watson statistic = 2,33604 | | | | | |

iii. Carga máxima – aparecimento da primeira fissura – $f_{m\acute{a}x}$

| Multiple Regression Analysis | | | | | |
|---|----------------|----------------|-------------|---------|---------|
| ----- | | | | | |
| Dependent variable: LOG(Fmax/28,01) | | | | | |
| ----- | | | | | |
| Parameter | Estimate | Standard Error | T Statistic | P-Value | |
| ----- | | | | | |
| Aco | 0,758188 | 0,235201 | 3,22357 | 0,0025 | |
| PP | -1,254 | 0,458426 | -2,73545 | 0,0091 | |
| Aco ² | -1,8429 | 0,282278 | -6,52865 | 0,0000 | |
| PP ² | -9,49671 | 0,919421 | -10,329 | 0,0000 | |
| Aco*Carb | -1,56551 | 0,477495 | -3,27859 | 0,0021 | |
| Aco*PP | 9,97418 | 0,644236 | 15,4822 | 0,0000 | |
| Carb*PP | 5,78325 | 0,887783 | 6,51427 | 0,0000 | |
| ----- | | | | | |
| Analysis of Variance | | | | | |
| ----- | | | | | |
| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
| ----- | | | | | |
| Model | 4,16635 | 7 | 0,595193 | 43,12 | 0,0000 |
| Residual | 0,579797 | 42 | 0,0138047 | | |
| ----- | | | | | |
| Total | 4,74615 | 49 | | | |
| R-squared = 87,7838 percent | | | | | |
| R-squared (adjusted for d.f.) = 86,0387 percent | | | | | |
| Standard Error of Est. = 0,117493 | | | | | |
| Mean absolute error = 0,0898478 | | | | | |
| Durbin-Watson statistic = 2,31883 | | | | | |

iv. Área sob a curva no ensaio de flexão em 03 pontos – T_b – JSCE SF4

| Multiple Regression Analysis | | | | | |
|---|----------------|----------------|-------------|---------|---------|
| ----- | | | | | |
| Dependent variable: LOG(TB/18,88) | | | | | |
| ----- | | | | | |
| Parameter | Estimate | Standard Error | T Statistic | P-Value | |
| ----- | | | | | |
| Aco | 5,23455 | 0,315116 | 16,6115 | 0,0000 | |
| PP | 2,13857 | 0,593685 | 3,6022 | 0,0009 | |
| Aco ² | -5,79581 | 0,420579 | -13,7806 | 0,0000 | |
| PP ² | -15,1184 | 1,17399 | -12,8777 | 0,0000 | |
| Aco*Carb | -1,93242 | 0,59777 | -3,23272 | 0,0025 | |
| Aco*PP | 9,29312 | 0,806761 | 11,519 | 0,0000 | |
| Carb*PP | 6,37676 | 1,11645 | 5,71165 | 0,0000 | |
| ----- | | | | | |
| Analysis of Variance | | | | | |
| ----- | | | | | |
| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
| ----- | | | | | |
| Model | 85,3463 | 7 | 12,1923 | 572,33 | 0,0000 |
| Residual | 0,830809 | 39 | 0,0213028 | | |
| ----- | | | | | |
| Total | 86,1771 | 46 | | | |
| R-squared = 99,0359 percent | | | | | |
| R-squared (adjusted for d.f.) = 98,8876 percent | | | | | |
| Standard Error of Est. = 0,145955 | | | | | |
| Mean absolute error = 0,109659 | | | | | |
| Durbin-Watson statistic = 1,74129 | | | | | |

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCETTI, K. M., PINHEIRO, L. M., *Tipos de fibras e propriedades do concreto com fibras*. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, 42, 2000, Fortaleza. Anais. Fortaleza: IBRACON, 2000.

AGARWAL, B. D.; BROUTMAN, L. J. *Analysis and performance of fiber composites*. John Wiley & Sons, Inc. second edition, 1990, 449p.

AGOPYAN, V., *Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: o uso de fibras vegetais*. São Paulo, 1991. 204p. **Tese (livre-docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo**, 1991.

