AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA COM REFORÇOS
CONTÍNUOS DE FIBRAS DE CARBONO E FIBRAS DE VIDRO**

REINALDO LEONEL CARATIN

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área de Tecnologia
Nuclear - Materiais**

**Orientador:
Prof. Dr. Gerson Marinucci**

**São Paulo
2014**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA COM REFORÇOS
CONTÍNUOS DE FIBRAS DE CARBONO E FIBRAS DE VIDRO**

REINALDO LEONEL CARATIN

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área de Tecnologia
Nuclear - Materiais**

**Orientador:
Prof. Dr. Gerson Marinucci**

Versão Corrigida
Versão Original disponível no IPEN

São Paulo
2014

À minha esposa Rosiris
e minha filha Priscila

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP), pela possibilidade de desenvolver este trabalho.

Ao Prof. Dr. Gerson Marinucci, por sua orientação, presença constante, paciência e amizade demonstrada durante o decorrer deste trabalho.

Aos Dr. Lalgudi Venkataraman Ramanathan e Dr. Jesualdo Luiz Rossi, pela cessão de área no Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais (CCTM-IPEN) para a instalação do laboratório de engenharia civil.

À Dr.^a Sumair Gouveia de Araujo, pela cessão de área no Centro de Química e Meio Ambiente (CQMA) para estocagem do material ensaiado.

Aos colegas, Jair Mengatti e José Francisco Corcione, pela ajuda na montagem do laboratório.

Ao Professor Antonio Domingues de Figueiredo, pelas valiosas observações feitas no exame de qualificação.

À Sra. Renata Monti, do Laboratório de Pesquisas de Construção Civil da USP, pela cooperação durante os ensaios de flexão em corpos de prova prismáticos.

À Texiglass, na pessoa de Giorgio Salinas, pelo fornecimento da fibra de vidro-AR.

Aos Srs. Delmo Amari Nishitsuji e Marcos Augusto, do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, pela colaboração nos ensaios de tração das fibras.

Ao Dr. Adonis Marcelo Saliba Silva, pela ajuda com a estatística.

À Dr.^a Elita Fontenele Urano de Carvalho, pela colaboração na edição das figuras.

Aos colegas, Mariano Castagnet e Djalma Batista Dias, do IPEN, pela cooperação durante os ensaios de *pullout* em corpos de prova prismáticos.

Aos colegas, Ary Pereira Junior e Gilberto Hage Marcondes, do IPEN, pela colaboração na impressão do trabalho.

Aos colegas, Fernando Fornarolo e José Antonio Batista, do IPEN, pelo companheirismo e apoio nos momentos de tensão.

Às colegas, Mery Piedad Zamudio Igami, Edna Maria Alves, Maria Eneide de Souza Araujo, e ao colega Waldir Ferreira, da biblioteca do IPEN, pela paciente e permanente ajuda prestada.

Aos colegas, Fábio Eduardo de Campos, Paulo Alves Teixeira, Gilson Carlos Victorino, José Carlos Sabino, Sérgio Augusto Sá, Márcio Antonio Gonçalves Ramos, Gilberto Magalhães, Amadeu Ferreira, Benedito Donizeti Gomes Pereira, Valdeci Donizeti dos Santos, Pedro Mariano, Severino Ferreira da Silva, pela ajuda nas oficinas de engenharia mecânica e civil do IPEN.

Ao meu cunhado e amigo Wilson Robert Mancini, por sempre me encorajar a continuar os estudos.

À minha esposa Rosiris Mancini Caratin, pela correção ortográfica e gramatical.

Aos queridos amigos e amigas do IPEN que, embora não tenham sido nominalmente citados, estiveram presentes e muitas vezes não entenderam a minha ausência nos nossos eventos, e pela paciência com o meu mau-humor.

DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA COM REFORÇOS CONTÍNUOS DE FIBRAS DE CARBONO E FIBRAS DE VIDRO

REINALDO LEONEL CARATIN

RESUMO

Resíduos da área de engenharia civil decorrentes da recuperação de estruturas danificadas por agentes agressivos contribuem continuamente para impactar o meio ambiente de maneira cada vez mais preocupante.

O desenvolvimento de novas tecnologias que sejam aceitáveis do ponto de vista ambiental e financeiro provou ser um grande desafio na solução desse problema quando se compara o custo original e eficaz em médio e longo prazo ao custo da demolição, destinação desse material e reconstrução da obra.

Para viabilizar a utilização de compósitos de fibras sintéticas como reforço resistente a ambientes agressivos em elementos de concreto, os aparatos de ensaio e os corpos de prova foram modificados e adaptados aos sistemas operacionais descritos pelas normas técnicas vigentes, a partir da concepção do uso de filamentos de fibra contínua.

Dado o caráter inovador do trabalho, não se identificou uma norma que tratasse especificamente dos ensaios de flexão nem *pullout* com fibras contínuas em blocos de concreto.

Portanto, para se conseguir um aproveitamento desse tipo de reforço que respondesse satisfatoriamente quando comparado às armaduras metálicas, foi aplicada uma rugosidade à superfície da haste para garantir sua aderência ao bloco de concreto.

Pelo método de preparo de compósitos de matriz cimentícia proposto no presente estudo, foram determinados os valores da força de arrancamento dos reforços com fibras de carbono e vidro-AR, os quais, no caso das fibras de carbono, apresentaram aumentos significativos entre 76% e 158% e 47% e 120% respectivamente para concretos de resistência à compressão de 30 MPa (f_{cm} 30) e 40 MPa (f_{cm} 40) comparados com valores obtidos para barras de aço.

DEVELOPMENT OF CEMENT MATRIX COMPOSITES WITH CONTINUOUS REINFORCEMENTS OF CARBON FIBERS AND GLASS FIBERS

REINALDO LEONEL CARATIN

ABSTRACT

In Civil Engineering, the waste from the recovery of structures that were damaged by aggressive agents continuously contribute to impact the environment in an increasingly concerning way.

The development of new technologies that would be environmentally and financially acceptable has become a major challenge to solve that problem when one compares the medium and long term original and effective cost to the cost of demolition, destination of that material and rebuilding.

To enable the use of synthetic fiber composites as a resistant reinforcement to aggressive environments in concrete elements, the test apparatus and the specimens were changed and suited to the operational systems described by current technical standards from the conception of the use of continuous fiber filaments.

Given the innovative character of the present work, no standard specifically related to bending and pullout tests with continuous fibers in concrete blocks has been identified.

Therefore, in order to obtain good use of that kind of reinforcement that would respond satisfactorily when compared to metallic bars, some rugosity was applied to the rod surface in order to ensure its adherence to the concrete block.

The preparation method of cement matrix composites proposed in the present work has determined pullout strength values and reinforcement with carbon and AR glass fiber values, which, regarding carbon fibers, showed significant increase between 76% and 158% and 47% and 120% respectively for compression resistant concrete of 30 MPa (f_{cm} 30) and 40 MPa (f_{cm} 40) compared to the obtained values for steel bars.

SUMÁRIO

	<i>Página</i>
1 INTRODUÇÃO.....	17
2 OBJETIVOS.....	21
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	22
4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	31
4.1 Considerações iniciais.....	31
4.2 Matriz cimentícia.....	34
4.2.1 Cura do concreto.....	37
4.3 Matriz polimérica.....	38
4.4 Elementos de reforço.....	40
4.5 Conceitos de interface fibra/matriz.....	43
4.6 Planejamento de experimentos.....	51
5 MATERIAIS.....	54
5.1 Infraestrutura.....	54
5.2 Fibra de vidro resistente a álcalis (FV-AR).....	54
5.3 Fibra de carbono (FC).....	54
5.4 Barras de aço corrugado.....	55
5.5 Formulação (traço) do concreto.....	55
5.6 Formulação da matriz polimérica.....	60
6. MÉTODOS E PROCESSOS.....	62
6.1 Técnica de fixação das fibras contínuas na matriz cimentícia.....	64
6.1.1 Técnica de fixação 1.....	64
6.1.2 Técnica de fixação 2.....	65
6.1.3 Técnica de fixação 3.....	66
6.1.4 Técnica de fixação 4.....	67
6.1.5 Técnica de fixação 5.....	69
6.2 Técnicas de modificação da superfície da fibra	70
6.3 Desenvolvimento de grades para cura da matriz polimérica.....	73
6.3.1 Grade tipo 1.....	73
6.3.2 Grade tipo 2.....	74
6.3.3 Grade tipo 3.....	75

6.3.4 Grade tipo 4.....	75
6.3.5 Grade tipo 5.....	77
6.4 Fabricação de formas.....	78
6.4.1 Formas para ensaio de flexão.....	78
6.4.2 Formas para ensaio pullout.....	79
6.4.2.1 Forma para ensaio pullout com bloco único.....	79
6.4.2.2 Forma para ensaio pullout com bloco duplo.....	79
6.5 Preparo dos blocos de concreto.....	80
6.6 Desenvolvimento do ensaio pullout.....	82
6.6.1 Ensaio pullout - montagem 1.....	84
6.6.2 Ensaio pullout - montagem 2.....	86
6.6.3 Ensaio pullout - montagem 3.....	86
6.6.4 Ensaio pullout - montagem 4.....	87
6.7 Análise das fibras em meio alcalino.....	90
6.8 Análise da cura da matriz polimérica	92
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	94
7.1 Avaliação das fibras após imersão em solução alcalina.....	94
7.2 Determinação da temperatura de transição vítrea utilizando um calorímetro exploratório diferencial (DSC).....	100
7.3 Determinação do diâmetro do reforço.....	101
7.4 Ensaio de flexão a 4 pontos.....	103
7.5 Ensaio pullout.....	107
7.5.1 Resultados com bloco único.....	107
7.5.2 Resultados com bloco duplo.....	110
7.6 Considerações finais.....	116
8 CONCLUSÕES.....	117
9. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	120

LISTA DE TABELAS

Página

TABELA 1 - Classificação e regulamentação dos cimentos utilizados na fabricação dos corpos de prova deste trabalho.....	56
TABELA 2 - Trabalhabilidade do concreto (A%).....	58
TABELA 3 - Relação entre agregados miúdos e graúdos.....	59
TABELA 4 - Formulação do concreto – fase 1.....	59
TABELA 5 - Formulação do concreto – fase 2.....	60
TABELA 6 - Formulação da matriz polimérica para cura em estufa.....	61
TABELA 7 - Valores médios da tensão e módulo de elasticidade em ensaios de tração em hastes de FV-AR e FC.....	99
TABELA 8 - Tensões de cisalhamento dos corpos de prova reforçados com varetas de FV-AR e barras de aço, nas duas primeiras etapas do trabalho.....	109
TABELA 9 - Forças de arrancamento admitindo para efeito de comparação os mesmos diâmetros para varetas e barras de aço.....	109
TABELA 10 - Valores das variáveis utilizadas no planejamento de experimentos e resultados obtidos para força média de arrancamento (F_m) e tensão média de cisalhamento na interface fibra/matriz cimentícia (τ_m)	111
TABELA 11 - Comparação entre forças calculadas (F_{mC}) admitindo que todas as varetas tivessem diâmetros equivalentes ao da barra de aço (10 mm), como também tensões de cisalhamento, para ensaios pullout com bloco duplo.....	115

LISTA DE FIGURAS

Página

FIGURA 1 - Exemplo de deterioração causada por agentes agressivos na estrutura da “Ponte Metálica” em Fortaleza/CE: a) vista geral da estrutura danificada pela maresia; b) detalhe da ferragem corroída em um trecho da mesa da ponte.....	20
FIGURA 2 - Evolução média da resistência à compressão em relação à idade do cimento comum (CPII) e cimento de alta resistência inicial (CPV-ARI)	36
FIGURA 3 - Peças de concreto simples e armado: a) exemplo da ruptura frágil em uma peça de concreto simples; b) as fissuras são decorrência do alongamento do aço em uma peça de concreto armado.....	37
FIGURA 4 - Detalhes de um elemento de reforço: a) perspectiva mostrando respectivamente um segmento de fibra (1 roving), uma haste com 9 rovings e uma vareta; b) corte esquemático mostrando respectivamente um roving de fibra com diâmetro 0,55 mm, uma haste de 9 rovings com diâmetro 3,75 mm e uma vareta com diâmetro 6,50 mm; c) vista da extremidade de uma vareta.....	42
FIGURA 5 - Representação da zona de atrito gerado pelas ranhuras em uma barra de aço ($\varnothing=6,3$ mm) submetida a esforços de tração.....	43
FIGURA 6 - Ensaio típico de arrancamento (pullout) para determinação da resistência cisalhante da interface fibra/matriz (Chamis apud Marinucci 2011)....	44
FIGURA 7 - Equilíbrio de forças em um elemento de reforço de comprimento dx na interface fibra/matriz.....	45
FIGURA 8 - Vetores que caracterizam a aderência da vareta com a matriz cimentícia: a) adesão; b) atrito; c) mecânica.....	46
FIGURA 9 - Influência da altura da camada de concreto no adensamento sobre o reforço posicionado na face inferior de uma estrutura.....	47
FIGURA 10 - Redução da área de aderência pelo acúmulo da água de exsudação sob o diâmetro de um elemento de reforço estrutural.....	48
FIGURA 11 - Trajetórias das principais tensões atuantes na zona de ancoragem de uma barra de aço inserida em uma matriz cimentícia sob ação da força F	48

FIGURA 12 - Seção longitudinal de um bloco na zona de atrito, interface vareta/matriz cimentícia.....	49
FIGURA 13 - Ensaio de arrancamento (pullout) utilizado para determinação da resistência cisalhante da interface vareta/matriz cimentícia.....	49
FIGURA 14 - Diagrama das tensões de arrancamento, com os valores últimos das curvas: 1 para barras de aço (T_{bus}); 2 para varetas de fibras (T_{bf}).....	50
FIGURA 15 - Interpretação geométrica dos efeitos de um planejamento fatorial 2x3: a) os efeitos principais são contrastes entre faces opostas; b) os efeitos da interação são contrastes entre planos diagonais.....	52
FIGURA 16 - Interpretação geométrica dos efeitos nas barras de aço com um planejamento fatorial 2x2: a) e b) os efeitos principais estão entre arestas opostas; c) o efeito de interação é o contraste entre as duas diagonais.....	53
FIGURA 17 - Novelo de fibra de vidro-AR.....	54
FIGURA 18 - Novelo de fibra de carbono.....	55
FIGURA 19 - Barra de aço corrugado classe CA-50.....	55
FIGURA 20 - Ábaco de Abrams para cimento comum, neste caso, CP11-32, utilizado na primeira fase dos trabalhos.....	57
FIGURA 21 - Ábaco de Abrams para cimento CPV-ARI, utilizado na segunda fase dos trabalhos.....	58
FIGURA 22 - Diagrama do processo de fabricação da vareta. Umectação das mechas de fibras, aplicação da rugosidade e consolidação do reforço pela cura térmica.....	63
FIGURA 23 - Diagrama de fluxo do processo de fabricação do corpo de prova para extração dos resultados dos ensaios de tração e pullout.....	63
FIGURA 24 - Montagem de uma amostra em forma dupla com fibra contínua sem preparo superficial, distribuída diretamente sobre a massa de concreto na região de boa aderência da amostra.....	64

FIGURA 25 - Forma desmontável para o posicionamento e alinhamento das fibras na matriz de concreto: a) forma de montagem rápida; b) exemplo do conjunto, detalhando a perfuração nas laterais da forma.....	65
FIGURA 26 - Aparato para alinhar mechas de fibras contínuas no concreto: a) montagem do aparato; b) simulação da distribuição contínua de 1 roving de fibra em 16 linhas.....	66
FIGURA 27 - Método simplificado: a) transferência da fibra direto do novelo para o pente alinhador; b) um nível de reforço montado com 9 linhas de 1 mecha.....	67
FIGURA 28 - Montagem manual de uma amostra: a) posicionamento de um pente descartável no nível externo do corpo de prova (removido sem reaproveitamento no final da cura); b) preenchimento da forma; c) extremidade de um corpo de prova com dois níveis de reforços após o período de cura.....	68
FIGURA 29 - Ensaio de flexão em corpo de prova cilíndrico: a) corpo de prova com as fibras fixadas por pentes descartáveis; b) a ruptura frágil da matriz cimentícia facilitou a observação do escorregamento das fibras internas da mecha.....	69
FIGURA 30 - Preparação de corpos de prova com fibras torcidas: a) o número de voltas e o comprimento das tranças foram controlados para manter a homogeneidade das amostras; b) as tranças foram fixadas ao pente alinhador, em cinco linhas com 18, 28 e 52 mechas cada; c) o reforço foi fixado manualmente nas extremidades da forma para manter uma geometria retilínea.....	70
FIGURA 31 - Preparo de hastes: a) corte das mechas nos comprimentos definidos para o ensaio; b) preparo da matriz polimérica segundo rigoroso controle quantitativo; c) tanque para impregnação das mechas; d) suporte para impregnação de matriz polimérica.....	71
FIGURA 32 - Definição das classes de rugosidade.....	72
FIGURA 33 - Impregnação das fibras e fixação da rugosidade de areia com granulometria controlada.....	73
FIGURA 34 - Grade tipo cavalete para cura de matriz polimérica.....	73
FIGURA 35 - Grade vertical para cura da matriz polimérica.....	74
FIGURA 36 - Grade tipo 3: a) montagem do sistema; b) tensionamento da fibra; c) sistema pronto para ser levado à estufa.....	75

FIGURA 37 - Detalhes da grade para 40 varetas: a) detalhe do cravamento de um pino; b) detalhe do desprendimento da areia pela vibração do cravamento; c) grade de 40 posições no interior da estufa; d) grade inutilizada pela percolação da matriz polimérica.....76

FIGURA 38 - Sequência de movimentos para a cura de 14 varetas: a) a base contém as furações para passagem da chave de rasgo e os suportes metálicos para estiramento da fibra, que é fixada com fita adesiva, que também é utilizada para delimitar o comprimento da fibra que será impregnado; b) a chave de rasgo atravessa o suporte para fixar a fibra com a sapata da grade.....77

FIGURA 39 - Fixação das fibras e preenchimento de uma grade: a) detalhe da chave de rasgo fixando a fibra à sapata, protegida por material antiaderente; b) detalhe de uma grade com 14 varetas preparadas para serem curadas.....78

FIGURA 40 - Modelo de forma utilizada nos ensaios de flexão.....78

FIGURA 41 - Forma para pullout em amostra de bloco único.....79

FIGURA 42 - Forma para pullout em amostra de bloco duplo.....80

FIGURA 43 - Preparo do concreto com betoneira elétrica: a) betoneira de eixo móvel para operação manual; b) traço para tingir o interior da betoneira.....80

FIGURA 44 - Preparo de corpo de prova de bloco duplo: a) agitação da massa de concreto; b) preenchimento de forma para ensaio pullout.....81

FIGURA 45 - Aparelho para cura submersa em água potável saturada de cal: a) tanque com capacidade de 500 L e instalação para troca periódica de água; b) corpos de prova para ensaio de flexão; c) peças de bloco único para ensaio pullout; d) idem com blocos duplos.....82

FIGURA 46 - Corte longitudinal de um corpo de prova na região do reforço: a) detalhe da ação da força de cisalhamento (C) e de tração (F) na região de uma vareta; b) detalhe da ação de C e F na região de uma barra de aço.....83

FIGURA 47 - Primeiro aparato experimentado para ensaio pullout.....84

FIGURA 48 - Proteção das extremidades da fibra: a) tabs sobre uma mecha; b) tabs sobre uma haste.....85

FIGURA 49 - Proteção da extremidade de uma vareta com diâmetro aproximado de 3 mm no ponto de contato com as garras da máquina de ensaio.....85

FIGURA 50 - Segunda opção de ensaio pullout: a) montagem do ensaio com pinça de aperto transversal; b) detalhes da fixação das garras planas aos tabs..**86**

FIGURA 51 - Aparato de ensaio de corpo de prova de bloco único mostrando a haste perfurada para ser fixada na garra superior da máquina de ensaio e a fenda para passagem e centralização da vareta.....**87**

FIGURA 52 - Última montagem experimentada para execução dos ensaios pullout: a) aparato de ensaio para corpo de prova de bloco duplo; b) detalhes de um corpo de prova de bloco duplo para ensaio pullout.....**88**

FIGURA 53 - Corpo de prova de bloco duplo: a) esquema da montagem com ênfase na posição do reforço; b) corte longitudinal do corpo de prova ilustrando as dimensões do conjunto e o sentido dos esforços aplicados no ensaio pullout.....**89**

FIGURA 54 - Montagem da simulação de ambiente agressivo: a) novelos de fibras, hastes, água e solução de carbonato de sódio utilizados no ensaio; b) amostras em solução de carbonato de sódio (pH 12) e água (pH 7).....**91**

FIGURA 55 - Preparo das hastes para ensaio de tração: a) secagem das fibras ao ar; b) identificação das hastes de fibra de vidro; c) ensaio de uma haste de carbono.....**92**

