

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

***INVESTIGAÇÃO DOS EFEITOS DE TEMPERATURAS  
ELEVADAS EM REFORÇOS ESTRUTURAIS  
COM TECIDOS DE FIBRA DE CARBONO***

Rogério Cattelan Antochaves de Lima

Dissertação de Mestrado

PORTO ALEGRE

2001

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

***INVESTIGAÇÃO DOS EFEITOS DE TEMPERATURAS  
ELEVADAS EM REFORÇOS ESTRUTURAIS  
COM TECIDOS DE FIBRA DE CARBONO***

Rogério Cattelan Antochaves de Lima

Dissertação apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

PORTO ALEGRE

2001

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelos Orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

Prof. *Luiz Carlos Pinto da Silva Filho*

Orientador

---

Prof. *João Luiz Campagnolo*

Colaborador

---

Prof. *Francisco de Paula Simões Lopes Gastal*

Coordenador do Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Civil

BANCA EXAMINADORA

Prof. *Luiz Carlos Pinto da Silva Filho* (Orientador)

Ph.D. pela University of Leeds, Reino Unido

Prof. *João Luiz Campagnolo* (Colaborador)

M.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. *Paulo Roberto do Lago Helene*

Dr. pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Prof.<sup>a</sup>. *Denise Carpena Coitinho Dal Molin*

Dra. pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Prof. *Hélio Adão Greven*

Dr-Ing. pela Universidade Técnica de Hannover, Alemanha.

*“A mente de um homem, uma vez ampliada por uma nova idéia,  
jamais retorna à sua dimensão original.”*

Oliver Wendell Holmes

# AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho pelos conhecimentos transmitidos e pela constante disponibilidade, atenção e amizade durante a orientação dos trabalhos.

Ao Prof. João Luiz Campagnolo pela vasta experiência profissional transmitida ao longo desta pesquisa.

A Prof<sup>a</sup>. Denise Dal Molin pela orientação durante o período básico e colaboração na escolha do tema de pesquisa.

Ao Prof. Andriei Beber, companheiro de mesmo ideal, pelos conhecimentos e ajuda na conduta da pesquisa.

Aos técnicos Eurípedes Fontes, Paulo Bueno, Flávio Lima e auxiliares Alcemar Ramos, Airton Freitas, Éderson Soares e Vanderlei Soares pela colaboração nas diversas etapas da pesquisa.

Aos bolsistas Alessandra Moro, Carlos A. Theisen, Daniela Brandão, Daniele Caberlon, Eduardo Schnitzler, Fabrício De Paoli, Karin Malcum, Luciane Caetano e, em especial, ao Lucas Pasquali pelo apoio durante a execução dos ensaios e pelos momentos de grande amizade que vivenciamos.

Ao Prof. Hélio Greven, Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Prof. Carlos Ferreira e a bibliotecária June Scharnberg pelo acompanhamento em etapas específicas do estudo. A colega Martina Lersch pela tradução das bibliografias em alemão. Ao Laboratório de Materiais Cerâmicos pelo empréstimo de equipamentos.

Ao Prof. Dario Klein, aos colegas de turma Andréa Naguissa, Anelise Todeschini, Cristina Brito, Giane Grigoletti, Ludmila Mattos, Maki Tokudome, Marcelo Azambuja, Paulo Marchesan, Rafael Kluwe, Roberto Barbosa e Valéria Pereira e aos amigos Graziela Grando, Liliani Gaeversen, Luciana Mânica e Ranier Barbieri pelo convívio fraterno ao longo destes dois anos.

Aos meus pais e familiares que, mesmo distantes, contribuíram no decorrer desta jornada com seu estímulo e carinho, dissipando o desânimo nos momentos difíceis.

Finalizando, a Deus que me deu a vida e as condições para chegar onde estou.

# SUMÁRIO

<i>Agradecimentos</i>	v
<i>Sumário</i>	vi
<i>Lista de Figuras</i>	x
<i>Lista de Quadros</i>	xii
<i>Lista de Tabelas</i>	xiii
<i>Resumo</i>	xiv
<i>Abstract</i>	xv
<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Considerações Iniciais</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Justificativa</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Hipóteses</b>	<b>5</b>
<b>1.4 Objetivos</b>	<b>5</b>
1.4.1 Objetivo Específico	6
1.4.2 Objetivos Secundários	6
<b>1.5 Limitações do Estudo</b>	<b>6</b>
<b>1.6 Estrutura da Dissertação</b>	<b>7</b>
<b>Reforços com Tecidos de Fibra de Carbono</b>	<b>10</b>
<b>2.1 Considerações Iniciais</b>	<b>10</b>
<b>2.2 A Técnica de Reforço com Tecidos de Fibra de Carbono</b>	<b>14</b>
2.2.1 Princípio Básico de Funcionamento	14
2.2.2 Propriedades dos Tecidos de Fibra de Carbono	15
2.2.3 Propriedades do Adesivo Epóxi	16
2.2.4 Propriedades dos Compósitos	16
<b>2.3 Vantagens dos Reforços com Fibra de Carbono</b>	<b>17</b>
<b>2.4 Investigações Relacionadas a Reforços com Fibra de Carbono</b>	<b>18</b>

<b>2.5</b>	<b>Exemplos de Utilização de Reforços com Fibra de Carbono</b>	<b>20</b>
<b>2.6</b>	<b>Limitações da Técnica</b>	<b>21</b>
	<b><i>A Ação de Temperaturas Elevadas</i></b>	<b>22</b>
<b>3.1</b>	<b>Considerações Iniciais</b>	<b>22</b>
<b>3.2</b>	<b>Princípios do Fenômeno da Combustão</b>	<b>23</b>
3.2.1	Elementos Essenciais ao Fogo	24
3.2.2	Fases de um Incêndio	26
3.2.3	Classificação dos Incêndios	28
<b>3.3</b>	<b>Efeitos das Altas Temperaturas em Elementos Estruturais</b>	<b>29</b>
3.3.1	Efeito de Altas Temperaturas sobre a Madeira e o Aço	30
3.3.2	Efeito de Altas Temperaturas sobre o Concreto	31
3.3.3	Efeito de Altas Temperaturas sobre Compósitos de Fibra de Carbono	33
<b>3.4</b>	<b>Prevenção e Controle de Incêndios</b>	<b>35</b>
3.4.1	Métodos de Controle e Extinção do Fogo	37
3.4.2	Classificação dos Métodos de Extinção por Tipo de Incêndio	38
<b>3.5</b>	<b>Técnicas de Proteção</b>	<b>39</b>
3.5.1	Tipos de Proteção Passiva	40
3.5.2	O Papel do Gesso como Elemento de Proteção Térmica	42
	<b><i>Programa Experimental</i></b>	<b>45</b>
<b>4.1</b>	<b>Estrutura da Pesquisa</b>	<b>45</b>
<b>4.2</b>	<b>Estudo Preliminar</b>	<b>46</b>
4.2.1	Definição dos Corpos de Prova	46
4.2.2	Matriz Experimental: Estudo Preliminar	47
<b>4.3</b>	<b>Delineamento da Etapa Principal da Pesquisa</b>	<b>48</b>
4.3.1	Parâmetros de Controle	49
4.3.2	Variáveis de Estudo	49
<b>4.4</b>	<b>Estudos Complementares</b>	<b>52</b>
4.4.1	Análise em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	53
4.4.2	Análise Termogravimétrica (TGA)	53
4.4.3	Avaliação de Temperatura de Exposição vs. Acabamento sobre a Superfície	53
	<b><i>Procedimentos Experimentais</i></b>	<b>55</b>

<b>5.1</b>	<b>Etapas do Procedimento Experimental</b>	<b>55</b>
<b>5.2</b>	<b>Concretagem dos Modelos</b>	<b>56</b>
5.2.1	Definição e Caracterização dos Materiais	56
5.2.2	Definição do Traço	57
5.2.3	Preparação do Concreto	57
5.2.4	Moldagem	59
5.2.5	Adensamento	59
5.2.6	Desforma e Cura	60
5.2.7	Controle Tecnológico	60
<b>5.3</b>	<b>Procedimentos de Execução do Reforço</b>	<b>60</b>
5.3.1	Preparação do Substrato	61
5.3.2	Imprimação do Substrato	62
5.3.3	Execução do Reforço	63
<b>5.4</b>	<b>Procedimentos de Execução da Proteção</b>	<b>67</b>
5.4.1	Proteção com Argamassa de Revestimento	67
5.4.2	Proteção com Gesso	69
<b>5.5</b>	<b>Método de Exposição dos Modelos à Temperatura</b>	<b>72</b>
<b>5.6</b>	<b>Método de Determinação da Resistência à Flexão</b>	<b>73</b>
<b>5.7</b>	<b>Ensaio Complementares</b>	<b>75</b>
5.7.1	Análise em Microscópio Eletrônico de Varredura	75
5.7.2	Análise Termogravimétrica (TGA)	76
5.7.3	Avaliação de Temperatura de Exposição vs. Acabamento sobre a Superfície	76
	<b><i>Avaliação dos Resultados</i></b>	<b>77</b>
<b>6.1</b>	<b>Estudo Preliminar</b>	<b>77</b>
<b>6.2</b>	<b>Etapa Principal</b>	<b>80</b>
6.2.1	Análise da Variância	80
6.2.2	Regressão Linear	87
<b>6.3</b>	<b>Estudos Complementares</b>	<b>90</b>
6.3.1	Análise em Microscópio Eletrônico de Varredura	90
6.3.2	Análise Termogravimétrica	93
6.3.3	Avaliação de Temperatura de Exposição vs. Acabamento sobre a Superfície	94

<b><i>Conclusões e Recomendações</i></b> _____	<b>105</b>
<b>7.1 Conclusões</b> _____	<b>105</b>
<b>7.2 Recomendações</b> _____	<b>108</b>
<b>7.3 Considerações Finais</b> _____	<b>109</b>
<b><i>Referências Bibliográficas</i></b> _____	<b>111</b>
<b><i>Bibliografia Consultada</i></b> _____	<b>117</b>
<b><i>Anexo 1</i></b> _____	<b>119</b>
<b><i>Anexo 2</i></b> _____	<b>122</b>

# LISTA DE FIGURAS

<i>FIGURA 2.1 – Sistema de reforço com chapas pultrudadas</i>	12
<i>FIGURA 2.2 – Sistema de reforço com fios enrolados sob tensão</i>	13
<i>FIGURA 2.3 – Sistema de reforço com tecidos de fibra de carbono</i>	13
<i>FIGURA 2.4 – Esquema da técnica de reforço</i>	15
<i>FIGURA 3.1 – Rotina de dimensionamento prevista na NBR 14323</i>	39
<i>FIGURA 4.1 – Estrutura da pesquisa</i>	46
<i>FIGURA 4.2 – Dimensões da viga padrão</i>	47
<i>FIGURA 5.1 – Mistura dos materiais constituintes do concreto</i>	58
<i>FIGURA 5.2 – Determinação da consistência do concreto</i>	58
<i>FIGURA 5.3 - Concretagem dos modelos</i>	59
<i>FIGURA 5.4 - Escarificação da superfície do modelo</i>	62
<i>FIGURA 5.5 - Aplicação do primer</i>	63
<i>FIGURA 5.6 - Aplicação da primeira camada de adesivo epóxi</i>	64
<i>FIGURA 5.7 - Posicionamento e colagem do tecido</i>	64
<i>FIGURA 5.8 - Retirada do ar aprisionado e excesso de adesivo</i>	65
<i>FIGURA 5.9 - Retirada do papel protetor</i>	65
<i>FIGURA 5.10 - Aplicação da segunda camada de adesivo epóxi</i>	66
<i>FIGURA 5.11 - Panorama da superfície reforçada</i>	66
<i>FIGURA 5.12 – Esquema do cobrimento da proteção passiva</i>	67
<i>FIGURA 5.13 – Modelos chapiscados</i>	68
<i>FIGURA 5.14 – Desempenho da argamassa de revestimento</i>	68
<i>FIGURA 5.15 – Modelo protegido com argamassa de revestimento</i>	69
<i>FIGURA 5.16 - Mistura manual da pasta de gesso</i>	70
<i>FIGURA 5.17 – Aplicação da pasta de gesso</i>	70
<i>FIGURA 5.18 - Regularização da superfície</i>	71
<i>FIGURA 5.19 – Modelo protegido com gesso</i>	71
<i>FIGURA 5.20 – Gráfico da forma de exposição dos modelos à temperatura</i>	72
<i>FIGURA 5.21 – Forno utilizado para expor modelos a temperaturas elevadas</i>	73
<i>FIGURA 5.22 – Prensa hidráulica Shimadzu</i>	74
<i>FIGURA 5.23 – Esquema de aplicação de carga</i>	74