AGOPYAN, V. SAVASTANO, Jr. H. *Uso de materiais alternativos a base de fibras vegetais na construção civil: experiência brasileira*. In: **Seminário Iberoamericano de materiais fibrorreforçados, 1., y reunión proyecto PIP VIII.5** Cyted, 3. Cali. Universidad Del Valle, Cali, 1997.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. “*State-of-the-art Report on fiber reinforced concrete*”. In: **Manual of concrete Practice, ACI 544.1R-96**, Detroit, United States of America. 2006.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. “*Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete*”. In: **Manual of concrete Practice. ACI 544-4R-88**, Detroit, Michigan, v. 5. 2004.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 544.2R-89: *Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete. ACI Committee 544*, Detroit, USA, 1999.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 544.3R-2008 *Manual of concrete practice: part 5. Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing steel fiber reinforced concrete. ACI Committee 544*, Detroit, USA, 2008.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 544.4R-88: *Manual of concrete practice: part 5. Design considerations for steel fiber reinforced concrete. ACI Committee 544* Detroit, USA, 1988.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavy Weight and Mass Concrete: ACI Committee 211* (Reaprovado 2009). In: ACI Manual of Concrete Practice. Detroit, USA, 1991.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *State-of-the-art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures* – **ACI Committee 440** (Reaprovado 2002) Detroit, USA, Janeiro, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C995: *Standard test method for time of flow of fiber reinforced concrete through inverted cone slump*. **Book of ASTM Standards**, USA, 1994.

ARAÚJO DA SILVA, P. F. *Concreto projetado com fibra: estágio atual*. In: **Simpósio sobre Túneis Urbanos**, 4., 2002, São Paulo. **Anais...**São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 2002. p. 203-206.

ARMELIN, H. S. *Contribuição ao estudo do concreto projetado por via seca com fibras de aço destinado ao revestimento de túneis NATM*. 1992. 144f. **Dissertação (Mestrado em Engenharia)** – **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, São Paulo.

ARMELIN, H. S., HAMASSAKI, L. T. *Avaliação do concreto projetado reforçado com fibras de aço e polipropileno na construção de túneis – NATM*. **32ª Reunião Anual do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON)** 1990, Anais. 12p.

ARMELIN, H. S., HELENE, P. R. L. *Physical and mechanical properties of steel fiber reinforced dry-mix shotcrete*. **ACI Materials Journal**, USA, v. 92, n. 3, May-Jun, 1995).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. **NBR 7222, ABNT**, Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto – Ensaio de compressão de corpos cilíndricos*. **NBR 5739, ABNT**, Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto – Determinação de Consistência pelo abatimento do Tronco de Cone*. **NBR NM 67, ABNT**, Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Agregados – Determinação da composição granulométrica*. **NBR 7217, ABNT**, Rio de Janeiro, 2003.

AZIZ, M. A., PARAMASIVAM, P., LEE, S. L. *Prospects for natural fibre reinforced concretes in construction*. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**. v.3, no.2, Singapura, 1981.

BALAGURU, P. N. & SHAH, S. P. *Fiber Reinforced Cement Composites*. Mc Graw Hill Book Co. New York, 1992.

BALAGURU, P., NARAHARI, R. & PATEL, M. *Flexural toughness of steel fiber reinforced concrete*. **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 6, p. 541-546, nov./dec. 1992.

BANTHIA, N. & GUPTA, R. *Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): fiber synergy in high strength matrices*. **Materials and Structures**. V.37, december 2004, pp 707-716

BANTHIA, N. & SOLEIMANI, S. M., *Flexural response of hybrid fiber reinforced mortar under load*. **ACI Materials Journal**, 99 (4) 2002 pp 379-385

BANTHIA, N. & TROTTIER, J. F. *Concrete reinforced with deformed steel fibre – Part I: bond slip mechanisms*. **ACI Materials Journal**, v. 91, n. 5, Detroit, USA, sep-oct 1994, p. 435-446.

BARBERO E. J., DAMIANI, T. M.; *Phenomenological prediction of tensile strength of E-glass composites from available aging and stress corrosion data*. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v.22, n.4, p. 373-394, 2003.