FIGURA 56 - Curva genérica da transição vítrea de um polímero.....**93**

FIGURA 57 - Hastes de FV-AR mantidas em ambiente alcalino.....**95**

FIGURA 58 - Hastes de FC mantidas em ambiente alcalino.....**95**

FIGURA 59 - Hastes de FV-AR mantidas em ambiente neutro.....**96**

FIGURA 60 - Hastes de FC mantidas em ambiente neutro.....**96**

FIGURA 61 - Hastes preparadas a partir de mechas de FV-AR mantidas em ambiente alcalino.....**97**

FIGURA 62 - Hastes preparadas a partir de mechas de FV-AR mantidas em ambiente neutro.....**97**

FIGURA 63 - Hastes preparadas a partir de mechas de FC mantidas em ambiente alcalino.....**98**

FIGURA 64 - Hastes preparadas a partir de mechas de FC expostas em ambiente neutro.....	98
FIGURA 65 - Superfície de um segmento de vareta com 3,75 mm de diâmetro exibindo o aspecto vitrificado devido à matriz polimérica envolvendo a fibra e à presença de grânulos de areia na superfície da haste.....	100
FIGURA 66 - Curva de Tg da amostra da matriz LY556/HY2918/DY062.....	101
FIGURA 67 - Detalhe dos reforços de fibra e de aço: a) geometria da superfície de contato de uma vareta; b) geometria da superfície de contato de uma barra de aço.....	102
FIGURA 68 - Seção transversal de um elemento de reforço de fibra de carbono indicando a diferença dos diâmetros considerados para o cálculo da tensão de cisalhamento.....	103
FIGURA 69 - Extremidade dos corpos de prova prismáticos: a) bloco sem reforço; b) bloco com uma camada de reforço; c) bloco com duas camadas de reforço; d) bloco com três camadas de reforço.....	103
FIGURA 70 - Ilustração da seção transversal do bloco de concreto mostrando o arranjo com 3 camadas de reforço.....	104
FIGURA 71 - Tenacidade da amostra proporcional ao aumento da quantidade de fibras contínuas imobilizadas.....	105
FIGURA 72 - Curva de flexão de uma amostra reforçada com 4 linhas de barras de aço com 6,3 mm de diâmetro.....	106
FIGURA 73 - Curva de flexão de uma amostra reforçada com 5 linhas duplas, com 8 rovings torcidos na forma como recebidos de fibra de carbono (FC).....	106
FIGURA 74 - Curva de flexão de uma amostra reforçada com 9 varetas com a rugosidade provocada pelos grânulos de areia.....	107
FIGURA 75 - Representação gráfica dos resultados dos ensaios pullout: a) com varetas de fibras; b) com barras de aço corrugado.....	112
FIGURA 76 - Curva de carregamento versus deformação de dois ensaios pullout com concreto C40 e barras de aço 3/8" e 1/4"	113

FIGURA 77- Curva de carregamento versus deformação de quatro ensaios pullout com concreto C40..... **114**

FIGURA 78 - Curva de carregamento versus deformação de quatro ensaios pullout com concreto C30..... **114**

1 INTRODUÇÃO

A necessidade e a curiosidade permanentes do homem fizeram com que ele encontrasse soluções para edificar em diferentes tipos de solos. Aprendeu a diminuir o número de vazios em solos arenosos para aumentar sua densidade e a reduzir a umidade no caso de solos argilosos. Conseguiu usar folhas, ramos, outras fibras vegetais e rochas para transformar terrenos instáveis em apoio resistente para edificações rudimentares. Ele utilizou materiais de construção antes mesmo de descobrir sua consciência científica. (Vargas, 1977 e Castro, 1994).

Surgiram, então, os primeiros materiais compósitos para aplicação em edificações, que poderiam ser definidos como um material multifásico que apresenta uma combinação de propriedades das fases constituintes, resultando em um produto final com propriedades superiores. Outra definição para compósito encontrada na literatura é a de um material artificial e multifásico, constituído por fases quimicamente diferentes e que apresenta uma interface bem definida entre os materiais constituintes. (Callister, 2002).

Mas foi somente entre a idade dos metais e o início da civilização (6000 a 4000 AC) que surgiram as primeiras misturas de argila, cinza, materiais orgânicos, cal e areia para aplicação nos mais diversos tipos de construção. Essa prática se modificou no início do século XIX, com a obtenção, em 1824, por Joseph Aspdin, da patente de um pó denominado cimento portland e sua incorporação à argamassa; e em 1855, na França, Joseph L. Lambot publicou pela primeira vez um artigo sobre a construção de um barco de concreto armado com barras de aço ou, como definido por Callister (2002), Compósito de Concreto.

Neste curto período de pouco mais de um século e meio de conhecimento e uso do cimento portland, as armaduras metálicas têm sido aplicadas como reforço do concreto, mas foi somente a partir das primeiras décadas do século passado que o uso de fibras não metálicas associadas à

argamassa, tijolos e pisos começou a ser efetivamente estudado para a obtenção de um material mais resistente. (Page e Page, 2007).

A palha, para melhorar a resistência de tijolos, o sisal, como reforço de estuque, o amianto, no enrijecimento de produtos cerâmicos, telhas e tubos ilustram algumas das aplicações práticas do uso de fibras em diferentes tipos de materiais utilizados regularmente na engenharia civil. O desejado é tornar a matriz cimentícia mais resistente à tração, ao impacto e à fadiga, mais tenaz e dúctil. Também estão disponíveis para esse fim fibras de vidro, carbono, aço carbono, aço inox, polietileno, polipropileno e outras. (Tesuka, 1999).

Diante dessas possibilidades surgiram, então, propostas para o uso desses diferentes tipos de fibras sintéticas como reforço em elementos estruturais em viadutos e pontes deteriorados pela sobrecarga em vigas e pilares, ou ainda para a adequação estrutural em edifícios comerciais por mudança do tipo de utilização, corrosão das armaduras, fragmentação do concreto, erros de projeto ou de execução, agressões acidentais sobre as estruturas, como explosões, incêndios ou abalos sísmicos.

Grande parte dessas ocorrências gera uma quantidade considerável de resíduos de construção, de demolições, os quais podem ser aproveitados como carga inerte em novas construções após moagem, ou contribuir continuamente para a rápida saturação dos espaços disponíveis em aterros públicos, se não forem despejados inadequadamente em rios, terrenos vazios ou outros locais impróprios, cujo impacto no meio ambiente é cada vez mais preocupante. A apresentação de soluções para esse problema em médio e longo prazo deve ser encarada como um grande desafio, e a utilização de compósitos de fibras sintéticas para reforços de estruturas surge como uma alternativa para essas patologias.

Portanto, apesar de essa necessidade ainda não fazer parte dos anseios principais do início do presente milênio, alguns trabalhos resultaram em ações correlatas, evitando a reconstrução de diferentes tipos de obras com a reestruturação de reforços externos às estruturas.

A associação de fibras sintéticas e argamassa registra a primeira aplicação prática utilizando o método denominado *Mechanically Fastened Fiber-Reinforced Polymer* (MF-FRP) no trabalho de restauração da estrutura de uma

ponte de 7.9 m de comprimento, construída em 1930 em Egerton-Wisconsin-USA. A pesquisa realizada pelos autores do projeto no período de novembro de 2001 a agosto de 2003, totalizando 22 meses, envolveu a inspeção de diversas pontes que apresentavam problemas estruturais antes de selecionarem uma que fosse adequada para receber o reforço com fibras. Foi feita a avaliação da capacidade de carga e a seleção de um sistema de reforço adequado ao trabalho proposto. Também foram executados testes de laboratório e análises teóricas. (Bank et al., 2003).

Estruturas como silos ou chaminés de tijolos foram recuperadas por meio da técnica de envolvimento externo por uma manta de fibras de carbono, fixada e revestida por uma fina camada de matriz polimérica. (Meier, 2005).

Elementos arquitetônicos, como por exemplo, capitéis e gárgulas, ou restaurações em edificações históricas sobre materiais como madeira, metais ou rochas, podem ser recuperados com fibras, que, devido à sua mínima espessura, não alteram as formas do substrato. (Jacob, 2007).

Atualmente, há um número crescente de estudos sobre aplicações de macro fibras sintéticas, tecidos ou mantas de fibras de carbono na construção civil, como reforço às solicitações axiais, de flexão e de cisalhamento. (Clever Reinforcement Company, 2014).

No Brasil, fibras descontínuas já têm sido utilizadas para controle de fissuras e em concreto jateado; porém, para reforço de estruturas o método carece de um estudo mais detalhado para que os resultados possam ser futuramente uma alternativa em produções de larga escala, possibilitando sua aplicação em processos construtivos.

No presente trabalho, está sendo proposta a incorporação de varetas com fibras contínuas ao concreto ainda fresco, produzindo compósitos com possível utilização na fabricação de elementos estruturais para aplicações, por exemplo, em peças com exposição a agentes agressivos, evitando custos extras com reconstrução e diminuindo, conseqüentemente, a geração de entulho. Um exemplo desse tipo de deterioração pode ser verificado na “Ponte Metálica” em Fortaleza/CE, FIG.1, interditada após ruir pela ação da maresia.

Uma vez que o público leitor pode ser composto por pesquisadores e estudantes de diferentes áreas de conhecimento, procurou-se, mesmo que

resumidamente, detalhar temas que pudessem ser desconhecidos para aqueles não afeitos à engenharia civil, como por exemplo, no capítulo 4.

FIGURA 1 - Exemplo de deterioração causada por agentes agressivos na estrutura da “Ponte Metálica” em Fortaleza/CE: a) vista geral da estrutura danificada pela maresia; b) detalhe do metal corroído em um trecho da mesa da ponte

fonte: autor da tese

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é apresentar uma técnica de incorporação de fibras contínuas em uma matriz cimentícia, produzindo compósitos com possível utilização na fabricação de elementos estruturais.

O objetivo específico é desenvolver uma técnica de modificação da superfície da fibra, criando uma rugosidade com o propósito de promover uma retenção da fibra à matriz cimentícia, ou seja, melhorar a interação entre esses dois materiais constituintes do compósito.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Na primeira sequência dos trabalhos selecionados para este capítulo, está indicado o uso de reforços com materiais sintéticos como fibras descontínuas inseridas à massa de concreto. A seguir, mantas e laminados de fibras foram utilizados como reforços externos de estruturas já comprometidas ou cuja capacidade de carga tivesse de ser reconsiderada. Nesses casos, foi preciso aderir os reforços sobre a superfície de estruturas como pilares, vigas e seções de lajes.

Alguns estudos sobre a durabilidade de compósitos cimentícios reforçados com fibra de vidro foram executados por Bentur et al. (1985). Como resultado, foram identificados diferentes graus de degradação das propriedades mecânicas nesses elementos de concreto, como fragilização e perda da resistência à tração devido à alcalinidade do cimento que ataca essas fibras. A análise desses compósitos em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) identificou que com o envelhecimento do material, o comportamento à flexão apresentou maior taxa de degradação em compósitos nos quais os produtos de hidratação cresceram entre os filamentos de vidro, ainda que, ao final de um ano, sua degradação química não representasse um papel importante.

Continuando, os autores complementam que em comparação à fibra de vidro tipo E (FV-E), própria para linhas de dados, que não apresenta proteção superficial, nos corpos de prova moldados com filamentos de fibra de vidro com adição de óxido de zircônio (ZrO_2), denominada fibra de vidro álcali-resistente (FV-AR), os testes indicaram considerável diminuição entre 20% e 40% da taxa de redução das propriedades mecânicas do compósito; mesmo assim, essa fibra FV-AR não pode ser classificada como imune à degradação pelos efeitos do crescimento de produtos de hidratação em seu interior.

Mas, apesar da condição quebradiça da matriz cimentícia, ambas as fibras continuaram retendo considerável parcela da sua tensão, o que não significa que a FV-AR não possa ser utilizada, apesar da possibilidade de a

ocorrência de ataque químico vir a ser um problema após longos períodos de serviço.

A possibilidade de se obter um aumento na capacidade de carga, ao se compararem dois corpos de prova cilíndricos armados com barras de aço aos resultados de outros três sem armaduras metálicas, porém encamisados por compósitos tubulares de FV-AR, foi motivo de um estudo desenvolvido por Yao et al. (2001). Essa substituição eliminou a ocorrência de degradação eletroquímica, aumentou a resistência à compressão, a absorção de energia e a ductilidade das peças, as quais foram projetadas para apresentar idêntica resistência à compressão axial. Os corpos de prova cilíndricos, embutidos em blocos retangulares de concreto armado, foram submetidos a carregamentos axiais constantes, e a cada deslocamento no pico de tração, três ciclos de cargas laterais foram conduzidos. Foi concluído que a ausência de armadura lateral compromete a resistência a esforços laterais cíclicos elevados, e que a ductilidade do corpo de prova reforçado com aço foi menor do que com reforço de FV-AR, ou seja, a resistência à compressão foi aumentada pelo confinamento da coluna; o mesmo foi observado para a resistência ao cisalhamento da peça e, conforme a aderência fibra/concreto e dureza do monolito, pode haver aumento também na resistência à flexão da estrutura.

Em uma estrutura podem ocorrer falhas por diversas causas, as quais podem conduzir ao aparecimento de danos e, como consequência, à diminuição de seu desempenho. A repetição desses danos exige a introdução de limites mais rígidos nos códigos de dimensionamento, e a necessidade de se encontrarem técnicas de reforço de aplicação mais simples e rápidas para recuperação de estruturas assume uma posição de destaque na indústria das construções.

Com a necessidade de haver pouca influência na arquitetura e elevadas características mecânicas e de durabilidade, Dias et al. (2002) consideraram como solução viável a aplicação de compósitos reforçados com fibras de carbono (CFRP) aderidos à superfície externa de estruturas de concreto. Foram comparados em relação a uma viga de referência os comportamentos de vigas similares que receberam reforços com dois diferentes sistemas de CFRP unidirecionais: o curado *in situ* (manta flexível) e o pré-fabricado (laminado), submetidos a ensaios de flexão. Cada sistema foi analisado segundo duas

diferentes soluções de reforços e pela ausência e adição de mecanismos externos de ancoragem, em um total de cinco corpos de prova. A adesão da manta e do laminado ocorreu por meio de adesivo epóxi. A ancoragem do laminado ocorreu com a sobreposição de suportes de aço, uma em cada extremidade do reforço. As ancoragens da manta flexível foram possíveis com a colagem de duas camadas de mantas cujas fibras ficaram inclinadas 90° entre si, posicionadas nas laterais e face tracionada das vigas, segundo o modelo da treliça de Mörsch, considerando 38° de inclinação para as bielas de compressão.

Nesse trabalho, Dias et al. (2002) observaram uma elevação de 57% no valor da capacidade última de carga em relação à viga não reforçada, independentemente do sistema utilizado (manta ou laminado), e um valor pouco superior para as vigas com ancoragens, exceto no caso do laminado com ancoragem quando a ruptura se deu por descolamento do reforço, não impedido pela fixação metálica por falta de rigidez e aperto adequado. Também ocorreu uma menor deformação nas vigas reforçadas em relação à viga de referência.

Em outro estudo dos mesmos autores, foi aplicado o reforço em faixas de laje, sem e com pré-fissuração, para ser comparado com uma peça intacta e sem reforço. (Dias et al., 2004). Nesse estudo, foram utilizadas mantas flexíveis e laminados, a eles relacionando vantagens adicionais como seu baixo peso específico, facilidade de transporte e manuseio, além de sua disponibilidade em comprimentos praticamente ilimitados.

Ainda nesse mesmo trabalho, a geometria do reforço foi determinada para que fosse dobrada a resistência das peças, e a deformação máxima do compósito reforçado com fibras de carbono (CFRP) fosse inferior a 50% de seu valor característico, de forma a garantir que não ocorresse o escoamento do aço, mas que permitisse o surgimento de uma fissuração prematura, isto porque, para ser necessário um reparo, a peça deve apresentar um nível de deterioração recuperável.

Continuando com Dias et al., (2004), para a aplicação dos sistemas de CFRP, a superfície da laje foi preparada para garantir as condições de aderência, e o reforço foi instalado. Dois tipos de ensaios à flexão foram executados: previamente à colocação dos reforços, as faixas de lajes foram carregadas até atingirem determinado padrão de fissuração; posteriormente, os modelos foram

carregados até a ruptura. Nos dois casos, os ensaios foram à flexão em quatro pontos. Três foram os estágios dos ensaios em que os resultados puderam ser analisados: o concreto não fissurado, o concreto fissurado com o aço não alongado e o concreto fissurado após o alongamento do aço. Verificou-se que a menor rigidez dos modelos pré-fissurados tende a se igualar aos modelos não pré-fissurados após o nível de carga de pré-fissuração ser atingido. As fissuras apresentaram menor espaçamento nos modelos reforçados do que nos modelos sem reforços. O desempenho dos reforços foi equivalente, com um aproveitamento melhor das mantas em relação aos laminados.

Kutarba et al.(2004) analisaram o comportamento de vigas de concreto, as quais, após uma pré-fissuração provocada, foram submetidas ao ataque de uma solução salina e a um potencial elétrico de 5 *Volts* para acelerar o processo de corrosão, pelo período de 28 dias, simulando, assim, o ambiente marinho. As delaminações da estrutura e das partes comprometidas das barras de aço foram removidas e as superfícies foram recompostas até atingirem as dimensões originais da peça, seguindo-se a posterior aplicação de sistema para reforço de manta de CFRP. Metade dessas amostras foram imediatamente ensaiadas à flexão em quatro pontos para avaliar a capacidade de recuperação estrutural de vigas recuperadas e reforçadas. As demais foram submetidas a nova etapa de corrosão antes de serem testadas da mesma forma até a ruptura.

Ainda segundo Kutarba et al. (2004), o arranjo experimental foi planejado para permitir a observação dos efeitos após um e dois ciclos de exposição à corrosão, ou seja, a determinação da vida útil do reforço externo de polímeros reforçados por fibras aplicados externamente a vigas de concreto. Nas estruturas de referência, a perda de capacidade de carga devido à corrosão controlada foi inferior a 15%. Nas vigas reforçadas, foi mensurado um ganho de até 32%, com uma perda inferior a 12% após o segundo ciclo corrosivo, também em relação às estruturas de referência. Isso significa que a perda de rigidez pode ser compensada com a aplicação de reforço externo e que esse reforço diminui a degradação quando a exposição ao ambiente agressivo é posterior à sua utilização.

Chenaf (2005) concentrou sua atenção para a praticidade da aplicação de reforços de fibra de carbono na recuperação ou reforço de edificações. Para

ele, todos os processos são baseados na qualidade da aderência conseguida pelo adesivo que une a estrutura e as fibras de carbono, seja para recuperar uma área ou alterar seu tipo de utilização. O pré-requisito para dimensionamento *in situ* é o conhecimento das propriedades mecânicas do compósito e tensões na estrutura para se projetar um reforço, e depois, verificar que o dimensionamento seja compatível com os resultados dos testes. A praticidade de sua aplicação permite a recuperação de obras de arte sem que ocorra alteração na geometria da estrutura, isto porque a baixa densidade da fibra permite trabalhar com camadas muito finas de reforço.

Para Chenal (2005), a limitação para o uso desse tipo de reforço na recuperação de estruturas danificadas, ou que passaram a ser submetidas a uma solicitação superior àquela para a qual foram projetadas, em parte se dá devido às repetidas perdas de aderência na interface laminado/matriz cimentícia observadas nos testes a que as peças são submetidas. Isso implica a necessidade de se detalhar mais precisamente o comportamento desses adesivos e as características das superfícies de contato.

A partir, possivelmente, de raciocínio similar, Matana et al. (2005) concentraram suas observações na hipótese de haver alguma relação em que a dimensão da rugosidade da superfície do concreto influencie a adesividade exigida pelo material de reforço no caso de solicitações à flexão. Ou, em outras palavras, se características inadequadas de adesão podem causar escamação com perda de aderência prematura do reforço externo.

Eles complementam que, não havendo uma norma específica para se medir a rugosidade de uma superfície, foi confrontado o resultado de um método subjetivo, que consiste na comparação, por observação pelo operador, de imagens contidas em nove lâminas plásticas com a superfície do substrato ao resultado da medida da rugosidade obtida por meio de perfilometria a laser. Prismas de concreto tiveram suas superfícies preparadas pelo jateamento de água; o aumento da pressão aumentou a rugosidade. Ficou padronizado o diâmetro do jato em 3 mm distante de 0 a 5 cm do bloco, com uma pressão média de 86 MPa. Quantidades diferentes de camadas de reforço foram aplicadas e submetidas a testes de arrancamento.

Para Matana et al. (2005), nesse trabalho, foi possível verificar que a variação da rugosidade na superfície do substrato não alterou a tensão de aderência, conforme observações nas formas de ruptura das amostras preparadas com os diferentes tipos de reforços. Após terem sido descritos esses trabalhos sobre a utilização de mantas e laminados de fibras colados às superfícies de elementos estruturais e corpos de provas, a seguir, serão descritos os estudos relativos à inclusão de fibras descontínuas ainda na fase de preparo do concreto. O concreto, quando apresentado sem adição de qualquer tipo de reforço, é um material frágil, de baixa resistência à tração, baixa ductilidade e instável diante da progressão de fissuras.