<i>FIGURA 5.24 – Aplicação de carga ao modelo</i>	75
<i>FIGURA 5.25 – Equipamento utilizado na análise termogravimétrica</i>	76
<i>FIGURA 6.1 – Cargas de ruptura dos modelos durante o estudo preliminar</i>	78
<i>FIGURA 6.2 – Aparência dos modelos reforçados após exposição ao calor</i>	79
<i>FIGURA 6.3 – Efeito presença de reforço</i>	82
<i>FIGURA 6.4 – Efeito temperatura de exposição</i>	83
<i>FIGURA 6.5 – Efeito temperatura de exposição x presença de reforço</i>	84
<i>FIGURA 6.6 – Efeito temperatura x acabamento de superfície x presença de reforço</i>	85
<i>FIGURA 6.7 – Efeito temperatura de exposição x acabamento de superfície</i>	86
<i>FIGURA 6.8 – Efeito tempo de exposição</i>	87
<i>FIGURA 6.9 – Gráfico comparativo entre o comportamento teórico e real</i>	89
<i>FIGURA 6.10 – MEV do tecido de fibra de carbono</i>	91
<i>FIGURA 6.11 – MEV da matriz do compósito</i>	92
<i>FIGURA 6.12 – MEV do concreto utilizado na moldagem</i>	93
<i>FIGURA 6.13 – Análise termogravimétrica do adesivo epóxi</i>	94
<i>FIGURA 6.14 – Efeito presença de reforço</i>	96
<i>FIGURA 6.15 – Efeito temperatura de exposição</i>	97
<i>FIGURA 6.16 – Efeito temperatura de exposição x presença de reforço</i>	98
<i>FIGURA 6.17 – Efeito acabamento de superfície x presença de reforço</i>	99
<i>FIGURA 6.18 – Efeito acabamento de superfície x presença de reforço</i>	100
<i>FIGURA 6.19 – Efeito acabamento de superfície</i>	101
<i>FIGURA 6.20 – Efeito temperatura de exposição x acabamento de superfície</i>	102
<i>FIGURA 6.21 – Gráfico comparativo entre o comportamento teórico e real</i>	104
<i>FIGURA 7.1 – Aparência de modelos expostos ao calor com diferentes tipos de proteção</i>	108

# LISTA DE QUADROS

<i>QUADRO 3.1 - Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF)</i>	29
<i>QUADRO 4.1 – Matriz experimental do estudo preliminar</i>	47
<i>QUADRO 4.2 – Camadas de reforço</i>	49
<i>QUADRO 4.3 – Temperaturas de exposição</i>	50
<i>QUADRO 4.4 – Tempo de Exposição</i>	51
<i>QUADRO 4.5 – Acabamentos sobre a superfície</i>	51
<i>QUADRO 4.6 – Variáveis de estudo</i>	52
<i>QUADRO 4.7 – Matriz experimental da análise em MEV</i>	53
<i>QUADRO 4.8 – Matriz experimental para temperatura &amp; acabamento</i>	54
<i>QUADRO 5.1 – Etapas do procedimento experimental</i>	55
<i>QUADRO 5.2 - Traço utilizado para a confecção do concreto</i>	57
<i>QUADRO 5.3 – Propriedades dos tecidos de fibra de carbono</i>	61
<i>QUADRO 5.4 – Características do primer e adesivo</i>	61
<i>QUADRO 6.1 – Fatores significativas à pesquisa</i>	81
<i>QUADRO 6.2 – Fatores significativos: Efeito Temperatura x Acabamento</i>	95
<i>QUADRO A1.1 – Matriz experimental do lote I para os modelos não reforçados</i>	120
<i>QUADRO A1.2 – Matriz experimental do lote I para os modelos reforçados</i>	120
<i>QUADRO A1.3 – Matriz experimental do lote II para os modelos não reforçados</i>	121
<i>QUADRO A1.4 – Matriz experimental do lote II para os modelos reforçados</i>	121

## LISTA DE TABELAS

<i>TABELA 5.1 – Características físicas do cimento (dados do fabricante)</i>	56
<i>TABELA 5.2 – Composição granulométrica do agregado graúdo</i>	56
<i>TABELA 5.3 – Composição granulométrica do agregado miúdo</i>	57
<i>TABELA A2.1 – Resistência à tração dos modelos ensaiados no estudo preliminar</i>	123
<i>TABELA A2.2 – Resistência característica à compressão das concretagens</i>	123
<i>TABELA A2.3 – Resistência à tração do lote I para os modelos não reforçados</i>	123
<i>TABELA A2.4 – Resistência à tração do lote I para os modelos reforçados</i>	124
<i>TABELA A2.5 – Resistência à tração do lote II para os modelos não reforçados</i>	124
<i>TABELA A2.6 – Resistência à tração do lote II para os modelos reforçados</i>	124
<i>TABELA A2.7 – Resistência à tração dos modelos ensaiados no estudo complementar</i>	125

# RESUMO

## *Investigação dos Efeitos de Temperaturas Elevadas em Reforços Estruturais com Tecidos de Fibra de Carbono*

A necessidade cada vez maior de efetuar a reabilitação de estruturas que apresentam manifestações patológicas faz com que os profissionais da área busquem continuamente aperfeiçoar os meios tradicionais utilizados para este fim e investigar novos materiais que apresentem vantagens técnicas e econômicas. A utilização de tecidos de fibra de carbono para reabilitação ou reforço de estruturas de concreto armado apresenta-se como uma nova alternativa que tem despertado grande interesse tanto no meio científico quanto no meio profissional, justificando-se o seu estudo. A presente pesquisa investiga a sanidade do reforço quando submetido a elevadas temperaturas, uma vez que o risco de perda da integridade durante um incêndio constitui uma das principais preocupações no que se refere a esta nova técnica, pois a aderência do tecido ao substrato é realizada com adesivo epóxi, altamente vulnerável ao efeito do calor. A degradação em termos de perda de resistência do reforço é avaliada para temperaturas variando de 80 °C à 240 °C e tempos de exposição de 30 à 120 min. Proteções passivas com argamassa de revestimento e gesso aplicadas sobre a matriz de epóxi, como forma de atenuar a degradação do polímero, são também investigadas. Pesquisam-se várias combinações destas variáveis e os resultados indicam que o adesivo epóxi apresenta um processo de volatilização crescente com o aumento da temperatura, comprometendo a eficácia da técnica de reforço; no entanto, a aplicação de revestimentos incombustíveis e isolantes sobre os elementos reforçados retarda este fenômeno. O estabelecimento do que se constitui em boa técnica para a aplicação de reforço com tecidos de fibra de carbono é de vital importância para evitar o colapso de elementos estruturais reforçados ou, ao menos, garantir estanqueidade e isolamento dos mesmos por um intervalo de tempo suficiente que possibilite a retirada dos ocupantes e as operações de combate ao incêndio em condições de segurança.

# ABSTRACT

## *Investigation of Technological Aspects of the Use of Carbon Fiber Bonded Reinforcement Sheets*

The use of carbon fiber sheets for the rehabilitation or reinforced concrete structures is an attractive alternative that has been attracting great interest from the scientific and technical community, justifying the present study. The proposed research aims to investigate the sanity of carbon-fiber reinforced elements when submitted to high temperatures, contributing to evaluate the risk of integrity loss during a fire, which constitutes one of the main concerns raised about this new technique. This results from the fact that the adherence of the carbon-fiber sheets in the concrete is accomplished by means of an epoxy adhesive, substance highly vulnerable to the effect of heat. In this work the heat degradation of these composite materials, measured in terms of the loss of flexural resistance of reinforced beams, is evaluated for temperatures varying from 80 °C to 240 °C and times of exposure varying from 30 to 120 min. Passive protections with cement mortar and gypsum were also tested, aiming at reducing the degradation of the epoxy polymer. Specimens exposed to various combinations of these variables were tested and the results have shown that the epoxy adhesive presents an increasing tendency to volatilization with temperature, and that this phenomenon can seriously affect the efficiency of the repair technique. However, the use of passive protection in the form of incombustible and thermo-insulating revetments has been able to retard the degradation process. The definition of an adequate technique for applying this kind of reinforcement is vital to avoid the collapse of structural elements during a fire. It is important to highlight that in major conflagrations even the protection can not prevent totally the heat from reaching the element but at least it will slow down degradation for a period of time sufficient to allow the evacuation of the occupants and the onset of firefighting operations.

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o tema de estudo desenvolvido na presente pesquisa e são discutidas as razões que motivaram a escolha do mesmo. São analisados ainda os objetivos, hipóteses e limitações do estudo e é detalha a estrutura da dissertação.

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

*“Como nos demonstra e comprova a ciência, o homem, desde a sua origem, encontra-se empenhado na conquista e domínio da natureza, no sentido de torná-la mais acessível ao uso pelo ser humano e mais segura como meio ambiente de vida” [Ruiz, 1976].*

A matéria-prima utilizada na construção sempre foi um fator de grande importância; na sociedade humana, as civilizações primitivas utilizavam os materiais como eram encontrados na natureza, sem qualquer tipo de beneficiamento. Com o passar do tempo, o Homem aprendeu a modelá-los e adaptá-los às suas necessidades. Os materiais que se mostraram mais adequados às necessidades humanas e que predominaram nas construções primitivas foram a pedra, a madeira e o barro. Os metais, couros e fibras vegetais foram utilizados apenas ocasionalmente.

As exigências da humanidade em relação às suas habitações foram aumentando a medida que o tempo passava, gerando demanda por materiais com maior resistência, maior durabilidade e melhor aparência, em relação aos até então empregados. Neste cenário, no final do século passado, surgiu o concreto armado, material trabalhável como o barro, resistente como a pedra e capaz de vencer grandes vãos [Verçoza, 1987].

Por este conjunto de qualidades, o concreto logo tornou-se um dos materiais mais empregados pela indústria da construção civil. Um dos principais motivos para esta preferência adveio do fato de que o mesmo foi tradicionalmente considerado como um material de alta durabilidade. Entretanto, inúmeras construções de concreto, especialmente nos últimos 20 anos, apresentaram manifestações patológicas em intensidade e incidência significativas, contrariando esta expectativa.

Este desempenho abaixo do esperado foi, principalmente, resultado de lacunas no conhecimento sobre o desempenho do material e de sua correlação com o meio ambiente. Este problema foi agravado, em muitos casos, porque as estruturas em questão não receberam uma manutenção sistemática e programada. Adicionalmente, algumas estruturas simplesmente não foram construídas com a qualidade necessária. O quadro sócio-econômico atual dos países em desenvolvimento impõe que as edificações sejam construídas com velocidades cada vez maiores, colaborando para que ocorra a falta de rigor na qualidade dos materiais e serviços empregados [Thomaz, 1989].

Os fatores enumerados acima acabam por gerar vários problemas patológicos. Em alguns casos, estes problemas acarretam apenas o comprometimento de aspectos estéticos, mas, em outros, sua presença pode ocasionar uma redução significativa na capacidade resistente do elemento estrutural. Inclusive, em situações críticas, pode-se chegar ao colapso parcial ou total da estrutura tendo em vista que os elementos estruturais de uma edificação são responsáveis pela absorção dos esforços, empuxos e cargas atuantes, bem como pela sua condução às fundações e ao terreno circundante através de diferentes caminhos [Cánovas, 1988].

A necessidade de prevenir estas ocorrências críticas e tratar a abundância de problemas existentes tem incentivado o desenvolvimento da área de *Terapia das Construções*, a qual ocupa-se do restabelecimento das condições mínimas de segurança e utilização de uma estrutura deteriorada, através da recuperação parcial ou total das peças comprometidas.