BARROS, J. A. O., *Estado da arte dos betões reforçados com fibras*. Engenharia Civil, Universidade do Minho, n.3, p.29-47, 1996.

BATSON, B. G. *State-of-art report on fiber reinforced concrete*. An **International Symposium: Fiber Reinforced Concrete**. Canada: 1973. Detroit, ACI, 1974. p. 535-549.

BAYASI, Z., DHAHERI, M. A., *Effect of exposure to elevated temperature on polypropylene fiber reinforced concrete*, **ACI Materials Journal**, v.99, n.1, jan-fev-2002. p 22-26.

BEBER, A. J., *Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono*, 2003. 317 f. **Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 2003.

BENTUR, A.; MINDESS, S. *Fibre reinforced cementitious composites*. New York: Elsevier Science Publishers, 1990.

BENTUR, A.; MINDESS, S. *Fibre reinforced cementitious composites*. 2nd. Edition, **Modern Concrete Technology Series**, Taylor&Francis, 2007.

BERNARDI, S. T. *Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida Kevlar*, 2003. 164 f. **Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 2003.

BERNARDI, S.T. & SILVA FILHO, L.C.P. *Perspectivas de utilização da fibra aramida Kevlar em estruturas de concreto*. In: **Anais do VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto**. São Paulo, abril 2006, pp. 1693-1704.

BLEDZKI, A. K. & GASSAN. J. *Composites reinforced with cellulose based fibres*. Progress in polymer science, v.24, pp. 221-274, 1999.

BLEIMAN, C., BULENS, M., ROBIN, P. *Alternatives for substituting asbestos in fibre cement products*. In **Proc. Conf. on High Performance Roofing Systems, Plastic and Rubber Institute**, London, 1984, p. 8.1-8.12. (citados por Bentur e Mindess, 1990).

BURATTI, N.; MAZZOTTI, C.; SAVOIA, M. (2011). *Post-cracking behaviour of steel and macro-synthetic fibre-reinforced concretes*. **Construction and Building Materials**, v. 25, pg. 2713-2722, January.

CALLISTER Jr., W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2002.

CALLISTER Jr., W. D. & RETHWISCH, D. G. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma abordagem integrada**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

CÁNOVAS, M. F. *Panorama Actual de los hormigones reforzados com fibras de acero. Universidad Politécnica de Madri*. In: **IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções - CONPAT 97, VI Congresso de Controle de Qualidade**. Porto Alegre, RS, Brasil. 21 a 24 de outubro de 1997 Vol II, Anais p.31-46.

CARVALHO, R. F. *Compósitos de Fibras de Sisal para Uso em Reforço de Estruturas de Madeira. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo*, São Carlos, 2005.

CASATI, B. *Utilização de tecidos de fibra de vidro em sistemas na construção civil*. In.: **Arquimacon'2002**. São Paulo, 2002.

CECCATO, M. R. *Estudo da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço*. São Paulo: USP, 1998. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CEPED (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento). **Utilização de fibras vegetais no fibro-cimento e no concreto-fibra**. Rio de Janeiro, BNH/DEPEA, 1982.

CHAMA NETO, P. J., FIGUEIREDO, A. D. *Avaliação de desempenho de tubos de concreto reforçados com fibras de aço*. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, 45, 2003. Vitória, ES. **Anais IBRACON**, São Paulo, 2003.

CHANDRAMOULI, K. ; SRINIVASA RAO, P. ; PANNIRSELVAN, N. ;SESHADRI SEKHAR, T. ; SRAVANA, P. *Strength properties of glass fiber concrete*. **ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 5, n. 4, April 2010.

CHANVILLARD, G. E S. RIGAUD. “*Complete Characterization of Tensile Properties of Ductal UHPFRC According to The French Recommendations*”. In: **RILEM Fourth international Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites - HPRCC4**, pp 21-34, Ann Arbor, USA, 2003.

CHEN, B & LIU, J. *Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability*, **Cement and Concrete Research**, 35 (2005) 913–917.