Ghugal e Deshmukh (2006) moldaram sobre mesas vibratórias corpos de prova a que inseriram FVAR com 12 mm de comprimento, em intervalos de 0,5%, até atingirem 4,5% em peso. Todos os resultados obtidos foram comparados aos valores das amostras de referência, sem adição de fibras. Os corpos de prova foram curados submersos por 28 dias e ensaiados com superfície seca.

De acordo com os autores acima, os valores da resistência à compressão e tração foram obtidos direta e respectivamente sobre os corpos de prova cilíndricos e prismáticos, e para cada intervalo das porcentagens de fibras. Outras características como trabalhabilidade, ductilidade, módulo de elasticidade e de Poisson puderam ser comparadas valendo-se de fórmulas empíricas e constantes normalizadas, associadas aos valores obtidos nos ensaios.

Ainda citando Ghugal e Deshmukh (2006), foram verificadas as seguintes alterações em relação às características iniciais do concreto: o aumento na porcentagem de fibras diminui a trabalhabilidade; aumenta as resistências à tração e compressão, a rigidez e a tenacidade. Porém, os ganhos das características finais do concreto reforçado com fibra foram proporcionais às quantidades de fibra misturada, mas variando essas quantidades de acordo com o tipo de força que se aplica, a qual gere uma resistência à compressão ou ao cisalhamento.

Figueiredo (2005) descreve as características e vantagens da utilização de fibras de aço e de polipropileno, seus aspectos tecnológicos e aplicações principais, conforme será relatado nos próximos seis parágrafos. A capacidade de

reforço proporcionada pela fibra ao concreto depende diretamente do seu módulo de elasticidade e da sua resistência mecânica.

Se comparadas ao módulo de elasticidade do concreto, as fibras com valores inferiores e baixa resistência mecânica devem ter aumentado seu teor para possibilitar sua utilização como reforço da matriz; essa medida pode inviabilizar a aplicação. No outro limite das possibilidades, se a fibra apresenta módulo de elasticidade maior que o concreto e alta resistência mecânica, a partir do ponto de ruptura da matriz começa sua atuação como reforço, caso sua resistência não seja superada, fato comum quando o consumo desse material é baixo.

As fibras metálicas são apresentadas com extremidades na forma de ganchos para aumentar a ancoragem e dimensões variando de 25 mm (curtas) a 60 mm (longas), e fornecidas soltas ou em pentes; as poliméricas são fornecidas nas formas monofilamentos e fibriladas, estas últimas detêm a característica de se abrir na forma de pequenas telas, após sua adição, durante o preparo do concreto, criando uma estrutura intertravada que melhora a capacidade de reforço.

Sua utilização deve ser associada à baixa resistência à tração do concreto, que dificulta a interrupção da propagação de fissuras. Assim, à medida que surgem as fissuras e essas vão se unindo, as fibras dispersas por todas as direções da matriz formam uma ponte de transferência de tensões entre os dois lados da fissura. Com isso, reduz-se a velocidade de propagação das fissuras, alterando o comportamento do material, que passa de frágil para pseudo-dúctil, adquirindo resistência pós-fissuração.

Os principais campos de aplicação para esse tipo de fibras são em reforço de pavimentos, revestimento de túneis e em peças pré-moldadas. No caso dos pavimentos, as vantagens estão na eliminação da estocagem, movimentação e colocação das armaduras e dos espaçadores. Se é utilizado concreto com consistência e vibração adequadas, pode ser garantido o reforço por todo o volume lançado, o que pode não ocorrer quando há deslocamento das armaduras metálicas. São desvantagens as possibilidades de empenamento do pavimento por retração diferencial, consequência de cura inadequada, o surgimento de pontos de ferrugem devido à corrosão das extremidades de fibras afloradas na

superfície e a necessidade de disposição de maior energia em caso de demolição da área.

Outro campo de aplicação é no revestimento de túneis urbanos, metroviários, de desvio, adução e esgotos, em que, na opção de uso de concreto projetado, com o comprimento das fibras limitado à metade do diâmetro da tubulação de transporte do concreto fresco (mangote), a sua grande vantagem, além do aumento da velocidade de trabalho, é a possibilidade de lançamento durante a escavação do local, reduzindo a ocorrência de escorregamentos e de acidentes. Contudo, exige constante controle tecnológico quanto à resistência inicial e propagação de fissuras.

A segunda opção de uso dessas fibras é com concreto pré-moldado, que é aplicado, no caso de escavação mecanizada, por meio de tuneladora. Com esse equipamento os segmentos são justapostos formando um anel que avança juntamente com o avanço da máquina. Seu uso acelera a produção das peças de revestimento, eliminando as etapas de fabricação e montagem das armaduras metálicas, e diminui as quebras de peças durante o manuseio no canteiro de obras, pois aumenta a resistência ao impacto.

Especificamente no caso de túneis, além de outras características técnicas associadas ao seu uso, as fibras de polipropileno têm sido aplicadas, pois, no caso de incêndio, elas se fundem criando pequenos canais para fuga dos vapores devido à água de saturação do concreto, evitando a ocorrência de lascamento explosivo.

As fibras vegetais, apesar de bastante estudadas, ainda apresentam limitações quanto ao seu uso na engenharia civil; mesmo assim, a sua inclusão em matriz cimentícia como substitutas das fibras de amianto foi analisada por Picanço e Ghavami (2008). Essas fibras podem ser utilizadas mais facilmente em locais de difícil acesso, onde a disponibilidade desses materiais viabiliza sua aplicação pelo baixo custo de obtenção e por se tratar de atitude salubre e ecologicamente correta. No baixo Amazonas, já existe pequena produção de curauá, que é uma qualidade de bromélia, para a confecção de cordas, cestas e tapetes.

Os autores aproveitaram a existência dessa cultura para analisar a possibilidade de seu aproveitamento como reforço de argamassas, com o objetivo

de melhorar a ductilidade e a capacidade resistiva pós-fissuração. Os corpos de prova submetidos a ensaios de compressão foram preparados com fibras cortadas com 15 mm, 25 mm e 45 mm de comprimento, inseridas na argamassa em frações volumétricas de 2% e 3%. A partir das deformações longitudinais e transversais foram calculados os valores dos módulos de elasticidade e de Poisson, e os resultados foram comparados aos valores obtidos de forma semelhante com argamassas reforçadas com fibras de sisal e juta.

Na melhor proporção estudada nesse trabalho, Picanço e Ghavami (2008) verificaram um ganho na capacidade de deformação da argamassa com a associação da fibra de carauá. E, apesar da diminuição da resistência à compressão máxima, os autores verificaram aumento na ductilidade e na resistência pós-fissuração em relação tanto às amostras sem reforço como às amostras com fibras de sisal e juta. A grande variação encontrada nos resultados se deve, sobretudo, ao uso de materiais naturais, não industrializados, sujeitos exclusivamente às características fornecidas pela natureza, o que impede a definição de rígidos padrões para cálculos que as envolvam.

O equilíbrio de um compósito, matriz e reforço, que pode ser interno ou externo, depende essencialmente da adesão que se consegue entre seus componentes. No caso do concreto armado, a aderência entre o concreto e as barras de aço não só permite uma eficiente transferência de carga da matriz para o aço, como também impede o escorregamento relativo entre as fases. Para isso ser possível, é fundamental observar também a compatibilização das deformações, de forma a anular os deslocamentos entre o reforço e o concreto.

Diante do exposto, verifica-se que é possível encontrar inúmeros trabalhos que apresentam resultados da incorporação de fibras vegetais, minerais e sintéticas, inseridas na massa de concreto. Em outros trabalhos, mantas e laminados de fibras sintéticas foram posicionados e fixados nas superfícies externas de estruturas com o objetivo de recuperar a capacidade resistiva original ou aumentar essa capacidade de carga para alteração de seu uso.

As pesquisas bibliográficas revelam também a inexistência de estudos que proponham a incorporação de fibra contínua na matriz cimentícia e a modificação da superfície da fibra, o que dá ao trabalho seu caráter de ineditismo.

4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1 Considerações iniciais

Um material compósito é obtido pela união de pelo menos dois materiais quimicamente diferentes, combinados artificialmente em escala macroscópica, de forma que as fases componentes possam se apresentar separadas por uma interface distinta. Formam uma unidade que apresenta um balanceamento das propriedades individuais de cada componente, de modo a obter uma melhor combinação dessas propriedades. Portanto, em um projeto de material compósito, é possível definir quais características mecânicas serão priorizadas e quais serão minimizadas na combinação dos componentes para atender a determinada necessidade de aplicação. Isso difere do que se observa com as ligas metálicas e alguns materiais cerâmicos, cujas combinações ocorrem em escala atômica, sendo as fases criadas por fenômenos da natureza. Ou seja, a característica básica dos compósitos é combinar pelo menos duas fases distintas denominadas matriz e reforço. (Callister, 2002; Mendonça, 2005; Levy e Pardini, 2006).

Segundo Caetano et al. (2004), a incorporação de materiais fibrosos em matrizes frágeis como o concreto tem como objetivo melhorar as propriedades do conjunto pela diminuição da quantidade, da profundidade e da velocidade de propagação das fissuras. Equivale dizer que quanto melhores as propriedades das fibras, melhor o desempenho do conjunto quanto à resistência à tração e à flexão, e maior será a capacidade portante pós-fissuração da matriz de concreto. Portanto, a associação desses materiais significa uma colaboração para que o compósito absorva uma maior quantidade de energia, a qual é dissipada pela resistência ao arrancamento e ruptura das fibras. Mais especificamente, microfibras retardam o surgimento de fissuras, favorecendo a resistência à tração quando o concreto ainda é jovem, e macrofibras melhoram seu comportamento pós-fissuração.

Um compósito, no qual uma das fases seja matriz cimentícia, pode receber a adição de materiais fibrosos, que podem ser naturais ou artificiais. Dos materiais naturais existentes, as fibras vegetais (sisal, coco, bambu, bananeira) apresentam natureza celulósica, de fácil preparo e obtenção pouco custosa. Todavia, sua durabilidade pode ser comprometida pelo caráter alcalino das matrizes cimentícias e pela variação do diâmetro das fibras na presença de umidade, o que pode ser em parte contornado com tratamento superficial prévio contra umidade e agentes agressivos. (Caetano et al., 2004).

Mais especificamente, a adição de fibras de coco e sisal em várias frações volumétricas e comprimentos altera o comportamento tensão-deformação das matrizes cimentícias, tornando viável sua aplicação como um material com maior ductilidade quando comparado ao material sem adição das fibras. Por outro lado, a substituição de parte do cimento por micro sílica e escória de alto forno gera misturas com resistência ligeiramente mais elevada que as preparadas apenas com cimento. Isso leva a um aumento da resistência cisalhante e alteração do modo de ruptura da matriz, pois os corpos de prova não se separam em diversos pedaços quando se atinge o valor da carga de ruptura. (Toledo Filho et al., 1997).

Porém, um aumento excessivo no teor de fibras aumenta a área de molhagem, o que reduz a quantidade de água necessária para a mistura e compromete a trabalhabilidade e o incremento da resistência esperado, caso sejam fibras vegetais sem proteção superficial. O ideal é trabalhar dentro do volume ótimo de fibras que garante uma distribuição uniforme dentro da matriz, (Caetano et al., 2004) e acima do comprimento crítico, valor limite para se observarem fraturas na fibra causadas pelas tensões transferidas na interface com a matriz, (Marinucci, 2011), consideração adequada para qualquer tipo de fibra.

As fibras de amianto, consideradas como fibras naturais, estão hoje sob restrições de uso, pois sua manipulação durante todo o ciclo de fabricação foi considerada prejudicial à saúde. Igualmente classificada como mineral tem-se a fibra de vidro produzida pela fusão da sílica e outros sais em menor proporção na mistura e sucata de vidro limpo, que resulta em uma substância inorgânica, homogênea e amorfa. (Levy e Pardini, 2006).

A terceira subdivisão dos materiais naturais contempla as fibras animais, que não são aproveitadas na fabricação de compósitos de matriz cimentícia.

Fibras sintéticas descontínuas têm sido incorporadas à argamassa com o objetivo de minimizar a ocorrência de fissuras. A regeneração da estrutura ocorre pela ação dessas fibras, que compõem aproximadamente 2% em relação ao volume total da mistura e formam uma rede multidirecional de reforços. O resultado tem sido a obtenção de um material flexível cuja regeneração ocorre mesmo após grandes deformações, continuando a se comportar como novo. (Faria e Rocha, 2009).

Na bibliografia pesquisada, foi possível verificar que a utilização de fibras descontínuas na construção civil, dependendo do comprimento, é indicada tanto para controlar as deformações e fissuras nas primeiras idades de endurecimento do concreto, como para servir de elemento de resistência à velocidade de propagação e abertura de fissuras, aumentando a tenacidade do concreto diante das cargas atuantes. (Levy e Pardini, 2006).

A fase matriz de um material compósito é contínua e envolve a fase reforço. No caso de um compósito de matriz cimentícia, esta é composta pela mistura de cimento, agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita) e os poros, denominada concreto, que, quando fresco, ainda com a consistência plástica, acomoda-se a qualquer geometria e dimensão de um molde. O preparo, a aplicação e a regularização dos constituintes do concreto, no país, são normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que estabelece o padrão de referência mediante a determinação da qualidade e quantidade das matérias-primas necessárias para cada tipo de aplicação; a identificação correspondente está indicada conforme o caso.

Após a cura do concreto, o resultado é uma estrutura rígida e homogênea, em que a força de aderência entre as partes se dá devido ao atrito físico entre seus componentes, e a estabilidade da estrutura é garantida pela absorção das ações, tanto pela matriz quanto pelo material de reforço. (Leonhardt, 1978).

Entretanto, quando o elemento de reforço é representado por uma mecha de fibra, a adesão fica prejudicada pela ausência de qualquer recurso

diretamente sobre a superfície da fibra, que possa favorecer sua retenção junto à matriz cimentícia. Além de uma matriz aglutinadora, conforme já foi citado, também é preciso modificar a superfície lisa dessa matriz polimérica para garantir melhor aderência com a matriz cimentícia.

Segundo Caetano et al. (2004), a qualidade da aderência na interface reforço/matriz polimérica é um fator importante no desempenho do compósito. É responsável por transferir os efeitos do carregamento exercido sobre a matriz cimentícia para os elementos de reforço representados pelas fibras, que absorvem a porção dessa energia até o limite de sua capacidade resistiva.

Neste trabalho, serão feitas avaliações segundo normas e procedimentos construtivos da engenharia civil e, na ausência destes, serão propostos procedimentos e ensaios adequados ao propósito do presente estudo.

4.2 Matriz cimentícia

As características do concreto são decorrentes das características de seus componentes. A qualidade e quantidade do cimento, a granulometria e impurezas dos agregados, a qualidade, quantidade e impurezas da água de amassamento e as quantidades dos aditivos influem na qualidade final do concreto produzido. São quatro os principais parâmetros a serem considerados na produção do concreto: 1) o traço, que determina as proporções dos materiais conforme a resistência final esperada; 2) a trabalhabilidade, que permite seu transporte e aplicação quando ainda fresco, nos diferentes moldes; 3) a consistência, que garante a coesão dos constituintes; 4) a mobilidade durante seu preparo, lançamento e adensamento. (Leiderman, 1975). Existem diversos métodos para dosagem de concreto (traço), os quais são mais ou menos complexos e trabalhosos. Porém, nessa proporção ideal, e qualquer que seja o método escolhido, pode ser expressa em massa ou em volume; é preferível o uso da massa seca de materiais por ser a mais precisa. (Tulikian e Helene, 2011).

Genericamente, denomina-se cimento qualquer material capaz de unir agregados com o objetivo de formar um corpo sólido. (Pfeil, 1985). O cimento portland (como é mundialmente conhecido) é um pó fino com propriedades aglutinantes, que endurece em contato com a água e assim permanece sem

possibilidade de decomposição futura que não seja de forma mecânica. Também é considerado o elemento quimicamente mais ativo em uma matriz cimentícia.

Aluminatos, sulfatos e álcalis dão origem a uma reação exotérmica, quando o pó de cimento entra em contato com a água de hidratação, formando compostos de menos solubilidade, os quais originarão o concreto. (Quarcioni, 2008).

“O clínquer tem como matérias-primas o calcário e a argila, ambos obtidos de jazidas em geral situadas nas proximidades das fábricas de cimento. A rocha calcária é primeiramente britada, depois moída e em seguida misturada, em proporções adequadas, com argila moída. A mistura formada atravessa então um forno giratório de grande diâmetro e comprimento, cuja temperatura interna chega a alcançar 1450°C. O intenso calor transforma a mistura em um novo material, denominado clínquer, que se apresenta sob a forma de pelotas. Na saída do forno o clínquer, ainda incandescente, é bruscamente resfriado para posteriormente ser finamente moído, transformando-se em pó. O clínquer em pó tem a peculiaridade de desenvolver uma reação química em presença de água, na qual ele, primeiramente, torna-se pastoso e, em seguida, endurece, adquirindo elevada resistência e durabilidade. Essa característica adquirida pelo clínquer, que faz dele um ligante hidráulico muito resistente, é sua propriedade mais importante.” GUIA BÁSICO DE UTILIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND, (2002).

A aplicação de diferentes aditivos ao clínquer permite criar os vários tipos de cimentos conhecidos. Dessas adições, a mais importante é o gesso, que tem a função de controlar o tempo do início da cura, isto é, do endurecimento. (Pfeil, 1985).

O cimento CPV-ARI, embora diferenciado do tipo comum pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, é, de fato, um tipo particular desse, que, devido à adição de diferentes quantidades de calcário e argila ao clínquer e com uma moagem mais fina, atinge altas resistências logo nos primeiros dias de preparo.

A amplitude das resistências desses dois tipos de cimentos pode ser observada na FIG.2.

FIGURA 2 - Evolução média da resistência à compressão em relação à idade do cimento comum (CPII) e cimento de alta resistência inicial (CPV-ARI)

fonte: Guia Básico de Utilização do Cimento Portland (2002)

A durabilidade e o preço da argamassa e do concreto, associados a uma adequada resistência à compressão e rigidez, tornam-nos materiais de construção atraentes; entretanto, como materiais de características frágeis, apresentam baixa resistência à tração e pequena capacidade de deformação.

A associação com elementos de reforço torna-os tenazes, dúcteis e mais resistentes à tração, ao impacto e à fadiga. Ao mesmo tempo em que o concreto simples apresenta resistência à compressão de 20 a 50 MPa, ele pode alcançar somente 10% desse valor quando submetido a ações de tração. Com a adição de diferentes aditivos é possível superar esse valor, podendo ser atingidos 90 MPa nos concretos de alta resistência. A FIG.3 ilustra a ruptura em uma peça de concreto simples e armado; na FIG. 3(a), a ruptura ocorre bruscamente devido à baixa resistência à tração do concreto; na FIG. 3(b), numa peça de concreto armado submetida a um esforço de flexão, o equilíbrio é conseguido com a absorção dos esforços de tração pela armadura, combinada à absorção dos esforços de compressão pelo concreto. As fissuras são decorrência do alongamento do aço.

O projetista formula o traço para obtenção do tipo de concreto por meio de uma sequência de operações para a determinação das quantidades, conforme as características individuais de cada estrutura.

FIGURA 3 - Peças de concreto simples e armado: a) exemplo da ruptura frágil em uma peça de concreto simples; b) as fissuras são decorrência do alongamento do aço em uma peça de concreto armado

fonte: Pfeil, 1985

Durante a fabricação de um elemento de concreto, o endurecimento do cimento ocorre pela adição de água em proporções pré-definidas e por uma reação química exotérmica que, se não for devidamente controlada, poderá provocar o aparecimento de fissuras com maior ou menor penetração no maciço, devido a um desequilíbrio térmico causado pelo resfriamento das camadas externas, gerando retração no tempo em que o núcleo permanece aquecido e dilatado. (Cánovas, 1988).

4.2.1 Cura do concreto

Essa é uma importante etapa para o preparo de elementos de concreto devido à influência exercida sobre a resistência à compressão e demais qualidades esperadas. Essas características podem ser diminuídas durante o período de cura e endurecimento da massa de concreto devido à fuga de

umidade pelos canais capilares causados pela evaporação da água de amassamento nas primeiras idades do concreto. (Montoya, 2000).

Portanto, impedir uma perda de água nesse período da reação inicial de hidratação do cimento, (Leiderman, 1975; Pfeil, 1985), e controlar a temperatura por um tempo suficiente para se atingir o nível de resistência desejada também evitam o surgimento das fissuras por retração do concreto, (Mehta e Monteiro, 2006), o que ocasiona um ganho na sua resistência final.