Segundo Helene [1992], as atividades terapêuticas podem ser divididas em três classes básicas: *reparo*, onde são solucionados defeitos de pequeno porte na estrutura; *recuperação*, onde é restabelecida a capacidade resistente original do elemento estrutural; *reforço*, onde a capacidade resistente do elemento estrutural é majorada em relação à original.

Dentre as atividades compreendidas no âmbito da terapia das construções, o estudo de técnicas de reforço constitui-se em um tópico vital. O presente trabalho visa discutir certos parâmetros fundamentais para o desempenho da técnica de reforço de estruturas através da aplicação externa de elementos compósitos constituídos por fibra carbono e adesivo epóxi. A importância deste tipo de estudo é salientada no próximo item.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Um aspecto importante a controlar durante as operações de recuperação e reforço de estruturas consiste na adequação dos materiais utilizados, já que a correta seleção dos mesmos colabora para garantir o desempenho almejado e evitar o surgimento prematuro de novos sintomas patológicos. De fato, segundo Souza & Ripper [1998], a escolha apropriada dos materiais é um dos fatores principais para que um trabalho de reforço ou recuperação de uma dada estrutura de concreto tenha sucesso, além do perfeito conhecimento das características da técnica de reforço ou recuperação a ser utilizada.

Este requerimento torna-se uma preocupação atual, tendo em vista que várias técnicas inovadoras para a recuperação ou reforço de estruturas estão sendo desenvolvidas, o que demanda a realização de pesquisas com esses novos materiais. As pesquisas visam verificar o comportamento dos novos materiais frente as mais diversas situações, com o objetivo de determinar as suas propriedades e os seus aspectos positivos e negativos, garantindo a sua eficácia em todas as situações que por ventura se fizerem necessárias.

Dentre os novos materiais que estão disponíveis no mercado, têm se destacado as fibras de carbono, um material largamente utilizado em soluções de reforço de alto desempenho, particularmente na indústria automobilística, aeronáutica, naval e aeroespacial. A fibra é normalmente utilizada envolta por adesivo epóxi, ou seja, como elemento de reforço resistente à tração em uma matriz polimérica. Esta combinação é normalmente denominada de compósito, como vai ser explicado em maiores detalhes no capítulo 2. Na área da construção civil, os compósitos de fibra de carbono passaram a ser empregados recentemente no reforço de estruturas de concreto armado, por tratar-se de um produto de elevada resistência à tração, baixo peso, fácil aplicação e que não acarreta problemas de durabilidade como os que hoje são associados às armaduras tradicionais [Souza & Ripper,1998].

Apesar destas vantagens, há algumas incertezas referentes ao desempenho do reforço em determinadas situações. De acordo com a literatura corrente, a mais perigosa para a sanidade do mesmo seria a exposição do adesivo a elevadas temperaturas, fato que pode ocasionar a degradação do compósito.

Isto é particularmente importante durante incêndios, quando a estrutura e outros elementos da construção absorvem grandes quantidades de calor. A temperatura pode alcançar facilmente 250 °C em incêndios domésticos, 800 °C em sinistros de maiores proporções e 1100 °C em grandes desastres. O calor gerado afeta os materiais, provocando a combustão espontânea de alguns deles e a deformação e perda de resistência de outros [Bayon, 1978].

Durante um incêndio prolongado, por exemplo, pode ocorrer uma perda significativa da resistência do concreto pois a estrutura e outros elementos da construção absorvem calor. Esta absorção se traduz em expansão térmica diferenciada entre a massa de concreto e o aço, prejudicando a aderência e originando tensões internas que levam o concreto a se desagregar, expondo as armaduras diretamente ao fogo, o que pode levar as mesmas ao escoamento [Souza & Ripper, 1998].

Formulações epóxi, em especial, apresentam um comportamento delicado frente ao fogo pois o adesivo epóxi começa a sofrer efeitos de temperaturas elevadas a partir de 80 °C, podendo atingir volatilização completa aos 300 °C. Em condições de incêndio, esta propriedade pode comprometer a sanidade de técnicas de reforço com elementos compósitos onde um dos constituintes é adesivo epóxi, pois a possível volatilização do adesivo e a conseqüente redução na capacidade resistente, poderia levar a perda do reforço e ao colapso da estrutura [Campagnolo & Silva Filho, 1989].

Devido à possível exposição ao fogo de elementos reforçados com materiais compósitos, o efeito de temperaturas elevadas sobre a fibra de carbono, bem como o comportamento do adesivo utilizado para a colagem da mesma ao substrato, requerem investigação. Proteções ao fogo também devem ser identificadas a fim de conferir segurança às estruturas reforçadas, evitando-se o colapso das mesmas, como recomenda a norma ACI 440R - "State of the art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures" [ACI, 1996].

As dúvidas existentes sobre o desempenho de compósitos com fibra de carbono frente a elevadas temperaturas justificam o desenvolvimento da presente pesquisa, visto que os conhecimentos nesta situação específica são extremamente escassos, gerando uma carência de referências bibliográficas relacionadas ao assunto, conforme será enfatizado no item 1.5.

De acordo com Petrucci [1982], o rápido avanço da tecnologia torna fundamental o desenvolvimento de pesquisas voltadas para o entendimento do comportamento sistêmico dos materiais utilizados nas edificações, com o intuito de determinar suas propriedades, identificar vantagens e reconhecer eventuais deficiências, buscando o aprimoramento de técnicas construtivas tradicionais e o desenvolvimento de novas técnicas a fim de melhorar a qualidade e o conforto oferecido aos usuários e possibilitar aos engenheiros a escolha das melhores alternativas para cada finalidade, sob o ponto de vista técnico e econômico. As hipóteses e os objetivos definidos para a presente pesquisa encontram-se apresentados no próximo item.

### 1.3 HIPÓTESES

As hipóteses que sustentam esta pesquisa são as seguintes:

- Elevadas temperaturas desencadeiam um processo de volatilização do adesivo epóxi utilizado para o reforço de estruturas com compósito de fibra de carbono, ocasionando uma perda gradativa da capacidade resistente do mesmo;
- A execução de proteção passiva sobre o reforço com fibra de carbono colabora para reduzir o gradiente de temperatura a que o adesivo epóxi estará submetido e, conseqüentemente, melhora o desempenho do reforço quanto à sua capacidade de carga, aumentando o tempo admissível de exposição ao calor.

### 1.4 OBJETIVOS

Considerando o exposto no item anterior, pode-se estabelecer os objetivos desta pesquisa como:

### 1.4.1 Objetivo Específico

- Avaliar o comportamento, expresso em termos da resistência à tração na flexão, de reforços estruturais com tecidos de fibra de carbono impregnados com adesivo epóxi quando submetidos à ação de elevadas temperaturas.

### 1.4.2 Objetivos Secundários

- Avaliar a correlação entre diferentes patamares de temperatura e a degradação sofrida pelo compósito;
- Avaliar a influência da manutenção de temperaturas elevadas ao longo do tempo no que se refere ao desempenho do reforço;
- Avaliar, comparativamente, a eficiência de proteções passivas, com argamassa de revestimento e gesso, aplicadas sobre os tecidos de fibra de carbono no tocante ao desempenho do reforço.

## 1.5 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Como discutido no item 1.2, é fundamental obter o domínio das diversas propriedades de todos os novos materiais que estão sendo lançados no mercado, uma vez que é dever dos pesquisadores e fabricantes disponibilizar produtos que não venham a acarretar problemas futuros ao invés de oferecer soluções, como seria de se esperar. O presente estudo está direcionado a incrementar o entendimento sobre o comportamento dos reforços com tecidos de fibra de carbono quando sujeitos a elevadas temperaturas.

A utilização de materiais compósitos para reforço estrutural começou a ser alvo dos pesquisadores em meados da década de 80. Mais especificamente, a utilização de tecidos de fibra de carbono para reforço de estruturas se popularizou no início da década de 90, como será discutido no capítulo 2. Apesar das inúmeras pesquisas relacionadas a esta nova técnica que estão em desenvolvimento, este material é extremamente novo e com propriedades pouco conhecidas pela comunidade científica [Emmons et al, 1998b]. Particularmente em relação ao desempenho diante de elevadas temperaturas, este trabalho é inovador, existindo, até o momento, poucos pesquisadores ligados ao assunto, entre os quais referencia-se Meier [1997], Abdalla & Elbadry [1997] e Crea et al [1997].

Em decorrência do exposto acima, as referências bibliográfica relacionadas a este tema são extremamente escassas e ainda não existe uma normalização específica para este fim. Este foi um dos principais fatores condicionantes do estudo realizado. Tornou-se necessário, por exemplo, realizar um estudo preliminar destinado a fornecer uma noção do comportamento de algumas das variáveis envolvidas nesta pesquisa frente às situações a que seriam submetidos os corpos de prova, tendo em vista que não havia dados pertinentes disponíveis na literatura.

O grande número de incertezas sobre o comportamento das variáveis de estudo estimulou, até mesmo, a realização de um estudo complementar destinado esclarecer alguns dos resultados obtidos no estudo principal e aprofundar o conhecimento na área. Isto demonstra que o presente estudo deve ser encarado como uma primeira incursão no tema e que estudos complementares serão necessários para esclarecer aspectos adicionais de grande importância.

Outro aspecto a considerar está relacionado à forma de exposição dos corpos de prova ao calor; a mesma foi realizada através de fornos com grande capacidade, visto que a simulação de um incêndio em condições reais é um fenômeno muito complexo devido ao grande número de variáveis envolvidas e considerando a infra-estrutura laboratorial disponível no momento.

Aliado a estes fatores, ressalta-se que os resultados obtidos estão condicionados ao concreto e a geometria dos corpos de prova utilizados, podendo haver alguma variação no comportamento em situações reais.

## 1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação pode ser dividida em duas partes distintas. Na primeira, que inclui os capítulos 1 à 3, é realizada a fundamentação teórica a respeito do problema que se pretende investigar, começando com a apresentação do problema de pesquisa, da técnica de reforço com fibra de carbono e prosseguindo com a abordagem dos problemas que elevadas temperaturas ocasionam sobre as estruturas em geral e nos reforços em particular. São ainda discutidas algumas técnicas de proteção passiva que poderiam ser utilizadas para amenizar o problema, enfatizando a proteção com gesso por tratar-se de uma das técnicas escolhidas para ser avaliada nesta pesquisa.

A segunda parte preocupa-se com o programa experimental e engloba os capítulos 4 a 7, onde são apresentados o escopo dos ensaios que foram realizados, os procedimentos adotados para a confecção dos corpos de prova, a análise dos resultados obtidos e as conclusões e sugestões para trabalhos futuros, respectivamente.

O conteúdo de cada capítulo será discutido de uma maneira mais detalhada abaixo.

O Capítulo 1 introduz o problema em questão de forma genérica, justificando a relevância do estudo e definindo os objetivos e hipóteses da pesquisa; ainda, faz menção às limitações do trabalho e à estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 está relacionado ao reforço de estruturas de concreto armado; inicialmente apresentam-se os motivos que tornam necessários trabalhos de recuperação e reforço de estruturas e, após, introduz-se a técnica de reforço com tecidos de fibra de carbono, sendo destacados o seu princípio de funcionamento, as propriedades dos materiais constituintes, as vantagens e limitações do seu emprego, bem como apresentadas algumas pesquisas relacionadas a esta técnica e alguns exemplos onde utilizaram-se compósitos de fibra de carbono para o reforço estrutural.

O Capítulo 3 está diretamente relacionado à ação de temperaturas elevadas. Primeiramente, apresenta-se o fenômeno da combustão de uma forma geral e os efeitos que temperaturas elevadas podem ocasionar em elementos estruturais, bem como as possíveis conseqüências destas temperaturas em reforços com compósitos de fibra de carbono. Na seqüência, discutem-se algumas proteções passivas que poderiam ser utilizadas na tentativa de atenuar os efeitos nocivos da temperatura sobre o reforço.