CHEN, L., MINDESS, S.; MORGAN, D. R., *Specimen geometry and toughness of steel-fiber-reinforced concrete*. **Journal of Materials in Civil Engineering**, V. 6, n. 4, p529-541, November, 1994.

CHUANG, E. & F. J. ULM. “*Size Independence of UHPC Ductility*. Fracture Mechanics of Concrete Structures”. In: **Fifth International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures**, pp1067-1074, Vail, Colorado, 2004

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. CEB-FIP Model Code 1990. Thomas Telford Services, Ltd., London, 1993. _____. **CEB-FIP Model Code 2010. First complete draft**, Lausanne, Switzerland, 2010

DANIEL, I. M. & ISHA, O. *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Oxford University Press, 1994.

DE LARRARD, F. *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach*, **Modern Concrete Technology Series**, vol. 9, E&FN SPON, London, 1999, 421 p

FELDMAN, D., ZHENG, Z., *Synthetic fibres for fibre concrete composites*. In: *High performance polymers and polymer matrix composites: symposium held April 1993*. **Materials Research Society Symposia Proceedings V 211**, 119-124, 1993

FÉLIX, A. H. O. *Compósitos de polipropileno com fibra de vidro utilizando viniltrióxido de silício como agente de adesão*. 2002. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre.

FIGUEIREDO, A. D. *Concreto com fibras*. In: **Geraldo Cechella Isaia (Editor). Concreto: ensino, pesquisa e realizações**, São Paulo: IBRACON, 2005.

FIGUEIREDO, A. D. *Concreto reforçado com fibras*. 2011. **Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica de São Paulo** – Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo.

FIGUEIREDO, A. D. *A nova especificação brasileira das fibras de aço para concreto*. In: **50º Congresso Brasileiro do Concreto**, Salvador, 2008. **Anais. Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON**. São Paulo, 2008.

FIGUEIREDO, A. D. *O Concreto com reforço de macrofibras poliméricas*. **Revista Concreto & Construção**, nº 59, 2010, p. 39-43.

FIGUEIREDO, A. D. *Concreto reforçado com fibras de aço*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000. **Boletim Técnico**.

FIGUEIREDO, A. D.; NUNES, N. L.; TANESI, J. *Mix design analysis on steel fiber reinforced concrete*. In: **FIFTH INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON FIBRE-REINFORCED CONCRETES (FRC)**, 2000, Lyon. Fibre-Reinforced Concretos (FRC) – BEFIB’2000. Proceedings. **RILEM Publications S. A. R. L.**, Lyon, 2000.

FORMAGINI, S., 2005, *Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho*. **Tese de Doutorado, COPPE-UFRJ**, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, 287 páginas.

GARCEZ, E. O., *Análise teórico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a cargas de impacto*. 2005. **Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, PPGEC, UFRGS, Porto Alegre.**

GAVA, G. P. *Análise teórica-experimental do comportamento à flexão de vigas de concreto reforçado com fibras de aço*. Florianópolis, 2006. 282 p. **Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.**

GETTU, R.; GARDNER, D. R.; SALDIVAR, H.; BARRAGÁN, B.E. *Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens*. **Materials and Structures**, 38, 2005, p.31-37.

GHAVAMI, K., *Application of Bamboo as Low-Cost Energy Material*. **In: Civil Engineering CIB/RILEM**. México, pp 526-639, 1989.

GLAVIND, M.& AARRE, T. *High-strength concrete with increased fracture-toughness*. **In: Fiber reinforced cementitious materials: symposium, Boston, Massachusetts**, 1990 / editors Sidney Mindess, Jan Skalny in **Materials Research Society Symposia Proceedings**. V 211, pp 39-46, 1991.

GOPALARATNAM, V. S. and SHAH, S. P. *Properties of Fiber Reinforced Concrete Subjected to Impact Loading*. **ACI Journal. Proceedings**. v 83, n 1, Jan-Feb 1986. p117-126.

GRISON, E. C. & HOINACKI, E. *Identificação de Materiais Poliméricos: Via Úmida*. **Fundação de Ciência e Tecnologia**: Porto Alegre, 1985.