Providências como jogar água sobre a superfície de concreto exposta, ou cobrir essa área com material fibroso úmido em locais quentes e sob ação de vento, que provocam uma evaporação rápida, ou ainda, usar água gelada e, se necessário, gelo moído, podem ser consideradas medidas práticas de campo para garantir a cura saudável do concreto. (Montoya, 2000).

O método de cura submersa foi utilizado no curso deste trabalho e os procedimentos acompanharam as orientações da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2006). As peças foram mantidas imersas em um tanque com água saturada de cal, com a temperatura estabilizada em torno de 23°C e a saturação controlada para pH 12, simulando o ambiente alcalino em uma massa de concreto.

Essa imersão previne a evaporação e fuga da água de amassamento, e a saturação impede a reação dos íons de cálcio do cimento.

4.3 Matriz polimérica

As fibras utilizadas como reforço na execução deste trabalho, se aplicadas na sua forma natural, cujas superfícies são perfeitamente lisas, desenvolvem pouca aderência junto à matriz cimentícia; forças de baixa intensidade são suficientes para promover seu arrancamento do interior da peça.

O uso de fibras contínuas, alinhadas à força aplicada (sentido longitudinal), resulta em um compósito mais resistente. Por outro lado, a ação de forças perpendiculares às fibras (sentido transversal) expõe sua fragilidade quando se processa o lançamento do concreto nos moldes, culminando com o rompimento dessas fibras.

Dessas desvantagens, que impedem uma perfeita interação com a matriz de concreto a ser reforçada, surge a necessidade de associação com a matriz polimérica que consolide a geometria da peça e mantenha o posicionamento relativo das fibras, distribuídas conforme a orientação do carregamento a ser compensado, mas também que se constitua como o elemento de transferência das tensões para o reforço, mantendo as fases unidas em um elemento único para facilitar o manuseio das varetas de reforço.

Descartados os materiais termoplásticos, que amolecem na presença de calor, a matriz polimérica selecionada foi preparada com material termofixo, formado por uma reação química irreversível obtida a partir da mistura em proporções adequadas de resina, endurecedor e, eventualmente, acelerador, que resulta em um material sólido denominado matriz polimérica.

Uma matriz polimérica será considerada curada após cumprir quatro etapas: 1) *gel time*, quando ainda não variou a temperatura e se consegue manipular a matriz, que continua líquida. Esse intervalo de tempo permite a impregnação de fibras quando os *rovings* são imersos na matriz líquida para umedecimento de todos os fios; 2) pico exotérmico, inerente à própria reação química; 3) tempo de endurecimento, que permite a desmoldagem assim que a peça não ofereça riscos de ser danificada, eventualmente para agilizar a linha de produção, porém a cura pode ainda não estar completa; 4) cura, que é o intervalo de tempo necessário para se esgotarem as reações químicas internas da matriz e serem atingidas as resistências mecânicas e químicas desejadas, suas principais características quando o reforço fica consolidado na forma final de aplicação.

O termo resina, como é normalmente utilizado, pode se referir tanto ao material resina como à matriz polimérica. As varetas provenientes dessa mistura de componentes resultam em elementos de reforço resistentes a ataques químicos, leves, e que não conduzem eletricidade nem têm características magnéticas, (Marinucci, 2011), além de apresentarem alta resistência e rigidez em relação a seu peso. (Callister, 2002).

4.4 Elementos de reforço

Elementos de reforço são posicionados segundo a orientação de projetistas para compensar a fragilidade das peças de concreto quando submetidos a esforços de tração. Segundo Santos (1977), uma estrutura será segura se puder suportar as ações externas, sem atingir o estado limite ao longo da vida útil para a qual foi projetada, mesmo diante de condições desfavoráveis de atuação e que não esteja em condições funcionais precárias. Considerando a segurança como uma hipótese mantida pelo engenheiro entre a insegurança e o desperdício, e mesmo que o risco assumido ainda seja um sonho técnico, por maiores e melhores que sejam as medidas tomadas, sempre existirá uma probabilidade de insucesso. A colocação dos elementos de reforço não impede a ocorrência de fissuras, mas deve garantir que a sua abertura permaneça em dimensões não visíveis a olho nu, embora não exista perigo imediato de corrosão das armaduras.

Seguindo o caminho de uma hipótese mais favorável, a partir da combinação de diversos filamentos em mechas se produz o *roving* contínuo de fibras. Esse material pode ser produzido com e sem torção e aglutinado por meio de um tratamento superficial compatível com a matriz polimérica. A impregnação de um ou mais *rovings* com matriz polimérica resulta em uma haste de fibras. A superfície lisa dessa haste oferece baixa resistência de atrito, principal vetor componente da aderência entre essas duas fases. Como parte do estudo, também foi necessário propor uma técnica para modificar a superfície dessa haste e garantir sua interação com a matriz cimentícia, passando a ser denominada, neste trabalho, vareta de reforço, ou simplesmente vareta.

As matérias-primas para a elaboração das varetas foram a fibra de vidro ou de carbono impregnadas por uma camada de resina e com a aplicação de agregados miúdos com granulometria controlada para provocar uma rugosidade superficial esperada na superfície das hastes.

Esses elementos de reforço foram desenvolvidos para serem inseridos à massa fresca da matriz cimentícia e permitirem a produção de compósitos com possibilidade de se fabricarem elementos estruturais resistentes a ações de tração, flexão, torção etc. em ambientes comuns, quimicamente agressivos ou marítimos.

A fibra de vidro é fabricada a partir do estiramento por gravidade e posterior resfriamento de uma massa incandescente com porcentagens variadas de sílica, potássio, alumina, sódio, magnésio, cálcio e sucata de vidro limpo, resultando em uma substância inorgânica, homogênea e amorfa, podendo ser encontrada em filamentos contínuos ou como fibras picadas (descontínuas) com diferentes comprimentos. A presença de óxido de zircônio (ZrO_2) e monóxido de sódio (Na_2O) confere resistência à degradação proveniente da alcalinidade do cimento; com esse revestimento a fibra passa a ser designada fibra de vidro do tipo álcali-resistente. (Levy e Pardini, 2006; Marinucci, 2011).

A fibra de carbono é fabricada a partir da fibra poliacrilonitrila (PAN), que é a matéria-prima mais utilizada. Por meio de um processo de fiação a úmido, sob rigoroso controle de qualidade e com controles eletrônicos, na última etapa da sua fabricação, a fibra PAN passa por um tratamento superficial (*sizing*) para aglutinação e proteção dos fios, secagem e bobinamento, resultando em uma fibra ainda sem propriedades mecânicas que capacitem seu uso em compósitos estruturais. Então, é submetida a novas etapas: oxidação, carbonização, que tornam estáveis as propriedades de alto desempenho, tratamento superficial (*finish*), que garante a adesão química com a matriz polimérica, e acabamento superficial (*sizing*), que mantém os filamentos aglutinados, para finalizar com a produção das bobinas de fibra de carbono. (Marinucci, 2011).

Portanto, é esperado que a rugosidade criada na superfície de hastes de fibras de vidro-AR ou de carbono melhore as condições de aderência, ao se combinar com a matriz cimentícia após seu endurecimento, e evite o escorregamento desse reforço na interface com a matriz cimentícia, até o limite de carregamento projetado. O programa experimental realizado para a determinação dessa resistência de atrito foi adaptado das prescrições do COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (1983), ensaio de arrancamento (*pullout test*), para trabalhar com varetas de fibras sem danificá-las, o qual consiste em medir a força de tração necessária para romper a ligação entre as fases do compósito e movimentar o reforço no interior da matriz cimentícia.

Para melhor compreensão das fases componentes de um elemento de reforço, neste trabalho denominado vareta, a partir de uma mecha de fibra, na Fig.4, estão ilustrados detalhes dessas modificações nas fibras. A Fig.4 (a) ilustra

uma mecha formada por 9 *rovings*, um segmento de haste (fibras impregnadas com resina) e um segmento de vareta (haste com a cobertura dos grânulos de areia). A Fig.4 (b) exibe um corte mostrando a seção transversal da mecha, haste e vareta. E finalmente, a Fig.4 (c) mostra um segmento de haste e um segmento de vareta.

FIGURA 4 - Detalhes de um elemento de reforço: a) perspectiva mostrando respectivamente uma mecha formada por 9 *rovings*, uma haste e uma vareta; b) corte mostrando a seção transversal da mecha, haste e vareta, respectivamente de diâmetros 0,55 mm, 3,75 mm e 6,50 mm; c) vista de um segmento de haste e vareta.

fonte: autor da tese

Uma vez rompida a ligação vareta/matriz cimentícia, o ensaio é interrompido e a intensidade da força de tração (arrancamento) medida nesse instante é considerada como limite da resistência de aderência para aquela amostra. A tensão de cisalhamento ou de aderência pode, então, ser obtida pela relação entre a força de tração no instante do escorregamento e a área superficial de ancoragem da vareta no interior do bloco de concreto, no início do teste.

A partir do início do escorregamento há uma redução na força de aderência até a ruptura desse equilíbrio na interface haste/matriz.

A FIG.5 ilustra a característica geométrica de uma barra de aço, que impede seu escorregamento até o limite da resistência imposta pela matriz cimentícia. Sempre que essa condição for atendida, a estrutura permanecerá estável.

FIGURA 5 - Representação da zona de atrito gerado pelas ranhuras em uma barra de aço ($\varnothing=6,3\text{ mm}$) submetida a esforços de tração

fonte: autor da tese

4.5 Conceitos de interface fibra/matriz

Duas são as situações a serem consideradas, a interface fibra/matriz polimérica e a interface elemento de reforço/matriz cimentícia. A interface fibra/matriz polimérica se comporta como um importante elo entre os materiais constituintes da estrutura dos compósitos, pois transmite os esforços do carregamento da matriz para as fibras. Pode ser definida como a região que está próxima à superfície das fibras e adjacente à matriz que as envolve. Considerando a diferença significativa nas propriedades elásticas das matérias-primas do compósito, caberá à interface compatibilizá-las. Como exemplo, vale citar que o módulo de elasticidade de uma matriz cimentícia é 30 GPa, ao passo que o de uma fibra de carbono de alta resistência mecânica é 230 GPa.

O conhecimento das propriedades da interface, que são específicas para cada sistema fibra/matriz polimérica, é essencial para conduzir a um entendimento das propriedades físicas e mecânicas dos materiais compósitos,

sendo um dos fatores mais importantes na resistência à fratura do material. Os resultados obtidos nessa análise são importantes para avaliar o comportamento mecânico da haste.

A resistência do acoplamento da fibra à matriz é garantida por ação mecânica, e em compósitos poliméricos existe ainda a resistência devido à ação que é resultante da presença de grupos funcionais na superfície da fibra, como na fibra de carbono, por exemplo, em que esses são introduzidos por um tratamento eletrolítico na etapa final de fabricação, cuja finalidade é criar afinidade com a matriz polimérica e promover uma melhor adesão.

Entretanto, quando se analisa a matriz cimentícia, esta não reúne condições para que haja aderência com a superfície lisa da haste, a não ser a pressão exercida pela força de retração do concreto devido ao processo de cura, o qual causa um mínimo atrito entre as fases. Desse modo, um acabamento superficial é feito na superfície dessa haste para permitir uma eficiente adesão mecânica entre esses dois materiais.

Marinucci (2011) descreve o ensaio utilizado para determinação da resistência da interface fibra/matriz polimérica como aquele que utiliza a montagem representada na FIG.6. Nesse caso, o corpo de prova é formado por um disco de matriz polimérica tendo no centro um filamento de fibra.

FIGURA 6 - Ensaio típico de arrancamento (pullout) para determinação da resistência cisalhante da interface fibra/matriz

fonte: Chamis apud Marinucci 2011

O ensaio é simples e realizado apenas retendo o disco da matriz por um dispositivo apropriado e a fibra convenientemente tracionada. A resistência

cisalhante é determinada pela expressão (1), que combina a força (F) aplicada para romper a ligação fibra/matriz, o diâmetro “d” da fibra e o comprimento “t” da fibra presa à matriz polimérica.

$$\tau_i = \frac{F}{\pi dt} \quad (1)$$

Considerando a atuação das forças cisalhantes e de tração no elemento de comprimento dx, FIG.7, indicadas respectivamente pelas equações (2) e (3) e seu equilíbrio pela equação (4), tem-se a tensão de cisalhamento ao longo da interface pela equação (5).

FIGURA 7 - Equilíbrio de forças em um elemento de reforço de comprimento dx na interface fibra/matriz

fonte: Chawla apud Marinucci 2011

$$\frac{dP}{dx} dx = (2\pi r_f \cdot dx) \tau_i \quad (2)$$

$$\frac{dP}{dx} = \pi r_f^2 \frac{d\sigma_f}{dx} \quad (3)$$

$$(\pi r_f^2 \frac{d\sigma_f}{dx}) \cdot dx = 2\pi r_f \cdot dx \cdot \tau_i \quad (4)$$

ou ainda

$$\tau_i(x) = \frac{r_f}{2} \frac{d\sigma_f}{dx} \quad (5)$$

O mecanismo de aderência se equivale quando se analisam macro estruturas, como reforços de varetas ou barras de aço. (Pinheiro, 2007). Ao se considerar a interface vareta/matriz cimentícia, a aderência é composta por três diferentes vetores: 1) aderência por adesão, que se caracteriza por uma resistência à separação dos dois materiais, concreto e vareta, gerada durante o processo de secagem do cimento; 2) aderência por atrito, que depende da pressão transversal exercida pelo concreto; 3) aderência mecânica, a mais importante, em que a rugosidade superficial aumenta substancialmente a resistência ao escorregamento em relação a um reforço liso, conforme pode ser observado na FIG.8. Porém, a separação da força de aderência em três componentes é apenas esquemática, pois não é possível quantificar isoladamente cada um deles.

FIGURA 8 - Vetores que caracterizam a aderência da vareta com a matriz cimentícia: a) adesão; b) atrito; c) mecânica

fonte: adaptada de Marino, 2006

O conhecimento dos critérios relativos à aderência e à ancoragem dos elementos de reforço deve garantir a estabilidade da estrutura e minimizar a ocorrência de fissuras. O comprimento de ancoragem depende: 1) da região envoltória dos elementos de reforço no interior da peça, se posicionados dentro

das regiões consideradas de boa ou má aderência, definidos no item 9.3.1.b da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2007) e desenhado na FIG.9; 2) do tipo ou da geometria desses elementos, se fabricados com superfície lisa ou com nervuras e armados com geometrias retas ou curvadas. (Cánovas, 1988; Leonardt, 1978).

FIGURA 9 - Influência da altura da camada de concreto no adensamento sobre um reforço posicionado no interior de uma peça de concreto. Cortes laterais de peças de concreto com altura (h) inferior ou superior a 60 cm.

fonte: Marino (2006)

A distância do reforço em relação ao fundo da forma também influi contrariamente, (Pinheiro, 2007), uma vez que a exsudação da água produz porosidade mais intensa nas camadas mais altas, podendo se acumular sob os elementos de reforço, criando aí um espaço sem atrito, FIG.10. Um estudo de Ducatti *apud* França (2004) complementa essa afirmação com a constatação de que o aumento do diâmetro de uma barra de aço implica maiores alturas das nervuras e, conseqüentemente, maior acúmulo de água na região dessas nervuras, diminuindo proporcionalmente o atrito na interface barra/concreto.

Na FIG.11, estão esquematizadas as trajetórias dos esforços de tração e compressão que ocorrem na extremidade (zona de ancoragem) de uma peça cuja armadura esteja sendo tracionada devido a esforços externos. (Leonhardt, 1977). A força "F" aplicada sobre a armadura está em equilíbrio com a força "C" de compressão no concreto.

FIGURA 10 - Redução da área de aderência pelo acúmulo da água de exsudação sob o diâmetro de um elemento de reforço estrutural

fonte: adaptada de Marino (2006)

FIGURA 11 - Trajetórias das tensões principais atuantes na zona de ancoragem de uma barra de aço inserida em uma matriz cimentícia sob ação da força F

fonte: Leonhardt, 1977

Dado o caráter inovador do trabalho, e não sendo identificada nenhuma norma que tratasse especificamente dos ensaios de flexão nem *pullout* com fibras contínuas em blocos de concreto, todos os métodos e aparatos de ensaios necessitaram ser projetados e aprimorados.

O ensaio *pullout* se destaca como principal no desenvolvimento deste trabalho e a forma definida para o ensaio se assemelha ao que se aplica a um compósito de matriz polimérica. Na FIG.12, está ilustrada a interface vareta/matriz cimentícia de um corpo de prova do presente estudo. A geometria da vareta

impede seu escorregamento entre as duas fases do conjunto até o limite de resistência do concreto, da matriz polimérica ou da própria fibra.

FIGURA 12 - Seção longitudinal de um bloco na zona de atrito, interface vareta/matriz cimentícia

fonte: autor da tese

O limite de resistência de aderência (atrito) entre a vareta e o concreto, abaixo do qual se garante a estabilidade da estrutura, poderá ser determinado segundo a montagem representada na FIG.13.

FIGURA 13 - Ensaio de arrancamento (pullout) utilizado para determinação da resistência cisalhante da interface vareta/matriz cimentícia

fonte: Pfeil, 1985

Nesse caso, o corpo de prova é formado por um bloco de matriz cimentícia e uma vareta de matriz polimérica reforçada com fibras de carbono ou vidro-AR, de diâmetro “d”, posicionada no seu centro. Metade do bloco, representado pelo comprimento “c”, fica em contato com a vareta; na outra metade, a vareta fica isolada por um tubo plástico de diâmetro $d' > d$.

O ensaio consiste na retenção do bloco de matriz cimentícia por um anteparo metálico apropriado ao mesmo tempo em que a força progressiva de tração F é aplicada sobre a vareta e medido o deslocamento (Δ) correspondente.

A expressão (6) fornece o valor da tensão de cisalhamento (τ_b) no comprimento experimental da vareta.

$$\tau_b = \frac{F}{\pi.d.c} \quad (6)$$

O traçado do diagrama da tensão de cisalhamento (τ_b) em função do deslocamento (Δ), mostrado na FIG.14, permite comparar o comportamento do reforço de aço e de fibras. Nesse gráfico, é possível identificar a maior resistência ao cisalhamento na interface que o compósito com fibras oferece, além de estar indicada, caso fosse possível isolar, a posição do vetor adesão, mostrada na FIG.8.

FIGURA 14 - Diagrama das tensões de cisalhamento, com indicação dos limites últimos das curvas: 1 para barras de aço ($\tau_{b\ us}$); 2 para varetas de fibras ($\tau_{b\ uf}$)

Como já citado anteriormente, o objetivo do presente trabalho é comparar os valores das tensões de cisalhamento para reforços de fibra de vidro e reforços de fibra de carbono com reforços de barras de aço, tomando-se por base as limitações descritas na norma da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2007).

4.6 Planejamento de experimentos

É desejável que esse método permita otimizar o campo de aplicação do objeto proposto (sistema), minimizando o tempo de desenvolvimento na obtenção do melhor resultado e extraindo o máximo de informação útil com um mínimo de experimentos. (Barros Neto et al., 2010).

Portanto, após a consolidação do método para realização dos ensaios *pullout*, espera-se que a aplicação do Planejamento Fatorial Experimental permita identificar como o conjunto de fatores atuantes sobre o sistema (que funciona como uma função) influencia a obtenção de uma resposta, ou pelo menos uma aproximação satisfatória, a qual representa a solução futura do problema que inicialmente motivou o experimento.

Foram efetuadas três réplicas completas de cada experimento, com todas as combinações possíveis dos principais valores individuais dos componentes ensaiados, com o auxílio do software “statística 5.0”.

Para os reforços com fibras sintéticas, a influência da resistência à compressão do concreto, a rugosidade e o diâmetro da vareta foram comparados entre si, e a análise das suas interações de segunda e terceira ordens permitiu verificar como poderiam influenciar estatisticamente cada valor individualmente. Essa combinação de três níveis de fatores resultou em um fatorial 2x3. A compreensão da interpretação dos resultados pode ser facilitada com a representação esquemática na FIG.15.

FIGURA 15 - Interpretação geométrica dos efeitos de um planejamento fatorial 2x3: a) os efeitos principais são contrastes entre faces opostas; b) os efeitos da interação são contrastes entre planos diagonais (fonte: Barros Neto et al., 2010)

fonte: Barros Neto et al., 2010

Para os reforços com barras de aço, como não foi considerada a rugosidade das ranhuras como um parâmetro a ser modificado, a resposta foi obtida somente pela variação de dois fatores sobre o sistema, a resistência à

compressão do concreto e o diâmetro da barra. Com essa combinação de dois níveis de fatores, o resultado foi obtido de um fatorial 2×2 , com representação em um sistema cartesiano plano, sendo os resultados anotados em um quadrado. Nesse caso, os efeitos principais são as diferenças médias entre os valores situados nas arestas opostas, e os efeitos da interação são o contraste entre as duas diagonais, conforme representação esquemática na FIG.16.