O Capítulo 4 preocupa-se com o escopo do programa experimental desenvolvido. O mesmo foi dividido em *estudo preliminar*, onde apresentam-se os ensaios realizados para adquirir conhecimentos relativos ao desempenho de algumas das variáveis da pesquisa; *etapa principal*, onde destaca-se os parâmetros de controle dos ensaios e as variáveis a serem estudadas na pesquisa; e *estudos complementares*, onde discute-se alguns ensaios específicos realizados para investigar pontos que se mostraram significativos ou para esclarecer tendências que não ficaram perfeitamente esclarecidos na etapa principal.

O Capítulo 5 apresenta os procedimentos adotados para a confecção dos corpos de prova, aplicação do reforço com tecido de fibra de carbono, execução da proteção passiva, exposição dos modelos a elevadas temperaturas, metodologia de ensaio e confecção das amostras para o estudo complementar.

O Capítulo 6 apresenta uma análise dos resultados obtidos nesta pesquisa. Primeiramente, discute-se os resultados de uma análise estatística efetuada com os valores obtidos nos ensaios e, em seguida, apresentam-se modelos matemáticos formulados com auxílio de regressões lineares, tendo-se como base os valores numéricos obtidos nos ensaios. Estes modelos têm por objetivo indicar o comportamento teórico dos corpos de prova, permitindo a comparação e a validação dos resultados experimentais.

O Capítulo 7 contém as conclusões decorrentes da realização desta pesquisa, bem como algumas recomendações e sugestões para futuros trabalhos. No mesmo, procede-se a avaliação dos objetivos iniciais em relação aos alcançados na conclusão do trabalho.

O Anexo 1 apresenta a matriz experimental dos ensaios realizados.

O Anexo 2 apresenta os resultados individuais dos ensaios realizados.

# Capítulo 2

## REFORÇOS COM TECIDOS DE FIBRA DE CARBONO

Como discutido no capítulo 1, os tecidos de fibra de carbono estão sendo utilizados pela indústria da construção civil como uma matéria prima para a nova tecnologia de formação de compósitos destinados a reabilitação e reforço de estruturas deterioradas.

O principal interesse desta dissertação é avaliar o comportamento deste sistema de reforço quando o mesmo é submetido à ação de elevadas temperaturas. Antes disso, neste capítulo, serão apresentadas, resumidamente, as principais características desta técnica de reforço, discutindo-se o seu princípio de funcionamento, vantagens e desvantagens e algumas investigações realizadas por pesquisadores sobre a mesma. Ainda, exemplos de aplicação e os principais problemas referentes a esta técnica serão examinados.

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O futuro e a continuidade do crescimento econômico de uma nação estão diretamente relacionados à resistência e à confiabilidade da sua infra-estrutura. Portanto, o desafio lançado à indústria da construção civil consiste em manter esta infra-estrutura frente às enormes restrições financeiras nos dias atuais [Emmons et al, 1998a].

Segundo Triantafillou [1997], muitas das estruturas existentes tem sofrido com efeitos acumulados provenientes da má execução ou emprego de materiais inadequados, degradações provocadas pelo ambiente, abalos sísmicos e recalques das fundações, fazendo com que as mesmas estejam deficientes em termos de segurança estrutural.

Aliado a estes fatos, alterações no uso a que se destinam e a necessidade de adequação às normas, cada vez mais rígidas, referentes à segurança contra sismos, acaba por resultar em estruturas que necessitam ter a sua capacidade de carga restabelecida ou majorada. Na eventualidade de ocorrência destes problemas, é possível que haja a necessidade do restabelecimento das suas condições de segurança; fato que pode ser conseguido através da execução de reforços estruturais [Campagnolo et al, 1999].

De acordo com Souza & Ripper [1998], vários são os motivos que podem levar à necessidade de execução de trabalhos de recuperação e reforço em estruturas de concreto armado, dentre os quais destacam-se:

- Correção de falhas de projeto oriundas da deficiência no cálculo estrutural, falta de interação entre os projetos, especificação inadequada dos materiais e falha ou erro no detalhamento;
- Correção de falhas de execução provenientes da capacitação profissional deficiente, da inexistência de controle na qualidade de execução, da má qualidade dos materiais empregados, da irresponsabilidade técnica e, até mesmo, de sabotagem;
- Aumento da capacidade portante da estrutura em função de modificações no uso da edificação em relação ao originalmente projetado;
- Recuperação da capacidade portante da estrutura diminuída em virtude de acidentes (choques, incêndios, etc), do desgaste natural, da deterioração acelerada e/ou da modificação na concepção estrutural, como, por exemplo, o corte de uma viga por necessidade arquitetônica ou de utilização.

A execução de reforços estruturais tornou-se uma alternativa empregada em grande escala na reabilitação de estruturas que apresentam manifestações patológicas, pois evita demolições desnecessárias e reduz o custo final do serviço. No entanto, a execução de reforços estruturais duráveis não se resume a uma fórmula única ou modelo que pode ser facilmente especificado, aprendido e resolvido. Pelo contrário, constitui-se em um sistema complexo, onde um dos principais requisitos é que a união entre o elemento estrutural e o material utilizado para o reforço tenha a habilidade de funcionar como um todo, como um sistema integrado [Emmons et al, 1998a].

Um dos problemas críticos deste processo é que as soluções de reforço adotadas, em muitos casos, consistem em técnicas com pouco respaldo científico. Em outros casos,

demolições injustificadas são recomendadas, as quais poderiam ser evitadas se fossem empregados os diversos métodos de recuperação e reforço que estão sendo ou já foram desenvolvidos para esta finalidade; nenhum destes tipos de postura é justificável diante da evolução da técnica na área da Terapia das Construções ocorrida nos últimos anos.

Atualmente, várias técnicas de reforço estão sendo empregadas para incrementar a capacidade portante e/ou a ductilidade de estruturas de concreto armado. De acordo com a modalidade escolhida, o reforço poderá ser executado na parte interna ou externa da estrutura. As realizadas na parte interna são extremamente invasivas, onerosas e de difícil execução. As realizadas na parte externa são menos invasivas, pois consistem em aplicar o reforço na superfície externa do elemento estrutural. As técnicas mais usuais são a adição de uma nova armadura ao elemento danificado e subsequente concretagem, a colagem de chapas de aço ou a colagem de compósitos poliméricos estruturais [Robery & Innes, 1997].

Em particular, existe um grande entusiasmo e expectativa em relação ao uso de polímeros de fibra de carbonos (CFRP) na construção civil. Acredita-se que eles possam vir a ser a maior revolução em termos de materiais utilizados para reforço neste novo século. Segundo Robery & Innes [1997], existem atualmente três sistemas de reforço com este tipo de material, os quais estão apresentados abaixo:

- Reforço com chapas pultrudadas: consiste em chapas de fibra de carbono impregnadas com adesivo epóxi e que apresentam elevada resistência. O reforço é realizado através da colagem das mesmas na superfície do elemento estrutural (Figura 2.1);



FIGURA 2.1 – Sistema de reforço com chapas pultrudadas

- Reforço com fios enrolados sob tensão: consiste em filamentos de fibra de carbono colados na superfície do elemento estrutural ou enrolados a seco e, após, curados a quente (Figura 2.2);



FIGURA 2.2 – Sistema de reforço com fios enrolados sob tensão

- Reforço com tecidos pré-impregnados: consiste em filamentos de fibra de carbono previamente alinhados e agrupados em forma de um tecido que são colados à superfície do elemento estrutural com adesivo epóxi (Figura 2.3).

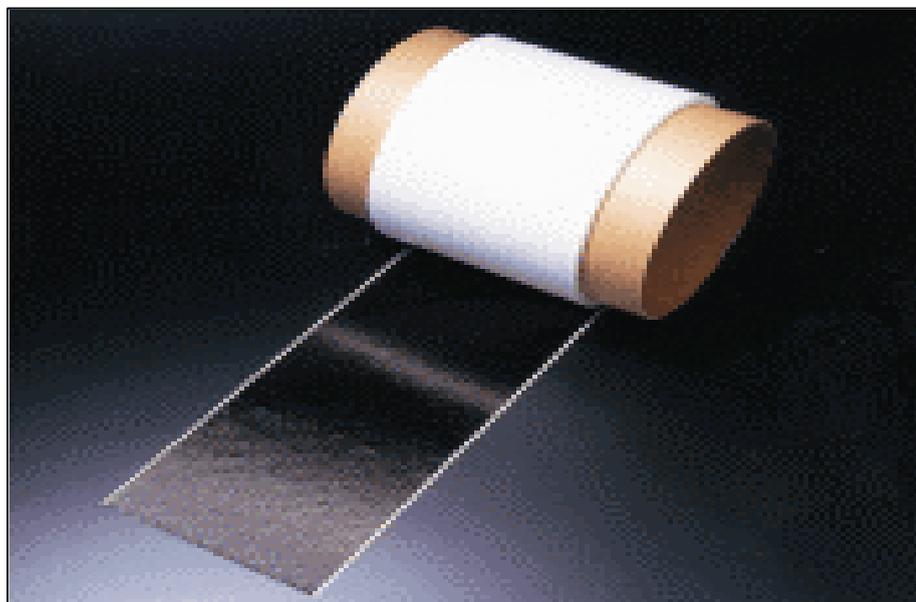


FIGURA 2.3 – Sistema de reforço com tecidos de fibra de carbono

No próximo item, serão discutidos os princípios básicos da técnica utilizando tecidos de fibra de carbono, visto que a mesma será objeto de estudo nesta pesquisa.

## 2.2 A TÉCNICA DE REFORÇO COM TECIDOS DE FIBRA DE CARBONO

Os compósitos poliméricos estruturais permaneceram durante décadas com o seu uso restrito a alguns setores específicos da indústria, tais como na área de mísseis, foguetes e aeronaves de geometria complexas. Atualmente, setores da indústria moderna têm ampliado a sua utilização, com um crescimento no uso de 5% ao ano. Na construção civil, tem se destacado o uso de compósitos de fibra de carbono para a recuperação e reforço de estruturas de concreto danificadas [Rezende, 2000]. Nesta área, os compósitos têm se popularizado como “armaduras” de reforço em elementos fletidos, especialmente em vigas. Os princípios básicos de funcionamento desta técnica de reforço encontram-se descritos no próximo item.

### 2.2.1 Princípio Básico de Funcionamento

O sistema de reforço com tecidos de fibra de carbono surgiu da conjugação de esforços entre entidades públicas e privadas japonesas. A intenção era reparar as estruturas existentes, em particular as estruturas do sistema viário, após a ocorrência do sismo de Kobe, em 1995. O sistema básico para a modificação e melhoria do comportamento das construções existentes, pelo reforço com tecido de fibras de carbono, era orientado no sentido do aumento da capacidade resistente das peças, quer quanto à flexão (principalmente lajes e vigas), quer quanto ao reforço transversal (para pilares, em especial); hoje, a orientação é o aumento da ductilidade das estruturas reforçadas. A tecnologia se popularizou devido à constante ameaça de um violento sismo no distrito de Kanto, que inclui a cidade de Tóquio [Souza & Ripper, 1998].

O reforço de elementos estruturais, com a finalidade de aumentar a ductilidade e/ou a capacidade de carga por intermédio de materiais compósitos, pode ser realizado através da aplicação de tecidos flexíveis pré-impregnados, onde feixes de filamento de fibras de carbono são agrupados de forma contínua, alinhados em uma única direção e aderidos a uma folha de suporte contendo quantidades muito pequenas de adesivo epóxi. O material combinado assume espessuras da ordem de décimos de milímetros e tem o aspecto de um tecido, permitindo o seu manuseio de forma adequada.

O elemento compósito é formado pela aplicação direta do tecido ao concreto, previamente impregnado com um adesivo primário ou primer (adesivo epoxídico muito fluído). A colagem é garantida pela formação do elemento compósito quando da aplicação de

uma fina camada de adesivo epóxi que serve de ponte de aderência para a fixação do tecido e que envolve as fibras de carbono, criando uma matriz altamente resistente (Figura 2.4).

Entende-se por elemento compósito a combinação de duas ou mais fases constituintes que interagem funcionando como um elemento único; no caso dos reforços estruturais, uma das fases é a fibra de carbono, responsável pela absorção das tensões impostas ao reforço e a outra é o adesivo, responsável por manter as fibras orientadas e aderidas ao substrato, bem como evitar o abrasão entre as mesmas durante os ciclos de carregamento [Jang, 1996].