GUIMARÃES, A. E. P., et al. *Análise experimental de pilares de concreto de alta resistência com adição de fibras metálicas*. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**. São Paulo, 2001. **Boletim Técnico**.

HAIR, J. JR. et al. **Fundamentos de Métodos de pesquisa em administração**. Porto Alegre: Bookman, 2005.

HAMEED, R.; TURATSINZE, A.; DUPRAT, F. & SELLIER, A. *Study on the flexural properties of metallic-hybrid-fibre reinforced concrete*. **Maejo International Journal of Science and Technology**, 2010, 4(02), 169-184.

HANNANT, D. J. *Fibres in concrete – a perspective*. **Concrete for the construction industry**. V. 36, n. 8, p. 40-43, 2002]

HANNANT, D. J. *Fiber Cements and Fiber Concretes*. **Guilford, United Kingdom: John Wiley & Sons**, 1978.

HARRIES, K. A.; YOUNG, S. C. *Sprayed-fiber-reinforced composites materials for infrastructure rehabilitation*. **Concrete International**. **United States of America**, v. 25, n.1, p 47-51, jan 2003.

HOLLAWAY, L. C., *Polymer Composites for civil and structural engineering*. Glasgow, **Blackie Academic and Professional**, 1993.

HULL, D.; *An Introduction to Composite Materials*, **Cambridge University Press**, Cambridge, 1981 – citado por CALLISTER, 1997.

JENNINGS, H. M. *Advanced Cement Based Matrices For Composites*. In High Performance Fiber Reinforced Cement Composites – **RILEM** . pp3-16, 1992.

JIA, Z. & SHAH, S. P. 1994, *Two dimensional electronic-speckle-pattern Interferometry and Concrete Fracture Processes*. **Experimental Mechanics**, v34, n.3, pp 262-270.

JIANG, G.P., HUAN, S., JIAO, C.J., TAO, W.J. (2011). *Study on the mechanical behavior of steel reinforced high strength concrete subjected to impact loading*. **Int. J. Phys. Sci.**, 6(13): 3099-3104.

JO, B-W., SHON, Y-H., KIM, Y. J. *The evaluation of elastic modulus for steel fiber reinforced concrete*. **Russian Journal of Nondestructive Testing**, v. 37, n. 2, 2001, p. 152-161.

JOHNSTON C.D.; SKARENDAHL, A. *Comparative flexural performance evaluation of steel fibre-reinforced concretes according to ASTM C 1018 shows importance of fibre parameters*. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 25, p. 191-200, 1992.

JOHNSTON, C. D. *Toughness of steel fiber reinforced concrete*. In: Steel Fiber Concrete -US-SWEDEN Joint Seminar (NSF-STU), 1985, Stockholm. **Proceedings...** Edited by Shahand A. Skarendahl, 1985, p. 333-360.

JOHNSTON, C. D. *Fibre-reinforced cement and concrete*. In: MALHOTRA, V. M. **Advances In Concrete Technology – Second Edition**. Ottawa, Canadá: **CANMET**, 1994.

KERN, A. P. *Estudo da Viabilidade da Incorporação de Resíduos de Contrafortes de Calçados em Matriz de Gesso para o Uso como Material de Construção Civil*. **Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 1999.

KONAPURE, C.G. & KANGIRI, S.D. Evaluation of performance of hybrid fibre reinforced concrete (HFRC) for M25 Grade. **International Journal of Current Engineering and Technology**, v.4, n. 3, june 2014, pp. 1831-1835.

LAWLER, J. S., WILHELM, T., ZAMPINI, D., SHAH, S. P., *Fracture process of hybrid fiber-reinforced mortar*. **Materials and Structures**, v 36, april 2003, pp 197-208.

LAWLER, J. S., ZAMPINI, D., SHAH, S. P., *Permeability of Cracked Hybrid Fiber-Reinforced Mortar under Load*, **ACI Materials Journal**. V.99, n.4, July-August, 2002 pp 379-385.