FIGURA 16 - Interpretação geométrica dos efeitos nas barras de aço com um planejamento fatorial 2×2 : a) e b) os efeitos principais estão entre arestas opostas; c) o efeito de interação é o contraste entre as duas diagonais

fonte: Barros Neto et al., 2010

5 MATERIAIS

5.1 Infraestrutura

Os corpos de prova foram preparados no IPEN e ensaiados nos laboratórios do CCTM (IPEN), da POLI-CIVIL (USP) e do LACAM (CTMSP).

5.2 Fibras de vidro resistentes a álcalis (FV-AR)

Resistência à tração: 2000 MPa

Módulo de elasticidade: 75 GPa

Densidade: $d_v = 2,66 \text{ g.cm}^{-3}$

Densidade linear: TEX 2430 (2430 g/1000m)

FIGURA 17 - Novelo de fibra de vidro-AR

fonte: autor da tese

5.3 Fibras de carbono (FC)

Resistência à tração: 4900 MPa

Módulo de elasticidade: 230 GPa

Densidade: $d_c = 1,8 \text{ g.cm}^{-3}$

Densidade linear: TEX 400 (400 g/1000m)

FIGURA 18 - Novelo de fibra de carbono

fonte: autor da tese

5.4 Barras de aço corrugado

Resistência à tração: 500 MPa

Módulo de elasticidade: 210 GPa

Deformação na ruptura: 8%

Densidade: 7,85 g.cm⁻³

Diâmetro da barra: 6,4 mm

FIGURA 19 - Barra de aço corrugado classe CA-50

fonte: autor da tese

5.5 Formulação (traço) do concreto

Dada a geometria da peça, o traço escolhido deverá permitir o permeio do concreto fresco entre os elementos de reforço, preenchendo todo o espaço

com uma mínima ocorrência de vazios; ele será representado pelo peso ou volume dos demais componentes da mistura em relação a uma quantidade padrão de cimento, na mesma unidade. Normalmente, utiliza-se uma relação com um saco de cimento (50 kg), ou com a quantidade de cimento por m³ de concreto, ou qualquer proporção que possibilite quantificar os demais materiais constituintes do concreto, na mesma proporção definida pelo traço. Deve-se ainda: definir o tipo do cimento e a resistência à compressão do concreto aos 28 dias (f_{c28}); fixar um valor para a relação água/cimento (X) que garanta atingir a resistência desejada; calcular a relação água/materiais secos (A%), conforme a plasticidade esperada e o tipo de adensamento a ser aplicado durante os trabalhos de preenchimento das formas.

Na primeira etapa da fase experimental, os corpos de prova foram moldados com cimento CII-E-32, com uma formulação para atingir 29 MPa de resistência à compressão aos 28 dias em cura submersa. Entretanto, considerando-se o tempo excessivo que esse cimento apresenta para a cura e levando-se em conta a quantidade de corpos de prova planejada para os ensaios, optou-se, na segunda etapa, por se utilizar o cimento CPV-ARI, com o qual foi possível reduzir o tempo de cura das amostras. Nessa fase, foram utilizados concretos classes C30 e C40.

A descrição e normas técnicas brasileiras que regulamentam as características físico-químicas desses dois tipos de cimentos estão indicadas na TAB.1.

TABELA 1- Classificação e regulamentação dos cimentos utilizados na fabricação dos corpos de prova deste trabalho

Tipo de cimentos	Sigla	Classe (MPa)	Norma técnica (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS)
Composto	CII-E	25,32,40	NBR-11578 (1991)
Alta resistência inicial	CPV-ARI	-	NBR-5733 (1991)

fonte: *Guia Básico de Utilização do Cimento Portland (2002)*

Para cada lote de cimento, se solicitado, o fabricante fornece o ábaco que apresenta a curva da relação água/cimento (X) em peso dos componentes e dos valores de resistência à compressão do cimento. Os ábacos utilizados na primeira e na segunda fase deste trabalho estão mostrados respectivamente nas FIG.20 e 21 para o cimento comum, CP II-E (Votorantim), e para o cimento de alta resistência inicial, CPV-ARI (Holcim).

FIGURA 20 - Ábaco de Abrams para cimento comum, neste caso, CP II-32

fonte: Votorantim Cimentos

Com base nesses parâmetros e no pressuposto de que um saco de cimento padrão pesa em média 50 kg, a expressão (7) permite calcular a quantidade de água (P_{ag}) ideal para a mistura.

$$X = \frac{P_{ag}}{P_c} \quad [\text{kg/kg}] \quad (7)$$

De acordo com a trabalhabilidade do concreto ($A\%$) definida pela consistência necessária para cada lançamento, com os dados da TAB.2 é

possível conhecer a relação entre a quantidade de água (P_a) e de agregados (P_m), com as expressões (8) e (9).

FIGURA 21 - Ábaco de Abrams para cimento CPV-ARI

fonte: Holcim Brasil

TABELA 2 - Trabalhabilidade do concreto (A%)

Consistência	Intervalo (%)
Seca	$6 \leq 8$
Plástica	$8 \leq 11$
Fluida	$11 \leq 14$

fonte: adaptado de Tutikian e Helene, 2011

$$A(\%) = \frac{P_{ag}}{P_c + P_m} \quad [\text{kg/kg}] \quad (8)$$

$$P_m = P_a + P_b \quad [\text{kg}] \quad (9)$$

O volume total de água deve ser corrigido conforme a umidade medida na areia em relação à densidade da areia seca. A equivalência entre as

porcentagens das quantidades em peso de Pa e Pb, respectivamente de areia (agregado miúdo) e brita (agregado graúdo), está indicada na TAB.3. O traço do concreto é representado normalmente pela unidade em peso ou volume de cimento em relação aos demais componentes da mistura: 1:a:b:c (cimento: areia: brita: água).

No presente trabalho, foram utilizados três diferentes traços para a preparação das amostras: na etapa de desenvolvimento do método de reforço, durante os testes com a fibra nua até o uso das hastes, designação dada a um ou mais *rovings* de fibras impregnados por matriz polimérica, em que foi utilizado cimento CII-32 com o traço ajustado para 29 MPa aos 28 dias (Fase 1), conforme mostrado na TAB.4.

TABELA 3 - Relação entre agregados miúdos e graúdos

AGREGADO GRAÚDO	% AREIA		
	FINA	MÉDIA	GROSSA
Seixo *	30	35	40
Brita **	40	45	50

(*)Valores para: {	Brita 1 + Brita 2	(**)Se: {	Brita 1:	somar 0,5%
			Brita 2:	diminuir 0,5%
	Areia normal		Areia artificial:	somar 1,0%

fonte: Leiderman, 1975

TABELA 4 - Formulação do concreto – fase 1

Material	Descrição	Dosagem
		classe 30 (kg.m ⁻³)
Cimento	CII-E-32	427
Agregado miúdo	Areia média (2,4<D<3,3 mm)	922
Agregado graúdo	Brita 1 (9,5<D<19 mm)	922
Água	Fornecida pela concessionária	228

fonte: autor da tese

Na etapa de testes a partir da definição das características da vareta, designação dada a uma haste recoberta com grânulos de areia, na qual o cimento CPV-ARI foi utilizado com dois diferentes traços para a resistência à compressão final de 30 MPA (classe 30) e 40 MPA (classe 40), ambos aos 7 dias (Fase 2), a formulação está detalhada na TAB.5.

TABELA 5 - Formulação do concreto – fase 2

Material	Descrição	Dosagem	
		classe 30 (kg.m ⁻³)	classe 40 (kg.m ⁻³)
Cimento	CPV- ARI	296	362
Agregado miúdo	Areia média (2,4<D<3,3 mm)	977	942
Agregado graúdo	Brita 1 (9,5<D<19 mm)	1010	978
Água	Fornecida pela concessionária	219	217

fonte: autor da tese

5.6 Formulação da matriz polimérica

A utilização inicial da matriz polimérica GY269/HY951 (100:13) na impregnação e consolidação dos elementos de reforço para cura ao ar foi descartada quando se observou a necessidade de usar rugosidade nesses reforços.

Para modificar a superfície da haste, da condição de lisa para rugosa, foi necessário ampliar o tempo de manipulação da matriz polimérica (*gel time*), levando à escolha de um outro sistema polimérico. Com essa nova formulação, que permite uma manipulação da matriz polimérica por mais de uma hora, a cura da resina deve ser feita em uma estufa. Os componentes usados nessa matriz polimérica estão mostrados na TAB.6.

TABELA 6 - Formulação da matriz polimérica para cura em estufa

Descrição	Massa (g)
Resina: Éster Diglicídico de Bisfenol A (DGEBA)	100
Endurecedor: Anidrido Metiltetrahidroftálico	88
Acelerador: Benzildimetilamine	0,5

fonte: autor da tese

6. MÉTODOS E PROCESSOS

No presente estudo, não só o desenvolvimento da técnica de posicionamento de fibras contínuas na matriz cimentícia exigiu tempo e muitas experimentações, mas também que fosse desenvolvida uma técnica para modificação da superfície da haste para que houvesse um completo ancoramento desta ao concreto, e com isso, propor um método que transmitisse a mesma segurança consolidada pelas barras de aço utilizadas em estruturas de concreto.

Portanto, havia dois desafios importantes para cumprir a proposta do estudo: 1) desenvolver dispositivos e mecanismos que permitissem colocar a fibra alinhada e tensionada no concreto; 2) modificar a superfície da haste, denominação dada à fibra quando impregnada pela matriz polimérica, para melhorar seu ancoramento na matriz cimentícia. Para isso, foi aprimorado o método de preparo dos elementos de reforço, a geometria dos corpos de prova e o conceito dos aparatos de ensaio.

Para facilitar o entendimento do método, no diagrama mostrado na FIG.22, estão descritas de forma resumida as etapas necessárias para se fabricar uma vareta a partir da mistura dos componentes da matriz polimérica para umectação das mechas de fibras, a aplicação da areia na granulometria desejada para criar a rugosidade e a consolidação da vareta com a etapa de cura térmica.

A sequência de atividades necessárias para preparar um corpo de prova de matriz cimentícia reforçado com vareta ou barra de aço, ensaiar (flexão e *pullout*) e comparar seus resultados estão mostradas no diagrama da FIG.23.

FIGURA 22 - Diagrama do processo de fabricação da vareta. Umeção das mechas de fibras, aplicação da rugosidade e consolidação do reforço pela cura térmica

fonte: autor da tese

FIGURA 23 - Diagrama de fluxo do processo de fabricação do corpo de prova para extração dos resultados dos ensaios de tração e arrancamento

fonte: autor da tese

É possível que essa proposta permita posicionar elementos de concreto: nos ambientes quimicamente agressivos, como por exemplo, expostos à maresia ou em tanques de contenção de líquidos contendo produtos químicos; na edificação de instalações rádio transparentes, isto é, sem a geração de campos magnéticos indesejáveis, como ocorre com as estruturas metálicas, e que alteram as leituras por equipamentos sensíveis; na redução da carga permanente em uma laje padrão de edifícios em aproximadamente 1 tonelada a cada 300 m², mantendo a mesma resistência.

6.1 Técnica de fixação das fibras contínuas na matriz cimentícia

6.1.1 Técnica de fixação 1

Na primeira experimentação, cinco mechas de fibras de vidro-AR foram extraídas diretamente do novelo e distribuídas sobre a massa de concreto fresco na região da peça definida como zona de boa aderência, conforme já mostrado na FIG.10; então, a forma foi preenchida com o restante da matriz cimentícia. Formas triplas de madeira possibilitaram fundir corpos de prova com dimensões finais de 100 x 100 x 400 mm cada amostra (FIG.24), os quais foram ensaiados em flexão após 28 dias de cura submersa em atmosfera saturada.

FIGURA 24 - Montagem de uma amostra com fibra contínua sem preparo superficial, distribuída diretamente sobre a massa de concreto na região de boa aderência da amostra

fonte: autor da tese

Segundo a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2007), a resistência média da tração na flexão ($f_{ct,m}$) pode ser obtida mediante uma correlação com a compressão axial (f_{ck}), conforme mostra a equação 10.

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (10)$$

Os resultados dos testes de flexão aplicados sobre o lote de amostras preparadas dessa forma não apresentaram variações significativas quando comparados aos resultados obtidos dos corpos de prova sem adição de fibras.

6.1.2 Técnica de fixação 2

Os resultados inexpressivos atingidos com a técnica anterior levaram a alterar a forma de colocação dos reforços. Elaborou-se um aparato desmontável com encaixes nas extremidades das peças, para montagem rápida, com o travamento do conjunto por meio de parafusos posicionados nas laterais da base.

As laterais foram perfuradas para alinhamento e estiramento das fibras no sentido longitudinal dos esforços aplicados ao concreto e também para que se mantivessem na zona de boa aderência da peça de concreto, FIG.25.

FIGURA 25 - Forma desmontável para o posicionamento e alinhamento das fibras na matriz de concreto: a) forma de montagem rápida; b) exemplo do conjunto, detalhando a perfuração nas laterais da forma

fonte: autor da tese

Os danos causados na fibra ao ser passada pelos orifícios, associados à constante obstrução pelo concreto fresco, levaram ao descarte desse projeto de molde.

6.1.3 Técnica de fixação 3

Novo aparato foi criado para facilitar a distribuição dos elementos de reforço no concreto, que garantisse o seu posicionamento conforme o desejado. Na FIG. 26, está mostrado o dispositivo elaborado especialmente para o posicionamento da fibra de forma contínua sobre o concreto fresco.

FIGURA 26 - Aparato para alinhar mechas de fibras contínuas no concreto: a) montagem do aparato; b) simulação da distribuição contínua de 1 roving de fibra em 16 linhas

fonte: autor da tese

O aparelho dispunha de quatro sapatas de altura regulável, de duas guias transversais para o movimento do pente móvel, mais um pente posicionador da fibra fixo e de uma barra móvel para ajustar o equipamento ao comprimento da forma do concreto.

Com os dentes do equipamento na posição recolhida, a fibra seria esticada pelo espaço deixado entre eles. O tracionamento do pente móvel provocaria o estiramento da fibra ao longo de todo o comprimento definido pela barra e na quantidade calculada de linhas, podendo dispor de até 16 *rovings* paralelos com um afastamento controlado entre eles.

Entretanto, o elevado atrito que ocorreu entre a fibra e os dentes dos pentes posicionadores causou o empenamento do aparato, e esse conceito também não foi utilizado.

6.1.4 Técnica de fixação 4

O método para a distribuição das mechas foi simplificado com o uso de um suporte sobre o qual se fixou o pente alinhador, que mantinha as mechas de fibras alinhadas e esticadas. Cada pente representava um nível de reforços, com capacidade para distribuir até 10 linhas de até 9 mechas cada. Esses pentes poderiam ser remontados em quantos níveis fosse a necessidade para cada peça de concreto. A distribuição das mechas era manual pelas ranhuras do pente e deveria respeitar a quantidade de reforço projetado para cada amostra.

Na FIG.27, está ilustrado esse método simplificado para distribuição de mechas. A transferência da fibra para o pente (descartável) está ilustrada na FIG.27 (a) e um exemplo de pente preenchido com 9 linhas de 1 mecha cada está mostrado na FIG.27 (b).

FIGURA 27 - Método simplificado: a) transferência da fibra direto do novelo para o pente alinhador; b) um nível de reforço montado com 9 linhas de 1 mecha

fonte: autor da tese

Na FIG.28, está detalhado o posicionamento de dois níveis de reforços de fibras para um elemento de concreto. Os pentes, depois de fixados na

extremidade do molde, foram destacados do suporte, conforme ilustra a FIG.28 (a). Depois da aplicação da camada restante de concreto, FIG.28 (b), o corpo de prova foi submetido à cura submersa. Na FIG. 28 (b), estão mostrados dois pentes fixos na extremidade de um corpo de prova, com dois níveis de reforços, após o período de cura e depois de ter a forma removida, FIG. 28 (c).

FIGURA 28 - Montagem manual de uma amostra: a) posicionamento de um pente descartável no nível externo do corpo de prova (removido sem reaproveitamento no final da cura); b) preenchimento da forma; c) extremidade de um corpo de prova com dois níveis de reforços após o período de cura, antes da retirada dos pentes

fonte: autor da tese

Esse novo conceito de posicionamento das fibras na matriz cimentícia também não permitiu atingir os resultados desejados, embora tenha sido observado ganho nos valores da resistência à flexão em relação aos valores de referência. O ensaio de flexão, conforme ilustra a FIG.29, seguiu as orientações da AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS (2002). A análise do corpo de prova rompido mostrou que houve um escorregamento das fibras na matriz cimentícia, sem que fosse possível observar a ocorrência de fissuras nas faces externas da peça.

As fibras de carbono e vidro, ou mesmo a aramida, se um trabalho fosse feito com essa fibra, apresentam um acabamento superficial que permite aderir às matrizes poliméricas. Além da adesão mecânica pela contração das matrizes poliméricas, ocorre também a adesão físico-química. Entretanto, o

cimento, material inorgânico, não contribui com a adesão química. Desse modo, torna-se imperativo promover uma modificação na superfície da fibra para possibilitar a retenção ou ancoramento da fibra pela matriz cimentícia.

FIGURA 29 - Ensaio de flexão em corpo de prova cilíndrico: a) corpo de prova com as fibras fixadas por pentes descartáveis; b) a ruptura frágil da matriz cimentícia facilitou a observação do escorregamento das fibras internas da mecha

fonte: autor da tese

6.1.5 Técnica de fixação 5

Os ensaios de flexão realizados neste trabalho, examinando o engastamento da fibra na matriz cimentícia sem nenhuma modificação na superfície do reforço, indicaram ocorrer um escorregamento da fibra pela baixa retenção.

Uma das possíveis soluções para essa questão foi aumentar a área superficial do contato fibra-cimento, promovendo uma torção nas mechas de fibras, deixando-as com o aspecto de uma trança, conforme ilustra a FIG.30.

Assim torcendo as fibras com controle do número de giros, foram preparados segmentos de reforço de comprimento e diâmetro homogêneos, FIG.30 (a), que foram utilizados para fabricar corpos de prova com 18, 28 e 52 mechas de fibras torcidas distribuídas em 5 linhas, conforme se observa na FIG.30 (b). As mechas torcidas foram posicionadas na região de boa aderência do molde, FIG.30 (c).

FIGURA 30 - Preparação de corpos de prova com fibras torcidas: a) o número de voltas e o comprimento das tranças foram controlados para manter a homogeneidade das amostras; b) as tranças foram fixadas ao pente alinhador, em cinco linhas com 18, 28 e 52 mechas cada; c) o reforço foi fixado manualmente nas extremidades da forma para manter uma geometria retilínea.

fonte: autor da tese

6.2 Técnicas de modificação da superfície da fibra

A primeira técnica proposta para solucionar a questão do ancoramento da fibra à matriz cimentícia foi impregnar a primeira com uma matriz polimérica, que, após a cura desta, deu ao conjunto fibra/matriz a forma de uma haste lisa. Assim, a consolidação da fibra na forma de um elemento rígido ocorreu pela cura da matriz polimérica quando, nessa etapa, mantiveram-se as fibras tensionadas em um suporte desenvolvido para essa finalidade, conforme ilustra a sequência da FIG.31. Foram preparadas amostras com 3 e 9 mechas, FIG.31 (a). A matriz polimérica foi preparada sob rígido controle das quantidades dos seus materiais componentes, FIG.31 (b), em que as mechas foram imersas até o envolvimento completo dos monofilamentos pelo polímero, de forma manual, FIG.31 (c), ou com auxílio de um suporte, FIG.31 (d).

Ao final dessa etapa, a fibra foi retirada desse suporte e transferida para um dispositivo que as acomodou e manteve o estiramento necessário, permitindo que a cura da matriz polimérica ocorresse nas mesmas condições, concluindo a consolidação dessas hastes na forma de um elemento rígido.

Para se impregnarem todas as fibras de um determinado lote de reforços, é preciso que a matriz polimérica seja mantida na condição líquida por um longo período de tempo, isto é, durante a fase *gel time*, possibilidade

conseguida com alterações na sua formulação. Porém, com esse retardo provocado no processo de cura do material, agora tornou-se necessário adicionar energia térmica extra para acelerar a conclusão da cura da matriz.

FIGURA 31 - Preparo de hastes: a) corte das mechas nos comprimentos definidos para o ensaio; b) preparo da matriz; c) tanque para impregnação das mechas; d) suporte para impregnação de matriz polimérica

fonte: autor da tese

A técnica de impregnação da haste permitiu evoluir para uma modificação na sua superfície, criando um aumento acentuado da rugosidade, que, se fosse curada sem os grânulos, seria lisa. A proposta foi fixar grânulos de areia na superfície da fibra/matriz cimentícia enquanto a matriz polimérica ainda estivesse líquida, cuidando para não haver a penetração desses grânulos no interior da mecha.

Foram utilizados grânulos de areia com granulometria controlada para gerar a rugosidade no momento seguinte à impregnação das hastes com a matriz polimérica.