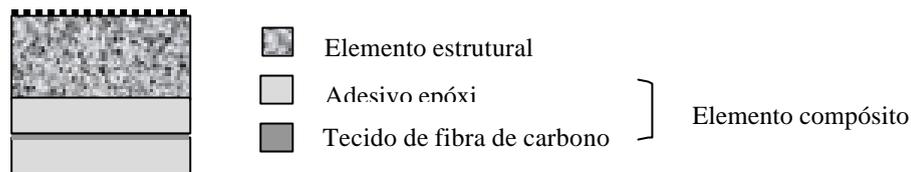


FIGURA 2.4 – Esquema da técnica de reforço

Poderia-se também denominar de compósito o elemento reforçado como um todo, isto é, uma viga de concreto (composto por matriz cimentícia e agregado) na qual está imersa uma armadura de aço e a qual foram aderidas, através da utilização de adesivo epóxi, as fibras de carbono. No entanto, neste trabalho, o termo compósito será adotado para designar apenas o conjunto formado pela união de fibras de carbono e adesivo epóxi. Cada uma destas fases será discutida com maior detalhe nos itens a seguir.

## 2.2.2 Propriedades dos Tecidos de Fibra de Carbono

A utilização de tecidos de fibra de carbono em reforços estruturais é decorrente de um conjunto de propriedades favoráveis que os mesmos apresentam, tais como elevada resistência à tração, baixo peso, grande durabilidade, resistência a ataques químicos e suscetibilidade nula à corrosão [Norris et al, 1997; Triantafillou, 1997].

Os filamentos de fibra de carbono são os elementos responsáveis pela absorção das tensões de tração a que o reforço estará submetido [Jang, 1996]. Como eles estão alinhados em uma única direção, o elemento compósito será relativamente rígido e resistente nesta direção, porém na direção transversal, eles apresentam baixa resistência e baixo módulo de elasticidade [Beber, 1999a].

### **2.2.3 Propriedades do Adesivo Epóxi**

O adesivo utilizado na colagem deverá ter resistência e dureza adequadas para permitir a transferência do esforço de corte existente entre o concreto e o tecido de fibra de carbono. Entretanto, o mesmo deve ser suficientemente elástico para prevenir a ruptura frágil nesta interface [Barton, 1997; Beber, 1999a].

O adesivo, além de ser responsável por manter o tecido colado ao substrato, forma uma película protetora entre as fibras e o ambiente, protegendo as mesmas contra umidade, oxidação, abrasão e agentes agressivos de natureza química e biológica. O adesivo utilizado na colagem é responsável pelas propriedades químicas e térmicas do elemento compósito [Jang, 1996; Beber, 1999a].

Entretanto, uma propriedade desfavorável à utilização de adesivo epóxi para a formação do elemento compósito em reforços com tecidos de fibra de carbono relaciona-se à exposição do adesivo a elevadas temperaturas visto que os mesmos são formados por átomos de carbono, hidrogênio e nitrogênio, ou seja, materiais orgânicos e altamente inflamáveis. Holloway [1993] salienta, no entanto, a possibilidade de incorporação de aditivos na formulação do mesmo para alterar sua estrutura química, a fim de melhorar o seu comportamento frente ao calor.

### **2.2.4 Propriedades dos Compósitos**

As propriedades dos compósitos dependem das propriedades do tecido e do adesivo, da proporção de cada um deles e da orientação dos feixes de fibra. Desta forma, as propriedades dos compósitos são determinadas basicamente pelas propriedades e características intrínsecas de cada componente, não sendo, entretanto, necessariamente iguais às mesmas.

Por exemplo, na formação de um compósito, o tecido de fibra de carbono e o adesivo interagem formando uma combinação na qual as tensões são redistribuídas por todos os fios, aumentando a sua eficiência. Esta distribuição de tensões está condicionada a natureza e a eficácia da aderência entre os componentes [Campagnolo et al, 1999].

## 2.3 VANTAGENS DOS REFORÇOS COM FIBRA DE CARBONO

Segundo Robery & Innes [1997], a preferência em reforçar estruturas com tecidos de fibra de carbono é decorrente do aumento de desempenho e da grande durabilidade proporcionados ao elemento estrutural, do custo de instalação ser relativamente inferior a outras técnicas tradicionais, do processo de instalação não ser invasivo, da facilidade e velocidade na instalação.

A aceitação crescente desta nova tecnologia pode ser atribuída à similaridade da mesma com a técnica de reforço através chapas de aço coladas, uma das técnicas mais empregadas para a recuperação ou reforço de elementos estruturais deteriorados [Campagnolo et al, 1999].

Efetuando-se uma comparação entre os dois sistemas, a técnica de reforço com chapa de aço apresenta algumas desvantagens. A primeira está relacionada ao elevado peso próprio do aço, gerando problemas com o manuseio dos elementos que, geralmente, possuem grandes dimensões. Além disso, existe uma certa dificuldade em fabricar chapas para o reforço de elementos com formas complexas. Ainda, pode ocorrer corrosão na interface entre o adesivo e a chapa após longos períodos de exposição, problema muito difícil de ser diagnosticado em inspeções de rotina, o que poderia comprometer perigosamente a aderência entre os elementos. Finalmente, com frequência é necessário empregar um sistema de escoramento especial para suportar o peso próprio das chapas durante a fixação das mesmas, o que encarece os trabalhos [Meier, 1997; Neubauer & Rostásy, 1997b; Beber, 1999b].

Em termos econômicos, a técnica de reforço com tecidos de fibra de carbono apresenta um custo de material relativamente mais elevado em relação à técnica de reforço com chapas de aço colada. No entanto, a facilidade na colagem dos tecidos e a reduzida necessidade de manutenção permitem uma economia significativa em relação aos custos operacionais, à mão de obra e aos equipamentos requeridos para a aplicação do reforço [Shapira & Bank, 1997; Robery & Innes, 1997]. Em um estudo comparativo entre os dois sistemas de reforço, foi realizado um levantamento dos custos necessários ao reforço de uma ponte com chapas de aço e com chapas compósitas, sendo que os resultados demonstraram que o sistema com fibra de carbono ofereceu uma redução de 17,5% no custo geral do reforço [Emmons et al, 1998b].

## 2.4 INVESTIGAÇÕES RELACIONADAS A REFORÇOS COM FIBRA DE CARBONO

A seguir, serão apresentadas algumas investigações realizadas por pesquisadores interessados em avaliar o comportamento de reforços com tecidos de fibra de carbono.

Meier e Kaiser foram os primeiros pesquisadores a avaliar o reforço de estruturas de concreto armado com compósitos de fibra de carbono. Na ocasião, meados da década de 80, foram reforçadas vigas de concreto armado com chapas pultrudadas de fibra de carbono. O adesivo utilizado para fixar o elemento compósito à superfície do concreto foi o mesmo que era empregado em reforços com chapas de aço. Os resultados demonstraram um aumento significativo na capacidade de carga e na rigidez das vigas reforçadas. Quanto às fissuras, estas ficaram melhor distribuídas ao longo do comprimento da viga e tiveram as suas aberturas reduzidas [Hollaway & Leeming, 1999].

Ritchie et al [1991] investigaram o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com chapas de vidro, aramida e carbono. O objetivo deste estudo foi determinar o incremento de resistência e rigidez conferido aos elementos estruturais através do reforço com materiais compósitos, observando o processo de formação das fissuras e registrando o seu espaçamento ao longo da viga. Os resultados indicaram um acréscimo considerável na resistência e rigidez dos elementos reforçados e uma redução na quantidade de fissuras.

Koga & Ohtsu [1997] realizaram um estudo detalhado a respeito dos aspectos tecnológicos referentes a diversos sistemas de reforço com fibra de carbono, devido à possibilidade de utilização desta técnica como medida preventiva aos danos causados a estruturas de concreto armado por abalos sísmicos ou para o retroajuste de estruturas afetadas pelos mesmos.

Norries et al [1997] investigaram o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão e ao cisalhamento. Avaliaram também, o comportamento de tecidos de fibra de carbono fornecidos por três fabricantes diferentes. Durante a colagem, os tecidos foram orientados em diferentes direções. Os resultados indicaram que para as fibras dispostas perpendicularmente em relação às fissuras, ocorreu um aumento significativo na rigidez e na resistência da viga, sendo que a ruptura ocorreu de forma frágil devido à elevada concentração de tensões de cisalhamento nas regiões dos apoios. Para as fibras posicionadas obliquamente em relação às fissuras, observaram-se menores incrementos na resistência e rigidez, entretanto, a ruptura ocorreu de forma mais dúctil.

Hutchinson et al [1997] reforçaram ao cisalhamento vigas em escala reduzida, representando as vigas de uma ponte, com tecidos de fibra de carbono fornecidos por três fabricantes diferentes. O motivo desta pesquisa foi a permissão, concedida pelo governo do Canadá, de aumento na carga transportada pelos caminhões daquele país. Após a análise da capacidade de carga das estruturas existentes, constatou-se a necessidade de reforçar ao cisalhamento algumas pontes que haviam sido construídas há 27 anos. Escolheu-se a técnica de reforço com tecido de fibra de carbono em função da velocidade na execução dos serviços, ocasionando uma menor interrupção no tráfego de veículos. Os resultados indicaram que, para reforços ao cisalhamento, a disposição diagonal dos tecidos foi mais eficiente que a disposição horizontal ou vertical, reduzindo as solicitações sobre os estribos para um mesmo nível de carregamento.

Em meados de 1997, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), por intermédio do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME), iniciou um amplo programa de pesquisa envolvendo a aplicação de compósitos de fibra de carbono na reabilitação de estruturas de concreto.

Beber [1999a] avaliou o desempenho de vigas de concreto armado reforçadas com tecidos de fibra de carbono. O programa experimental contemplou a análise de reforços com um número variável de camadas de tecido. Os resultados indicaram um incremento significativo na carga de ruptura dos protótipos. Foi constatado que este incremento tende a um limite, o qual está associado à carga de ruptura por descolamento do tecido, às tensões de cisalhamento suportadas pelo elemento estrutural e à capacidade de deformação das armaduras.

Dando continuidade a este amplo programa de pesquisa, vêm-se desenvolvendo também a aplicação de tecidos de fibra de carbono no reforço de elementos submetidos à compressão axial, tais como pilares.

Ainda, a presente pesquisa se insere nesta linha e visa analisar os problemas associados à exposição dos reforços com tecidos de fibra de carbono a elevadas temperaturas decorrentes da volatilização do adesivo epóxi da matriz do compósito, bem como avaliar o comportamento de proteções passivas aplicadas sobre o reforço com o intuito de minimizar os danos gerados, como descrito no capítulo 1. Os resultados deste programa experimental encontram-se no capítulo 6.

## 2.5 EXEMPLOS DE UTILIZAÇÃO DE REFORÇOS COM FIBRA DE CARBONO

A ponte Ibach, na cidade de Luzerna, Suíça, foi a primeira estrutura a ser reforçada com CFRP, em 1991. O motivo da execução do reforço foi um acidente envolvendo os cabos de protensão que resultou numa redução da capacidade portante da estrutura [McKenna & Erki, 1994]. No período de 1991 a 1996, aproximadamente 17 ton de polímeros de fibra de carbono foram utilizados para reforçar estruturas na Suíça [Meier, 1997].

Em Zurique, Suíça, dois edifícios residenciais, com 60 anos de idade, foram transformados em edifícios comerciais. Através da avaliação estrutural dos mesmos, constatou-se a necessidade de realizar a substituição de alguns elementos estruturais que estavam com um nível de deterioração muito elevado, assim como o reforço de outros elementos remanescentes. Desta forma, aplicaram-se chapas de fibra de carbono em paredes de alvenaria, com a finalidade de restabelecer a sua capacidade portante [Schwegler, 1997].