LEE, M. K., BARR, B. I. G. *Strength and fracture properties of industrially prepared steel fibre reinforced concrete*. **Cement and Concrete Composites**. V.25, p321-332, 2003.

LE, Z.; XIAOCHU, W.; YUANQING, W.; HONGTAO, L.; JUNWEI, W. *Experimental study of mechanical behaviors of carbon fiber reinforced concrete columns*. **AISS**, V. 5, n. 8, pp. 27-35, 2013.

LI, V. C. & STANG, H. “*Classification Of Fibre Reinforced Cementitious Material For Structural Applications*”. In: **6th Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)**, pp 197-217, Verenna, Italy, 2004.

LI, V. C.; MAALEJ, M. *Toughening in cement based composites. Part I: Cement, mortar and concrete*. **Cement and Concrete Composites**, v. 18, p. 223-237, 1996.

LIAO, K.; SCHULTHEISZ, C. R.; HUNSTON, D. L. et al. *Long-term durability of fiber-reinforced polymer-matrix composite materials for infrastructure applications: A review* **Journal of Advanced Materials**, v.30, n.4, p. 3-40, 1998.

LIMA, P. R. L., *Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal*. Rio de Janeiro. 2004. **Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE**. 2004.

LOBÃO, L. M. M. *Taxa de armadura longitudinal mínima em vigas de concreto de resistência normal com fibras de aço*. Rio de Janeiro. **Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE**, 2005.

MAJUMDAR, A. J. *Glass fibre reinforced cement and gypsum products*. **Proc. Roy. Soc. Lond. A**, 319 (1970), p 69-78.

MAJUMDAR, A. J., RYDER, J. F. *Glass fibre reinforcement for cement products*. **Glass Technology**, 9 (1968), p. 78-84 (citado por Bentur & Mindess, 1990)

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Edgar Blucher, 2. ed, 2000.

MARKOVIC, I., WALRAVEN, J.C. & VAN MIER, J.G.M. 2003. *Development on high performance hybrid fibre concrete* In **A.E. Naaman & H.W. Reinhardt (eds.)**, **RILEM Publication**. s.a.r.l., p. 277-300. Delft.

MARTINEAU, P., AGOPYAN, V. **Conferência Magna I – Compósitos: material inovador**. In: **Arquimacom’2002**. São Paulo, 2002.

MATSUMOTO, T. & LI, V. C. *Fatigue crack growth analysis of fiber reinforced concrete with effects of interfacial bond degradation*. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, p. 339-350, out 1998.

MATSUMOTO, T. & LI, V. C. *Fatigue live analysis of fiber reinforced concrete with a fracture mechanics based model*. **Cement and Concrete Composites**, v. 21, p. 249-260, ago 1999.

MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M. **Concreto : Microestrutura, propriedades e materiais**. 4^a.edição (inglês) 2^a. edição (português) São Paulo, IBRACON, 2014.

MELO FILHO, J. A., 2005, *Desenvolvimento e caracterização de laminados cimentícios reforçados com fibras longas de sisal*. **Dissertação de Mestrado, COPPE-UFRJ**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 114 páginas.

MOBASHER, B., STANG, H. & SHAH, S. P. *Microcracking in fiber reinforced concrete*. **Cement and Concrete Research**, 20, 1990, pp 665-676.

MORAES NETO, B.N., 2013. *Comportamento à Punção de Lajes Lisas em Concreto Reforçado com Fibras de Aço sob Carregamento Simétrico*. **Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil**, Publicação E.TD-001A/13 **Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília**, Brasília, DF, 343 p.

NAAMAN, A. E. *Fiber reinforcement for concrete*. **Concrete International**, v.7, n. 3, p 21-25, March 1985.

NEPOMUCENO, A. A. *Mecanismo de transporte de fluidos no concreto*. **In: Geraldo Cechella Isaia (Editor). Concreto: ensino, pesquisa e realizações**, São Paulo: **IBRACON, 2005**.

NEVILLE, A. *Fiber reinforced cement & concrete – RILEM Symposium*, 1975. p 459- , 1975.