Para estudar o comportamento da resistência ao arrancamento e analisar a ancoragem da fibra à matriz, dos parâmetros escolhidos no item 4.6, duas classes aleatórias de rugosidade foram preparadas utilizando-se peneiras de malha quadrada para definir o diâmetro dos grânulos (d). Segundo os intervalos adotados como escala granulométrica, os grânulos retidos no intervalo de 0,3 e 0,6 mm definiram a rugosidade fina (RF), que equivale a um diâmetro médio de 0,45 mm, e no intervalo de 0,6 e 2 mm, a rugosidade grossa (RG), que equivale a um diâmetro médio de 1,3 mm, conforme ilustra a FIG.32.

FIGURA 32 - Definição das classes de rugosidade

fonte: autor da tese

Em sequência à impregnação da fibra pela matriz polimérica e fixação da areia na granulometria desejada, conforme pode ser visto na FIG.33, as varetas foram levadas para o processo de cura a quente. A areia foi secada em estufa com a temperatura mantida constante em 70°C, pois a presença de umidade compromete a cura da resina.

FIGURA 33 - Impregnação das fibras e fixação da rugosidade de areia com granulometria controlada

fonte: autor da tese

6.3 Desenvolvimento de grades para cura da matriz polimérica

6.3.1 Grade tipo 1

As modificações nas grades para a cura da matriz polimérica acompanharam o desenvolvimento das varetas. Na FIG.34, está ilustrada uma grade de montagem horizontal com capacidade para 4 varetas.

FIGURA 34 - Grade tipo cavalete para cura de matriz polimérica

fonte: autor da tese

Nessa ferramenta, a vareta teve de ser estirada sobre os dois apoios antiaderentes e o estiramento ficou garantido pela torção das extremidades não impregnadas das fibras, sobre suportes metálicos posicionados nas laterais dos apoios. O travamento da fibra nesses suportes foi por meio de grampos. Porém, sempre ocorre o afrouxamento da tensão inicial aplicada sobre a fibra e causa perda de linearidade na haste durante o processo de cura.

6.3.2 Grade tipo 2

A opção para se evitar o empenamento da vareta foi utilizar uma grade que permitisse trabalhar na posição vertical. Nessa montagem, a extremidade superior da mecha, mantida sem contato com a matriz polimérica, foi fixada a uma estreita ranhura da grade. A tensão foi aplicada pela torção da extremidade da fibra sobre o suporte metálico inferior, e o travamento foi feito com tiras de material adesivo, conforme mostrado na FIG.35. Também essa alternativa foi descartada ao se verificar o escorregamento vertical de parte da matriz polimérica associada ao peso dos grânulos de areia enquanto a viscosidade ainda era alta.

FIGURA 35 - Grade vertical para cura da matriz polimérica

fonte: autor da tese

6.3.3 Grade tipo 3

A exigência de rugosidade trouxe como consequência a necessidade do uso de energia térmica para se proceder à cura das varetas. Para isso, foi elaborado um modelo de grade que pudesse ser acondicionada no interior de uma estufa e que permitisse a cura simultânea de diversas varetas, ilustrado na sequência da Fig.36. A ideia inicial foi esticar a fibra entre as fendas de dois pentes encaixados nas ranhuras de uma base de madeira. Em oposição a essas ranhuras e alinhadas simetricamente com os dentes dos pentes, foram feitas perfurações sobre a base para a introdução das extremidades cônicas de pinos de madeira.

FIGURA 36 - Grade tipo 3: a) montagem do sistema; b) tensionamento da fibra; c) sistema pronto para ser levado à estufa

fonte: autor da tese

A tensão durante a cura seria garantida pela torção nos pinos, sobre os quais as extremidades das varetas, mantidas sem impregnação por matriz polimérica, foram enroladas. Porém, a fibra escorregou em todas as tentativas de se manter a tensão inicial imposta ao sistema.

6.3.4 Grade tipo 4

Para contornar o afrouxamento da tensão na fibra, o método foi modificado de torção para cravamento de pinos.

Nas laterais de uma grade de madeira, com dimensões suficientes para sua introdução em uma estufa, foram feitas 40 perfurações simétricas. Um segmento de mecha, com as extremidades livres da impregnação por matriz

polimérica e areia aplicada em sua porção central, foi posicionado sobre a grade cobrindo duas furações opostas.

As varetas posicionadas dessa forma foram tracionadas pelo estiramento e fixação por cravamento de pinos de madeira por meio de uma maça e foram conduzidas à estufa, conforme ilustrado na sequência da FIG.37.

FIGURA 37 - Detalhes da grade para 40 varetas: a) detalhe do cravamento de um pino; b) detalhe do desprendimento da areia pela vibração do cravamento; c) grade de 40 posições no interior da estufa; d) grade inutilizada pela percolação da matriz polimérica

fonte: autor da tese

Porém, a vibração causada pela sequência de golpes necessários para a cravação soltou pinos, relaxando a tensão em varetas anteriormente estiradas, além de fazer desprender os grânulos de areia impregnados de matriz polimérica. Outro problema observado foi a percolação da matriz polimérica por entre a fibra até atingir as pontas dos pinos, impedindo a reutilização de algumas cavidades que ficaram obstruídas e, conforme o caso, inutilizaram a grade completa.

6.3.5 Grade tipo 5

O último modelo desenvolvido para a sustentação das varetas durante o processo de cura necessitou de um conjunto de dispositivos a partir da fase de corte da fibra, (FIG.38), que exigiu modificar a formulação da matriz polimérica para esta ser curada a quente.

Nas extremidades de uma base em madeira com dois orifícios de 1 cm de diâmetro cada um e opostos entre si, foram instaladas hastes metálicas para a impregnação das varetas. A fita adesiva serviu para delimitar o comprimento total das varetas e garantir sua fixação aos suportes metálicos, FIG.38 (a). A base foi posicionada para a transferência e fixação das varetas na grade de cura. Depois de presas nas sapatas da grade, pelas extremidades das varetas sem revestimento, as varetas foram seccionadas e as bases removidas, FIG.38 (b).

FIGURA 38 - Sequência de movimentos para a cura de 14 varetas: a) suporte perfurado com hastes metálicas para estiramento da fibra, que é fixada com fita adesiva, que também delimita o comprimento da fibra a ser impregnado; b) a chave de rasgo atravessa o suporte para fixar a fibra com a sapata da grade

fonte: autor da tese

Outros detalhes dessa montagem estão indicados na FIG.39. A fixação da fibra na grade foi facilitada pela utilização de uma chave de rasgo para aperto da sapata, conforme está mostrado na FIG.39 (a). Esse modelo com sapatas metálicas foi criado para comportar até 14 varetas por grade, sendo possível carregar a estufa com até quatro grades simultâneas, FIG.39 (b).

FIGURA 39 - Fixação das fibras e preenchimento de uma grade: a) detalhe da chave de rasgo fixando a fibra à sapata, protegida por material antiaderente; b) detalhe de uma grade com 14 varetas preparadas para serem curadas

fonte: autor da tese

6.4 Fabricação de formas

Todas as formas foram fabricadas em madeira, fechadas por parafusos, e antes de cada lançamento de concreto, foram besuntadas com material desmoldante.

6.4.1 Formas para ensaio de flexão

Para os ensaios de flexão em corpo de prova prismático, segundo norma da AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS (2002), formas foram produzidas nas dimensões internas de 100x100x400 mm, conforme ilustra a FIG.40.

FIGURA 40 - Modelo de forma utilizada nos ensaios de flexão

fonte: autor da tese

6.4.2 Formas para ensaio *pullout*

6.4.2.1 Forma para ensaio *pullout* com bloco único

A forma adotada para ensaio de arrancamento de varetas embutidas em corpos de prova de bloco único se equipara aos modelos utilizados com barras de aço.

No formato de um cubo com 100 mm de aresta, sobre duas faces laterais opostas, foram feitos orifícios para o transpasse do reforço e para a colocação de um tubo isolador de diâmetro maior que o do reforço, conforme ilustrado na FIG.41.

FIGURA 41 - Forma para pullout em amostra de bloco único

fonte: autor da tese

6.4.2.2 Forma para ensaio *pullout* com bloco duplo

Para os ensaios com blocos duplos foi necessário manter uma fenda nas faces internas das formas para passagem das varetas e assegurar o seu posicionamento no centro dos blocos. Também nesse caso, foi colocado um tubo de diâmetro maior que o do reforço para isolar parte da vareta no interior do bloco de concreto.

As formas foram idealizadas em 11 partes distintas para facilitar sua desmontagem ao final do período de cura do concreto, sem danificar o reforço de fibras. Para essa geometria de corpo de prova, cada bloco media 100x100x100 mm, cujos detalhes estão destacados na FIG.42.

FIGURA 42 - Forma para pullout em amostra de bloco duplo

fonte: autor da tese

6.5 Preparo dos blocos de concreto

O concreto foi preparado em betoneira MAQTRON, modelo HCM160, capacidade 63 litros e 27,5 rpm, para alimentação e basculamento manuais. Antes de cada carreira de ensaios ou da variação do traço, o interior do tambor foi recoberto com um volume de concreto no traço a ser utilizado, suficiente para tingir toda a área interna da máquina. Dessa maneira, o traço definitivo não se alteraria com a perda do material aderido nas suas paredes. Esse procedimento foi repetido no início de cada série para evitar o desequilíbrio da formulação do concreto, sendo esse material descartado antes do carregamento com o traço do ensaio subsequente, FIG.43.

FIGURA 43 - Preparo do concreto com betoneira elétrica: a) betoneira de eixo móvel para operação manual; b) traço para tingir o interior da betoneira

fonte: autor da tese

A alimentação da betoneira manteve a mesma sequência em todos os lotes. Inicialmente, foi colocado todo o agregado graúdo junto com $\frac{1}{4}$ do volume de água, com batimento de 10 s; em seguida, todo o volume de cimento e $\frac{1}{4}$ do volume de água com 20 s de batimento; por fim, foi adicionado todo o agregado miúdo e o restante da água. O tempo de amassamento durou 2 minutos.

Concluída a agitação, o concreto foi transferido para as formas conforme orientações constantes na ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2008), devendo garantir o pleno recobrimento das varetas e finalizando com o adensamento do concreto para eliminação de bolhas e preenchimento de vazios. A FIG.44 ilustra essa sequência.

FIGURA 44 - Preparo de corpo de prova de bloco duplo: a) agitação da massa de concreto; b) preenchimento de forma para ensaio pullout

fonte: autor da tese

Cada conjunto de amostras permaneceu em descanso ao ambiente por cerca de 4 horas antes de ser mantido à cura submersa por 7 ou 28 dias, conforme o tipo de cimento utilizado em cada etapa. (FIG.45).

FIGURA 45 - *Aparelho para cura submersa em água potável saturada de cal: a) tanque com capacidade de 500 L e instalação para troca periódica de água; b) corpos de prova para ensaio de flexão; c) peças de bloco único para ensaio pullout; d) idem com blocos duplos*

fonte: autor da tese

6.6 Desenvolvimento do ensaio *pullout*

Para que o desenvolvimento dos ensaios *pullout* de varetas pudesse atender aos requisitos propostos pelas normas da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2008) e COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (1983), que são específicas para barras de aço, tanto a geometria do concreto como a forma de contato das fibras com a máquina de ensaio foram adaptadas a partir desses modelos.

O ensaio *pullout* tem por objetivo determinar a tensão de cisalhamento na interface fibra/matriz cimentícia, para que por meio desta seja obtida a tensão trativa na fibra. Assim, desenvolveu-se uma técnica de modificação da superfície

da fibra para que a carga aplicada na estrutura de concreto fosse transferida para a fibra num efeito de tração, pois, como se sabe, a condição de resistência à compressão é dada pelo concreto.

Para aplicação do ensaio *pullout* é necessário saber qual é a resistência média à compressão do concreto (f_{cm}) utilizado na fabricação dos corpos de prova e a área de atrito na interface do elemento de reforço com a matriz cimentícia que a envolve. No corte longitudinal mostrado na FIG.46 (a), estão ilustradas as três fases de um corpo de prova que contém um elemento de fibra: concreto, reforço (fibra) e a interface reforço/matriz cimentícia. Também mostra a região onde se concentram as forças internas de cisalhamento (C) e as forças externas de tração na fibra (F). Na FIG.46 (b), está ilustrado o reforço com barra de aço, submetido ao mesmo tipo de carregamento que as fibras.

FIGURA 46 - Corte longitudinal de um corpo de prova na região do reforço: a) detalhe da ação da força de cisalhamento (C) e de tração (F) na região de uma vareta; b) detalhe da ação de C e F na região de uma barra de aço

fonte: autor da tese

Os resultados das forças máximas de arrancamento e das tensões de cisalhamento da interface foram comparados com os resultados dos ensaios utilizando vergalhões empregados na construção civil.

A carga máxima é considerada como aquela que provoca o deslocamento inicial da fibra na interface. O valor dessa carga é referente ao atrito que surge entre a fibra e a matriz, diminuindo à medida que a fibra é retirada (sacada) da matriz, ou seja, decresce proporcionalmente à redução da área de contato entre a fibra e a matriz, motivada pela diminuição do atrito. O processo é finalizado quando não existe mais atrito entre a fibra e a matriz.

6.6.1 Ensaio *pullout* - montagem 1

O primeiro aparato experimentado teve a concepção adaptada dos modelos normalmente utilizados para ensaios com barras de aço (Oliveira e Assis, 2006), sendo os ajustes do anteparo, o nivelamento do corpo de prova e a fixação da base à máquina universal de ensaios por meio de parafusos. Detalhes da montagem do corpo de prova no aparato, apoios e fixações podem ser observados na FIG.47.

FIGURA 47 - Primeiro aparato experimentado para ensaio pullout

fonte: autor da tese

No ensaio de tração em fibras, para que os filamentos não sejam danificados devido ao efeito de aperto das garras, habitualmente o procedimento recomendado é o de colocar na extremidade do corpo de prova elementos de papelão couro (rígido), denominados tabs. Seguindo essa conduta, devido aos danos causados na extremidade das varetas, também para o ensaio *pullout* foi

aplicada essa proteção de tabs. Entretanto, diferente de um ensaio em que o corpo de prova é constituído de apenas uma mecha, que, na maioria das vezes, pode variar de 1000 a 24000 monofilamentos, o corpo de prova do presente estudo foi formado por inúmeras mechas. Isso deixou a seção da vareta com um formato quase circular, de diâmetro aproximado de 3 mm, muito superior ao de uma mecha de fibra de carbono de 12000 monofilamentos, conforme ilustra esquematicamente a FIG.48.

FIGURA 48 - Proteção das extremidades da fibra: a) tabs sobre uma mecha; b) tabs sobre uma haste

fonte: autor da tese

Dada a forma irregular do conjunto tabs/vareta, conforme observado na FIG.49, o aperto desse na garra da máquina de tração foi bastante dificultado.

FIGURA 49 - Proteção da extremidade de uma vareta com diâmetro aproximado de 3 mm no ponto de contato com as garras da máquina de ensaio

fonte: autor da tese

O aperto da pinça cônica para fixar os tabs na máquina de tração exigiu um movimento coordenado entre o operador e a movimentação precisa do dispositivo de fixação do corpo de prova preso à ponte da máquina de ensaios. Quando isso não acontecia, houve danos em diversas varetas, inviabilizando o aproveitamento desses resultados, o que sugeriu o descarte desse procedimento.

6.6.2 Ensaio *pullout* - montagem 2

Como alternativa, foi experimentada uma pinça cujo aperto era no sentido transversal ao eixo da vareta. A FIG.50 ilustra a montagem desse ensaio.

Esse aparato não revelou praticidade de utilização, pois a reposição dos corpos de prova ainda requereu movimentar 4 parafusos para posicionar a placa de reação (anteparo) perpendicular à vareta e movimentar mais 4 parafusos para resistir aos esforços de tração da prensa.

FIGURA 50 - Segunda opção de ensaio pullout: a) montagem do ensaio com pinça de aperto transversal; b) detalhes da fixação das garras planas aos tabs

fonte: autor da tese

6.6.3 Ensaio *pullout* - montagem 3

Para melhorar essa técnica, foi elaborado um suporte metálico para o corpo de prova de bloco único sem peças móveis, de forma que tanto seu engaste à máquina de ensaios como a troca de amostras fossem rápidos e eficientes. O dispositivo foi projetado para ter em uma das faces uma haste

metálica para fixação na ponte da máquina de ensaios, e na face oposta, uma fenda para permitir a acomodação do corpo de prova, conforme mostra a FIG.51. Essa construção não só facilitou bastante a montagem do bloco único no dispositivo de ensaio, como manteve o alinhamento entre os dois.

FIGURA 51 - Aparato de ensaio de corpo de prova de bloco único mostrando a haste perfurada para ser fixada na garra superior da máquina de ensaio e a fenda para passagem e centralização da vareta

fonte: autor da tese

Inúmeros ensaios foram realizados com o corpo de prova de bloco único; porém, observou-se que houve um escorregamento dos tabs devido à dificuldade de se garantir um aperto adequado pelas garras da máquina ao mesmo tempo em que se conseguiu preservar a integridade da fibra. Assim, com essa montagem, foram corrigidas várias das ocorrências relatadas nas montagens anteriores; porém, diversos corpos de prova ainda tiveram de ser descartados, tanto pelo escorregamento dos tabs, como pela ruptura da fibra fora do concreto, causada por eventual perda do alinhamento do corpo de prova.

6.6.4 Ensaio *pullout* - montagem 4

Uma nova solução foi proposta com o método construtivo para ensaio de blocos de corpo duplo.

Nesse projeto, utilizou-se o conceito do aparato da FIG.50, porém duplicado, e com isso, eliminou-se totalmente a fixação do corpo de prova nas garras por meio dos tabs, facilitando a montagem, a centralização, e eliminando qualquer possibilidade de escorregamento da vareta nos tabs ou destes nas garras de fixação da máquina universal de ensaios. Ambos os suportes foram presos à máquina por pinos de engate rápido, que também mantiveram o alinhamento das fendas, evitando a torção da vareta. A FIG.52 mostra a concepção do dispositivo e um corpo de prova de bloco duplo.

FIGURA 52 - Última montagem experimentada para execução dos ensaios pullout: a) aparato de ensaio para corpo de prova de bloco duplo; b) detalhes de um corpo de prova de bloco duplo para ensaio pullout

fonte: autor da tese

Para melhor compreensão, a FIG.53 mostra uma perspectiva de um corpo de prova de bloco duplo, em que é possível observar a posição da fibra e do tubo plástico em relação ao concreto, além de um esquema com o sentido dos esforços durante um ensaio. Com isso, como se observa no desenho, não há mais ajustes do aparato ou fixações pelas garras da máquina de ensaios. Essa

solução engenhosa permitiu garantir que toda a força de tração fosse transmitida para o corpo de prova, sem a ocorrência de escorregamentos dos tabs.

FIGURA 53 - Corpo de prova de bloco duplo: a) esquema da montagem com ênfase na posição do reforço; b) corte longitudinal do corpo de prova ilustrando as dimensões do conjunto e o sentido dos esforços aplicados no ensaio pullout

fonte: autor da tese

Cumprir afirmar que os dispositivos e métodos de ensaio utilizados ao longo deste trabalho foram aplicados em amostras similares submetidas à cura submersa, com o preparo das matrizes poliméricas e cimentícias seguindo sempre o mesmo procedimento de fabricação.

Nos ensaios *pullout*, os conjuntos foram tracionados em duas diferentes velocidades. Na fase inicial (montagens 1, 2 e 3), utilizou-se 1 mm/s, e após a troca do tipo do cimento, de CII para CPV-ARI, a velocidade de tração foi de 0,5 mm/s. Dentro de cada bloco, o comprimento de contato da interface fibra/concreto foi mantido em 50 mm, sendo que os 50 mm restantes ficaram isolados por meio de um tubo plástico de diâmetro superior ao diâmetro do reforço.

As superfícies de contato entre a matriz cimentícia e as barras de aço de diâmetros 1/4" e 3/8" apresentaram áreas respectivamente de 989 mm² e 1496 mm², enquanto que para as varetas de 3 e 9 *rovings*, as áreas médias foram respectivamente de 393 mm² e 589 mm² para hastes de 2,5 mm e 3,75 mm de diâmetro.

Foram testadas por esse método varetas de fibras de vidro, carbono e barras de aço de construção civil, para que os resultados das forças de arrancamento e das tensões de cisalhamento fossem comparados entre si.

6.7 Análise das fibras em meio alcalino

Considerando o grande salto tecnológico que os compósitos de matriz cimentícia experimentaram nas últimas décadas e mostrando um grande potencial de mercado, as empresas fabricantes de fibras de vidro, atentas a isso, desenvolveram um produto específico para atender às necessidades da construção civil, a fibra de vidro álcali resistente (FV-AR).

Conforme já dito, a adição de 16% de óxido de zircônia na massa fundida de vidro oferece resistência química em ambientes alcalinos, como é o caso do cimento. (Marinucci, 2011; Levy e Pardini, 2006).

Neste trabalho, a expectativa é de que varetas de fibra de vidro-AR ou de carbono imobilizadas em matriz cimentícia continuem íntegras durante o seu período de vida útil.