Foi efetuada a recuperação de três pontes de concreto armado com aproximadamente 70 anos de idade nas proximidades de Dresden, Alemanha. Estas pontes encontravam-se com sérios problemas em sua estrutura devido à ausência de manutenção, o que ocasionou a deterioração do concreto e levou à corrosão da armadura por ataque de cloretos. Utilizaram-se chapas de fibra de carbono para restabelecer a capacidade portante da mesma. Como esta técnica de reforço não era normalizada pelas autoridades locais, ensaios em laboratório foram desenvolvidos com vigas de concreto armado reforçadas e levadas até a ruptura, a fim de fornecer parâmetros para o dimensionamento do reforço [Neubauer & Rostásy, 1997a].

Especial destaque deve ser dado ao Japão devido a elevada quantidade de tecidos de fibra de carbono empregado para a recuperação e reforço de estruturas. A ponte Hata recebeu reforço a fim de suportar um momento fletor adicional causado pela ação do vento sobre o seus guarda corpos, pois eles haviam sido aumentados. O deck da ponte Hiyoshikura apresentava elevado nível de fissuração em decorrência da deformação excessiva das armaduras. O reforço com tecidos de fibra de carbono permitiu reduções entre 30 e 40% nas deformações desta armadura [Nanni, 1995].

Belo Horizonte foi a primeira cidade brasileira a utilizar tecidos de fibra de carbono para o reforço de uma obra de arte. Os serviços foram efetuados no viaduto Santa Tereza, em 1998. A escolha desta técnica foi motivada por aspectos estéticos, uma vez que o viaduto era tombado pelo patrimônio histórico [Beber, 1999b].

## 2.6 LIMITAÇÕES DA TÉCNICA

Uma das principais questões que limitam o uso da técnica de colagem de tecidos de fibra de carbono está relacionado com a aderência e a ancoragem destas fibras ao concreto. O ganho de resistência através da execução de reforço com tecidos de fibra de carbono é limitado, uma vez que novos tipos de falha surgem devido à alta concentração de tensões de cisalhamento nas regiões próximas aos apoios. Este fenômeno é denominado *peeling off* e ocasiona uma ruptura frágil e abrupta do reforço, pois acontece o descolamento na interface entre o concreto e o reforço ou na interface entre a armadura longitudinal e o reforço [Buyukozturk & Hearing, 1997; He et al, 1997; Beber, 1999a]. Entretanto, se medidas adequadas para prover ancoragem adicional nos extremos do reforço forem empregadas, este problema pode ser superado com sucesso, como indicam as pesquisas de Campagnolo et al [1999].

Outra desvantagem decorre da falta de normalização específica que oriente o projeto e a execução do reforço com tecidos de fibra de carbono. Aliado a isto, existem limitações impostas por algumas formas geométricas na sua aplicação [Emmons et al, 1998b].

Ainda, a excessiva absorção de umidade pela matriz do compósito pode resultar em significativa redução na rigidez e tensão admissível do reforço, pois produz alterações nas propriedades do adesivo, podendo ocasionar a formação de bolhas nos compósitos. Em regiões frias, os ciclos de gelo e degelo devem ser avaliados [ACI, 1996].

Finalmente, os elementos compósitos, ao serem expostos à ação de elevadas temperaturas e raios ultravioletas, ficam sujeitos a reações químicas na matriz do polímero que causam a degradação de suas propriedades [ACI, 1996]. De acordo com Meier [1997], o adesivo epóxi utilizado para a colagem do tecido de fibra de carbono em estruturas, com o objetivo de reforçá-las, começa a volatilizar quando o gradiente térmico incidente sobre o mesmo ultrapassar determinado patamar. Como exposto no capítulo 1, esta pesquisa visa fornecer dados sobre a suscetibilidade do adesivo a altas temperaturas e a eficiência de proteções passivas. No próximo capítulo, será feita uma revisão do efeito de incêndios em materiais de construção em geral e em elementos reforçados com tecidos de fibra de carbono, em particular para subsidiar este estudo.

# Capítulo 3

## A AÇÃO DE TEMPERATURAS ELEVADAS

A questão das altas temperaturas e seus efeitos sobre os materiais de construção é fundamental nesta pesquisa, portanto, neste capítulo, serão apresentados os princípios do fenômeno da combustão e discutidas as possíveis conseqüências que um incêndio ocasiona em elementos estruturais. Adicionalmente, serão abordadas algumas técnicas de proteção passiva utilizadas para proteger os sistemas de uma edificação, discutindo os seus princípios.

### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Por muitos e muitos séculos o fogo constituiu-se em um mistério, sendo descoberto provavelmente pelo homem das cavernas na Idade da Pedra, onde era utilizado para o aquecimento do ambiente. Na Idade Média, os alquimistas o definiram como um elemento básico, juntamente com a terra, o ar e a água, considerando-os indivisíveis. Após os estudos de Lavoisier é que se conheceu o fogo realmente, sabendo-se que não se tratava de nenhuma força misteriosa, como pensava o homem primitivo, nem de um elemento básico e indivisível, como pensavam os alquimistas, mas sim de um fenômeno químico denominado combustão, que se caracteriza pela liberação de energia na forma de emissão de luz e calor [Kerber, 1979].

O fogo, quando sob controle, é de extrema necessidade. Contemporaneamente, o mesmo é usado na indústria, nos transportes, na produção de energia e em inúmeras outras necessidades indispensáveis ao homem. No entanto, quando foge ao controle, transforma-se num agente de grande poder destruidor. Este tipo de sinistro é comumente denominado incêndio.

Quando um incêndio ocorre em uma edificação, os seus usuários ficam expostos a um elevado risco de vida e a construção pode sofrer grandes danos estruturais. Os riscos de vida começam a se pronunciar em temperaturas relativamente baixas devido ao calor, aos gases tóxicos e à fumaça gerada na fase inicial do processo de queima. Ainda devem ser consideradas as perdas patrimoniais decorrentes da destruição da edificação e da interrupção das atividades nela exercidas, como salienta Gouvêia [2000a].

Os incêndios são influenciados por um grande número de parâmetros, sendo muitos destes conhecidos, pois se repetem e outros aleatórios, pois não se repetem. Desta forma, não é possível determinar como, onde e com que severidade os incêndios ocorrerão, fazendo com que cada um deles seja em si um fenômeno único [Gouvêia, 200b].

Para que se possa discutir os efeitos dos incêndios nos materiais de construção, torna-se necessário, iniciar a discussão por uma revisão das características básicas do fenômeno da combustão, enfatizando quais os elementos essenciais ao processo de queima e descrevendo as diversas fases do mesmo, como segue.

### 3.2 PRINCÍPIOS DO FENÔMENO DA COMBUSTÃO

Do ponto de vista físico-químico, um incêndio é uma reação de combustão que, uma vez iniciada, ocorre em cadeia e de forma descontrolada até que pelo menos uma das condições essenciais para que ela ocorra deixe de existir.

Combustão é uma reação química de oxidação rápida entre o combustível e o oxigênio (ar atmosférico, carburente) acompanhado do desprendimento de calor (calor de combustão) e luz (chama visível), que podem ser considerados como a liberação da energia química latente do combustível [Kerber, 1979].

O mecanismo da reação de combustão é, de modo simples, o seguinte: a fonte de calor (fonte de ignição) provoca a decomposição química do material combustível (pirólise), o qual libera gases combustíveis que reagem exotermicamente com o oxigênio (chamas). O calor liberado pela reação exotérmica inicial causa a pirólise dos outros materiais combustíveis, tornando-se uma reação em cadeia [Gouvêia, 200b].

Em relação ao seu desenvolvimento, a oxidação, de forma semelhante a outras reações químicas, se processa a uma proporção que varia conforme a temperatura. À medida que a temperatura de uma substância é elevada, a taxa de oxidação é aumentada, até que se atinge o ponto em que o calor é gerado mais rapidamente do que pode ser removido ou equilibrado no ambiente. Prosseguindo o aquecimento, chega-se a uma temperatura em que o material começa a liberar vapores que se incendiam se houver uma fonte externa de calor. Neste ponto, chamado de *Ponto de Fulgor*, as chamas não se mantêm devido à pequena quantidade de vapores. Continuando o aquecimento, atinge-se uma temperatura em que os gases desprendidos do material, ao entrarem em contato com uma fonte externa de calor, iniciam a combustão e continuam a queimar sem o auxílio daquela fonte. Este ponto é chamado de *Ponto de Combustão*. Prosseguindo o aquecimento, atinge-se um ponto no qual o combustível exposto ao ar entra em combustão sem que haja fonte externa de calor. Este ponto é chamado de *Ponto de Ignição* [Faillace, 1989].

O resultado da combustão é a transformação do combustível de origem em vários gases, deixando um resíduo sólido (cinzas), com características completamente diferentes da substância de origem.

### 3.2.1 Elementos Essenciais ao Fogo

De acordo com Kerber [1979], a combustão é um fenômeno químico e/ou uma reação química; assim, para que ela ocorra necessitamos de no mínimo dois elementos que reajam entre si, bem como uma condição que favoreça tal reação. No caso da combustão, três são os elementos essenciais para que haja fogo, formando o chamado "triângulo do fogo".

Combustível + Fonte de Ignição (calor) + Comburente (oxigênio)

A seguir descreve-se sucintamente cada um destes elementos:

#### a) Combustível

É o elemento que serve de campo de propagação e que alimenta o fogo e, com pequenas exceções, compreende todos os materiais que possamos imaginar. Os materiais orgânicos são todos combustíveis. Quanto aos inorgânicos, nas condições normais, apenas alguns são combustíveis.

Os combustíveis podem ser sólidos, líquidos ou gasosos e a grande maioria precisa passar pelo estado gasoso para então se combinar com o oxigênio (queimar). Submetidos ao calor, os sólidos e os líquidos combustíveis transformam-se em gás para após se inflamarem. Como exceção, há o enxofre e os metais alcalinos (potássio, cálcio, magnésio, etc), que queimam diretamente no estado sólido.

A velocidade de queima de um material combustível depende de sua capacidade de combinar com o oxigênio sob a ação do calor e da sua fragmentação.

### **b) Fonte de Ignição (calor)**

Forma de energia que eleva a temperatura gerada pela transformação de outra energia através de processo físico ou químico. A fonte de ignição é o elemento que serve para dar início ao incêndio, que o mantém e o incentiva a progressão. Podem ser resultados de chamas abertas, circuitos elétricos mal dimensionados ou outras fontes.

A procura das possíveis fontes de calor que possam dar partida a um incêndio constitui uma das bases da prevenção, pois conhecendo-as podemos tomar as medidas necessárias para evitar um provável incêndio, como será discutido no item 3.4.

### **c) Comburente (oxigênio)**

Um elemento que está presente em quase todas as combustões é o chamado “comburente”. Este elemento possibilita o desenvolvimento das chamas e intensifica a combustão. O comburente mais comum é o oxigênio.

A atmosfera terrestre é composta, em média, por 21% de oxigênio, 78% de nitrogênio e 1% de outros gases. Em ambientes com esta composição aproximada do ar, a queima desenvolve-se com velocidade e de maneira completa, notando-se a presença de chamas. Contudo, a combustão consome oxigênio do ar num processo contínuo e quando a porcentagem de oxigênio estiver situada na faixa de 8% a 16%, a queima torna-se mais lenta, notando-se a formação de brasas e não mais de chamas. Quando o oxigênio contido no ar do ambiente estiver em concentração inferior a 8%, não há mais combustão.

A reação em cadeia torna a queima auto-sustentável pois, nesta condição, o calor irradiado das chamas atinge o combustível e o decompõe em partículas menores que, por sua vez, se combinam com o oxigênio e queimam, irradiando outra vez calor para o combustível, formando um ciclo constante.

### 3.2.2 Fases de um Incêndio

Um incêndio pode ser melhor entendido se conhecermos seus estágios de desenvolvimento. De acordo com o Manual de Fundamentos de Bombeiros [?] um incêndio pode ser dividido em três fases principais: fase inicial, queima livre e queima lenta. A seguir discute-se cada uma delas.

#### *Fase Inicial*

Nesta primeira fase, o oxigênio no ar não está significativamente reduzido e o fogo está produzindo vapor d'água (H<sub>2</sub>O), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) e outros gases. Grande parte do calor está sendo consumido no aquecimento dos combustíveis e a temperatura do ambiente neste estágio está pouco acima do normal. O calor está sendo gerado e evoluirá com o aumento do fogo. Não há alterações drásticas no ambiente, mas já há indícios de calor, fumaça e danos causados pelas chamas.