OSTERTAG, C.P. & BLUNT, J. *Effect of crack control in hybrid fiber reinforced concrete composites on corrosion rate of steel reinforcing bars*. **In: Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures – Assessment, Durability, Monitoring and Retrofitting of Concrete Structures – B. H. Oh, et al. (eds.)**, 2010, Korea Concrete Institute, Seoul.

PADRON, I. & ZOLLO, R. F., *Effect of synthetic fibers on volume stability and cracking of Portland Cement Concrete and Mortar*. **Journal of Materials. American Concrete Institute**, Jul-Ago 1990.

PURNELL, P., SHORT, N. R., PAGE, C. L., MAJUMDAR, A. J. – *Microstructural observations in new matrix glass fibre reinforced cement*. **Cement and Concrete Research**, ed. 30, 2000.

QIAN, C., STROEVEN, P., *Fracture properties of concrete reinforced with steel-polypropylene hybrid fibers*. **Cement & Concrete Composites**. V.22, p343-351, 2000.

QUININO, U. C. M. *Uso do método das interfaces coesivas na análise da simulação do comportamento de fratura em materiais frágeis*. 2004. **Dissertação (Mestrado em, Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PPGEC, UFRGS**, Porto Alegre.

REIS, J. M. L. *Fracture and flexural characterization of natural fiber-reinforced polymer concrete*. **Construction and Building Materials**, v. 20, pp. 673-678, 2006.

RESENDE, F. M. *Influência das Fibras de Aço, Polipropileno e Sisal no Amortecimento de Concretos de Resistência Normal e de Alto Desempenho*. 2003. 98f. **Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Janeiro**, Rio de Janeiro, 2003.

SANTIAGO, M. O. *Aplicações do GRC – Cimento Reforçado com Fibras de Vidro em novos estádios de Sevilha*, Espanha. In: **Arquimacom'2002**. São Paulo, 2002.

SAVASTANO JR, H. *Materiais a base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo*. **Tese de livre docência. EPUSP**. São Paulo, 2000.

SAVASTANO JR, H., NOLASCO, A. M., LUZ, P. H. C., *Análise dos resíduos e subprodutos da agroindústria de fibras vegetais do Brasil para o uso em materiais de construção*. In: **Simpósio de Ciências da Engenharia Ambiental**, 4. 1997, São Paulo. Anais... São Carlos, SP. CRHEA-EESC-USP, pp85-87, 1997.

SCHWARTZ, M. M. **Composites materials handbook**. New York: McGraw Hill, 1984.

SELINA RUBY, G.; GEETHANJALI, C.; JAISON, VARGHESE; P. MUTHU PRIYA. *Influence of hybrid fiber on reinforced concrete*. **International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering**, v. 03, n. 1, January 2014.

SHAH, S. P., OUYANG, C. *Mechanical Behavior of Fiber Reinforced Cement-Based Composite*. **Journal of the American Ceramic Society**, Vol. 74, no. 11, 1991, pp. 2727-2738, 2947-2953.

SHAH, S. P., SWARTZ, S. E., OUYANG, C. **Fracture Mechanics of Concrete: Applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials**. New York: John Wiley & Sons, 1995.

SILVA, A. C. “*Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose*”. **Tese de mestrado. Departamento de Engenharia de Construção Civil/EPUSP**. – São Paulo, 2002

SILVA, R. V. *Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais*. **Ciência e Engenharia de Materiais/USP**, São Carlos, 2003.

SIVAKUMAR, A. *Influence of hybrid fibres on the post crack performance of right strength concrete: Part I experimental investigations*. **Journal of Civil Engineering and Construction Technology**, vol. 2(7), pp. 147-159, July 2011.

SOROUSHIAN, P.; BAYASI, Z. *Fiber Type Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete*, **ACI Materials Journal**, V.88, N°2, Mar – Apr 1991, pp 129-134.

SOTO IZQUIERDO, I. “*Uso de fibra natural de sisal em blocos de concreto para alvenaria estrutural*”. **Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo**, São Carlos, 2011.

STÄHLI, P. & VAN MIER, J.G.M. (2004), *Three-fibre-type hybrid fibre concrete* - in **proceeding FRAMCOS-5**, Vail, USA, ed. V. C. Li et al pp. 1105-1112.