Após serem impregnadas por matriz polimérica, o que consolida as fibras como haste e cria uma barreira física contra a penetração de produtos de hidratação no interior da mecha, tanto hastes como mechas ficaram imersas em meio agressivo e em meio neutro. Então, foram tracionadas, e os resultados das diferentes situações a que foram submetidas foram comparados.

Foram preparadas 10 hastes de fibra de vidro do tipo AR (FV-AR) e 11 hastes de fibra de carbono HT-12K (FC-12K), todas com 1 *roving* e comprimento de 30 cm. Também foram preparadas, na forma como recebidas, 8 mechas de FV-AR e 6 mechas de FC sem revestimento superficial de matriz polimérica, igualmente com 1 *roving* e comprimento de 30 cm.

Todas as amostras foram imersas em solução alcalina de carbonato de sódio, pH 12, equivalente ao valor da alcalinidade média de uma matriz cimentícia, pelo período de 30 dias: 8 hastes e 3 mechas, tanto de FC-12K como de FV-AR. O mesmo procedimento foi executado em ambiente neutro, com pH 7, de água fornecida pela concessionária local, neste caso, para 3 hastes e 3

mechas de FC e para 2 hastes e 5 mechas de FV-AR. Essa sequência está apresentada na FIG.54.

FIGURA 54 - Montagem da simulação de ambiente agressivo: a) novelos de fibras, hastes, água e solução de carbonato de sódio utilizados no ensaio; b) amostras em solução de carbonato de sódio (pH 12) e água (pH 7)

fonte: autor da tese

Concluído o período de imersão, todas as amostras foram secadas ao ar e todas as mechas receberam impregnação de matriz polimérica.

Foi utilizado um adesivo à base de cianoacrilato para colar o papelão à extremidade da haste, e a geometria do tab impediu o seu escorregamento junto à garra da prensa.

A resistência das fibras que foram imersas em água pura e em solução alcalina foi determinada em ensaios de tração, que seguiram as orientações da AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS (1999).

Os resultados dos ensaios foram analisados para avaliar se as fibras que permaneceram em solução alcalina sofreram degradação, FIG.55.

FIGURA 55 - Preparo das hastes para ensaio de tração: a) secagem das fibras ao ar; b) identificação das hastes de fibra de vidro; c) ensaio de uma haste de carbono

fonte: autor da tese

6.8 Análise da cura da matriz polimérica

A cura de uma matriz polimérica é o fenômeno caracterizado pela sua passagem do estado líquido para o estado sólido. Essa matriz poderá ser considerada totalmente curada quando não mais estiver ocorrendo conversão de insaturação em ligações cruzadas entre os componentes dessa mistura.

Assim, a determinação da temperatura de transição vítrea (T_g) permite avaliar se ocorreu um grau de interligação adequado entre os grupos epóxi da resina e agentes de cura na formação de uma estrutura tridimensional rígida.

Uma curva genérica da transição vítrea de um polímero está ilustrada na FIG.56, na qual se identifica o ponto T1, que representa o início da transição, o ponto de inflexão da curva entre as linhas base do estado vítreo e do amolecido, e o ponto médio entre as duas linhas base. Essas três posições permitem determinar o valor da T_g (Marinucci, 2011).

FIGURA 56 - Curva genérica da transição vítrea de um polímero

fonte: Marinucci, 2011

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Avaliação das fibras após imersão em solução alcalina

Se o ambiente severo de alcalinidade associado ao cimento pode comprometer, em longo prazo, o desempenho dos elementos de reforço se utilizados sem nenhuma proteção superficial, o desenvolvimento da fibra de vidro-AR permitiu o uso desse material em aplicações de fibra em matrizes cimentícias e criou um novo mercado na indústria da construção civil.

Embora a fibra de vidro-AR tenha o apelo de trabalhar envolvida por cimento, julgou-se importante estudar o comportamento mecânico do material sob ação de uma solução alcalina. O mesmo aconteceu com a fibra de carbono, motivado pela ausência de estudos na literatura relacionados ao assunto.

Os resultados foram obtidos de ensaios de tração em corpos de prova de hastes, de acordo com a AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS, (1999). Comparando-se os valores da carga máxima aplicada e os módulos de elasticidade de corpos de prova mantidos em ambiente neutro com aqueles expostos a ambiente alcalino de pH 12, para a fibra de vidro-AR houve uma redução de 1,6% e para o carbono a redução foi de 0,4%.

Também foram mantidos expostos ao ambiente alcalino, pelo mesmo período de 30 dias, alguns segmentos de mechas de FV-AR e de FC, ambos sem a impregnação prévia pela matriz polimérica. Ao final desse prazo, esses corpos de prova foram tracionados da mesma maneira das hastes e a redução observada foi de 17,5% na carga máxima da fibra de vidro e 4,7% para o carbono.

Considerando os resultados obtidos dos ensaios com essas hastes, as variações, na verdade, estão dentro da margem de erro do ensaio, e na prática, os resultados podem ser considerados sem alteração. Já os corpos de prova somente de fibras imersos na solução alcalina, recordando que foram impregnados com a matriz polimérica somente após o tempo de imersão, apresentaram reduções bem maiores. A evolução dos resultados desses

carregamentos está ilustrada na sequência da FIG.57 até a FIG.64, enquanto que os valores médios das tensões e dos módulos de elasticidade são mostrados na Tabela 7.

FIGURA 57 - Hastes de FV-AR mantidas em ambiente alcalino

fonte: autor da tese

FIGURA 58 - Hastes de FC mantidas em ambiente alcalino

fonte: autor da tese

FIGURA 59 - Hastes de FV-AR mantidas em ambiente neutro

fonte: autor da tese

FIGURA 60 - Hastes de FC mantidas em ambiente neutro

fonte: autor da tese

FIGURA 61 - Mechas de FV-AR mantidas em ambiente alcalino

fonte: autor da tese

FIGURA 62 - Mechas de FV-AR mantidas em ambiente neutro

fonte: autor da tese

FIGURA 63 - Mechas de FC mantidas em ambiente alcalino

fonte: autor da tese

FIGURA 64 - Mechas de FC expostas em ambiente neutro

fonte: autor da tese

Como os elementos de reforço no presente trabalho foram inseridos na matriz cimentícia após terem sido revestidos de material polimérico, pode-se afirmar que estes não sofrerão degradação devido à alcalinidade do cimento.

A TAB.7 exhibe de maneira completa não só as propriedades das duas fibras, mas também as variações obtidas de ensaios de corpos de prova nos dois ambientes, alcalino e neutro. Analisando-se os gráficos, é possível observar que os corpos de prova tiveram um comportamento essencialmente elástico durante todo o ensaio, que é uma característica que a fibra de vidro e a de carbono apresentam, diferentemente de uma barra de aço, que apresenta patamar de escoamento e regime plástico.

A velocidade da ponte nesse ensaio foi mantida em 12,7 mm/min para todas as partidas. Cada corpo de prova foi preparado com 200 mm de comprimento nesse ensaio.

TABELA 7 - Valores médios da tensão e módulo de elasticidade em ensaios de tração em hastes de FV-AR e FC.

Material	Ambiente	Tensão (MPa)/ desvio padrão	Variação alcalino/ neutro (%)	Módulo de elasticidade (GPa)/ desvio padrão	Variação alcalino/ neutro (%)
fibra de vidro (FV-AR)	alcalino (pH 12)	1283/ 123	1,6	80/ 4	1,3
	neutro (pH 7)	1304/ 86		79/ 2	
fibra de carbono (FC)	alcalino (pH 12)	4390/ 232	0,4	257/ 15	1,3
	neutro (pH 7)	4407/ 40		263/ 12	
mecha transformada de fibra de vidro (FV-AR)	alcalino (pH 12)	1214/ 88	17,4	81/ 5	4,7
	neutro (pH 7)	1469/ 101		85/ 6	
mecha transformada de fibra de carbono (FC)	alcalino (pH 12)	4060/ 524	6,2	235/ 17	10,0
	neutro (pH 7)	4328/ 75		261/ 3	

fonte: autor da tese

A blindagem assegurada pela impregnação das fibras com a matriz polimérica impede a penetração de produtos de hidratação nos interstícios das fibras devido à alcalinidade do cimento; isso evita a degradação na superfície dos monofilamentos e garante a manutenção da integridade da fibra enquanto esta se mantém imobilizada na forma de vareta em um elemento de matriz cimentícia.

É o mesmo que afirmar que a exposição ao ambiente agressivo não afetou as varetas a ponto de modificar suas características físicas e impedir sua aplicação como elemento de reforço na forma proposta neste trabalho. A FIG.65 mostra o aspecto vitrificado da matriz polimérica quando envolve a fibra, e os grânulos de areia que representam a rugosidade aplicada sobre a haste.

FIGURA 65 - Superfície de um segmento de vareta exibindo o aspecto vitrificado dado devido à matriz polimérica envolvendo a fibra e à presença de grânulos de areia na superfície da haste

fonte: autor da tese

7.2 Determinação da temperatura de transição vítrea utilizando um calorímetro exploratório diferencial (DSC)

Na fabricação das hastes e varetas, foi utilizada uma estufa para cura da matriz polimérica, que foi regulada em patamares de 90°C a 140°C e temperatura final de 150°C, escalonados em um período de 9 horas até o resfriamento total das amostras.

Para analisar a cura da matriz polimérica utilizada na fabricação das varetas, determinou-se a temperatura de transição vítrea utilizando um calorímetro Mettler-Toledo 823^e (padrões metálicos de índio e zinco) e balança analítica Perkin Elmer modelo AD-4. A curva da amostra da matriz LY556/HY2918/DY062 analisada, obtida segundo orientação da AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS, (2003), que apresenta um valor médio da Tg de 124,5°C, está exibida na FIG.66.

FIGURA 66 - Curva de Tg da amostra da matriz LY556/HY2918/DY062

fonte: autor da tese

7.3 Determinação do diâmetro do reforço

As diferenças de rugosidade da vareta, preparada manualmente, e da barra de aço, produzida industrialmente, podem ser comparadas nas imagens dos seus respectivos segmentos, ambas com os mesmos 6,4 mm de diâmetro externo, posicionados dentro de uma forma e em um detalhe ampliado, FIG.67.

FIGURA 67 - Detalhe dos reforços de fibra e de aço: a) geometria da superfície de contato de uma vareta; b) geometria da superfície de contato de uma barra de aço

fonte: autor da tese

Depois de imobilizada pela matriz polimérica, a vareta estabeleceu uma boa compatibilidade mecânica com a matriz cimentícia, decorrente da rugosidade, como ficou comprovado nos resultados dos ensaios de arrancamento. Porém, foi preciso reposicionar o entendimento de que a ruptura do equilíbrio do sistema não ocorreu na interface fibra/matriz polimérica, mas sim, na interface vareta/matriz cimentícia.

Com isso, o diâmetro de atrito deve ser medido na seção da haste para se obter o valor da tensão de cisalhamento, ao invés de se considerar o diâmetro externo da vareta, que engloba também a rugosidade. Essa alteração, portanto, do valor do diâmetro de 6,3 mm para 3,75 mm, conforme ilustrado na FIG.68, eleva o valor da tensão de cisalhamento calculado para a fibra acima dos valores obtidos com as barras de aço.

Essas constatações reforçam a inexistência de carga suficiente sobre a estrutura de concreto que venha a provocar uma resposta da fibra junto ao atrito da interface. E eliminam também a necessidade de submeter o elemento de reforço a uma análise em microscópio eletrônico de varredura (MEV). No caso de reforço de fibra, o diâmetro pode ser modificado conforme o valor da carga que tenha de ser compensado para o equilíbrio do sistema.

FIGURA 68 - Seção transversal de um elemento de reforço de fibra de carbono indicando a diferença dos diâmetros considerados para o cálculo da tensão de cisalhamento

fonte: autor da tese

7.4 Ensaio de flexão a 4 pontos

Ensaio de flexão foram feitos ainda na fase de investigação do comportamento da fibra nua embutida diretamente na matriz cimentícia, com a intenção de analisar a retenção da fibra como recebida no cimento. A FIG.69 ilustra corpos de prova com dimensões externas de 100x100x400 mm, preparados com um bloco apenas de concreto e blocos com uma, duas e três camadas de reforços, estes dispostos a cada 10 mm no sentido horizontal e 15 mm no sentido vertical, medidos a partir das faces externas dos blocos de concreto.

FIGURA 69 - Extremidade dos corpos de prova prismáticos: a) bloco sem reforço; b) bloco com uma camada de reforço; c) bloco com duas camadas de reforço; d) bloco com três camadas de reforço

fonte: autor da tese

Na FIG.70, está mostrada parte da seção transversal do bloco que aparece na FIG.69 (d). O posicionamento foi feito mantendo-se o espaçamento entre as varetas de 10 mm, tanto na direção vertical quanto na horizontal, medidos a partir das faces externas da peça. Nessa imagem, os pontos iluminados são as varetas de fibra de vidro posicionadas diante de um foco luminoso, colocado atrás da peça. As irregularidades na precisão dos distanciamentos entre as varetas são devido à colocação manual dos reforços.

FIGURA 70 - Ilustração da seção transversal do bloco de concreto mostrando o arranjo com 3 camadas de reforço.

fonte: autor da tese

A FIG.71 mostra o aumento na tenacidade (A) do concreto, representada pela área (carga de ruptura x deformação) calculada abaixo de cada curva, obtida como resultado do aumento do número de linhas de fibras contínuas dispostas nos blocos de matriz cimentícia. A carga máxima de ruptura foi atingida pelo corpo de prova que foi fabricado com 9 linhas de fibra dispostas em 3 camadas.

Apesar de uma diferença de valores em relação aos resultados com barras de aço (64377 N) mostrados na FIG.72, o progressivo aumento da força a ser aplicada no corpo de prova, a cada nova alteração da disposição das fibras, indicou ser factível melhorar o desempenho de aderência do reforço de fibra no concreto.

A colocação de 80 mechas torcidas de fibras de carbono, distribuídas em 5 linhas duplas, manteve a carga de ruptura no patamar de 15.127 N, sem ultrapassar a carga atingida pela barra de aço, conforme pode ser observado na FIG.73, e mantendo a resistência à flexão no mesmo patamar de valores da distribuição anterior com 27 *rovings*.

O passo seguinte foi ensaiar fibras com a modificação da superfície para observar as alterações nas condições de aderência.

FIGURA 71 - Tenacidade da amostra proporcional ao aumento da quantidade de fibras contínuas imobilizadas

fonte: autor da tese

FIGURA 72 - Curva de flexão de uma amostra reforçada com 4 linhas de barras de aço com 6,3 mm de diâmetro

fonte: autor da tese

FIGURA 73 - Curva de flexão de uma amostra reforçada com 5 linhas duplas, com 8 rovings torcidos na forma como recebidos de fibra de carbono (FC)

fonte: autor da tese

A rugosidade provocada pelos grânulos de areia aumentou a condição de aderência na interface fibra/matriz cimentícia, evitou o escorregamento das

fibras internas do *roving* e elevou os valores da carga de ruptura do corpo de prova até os valores obtidos com reforço de barras de aço. Com reforço de 9 varetas o corpo de prova atingiu 50148 N, FIG.75.

FIGURA 74 - Curva de flexão de uma amostra reforçada com 9 varetas com a rugosidade provocada pelos grânulos de areia

7.5 Ensaio *pullout*

7.5.1 Resultados com bloco único

As fases iniciais dos ensaios *pullout* ficaram caracterizadas pelo desenvolvimento praticamente simultâneo do projeto da vareta de reforço e da criação do aparato de ensaio. Este último foi desenhado inicialmente contendo uma base que exigia um pré-nivelamento e a manipulação de 8 porcas e parafusos a cada troca de amostra, que evoluiu para um dispositivo formado por um suporte de troca rápida do corpo de prova de bloco único.

Os dois sistemas apresentaram resultados de resistência ao cisalhamento semelhantes, tanto para varetas de fibra de vidro-AR como para varetas de fibra de carbono, porém com grande quantidade de amostras descartadas por danos nas fibras ou escorregamento dos tabs. Em ambos os casos, foram experimentadas fixações das varetas por garras de aperto cônico e

aperto perpendicular plano. Nas FIG.47 e FIG.51, estão ilustrados esses dois dispositivos de ensaio.

Os experimentos dessa fase inicial foram feitos com corpos de prova de concreto com resistência média à compressão (f_{cm}) de 29 MPa aos 28 dias, fabricados com cimento CII-E-32, areia média e brita nº1. As varetas foram montadas com 9 *rovings* de fibra, impregnadas da matriz polimérica para cura a quente, e tiveram a rugosidade formada por meio da fixação de areia na superfície da fibra. O diâmetro externo das varetas (incluindo a rugosidade da areia), em média, foi de 6,4 mm, o mesmo diâmetro das barras de aço ensaiadas.

A análise dos corpos de prova depois dos ensaios permitiu observar que os grânulos de areia permaneceram retidos na massa de concreto, enquanto que a vareta, ao ser removida do interior do bloco, apresentava aspecto liso. Esse efeito evidencia que a ruptura no ensaio *pullout* ocorreu pelo cisalhamento da matriz polimérica, em uma região mais próxima da haste de fibra. Portanto, passou-se a considerar para efeito do cálculo das tensões de cisalhamento o valor do diâmetro da haste.

Os resultados do ensaio *pullout* foram então comparados com os resultados obtidos de corpos de prova fabricados com barras de aço corrugado de 6,4 mm de diâmetro e ensaiados com os mesmos aparatos de ensaio e características do concreto, e estão indicados na TAB.8.

Para efeito de comparação, assumindo que as varetas tivessem 10 mm de diâmetro e, portanto, a mesma área de atrito calculada para as barras de aço, isto é, 989 mm², e utilizando-se a tensão média de cisalhamento obtida nos ensaios, verificou-se um aumento aproximado no valor das forças de arrancamento de 16% favorável à fibra de vidro-AR e de 21% favorável ao carbono, ambos em relação às barras de aço, conforme pode ser visto na TAB. 9, o que pode ser considerado um dado importante quanto ao que pode representar em redução do peso em relação a estruturas armadas com barras de aço.

Foram descartadas desses resultados todas as amostras em que ocorreu o escorregamento dos tabs, logo no início desses ensaios, e também diante dos danos às varetas causados pelas pinças metálicas ou torções durante a montagem e preparo dos ensaios.

TABELA 8 - Tensões de cisalhamento dos corpos de prova reforçados com varetas de FV-AR e barras de aço, nas duas primeiras etapas do trabalho

Elemento de reforço	Diâmetro do reforço (mm)	Área de atrito (mm ²)	Força de arrancamento (kN)	Tensão de cisalhamento (MPa)
Fibra de vidro-AR (FV-AR)	3,75	589	11,10	18,84
Fibra de carbono (FC)	3,75	589	11,57	19,64
Barra de aço	10,0	989	16,37	16,19

fonte: autor da tese

TABELA 9 - Forças de arrancamento assumindo para efeito de comparação os mesmos diâmetros para varetas e barras de aço

Elemento de reforço	Diâmetro do reforço (mm)	Área de atrito (mm ²)	Força média de arrancamento (kN)	Tensão média de cisalhamento (MPa)
Fibra de vidro-AR	6,3	989	18,63	18,84
Fibra de carbono	6,3	989	19,85	19,64
Barra de aço	10	989	16,37	16,19

fonte: autor da tese

7.5.2 Resultados com bloco duplo

Com o objetivo de reduzir a quantidade de amostras descartadas, ou seja, elevar a quantidade de resultados confiáveis por lote, na terceira fase do trabalho, foi utilizado o aparato de ensaio para corpos de prova com bloco duplo, unidos pelo elemento de reforço centralizado, conforme já foi mostrado na FIG.52.

Nessa segunda etapa dos trabalhos, foi utilizado o cimento CPV-ARI como ligante na preparação da massa de concreto. Sendo um cimento de alta resistência inicial, foi possível reduzir o tempo de cura das amostras, de 28 para 7 dias.

Seguindo um planejamento para esses experimentos, nessa etapa do trabalho, além da resistência à compressão do concreto, de 30 MPa, foi introduzido um segundo valor para essa resistência, de 40 MPa, que, associadas a duas rugosidades (rugosidade fina – RF e rugosidade grossa – RG) e também aos dois valores de diâmetros dos reforços ($\emptyset$), formaram o conjunto de dados necessários para se analisar o comportamento dos corpos de prova de bloco duplo reforçados com barras de aço, fibras de vidro-AR (FV-AR) e de carbono (FC).

Essas variáveis consideradas para cada grupo formado por três amostras resultaram nos valores médios da força de arrancamento (F_m) e tensão de cisalhamento (τ_m) para os corpos de prova de bloco duplo, que estão mostrados na TAB.10, por meio do ensaio *pullout*.