#### *Queima Livre*

Durante esta fase, o ar rico em oxigênio é arrastado para dentro do ambiente pelo efeito da convecção, isto é, o ar quente se desloca para a parte superior do ambiente e sai do mesmo, isto força a entrada de ar fresco pelas aberturas nos pontos mais baixos do ambiente.

Os gases aquecidos espalham-se preenchendo o ambiente e, de cima para baixo, forçam o ar frio a permanecer junto ao solo. Eventualmente, os mesmos causam a ignição dos combustíveis nos níveis mais baixos do ambiente. Este ar aquecido é uma das razões pelas quais os bombeiros devem manter-se abaixados e usar equipamentos de proteção respiratória, uma vez que a inspiração desse ar superaquecido pode queimar os pulmões. Neste momento, a temperatura nas regiões superiores (teto) pode exceder a 700°C.

Durante a fase da queima livre, o fogo aquece gradualmente todos os combustíveis do ambiente. Quando determinados combustíveis atingem seu ponto de ignição simultaneamente, pode haver uma queima instantânea e concomitante desses produtos, o que provoca uma explosão ambiental, ficando toda a área envolvida pelas chamas. Este fenômeno é comumente chamado de *Flashover*.

## *Queima Lenta*

Como nas fases anteriores, o fogo continua a consumir oxigênio até atingir um ponto onde o comburente é insuficiente para sustentar a combustão. Nesta fase, as chamas podem deixar de existir se não houver ar suficiente para mantê-las (na faixa de 0% a 8% de oxigênio). O fogo é normalmente reduzido a brasas, o ambiente torna-se completamente ocupado por fumaça densa e os gases se expandem.

Devido à pressão interna ser maior que a externa, os gases saem por todas as fendas em forma de lufadas, que podem ser observadas em todos os pontos do ambiente. Esse valor intenso reduz os combustíveis a seus componentes básicos, liberando vapores combustíveis.

Durante o processo de queima lenta pode ocorrer o fenômeno denominado *Backdraft*, que ocorre quando a combustão é incompleta porque não há oxigênio suficiente para sustentar o fogo. Contudo, o calor da queima livre permanece e as partículas de carbono não queimadas (bem como outros gases inflamáveis, produtos da combustão) estão prontas para incendiar-se rapidamente assim que o oxigênio for suficiente. Se o ambiente for ventilado e aumentar o teor de oxigênio, este ambiente explodirá.

Durante o combate aos incêndios, a ventilação adequada permite que a fumaça e os gases combustíveis superaquecidos sejam retirados do ambiente. Já uma ventilação inadequada suprirá abundantemente e perigosamente o local com o elemento que faltava, o oxigênio, podendo provocar a explosão ambiental característica do *Backdraft*.

As condições a seguir podem indicar uma situação de *Backdraft*:

- Fumaça sob pressão num ambiente fechado;
- Fumaça escura, tornando-se densa, mudando de cor (cinza e amarelada) e saindo do ambiente em forma de lufadas;
- Calor excessivo;
- Pequenas chamas ou inexistência destas;
- Resíduos de fumaça impregnando o vidro das janelas;
- Pouco ruído;
- Movimento de ar para o interior do ambiente (quando alguma abertura é feita, ouve-se o ar assobiando ao passar pelas frestas).

### 3.2.3 Classificação dos Incêndios

Os incêndios são classificados de acordo com os materiais neles envolvidos, bem como a situação em que se encontram. Essa classificação é feita para determinar o agente extintor adequado para o tipo de incêndio específico, como será discutido no item 3.4.

A classificação apresentada a seguir foi elaborada pela NFPA (National Fire Protection Association), adotada pela IFSTA (International Fire Service Training Association) e pelo Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo.

#### *Incêndio Classe “A”*

Envolve a combustão de sólidos comuns, tais como borracha, madeira, pano e papel. É caracterizado pelas cinzas e brasas que ficam como resíduos e pela queima ser em função do seu volume, isto é, a queima se dá na superfície e em profundidade.

#### *Incêndio Classe “B”*

Envolve líquidos inflamáveis, graxas e gases combustíveis. É caracterizado por não deixar resíduos e queimar apenas na superfície exposta e não em profundidade.

#### *Incêndio Classe “C”*

Envolve equipamentos energizados e caracteriza-se pelo risco de vida que oferece a quem os combate.

#### *Incêndio Classe “D”*

Envolve metais combustíveis pirofóricos (magnésio, selênio, antimônio, lítio, potássio, alumínio fragmentado, zinco, titânio, sódio, zircônio). Caracteriza-se pela queima em altas temperaturas e por reagir com os agentes extintores comuns (principalmente os que contenham água).

Tendo discutido a natureza geral do processo de combustão e apresentado como um incêndio se desenvolve, cabe agora examinar como os incêndios afetam as estruturas civis. No próximo item é feita uma revisão dos efeitos de altas temperaturas em alguns dos principais materiais de construção.

### 3.3 EFEITOS DAS ALTAS TEMPERATURAS EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS

A análise do comportamento de uma edificação, quando submetida à ação do fogo, é definida pela reação e resistência às altas temperaturas por parte dos elementos da construção. A *reação ao fogo* pode ser definida como a capacidade de um material em contribuir para o desenvolvimento do incêndio e dos seus subprodutos. Já, a *resistência ao fogo*, de acordo com NBR 14432 – “Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento” [ABNT, 2000], representa a capacidade de um componente se manter inalterado, durante um certo período de tempo, de forma a garantir a segurança estrutural, estanqueidade e isolamento. A norma prescreve que a resistência ao fogo dos elementos construtivos deve ser assegurada durante um tempo mínimo igual ao especificado em função da ocupação e da altura da edificação, expresso em termos de *Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF)*, como mostra a Quadro 3.1.

QUADRO 3.1 - Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF)

Ocupação Uso	Profundidade do Subsolo (m)		Altura da Edificação (m)				
	$H_s > 10$	$H_s \leq 10$	$H \leq 6$	$6 < H \leq 12$	$12 < H \leq 23$	$23 < H \leq 30$	$H > 30$
Residencial	90	60 <sub>(30)</sub>	30	30	60	90	120
Serviços de Hospedagem	90	60	30	60 <sub>(30)</sub>	60	90	120
Comercial Varejistas	90	60	60 <sub>(30)</sub>	60 <sub>(30)</sub>	60	90	120
Serviços Profissionais, Pessoais e Técnicos	90	60 <sub>(30)</sub>	30	60 <sub>(30)</sub>	60	90	120
Educacional e Cultura Física	90	60 <sub>(30)</sub>	30	30	60	90	120
Locais de Reunião de Público	90	60	60 <sub>(30)</sub>	60	60	90	120
Serviços Automotivos	90	60 <sub>(30)</sub>	30	60 <sub>(30)</sub> / 30	60	90	120 / 90
Estacionamentos Abertos Lateralmente	90	60 <sub>(30)</sub>	30	30	30	30	---
Serviços de Saúde e Institucionais	90	60	30	60	60	90	120
Industrial (I1)	90	60 <sub>(30)</sub>	30	30	60	90	120
Industrial (I2)	120	90	60 <sub>(30)</sub>	60 <sub>(30)</sub>	90 <sub>(60)</sub>	120 <sub>(90)</sub>	120
Depósitos (J1)	90	60 <sub>(30)</sub>	30	30	30	30	60
Depósitos (J2)	120	90	60	60	90 <sub>(60)</sub>	120 <sub>(90)</sub>	120

Os tempos entre parênteses podem ser usados em edificações nas quais os pavimentos acima do solo tenham área individual menor ou igual a 750 m<sup>2</sup> e em subsolos nos quais a área individual dos pavimentos seja menor ou igual a 500 m<sup>2</sup>.

De acordo com Souza & Ripper [1998], na primeira fase de um incêndio e durante a inflamação generalizada que se segue, o que interfere são as reações ao fogo e os fenômenos que as caracterizam, enquanto que, nas fases posteriores, a resistência ao fogo é que desempenha o papel principal.

O desempenho de vigas, pilares, lajes e outros componentes estruturais da edificação, em situações de exposição ao fogo, são um assunto de vital importância para que as construções sejam consideradas seguras e para que as mesmas não se constituam em uma ameaça às estruturas vizinhas ou às pessoas, como explica a norma ASTM E119 [ASTM, 1998].

Seguindo a filosofia do Quadro 3.1, os regulamentos que tratam do assunto geralmente estabelecem tempos mínimos de resistência ao fogo para os elementos estruturais; porém, na maioria dos casos, estes tempos são definidos de modo essencialmente subjetivo, levando-se em conta apenas a natureza da ocupação, a sua altura e a experiência de atendimentos de ocorrências dos corpos de bombeiros. Não são considerados os efeitos das altas temperaturas sobre os materiais de construção, pela falta de conhecimento na área.

Estabelecer cientificamente a dependência entre a estabilidade de um elemento estrutural e o tempo de resistência ao fogo é uma tarefa muito complexa e, atualmente, constitui um tópico vital na área de Engenharia de Incêndio. Porém, não é muito simples determinar um procedimento adequado para analisar o desempenho de elementos estruturais no decorrer do tempo em função da exposição ao calor, pois vários aspectos químicos e físicos devem ser considerados [Crea et al, 1997]. Os principais efeitos sobre alguns materiais são discutidos abaixo

### **3.3.1 Efeito de Altas Temperaturas sobre a Madeira e o Aço**

A grande maioria das pesquisas que analisam os efeitos do calor em obras de engenharia civil estão voltadas para construções em estruturas metálicas, uma vez que o aço apresenta uma deformação muito grande sob a ação do calor.

Segundo Gouvêia [2000b], a exposição de elementos de aço a elevadas temperaturas torna o comportamento do mesmo mais dúctil, verificando-se uma redução no seu módulo de elasticidade e tensão de escoamento. A sua resistência é reduzida de tal maneira que,

a uma temperatura de 550 °C, o elemento de aço uniformemente tracionado, dimensionado pelo método das tensões admissíveis, terá perdido toda a sua reserva de resistência. Por este motivo, este patamar é usualmente definido como a temperatura crítica para aços estruturais [Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo, 1999].

Em edificações, onde os elementos estruturais são compostos por peças em aço, o curto intervalo de tempo decorrido até que seja atingida a temperatura crítica, em situações de incêndio, ocasiona situações de elevado risco durante o processo de desocupação da mesma e as operações de combate ao incêndio [Ruiz, 1976].

Quando o assunto é voltado para peças estruturais construídas em madeira, observa-se que a literatura indica, o que a primeira vista pode parecer incoerente, um bom comportamento deste material frente a um incêndio. O conceito adquirido de que a madeira é uma material combustível largamente utilizado como fonte de calor tende a sugerir que ela, como componente de uma estrutura, está sujeita a ser destruída pelo fogo. Entretanto, o comportamento da madeira em caso de incêndio não é alarmante, uma vez que a mesma queima, porém lentamente.

Se compararmos com as estruturas metálicas, a madeira apresenta a conveniência de ser resistente por um maior período de tempo aos efeitos do fogo. A principal diferença é que, no cálculo da carga de incêndio imobiliária nas estruturas de aço, não é considerada a estrutura em si, enquanto que os materiais lenhosos contribuem com grande peso no cômputo da carga de incêndio final em estruturas de madeira. Isso exige considerações especiais ao projetar-se um sistema de prevenção para estas estruturas [Ruiz, 1976].

### **3.3.2 Efeito de Altas Temperaturas sobre o Concreto**

As pesquisas referentes à exposição do concreto a altas temperaturas apresentam resultados muito variáveis, o que dificulta uma generalização ampla a respeito do assunto. Este fato é decorrente das diferenças entre as tensões atuantes e as condições de umidade do concreto enquanto sob aquecimento, diferença na duração da exposição à temperatura elevada e diferença nas propriedades dos agregados [Neville, 1997]. Um aspecto, entretanto, é que os materiais constituintes do concreto são incombustíveis; desta forma, a propagação de chamas através dos mesmos é reduzida e as estruturas mantêm-se relativamente reutilizáveis após a sua exposição ao fogo [Ruiz, 1976].