STUDINKA, J. B. *Asbestos substitution in the fibre cement industry*, **The international journal of cement and lightweight concrete**, v. 11, n. 2, may 1989.

STUDINKA, J. B. *Replacement of asbestos in the fiber cement industry – state of substitution, experience up to now*. **Paper 25 in International Man Made Fibres Congress**, Dornbirn, Áustria, Austrian Chemical Institute, 1986.

SUN, W.; CHEN, H.; LUO, X. & QIAN, H. *The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete*, **Cement and Concrete Research** 31 (2001) 595-601.

SURESH, S. **Fatigue of Materials**. 2nd. Ed., New York, Cambridge University Press, USA, 1998.

TAMIL SELVI, M. & THANDAVAMOORTHY, T.S. (2013) *Studies on the Properties of Steel and Polypropylene Fibre Reinforced Concrete without any Admixture*, **International Journal of Engineering and Innovative Technology**, Vol. 3 (1), pp. 411-416, H Index:1. ISSN 2277-3574.

TANESI, J. & AGOPYAN, V. *Compósitos reforçados com fibras plásticas para a construção civil*. **II Encontro Tecnologia de Sistemas Plásticos na Construção Civil**. EPUSP. São Paulo, 1997.

TANESI, J. *A influência das fibras de polipropileno no controle da fissuração por retração*. **Dissertação apresentada na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, 1999.

TANESI, J. & FIGUEIREDO, A. D., 2000, “Eficiência do Reforço de fibras de Polipropileno em Concretos”. **In: IV Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto**. São Paulo. 2000.

TOLEDO FILHO, R. D., BARBOSA, N. P. & GHAVAMI, K., *Applications of sisal and coconut fibres in adobe blocks*. **In: Vegetable plants and their fibres as building materials**. 1990, Salvador, Brasil. RILEM 7, Proceedings..., London: Chapman & Hall, V 01, p 139-149, 1990.

TOLEDO FILHO, R. D., SCRIVENER K., ENGLAND G. L. et al., “Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites” **Cement & Concrete Composites**, n. 22, pp 127-143, 2000.

TOUTANJI, H. & BAYASI, Z. *Effect of manufacturing techniques on the flexural behavior of steel fiber-reinforcement concrete*. **Cement Concrete Research**, 28, v 1, p115-124.

VAIRAGADE, V.S. & KENE, K.S. *Experimental investigation on hybrid fiber reinforced concrete*. **International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)**, v. 2, issue 3, may-jun 2013, 1037-1041.

VENÂNCIO, D.S.; GONÇALVES, D.J.; MOREIRA, K.A.W. *Análise da resistência à compressão em blocos estruturais de concreto com adição de fibra de polipropileno*. **Revista Eletrônica Multidisciplinar – ISSN: 2316-2317**, 2013.

WANG, K., SURENDRA, P. S. & PHUAKSUK, P., *Plastic shrinkage cracking in concrete materials – Influence of fly ash and fibers*. **Journal of Materials. American Concrete Institute**. Nov-Dec 2001.

XU, G., MAGNANI, S. & HANNANT, D. J. *Durability of Hybrid polypropylene-glass fibre cement corrugated sheets*, **Cement and Concrete Composites**, 20, (1) 1998, pp 79-84.

YEW, M.K., OTHMAN, I., YEW, M.C., YEO, S.H. & MAHMUD, H.B. *Strength properties of hybrid nylon-steel and polypropylene-steel fibre-reinforced high strength concrete at low volume fraction*, **International Journal of the Physical Sciences**, Vol. 6(33), pp. 7584-7588, 9 December, 2011.

ZOLLO, R.F. *Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development*. **Cement and Concrete Composites**, v. 19, p. 107-122, 1997.

RILEM TC 162-TDF: *Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – Recommendations: Bending Test*. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v.33, p. 3-5, jan./feb. 2000a.

RILEM TC 162-TDF: *Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – Recommendations: σ - ε Design Method*. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 33, p. 75-81, mar. 2000b.