Para melhor visualização dos resultados de F_m e τ_m , as variáveis diâmetro dos reforços ($\emptyset$), rugosidade fina (RF), grossa (RG), resistência média à compressão do concreto (f_{cm}) e tensão média de cisalhamento (τ_m) foram posicionadas em um sistema de eixos cartesianos (tridimensional e bidimensional), conforme ilustra a FIG.75.

Nos vértices dessas figuras geométricas formadas pela interseção dos valores de diâmetro de varetas, resistência à compressão do concreto e rugosidade, estão identificados os valores relativos às forças médias de arrancamento e, entre parênteses, suas respectivas tensões de cisalhamento.

TABELA 10 - Valores das variáveis utilizadas no planejamento de experimentos e resultados obtidos para força média de arrancamento (F_m) e tensão média de cisalhamento na interface fibra/matriz cimentícia (τ_m)

Grupo	f_{cm} (MPa)	Diâmetro médio da rugosidade (mm)	$\varnothing$ (mm)	Força média de arrancamento (N)	Tensão média de cisalhamento (MPa)
1	30	0,45	2,50	5188	13
2	40	0,45	2,50	5343	14
3	30	0,45	3,75	9221	16
4	40	0,45	3,75	9766	16
5	30	1,30	2,50	5384	14
6	40	1,30	2,50	5771	15
7	30	1,30	3,75	11444	19
8	40	1,30	3,75	12632	21
9	30	0,12 (nervura)	6,30	7725	7
10	40	0,12 (nervura)	6,30	8351	8
11	30	0,4 (nervura)	10,00	11563	8
12	40	0,4 (nervura)	10,00	14935	9

fonte: autor da tese

Como exemplo, a força de 9766 N representa a força média necessária para romper o atrito de uma vareta de 3,75 mm de diâmetro, com rugosidade 0,45 mm, inserida dentro de um bloco de concreto de 40 MPa de resistência média à compressão, e a tensão média de cisalhamento, nesse caso, é 16 MPa, conforme pode ser visto na FIG.76 (a), onde também estão representados os resultados médios dos ensaios com reforço de varetas de fibras, com três variáveis que têm no cubo a figura básica para sua apresentação. Na FIG.76 (b), estão representados os resultados para barras de aço corrugado, que, devido à dimensão da nervura ser fixa para cada diâmetro das barras de aço de uso em construção civil, a representação cartesiana plana é mais apropriada para essa apresentação.

FIGURA 75 - Representação gráfica dos resultados dos ensaios pullout: a) com varetas de fibras; b) com barras de aço corrugado

fonte: autor da tese

Na comparação entre os resultados dos ensaios dispostos nas arestas do cubo e do quadrado, respectivamente para reforços de fibras sintéticas e barras de aço, pode-se identificar um aumento de 85% no valor da tensão de cisalhamento considerando varetas RF de $\varnothing = 2,5$ mm (13 MPa) e barras de aço de $\varnothing = 6,3$ mm (7 MPa), e um aumento de 100% entre varetas RF de $\varnothing = 3,75$ mm (16 MPa) e barras de aço de 10 mm (8 MPa), ambos para concreto de f_{cm} 30 MPa.

Com blocos de matriz cimentícia de $f_{cm} = 40$ MPa, os resultados mostraram um aumento de 87% comparando-se varetas RG de $\varnothing = 2,50$ mm (15 MPa) e barras de aço de $\varnothing = 6,3$ mm (8 MPa), e um aumento de 133% se comparadas varetas RG de 3,75 mm (21 MPa) com barras de aço de 10 mm (9 MPa).

Na FIG.76, estão exemplificadas as curvas representativas de dois dos ensaios pullout executados para concreto C40 e barras de aço de diâmetros 6,3 mm (1/4") e 10 mm (3/8").

FIGURA 76 - Curva de carregamento versus deformação de dois ensaios pullout com concreto C40 e barras de aço 6,3 mm e 10 mm

fonte: autor da tese

Os resultados de quatro dos ensaios *pullout* executados para concreto C40 e C30, variando-se a rugosidade e o diâmetro da vareta, estão também mostrados respectivamente na FIG.77 e na FIG.78.

Os gráficos representados nas FIGS. 76, 77 e 78, juntamente com a representação espacial mostrada na FIG.16, permitem acompanhar o comportamento do sistema em relação às interações de segunda ordem, isto é, a força de arrancamento e a tensão de cisalhamento, que variam conforme a posição que se considere sobre o eixo da variável analisada. Quando se combinam as variáveis aos pares, é possível verificar que com o aumento simultâneo do diâmetro da vareta e da rugosidade, atinge-se maior valor para a força de arrancamento e para a tensão de cisalhamento do que seja possível ao se combinar cada uma dessas duas variáveis com a rugosidade.

FIGURA 77 - Curva de carregamento versus deformação de quatro dos ensaios pullout executados com matriz cimentícia C40

fonte: autor da tese

FIGURA 78 - Curva de carregamento versus deformação de quatro dos ensaios pullout executados com matriz cimentícia C30

fonte: autor da tese

Assumindo que na TAB.10 fosse feita uma equivalência da mesma área de atrito calculada para as barras de aço (989 mm²) e varetas, e fosse mantida a tensão média de cisalhamento (que consta na TAB.10), encontram-se variações significativas entre 76% e 158% e 47% e 120% respectivamente para concretos de resistência à compressão de 30 MPa (f_{cm} 30) e 40 MPa (f_{cm} 40), conforme se observa na TAB.11.

Desse modo, o desenvolvimento proposto neste estudo indica que a rugosidade superficial criada na superfície da fibra, combinada com o diâmetro do reforço, propicia valores de resistência cisalhante mais elevados do que aqueles obtidos com as barras de aço.

TABELA 11 - Comparação entre forças calculadas (F_{mC}), assumindo que todas as varetas tivessem diâmetros equivalentes ao da barra de aço (10 mm), para ensaios *pullout* com bloco duplo

Lote	f_{cm} (MPa)	Diâmetro médio da rugosidade (mm)	Ø inicial (mm)	F_{mR} Real (N)	F_{mC} Calculada (N)	Aumento (%)
1	30	0,45	10,00	5188	20410	76
2	40	0,45	10,00	5343	21980	47
3	30	0,45	10,00	9221	25120	117
4	40	0,45	10,00	9766	25120	68
5	30	1,30	10,00	5384	21980	90
6	40	1,30	10,00	5771	23550	58
7	30	1,30	10,00	11444	29830	158
8	40	1,30	10,00	12632	32970	120
9	30	0,12 (nervura)	10,00	7725	10990	-
10	40	0,12 (nervura)	10,00	8351	12560	-
11	30	0,4 (nervura)	10,00	11563	11563	-
12	40	0,4 (nervura)	10,00	14935	14935	-

fonte: autor da tese

7.6 Considerações finais

O êxito alcançado neste trabalho está diretamente relacionado ao conjunto de ações envolvidas no desenvolvimento de compósitos de matriz cimentícia com reforços contínuos de fibras de carbono e fibras de vidro, que estão diretamente relacionadas aos métodos de fabricação dos corpos de prova, em especial, para efetuar o ensaio *pullout*, para o qual não se dispõe de literatura específica em relação ao reforço de fibras sintéticas contínuas, o que exigiu completo desenvolvimento de parâmetros de processo e adaptação do método às normas técnicas vigentes, elaboradas para serem seguidas pela indústria da construção civil para ensaios com barras de aço.

As tentativas de ajustes desses aparatos de ensaios, da geometria dos corpos de prova e dos acessórios de apoio aos ensaios, demandaram diversas etapas de desenvolvimento até que fosse possível produzir um suporte que garantisse praticidade de operação e reprodutividade nos resultados para varetas rugosas, que demonstraram ser possível conseguir uma eficiente condição de aderência do reforço de fibra na interface vareta/matriz cimentícia.

Considerando-se o âmbito geral do presente trabalho, é possível creditar todo esse desenvolvimento como parte dos resultados obtidos.

8 CONCLUSÕES

As falhas que comprometeram os resultados dos ensaios de algumas amostras, ou até mesmo de lotes de amostras, ocorreram em decorrência do desenvolvimento do método de reforço e dos ajustes e modificações nos aparatos de ensaio, necessários para adaptação às orientações contidas nas normas técnicas específicas para barras de aço da construção civil.

Os resultados do teste de tração (degradação) mostraram que o desempenho das varetas de fibras de vidro-AR e de carbono não foi afetado pela alcalinidade da matriz cimentícia. Não foi observada a ocorrência de produtos de hidratação no material consolidado.

A análise da temperatura de transição vítrea mostrou que houve cura da matriz polimérica, o que permite que toda a carga seja transferida para as fibras de reforço pela interface fibra/rugosidade.

Uma observação em escala macroscópica do ponto de ruptura de um sistema submetido ao teste de arrancamento permitiu identificar a rugosidade ainda envolta pela matriz polimérica e aderida ao concreto, destacada da fibra também envolta por parte da mesma matriz. A resistência de atrito, portanto, é garantida pela resistência ao cisalhamento da matriz polimérica.

Considerando-se a flexibilidade de escolha das variáveis inerentes ao concreto e à fabricação das varetas com fibras sintéticas contínuas para reforço de estruturas, é possível afirmar que esse método pode se colocar com vantagens em relação ao uso de barras de aço da seguinte forma:

a) Se for considerada a aplicação desse método em ambientes agressivos, o benefício que se obtém é a economia financeira em longo prazo

pela eliminação das reconstruções de obras condenadas à demolição e o consequente transporte desse material de desmonte.

b) Também se observa a possibilidade de redução do peso próprio dessas estruturas.

c) Outra vantagem é conseguir eliminar a influência de campos eletromagnéticos, devido à concentração de armaduras de aço, em aparelhos de alta sensibilidade que venham a ser instalados em locais construídos com estruturas reforçadas com varetas de fibras.

A possibilidade de escolher as características mais interessantes do concreto e das varetas de reforço permite individualizar o concreto reforçado com varetas (varetado) para cada estrutura, priorizando a variável mais interessante para cada caso, como a resistência, custo ou trabalhabilidade para cada peça, garantindo sua estabilidade e otimizando o uso dos reforços.

Com os aumentos verificados para os valores da força de cisalhamento, quando se assume o mesmo valor para os diâmetros dos reforços de fibras sintéticas e barras de aço, fica atendido o objetivo geral deste trabalho quanto ao compromisso de apresentar uma técnica de incorporação de fibras contínuas em uma matriz cimentícia, produzindo compósitos com possível utilização na fabricação de elementos estruturais.

Numericamente significa que para uma vareta de fibra de carbono ser sacada (*pullout*) de um bloco duplo de matriz cimentícia (f_{cm} 30 MPa) são necessários 29,83 kN de força de tração, que é 158% superior à força necessária para remover uma barra de aço, a qual atinge 11,56 kN.

Se a mesma comparação fosse aplicada para uma matriz cimentícia (f_{cm} 40 MPa), para se remover uma vareta de fibra de carbono (*pullout*) de um bloco duplo de concreto seriam necessários 32,97 kN de força de tração, 120% superior aos 14,94 kN necessários para remover uma barra de aço.

9. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Variar a formulação da matriz polimérica para obter diferentes valores numéricos no ensaio *pullout*.

Variar os patamares superiores e inferiores de cada um dos três parâmetros utilizados no ensaio *pullout*.

Tracionar duas e três varetas simultâneas em um bloco único para analisar a influência das zonas restritivas e a distância mínima de sua utilização.

Variar o comprimento de ancoragem e encontrar o limite mínimo e máximo de trabalho para cada conjunto de resistência do concreto e diâmetro da vareta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. ***Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber-Reinforced Concrete***¹. Pennsylvania: ASTM, 2002 (ASTM C-1399 02).

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. ***Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperatures by Differential Scanning Calorimetry***. Pennsylvania: ASTM, 2003 (ASTM E 1356-03).

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. ***Standard test methods for properties of continuous filament carbon and graphite fiber tows***. Pennsylvania: ASTM, 1999. (ASTM-D-4018).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos de prova de argamassas e concreto***. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. (NBR-9479).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Cimento portland de alta resistência inicial***. Rio de Janeiro: ABNT, 1991. (NBR- 5733).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Cimento portland composto***. Rio de Janeiro: ABNT, 1991. (NBR-11578).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova***. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. (NBR 12142).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova***. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. (NBR-5738).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***Projeto de estruturas de concreto – procedimento***. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. (NBR 6118).

BANK, L.C.; OLIVA, M.G.; ARORA, D.; BOROWICZ, D.T. Rapid strengthening of reinforced concrete bridges. University Wisconsin-Madison. ***Technical Report 03-06***. Engineering University of Wisconsin, Madison: Department of Civil and Environmental, 2003.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. ***Como fazer experimentos***. Porto Alegre, RS: Bookman, 2010. cap. 3, como variar tudo ao mesmo tempo. p. 99 144.

BENTUR, A.; BEN-BASSAT, M.; SCHNEIDER, D. Durability of glass-fiber-reinforced cements with different alkali-resistant glass fiber. ***Journal American Ceramic Society***, n.68, v.4, p.203 – 208, 1985.

CAETANO, L.F.; GRAEFF, E.A.G.; GARCEZ, E.O.; BERNARDI, S.T.; SILVA Fº., L.C.P. Compósitos de matriz cimentícia reforçada com fibras. In: II SEMINÁRIO DE PATOLOGIAS DAS EDIFICAÇÕES “NOVOS MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES”. 18 e 19 de novembro, 2004, Porto alegre, RS.

CALLISTER JR., W.D. ***Ciência e engenharia de materiais***. Rio de Janeiro, RJ: LTC-Livros Técnicos e Científicos, 2002. cap. 17, compósitos. p. 359-362.

CÁNOVAS, M. F. ***Patologia e terapia do concreto armado***. São Paulo, SP: Pini, 1988. cap. 2, patologia dos materiais, p. 27.

CASTRO, F.C. Elementos estruturais de concreto armado com barras de fibra de vidro. In: 36º REUNIÃO DO INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO - 36º REIBRAC. 19 a 23 de setembro, 1994, Porto Alegre, RS.

CHAMIS, C. C. Mechanics of load transfer at the interface. In: PLUEDDERMANN, E.P. (Ed.) – Interfaces in polymer matrix composites. New York: Academic, 1974.

CHAWLA, K.K. Composite materials – science and engineering. New York: Springer –Verlag, 1988. CLEVER REINFORCEMENT COMPANY, s/d. Disponível em: <<http://www.reinforcement.ch/>>. Access in: 20 jan. 2014.

CHENAF, M. Carbon fibre to reinforce buildings. ***JEC – COMPOSITES***, n.15, p. 29, 2005.

CLEVER REINFORCEMENT COMPANY, s/d. Disponível em: <<http://www.reinforcement.ch/>>. Acesso em: Jan 20, 2014.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON - RILEM/CEB/FIB.

Recommendations on reinforcement steel for reinforced concrete. Revised edition of: RC6 Bond test for reinforcement steel: (2) Pull-out test. Lausanne: CEB Manual on concrete reinforcement technology, 1983.

DIAS, S. J. E.; JUVANDES, L. F. P.; FIGUEIRAS, J. A. Comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com sistemas compósitos de CFRP unidirecionais. UM – Repositorium, n.14, 2002. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/2533>. Acesso em: 10 mai. 2014.

DIAS, S. J. E.; JUVANDES, L. F. P.; FIGUEIRAS, J. A. Efeito da pré-fendilhação do betão no comportamento à flexão de faixas de laje reforçadas com sistemas compósitos de CFRP. UM – repositoriun, n. 19, 2004. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/2553>. Acesso em: 10 fev. 2009.

DUCATTI, V. A. **Concreto de elevado desempenho: estudo da aderência com a armadura**. 1993. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

FARIA, R.; ROCHA A. P. Pesquisadores desenvolvem argamassa compósita flexível. **PINI Web**, artigo 135059-1, 2009. Disponível em: <http://piniweb.pini.com.br/construcao/tecnologia-materiais/pesquisadores-americanos-desenvolvem-argamassa-flexivel-135059-1.aspx>. Acesso em: 15 mai. 2014.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto. Ensino. Pesquisa e Realizações**. São Paulo, SP: IBRACON, 2005. cap. 39, concreto com fibras. p. 1195 – 1225.

FRANÇA, V.H. **Aderência aço-concreto – uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha**. 2004. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira.

GHUGAL, Y. M.; DESHMUKH, S. B. Performance of alkali-resistant glass reinforced concrete. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, n. 6, v. 25, p. 617 – 630, 2006.

GUIA BÁSICO DE UTILIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND: Boletim Técnico-106. 7ª edição, São Paulo, SP: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002.

JACOB, A. Composites offer help in conservation of historic buildings. **Reinforced Plastics**, v. 51, p. 30-34, 2007.

KUTARBA, M. P.; BROWN, J. R.; HAMILTON, H. R. Repair of corrosion beams with carbon fiber – reinforced polymer composites. **Composites Fabrication**, p. 32 – 39, Nov. – Dec. 2004.

LEIDERMAN, E. **Materiais de construção civil: concreto**. São Paulo, SP: Centro Acadêmico Horácio Lane, 1975. Parte I-B.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. **Construções de concreto: princípios básicos sobre a armação de estruturas de concreto armado**. Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 1978. v.3, cap. 4, ancoragem das barras da armadura, p. 31-52.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L.C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo, SP: Edgard Blücher, 2006. cap. 1, considerações gerais e estado da arte. p. 1.

MARINO, M.A. Curso de engenharia civil. UFPR, 2006. Disponível em: <<http://www.cesec.ufpr.br/disciplinas/concretoarmado/>>. Acesso em 16 jul. 2014. Referência Pessoal.

MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos: fundamentos e tecnologia**. São Paulo, SP. 1ª ed. Artliber Publisher, 2011.

MATANA, M.; GALECKI, G.; MAERS, N.; NANNI, A. Concrete substrate preparation and characterization prior to adhesion of externally bonded reinforcement. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BOND BEHAVIOR OF FRP IN STRUCTURES. December 7-9, 2005. **Proceedings...** Hong Kong: International Institute for FRP in Construction, 2005. p. 133-139.

MEHTA, P.H.; MONTEIRO, P.J.M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. New York, USA. Mc Graw-Hill, 2006, cap. 10, concrete at early age. p. 351-352.

MEIER, H. 10 years of successful strengthening in construction. **JEC – COMPOSITES**, n 15, p. 30-33, Feb.- Mar. 2005.

MENDONÇA, P. de T.R. **Materiais compósitos e estruturas-sanduiche: projeto e análise**. Barueri, SP: Manole, 2005. cap. 1, tipos de compostos, fibras e matrizes. p. 3.

MONTOYA, P.J.; MESEGUER, A..G.; CABRÉ, F.M. **Hormigon armado**. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 2000. cap. 4, preparación y puesta en obra del hormigón. p. 60-74.

MOTHE, C.; ARAUJO, C.R. Caracterização térmica e mecânica de compósito de poliuretano com fibras de carauá. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v.14, nº4, p. 274-278, 2004.

OLIVEIRA, M.J.E.de; ASSIS, C.S.de. Aderência do aço-concreto produzido com agregado reciclado. **Exacta**, v.4, n.1, p135-141, jan./jun. 2006.

PAGE, C.L.; PAGE, M.M. **Durability of concrete and cement composites**. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited, 2007. cap. 1, Introduction. p. 1-9.

PFEIL, W. **Concreto armado**. Rio de Janeiro, RJ. LTC-Livros técnicos e científicos editora. cap. 1, conceitos gerais. p. 1., 1985.

PICANÇO, M.S.; GHAVAMI, K. Comportamento à compressão de argamassas reforçadas com fibras vegetais da Amazônia. **Revista Escola de Minas**, v. 61, n. 1, p. 13–18, 2008.

PINHEIRO, L.M.; MUZARDO, C.D. **Fundamentos do concreto e projetos de edifícios**. São Carlos, SP: Escola de Engenharia de São Carlos-USP–Depto. de Estruturas, 2007. cap. 10, Aderência e ancoragem.

QUARCIONI, V.A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland – estudo em pasta**. 2008. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

SANTOS L.M. **Cálculo de concreto armado**. São Paulo, SP: Editora Edgard Blücher, 1977. v.1, cap. B, uma nova filosofia de segurança. p. 21-38.

TEZUKA, Y. Concreto armado com fibras: Estudo Técnico-94. 2ª edição, São Paulo, SP, Associação Brasileira de Cimento Portland, 1999.

TOLEDO FILHO, R. D.; ENGLAND G. L.; GHAVAMI, K. **Comportamento em compressão de argamassas reforçadas com fibras naturais**. Campina Grande: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e ambiental, 1997. v.1, p.79-88.

TULIKIAN, B.F., HELENE, P. **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo, SP: IBRACON, 2011. cap. 12, dosagem dos concretos de cimento portland.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo, SP: Mc Graw-Hill do Brasil, Universidade de São Paulo, 1977. cap. 1, os solos sob o ponto de vista da engenharia. p. 37-38.

YAO, J.; LI, X.; LI, Z. Experimental study of a circular concrete column reinforced with a composite tube. **Composites Science and Technology**, n. 13, v. 61, p. 1881-1887, 2001.