Esse bom comportamento é confirmado por Mehta & Monteiro [1994], que enfatizam que este material apresenta boas características no que diz respeito a elevadas temperaturas, que o período de tempo que o mesmo continua com um desempenho adequado é relativamente longo e que não ocorre desprendimento de gases tóxicos durante a sua exposição ao calor. Assim, as operações de resgate dos ocupantes da edificação são favorecidas pela redução do risco de colapso estrutural.

O comportamento real do concreto submetido a temperaturas elevadas é resultado de muitos fatores que interagem simultaneamente e que são muito complexos para uma análise exata. A composição do concreto é um dos fatores que deve ser levado em consideração, uma vez que tanto a pasta de cimento quanto o agregado consistem de componentes que se decompõe ao aquecer. A permeabilidade do concreto, o tamanho da peça e a taxa de aumento da temperatura também influenciam pois governam o desenvolvimento das pressões internas dos produtos gasosos de decomposição [Mehta & Monteiro, 1994].

Considerando o comportamento durante um incêndio, o concreto fica exposto a um elevado gradiente de temperatura, resultando no descamamento das camadas superficiais quentes das camadas interiores mais frias. O grau de fissuração intensifica-se nas juntas, nas regiões mal adensadas e nos planos de barras de armadura. Uma vez atingida a armadura, a mesma passa a conduzir calor, acelerando o efeito da temperatura elevada [Neville, 1997].

Os elementos estruturais da grande maioria dos edifícios de concreto resultam estaticamente íntegros após a ocorrência de um incêndio; entretanto, as condições estéticas da edificação, geralmente, exigem total reparo, resultando quase sempre na necessidade de recobertura completa da estrutura [Ruiz, 1976]. Por exemplo, em 1972, um edifício de concreto armado de 31 andares em São Paulo, foi exposto a um incêndio de alta intensidade por mais de 4 horas, sendo que foi possível resgatar mais de 500 pessoas devido a manutenção da estabilidade estrutural do mesmo. [Mehta & Monteiro, 1994]

Por estas razões o concreto representa, no quadro de cálculo do risco de incêndio, uma carga imobiliária nula, tendo como vantagem não necessitar proteção externa por revestimento. Isto é de extrema importância, devido ao fato de que a manutenção periódica e constante das proteções passivas, nas situações em que ela é necessária, raramente são observadas, ocasionando pontos mais frágeis ao calor, surgindo regiões de baixa resistência ao fogo nas peças estruturais e colocando em risco a integridade da edificação [Ruiz, 1976].

No entanto, ressalta-se que as vantagens apresentadas pelas edificações em concreto em relação à segurança contra incêndios não justificam que se despreze por completo a necessidade de medidas de prevenção. Estas são fundamentais no sentido de assegurar a vida dos ocupantes e, portanto, é necessário o cálculo de um sistema de proteção que considere a carga mobiliária e adote soluções com a mesma seriedade existente no cálculo da prevenção em estruturas com carga de incêndio imobiliária ou deformáveis com excesso de calor.

A exposição de elementos estruturais de concreto reforçados com compósitos de fibra de carbono a elevadas temperaturas exige cuidados adicionais, como será discutido logo abaixo.

### **3.3.3 Efeito de Altas Temperaturas sobre Compósitos de Fibra de Carbono**

No caso específico de estruturas de concreto reforçadas com tecidos de fibra de carbono e submetidas a elevadas temperaturas, especial atenção deve ser dispensada por parte dos projetistas. Segundo Meier [1997], um aquecimento no compósito de fibra de carbono utilizado para o reforço estrutural ocasiona a volatilização do adesivo epóxi que serve para aderir o tecido ao concreto, além de afetar a integridade estrutural do tecido após o resfriamento.

No caso de compósitos inseridos em elementos de concreto, a estrutura tem um comportamento de risco reduzido, semelhante ao exigido para as estruturas de concreto armado e pré-fabricadas em situações de incêndio. É interessante, neste caso, o estudo da espessura de cobertura das barras utilizadas no reforço, assim como da matriz constituinte do compósito, a fim de verificar se o tempo de resistência ao fogo estabelecido no projeto pode ser atendido. Já no caso de exposição direta dos sistemas compósitos ao fogo, como ocorre, por exemplo, na colagem externa de laminados ou mantas de CFRP, o reforço estrutural pode ficar comprometido, uma vez que o adesivo utilizado na colagem do reforço possui grande quantidade de carbono e hidrogênio, que são inflamáveis [ACI, 1996].

Por esta razão, no caso de exposição direta ao fogo, não se deve executar reforços com fibra de carbono, a menos que se apliquem proteções especiais. Estas devem ser estudadas em conformidade com as informações dos fornecedores dos sistemas (compósitos de CFRP e adesivos) e de acordo com as exigências estabelecidas no projeto em relação aos requisitos das Normas de Proteção Contra Incêndio [Juvandes, 1999].

Como visto no capítulo 2 e enfatizado pela norma ACI [1996], o sucesso no aumento da capacidade portante de uma estrutura reforçada com fibra de carbono depende do desempenho do adesivo utilizado para colar o material compósito ao concreto. Este desempenho pode ser seriamente comprometido pela ação da temperatura. Por exemplo, em 1994, no EMPA - *Eidgenössische Material Prüfungs Anstalt (Laboratório Federal Suíço de Ensaios e Pesquisas em Materiais)*, foram realizados ensaios de comportamento ao fogo de seis vigas de concreto armado, sujeitas à flexão em quatro pontos. Uma destas vigas estava reforçada com chapas de aço colada, quatro estavam reforçadas com fibra de carbono e outra atuava como referência e sem reforço exterior. Sob flexão, os modelos foram aquecidos até o forno atingir uma temperatura de 925K (651,85 °C) de acordo com a norma ISO 834, no intervalo de uma hora. A viga reforçada com chapa de aço cedeu ao término de 8 minutos por incapacidade do adesivo. Já nas reforçadas com CFRP, observou-se inicialmente a inflamação das fibras de carbono na superfície e, depois, a redução gradual da seção útil, ocasionando a diminuição de rigidez do compósito e ao final de uma hora, o reforço destacou-se da viga. Em ambos os casos, o reforço cedeu pela ligação, porém com vantagem para os compósitos de CFRP uma vez que apresentaram um desempenho superior as chapas coladas, devido à baixa condutividade térmica transversal do compósito [Meier, 1997].

Devido à esta suscetibilidade a altas temperatura, as conseqüências da perda de capacidade do reforço devem ser sempre consideradas como uma situação de risco possível. Geralmente, exige-se que a estrutura, com a ruína do reforço, possa suportar a combinação de ações estabelecidas nesta situação (coeficiente de segurança maior que a unidade), isto é, que resista as ações permanentes e a uma percentagem de ações variáveis. Desde as primeiras pesquisas realizada nos anos setenta, recomenda-se portanto que o reforço posterior de estruturas existentes não exceda 50% da sua resistência atual e que, no caso da ruína acidental do reforço, a estrutura remanescente tenha um fator residual de segurança de aproximadamente 1,2 para evitar o colapso da estrutura [Meier, 1997].

Uma maneira de minimizar o problema e viabilizar o uso destas estruturas reforçadas é o desenvolvimento de proteções adequadas para situações de risco. Investigar o comportamento dos compósitos em várias temperaturas e avaliar o desempenho de alguns sistemas simples de proteção são os objetivos da presente pesquisa, como discutido no capítulo 1; o planejamento experimental para atingir estes objetivos é apresentado no capítulo 4. Antes porém se faz uma revisão dos sistemas de prevenção, controle e proteção contra incêndio.

### 3.4 PREVENÇÃO E CONTROLE DE INCÊNDIOS

As primeiras iniciativas referentes a proteções contra incêndios foram prescrições relativas às construções e aos materiais nela empregados. O Rei Charles II decretou regras de separação dos edifícios em termos de espessura mínima das paredes, após o grande incêndio de Londres, em 1666 [Gouvêia, 2000a]. Com o passar do tempo, novas regulamentações ou o aprimoramento das existentes foram sendo desenvolvidas, mas sempre com a mesma visão de estabelecer materiais e formas aceitáveis de construção.

No Brasil, o advento da regulamentação da segurança contra incêndio das edificações ocorreu na década de setenta com os sinistros ocorridos nos edifícios Andraus e Joelma, em São Paulo e o da Caixa Econômica Federal, no Rio de Janeiro. A maioria das regulamentações existentes no país surgiram de adaptações das legislações estrangeiras, realizadas no âmbito do Instituto de Resseguros do Brasil com vistas à contratação de seguros. Os “Regulamentos para Prevenção de Incêndios em Edificações”, das corporações de bombeiros e dos códigos de obra municipais tiveram papel fundamental na disseminação dessas normas no meio profissional [Gouvêia, 2000a].

Em 1979, foi fundado em São Paulo o Laboratório de Ensaios de Fogo do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), com a finalidade de realizar pesquisas na área de incêndio. Em 1993, foi aprovado, no estado de São Paulo, o Decreto nº 38069 que versa sobre “Especificações para Instalação e Proteção contra Incêndios”, baseado em consultorias do inglês H. L. Malhotra, estabelecendo medidas ativas e passivas a serem adotadas nas edificações [Gouvêia, 2000a].

Segundo Gouvêia [2000a], em 1994, a Instrução Técnica CB-02.33/94 estabeleceu tempos mínimos de resistência ao fogo para estruturas de aço. Recentemente, novas considerações foram feitas nesta instrução, sendo ampliada para todos os tipos de estruturas do estado de São Paulo e publicada como IT CB-011-33/99.

Em 1995, o CB-24, com o apoio da Associação Brasileira dos Construtores de Estruturas Metálicas (ABCEM) formou um grupo de trabalho com a finalidade de elaborar uma norma de tempos de resistência ao fogo para edificações e outra de dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio. O resultado deste trabalho foi a aprovação e publicação das normas NBR 14323 – “Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em

situação de incêndio – Procedimento” [ABNT, 1999] e NBR 14432 – “Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento” [ABNT, 2000].

A NBR 14432 [2000] estabelece as condições a serem atendidas pelos elementos estruturais da edificação face à ação do calor em caso de incêndio, de forma que seja evitado o colapso estrutural e atendidos os requisitos de estanqueidade e isolamento térmico por um intervalo de tempo suficiente para:

- Possibilitar a saída dos ocupantes da edificação em condições seguras;
- Garantir condições de segurança durante as operações de combate ao incêndio;
- Evitar ou minimizar os danos às edificações adjacentes e à infraestrutura pública.

Apesar de suas imperfeições, os sistemas de prevenção colaboram para que os incêndios sejam ocasiões raras. Pesquisas realizadas na Europa indicam que o risco de morte devido a um incêndio é trinta vezes menor que o risco de morte no sistema de transporte [Silva, 2000]. Ainda, sem considerar os prováveis danos à vida em função dos danos ao meio ambiente, o número de óbitos causados diretamente por um colapso estrutural nos países europeus é da ordem de apenas 1% do total de óbitos verificados em incêndios [Gouvêia, 2000a].

De acordo com Silva [2000], o risco à vida em função de um colapso estrutural decorrente de um incêndio, em edificações dimensionadas de forma adequada à temperatura ambiente e equipadas com os dispositivos apropriados de segurança, geralmente exigidos pelo poder público, é muito reduzido, pois deve-se considerar a probabilidade da ocorrência de início do incêndio, a probabilidade de que os meios de proteção ativa não sejam eficazes e o incêndio se generalize, a probabilidade de que as rotas de saída não sejam adequadas e que as pessoas fiquem presas na edificação em locais não atingidos pelo fogo ou pela fumaça, e a probabilidade de que a estrutura atinja o colapso devido à alta temperatura. Esta combinação felizmente é rara, orientando a prevenção de incêndios preferencialmente para o monitoramento e a extinção, reservando um lugar secundário para a estabilidade estrutural.

Em termos de extinção, os métodos para tal são variados e se baseiam no controle dos elementos essenciais do fogo, como se verifica a seguir; mas seu uso depende da classe de incêndio, como se verifica no item 3.4.2.

### **3.4.1 Métodos de Controle e Extinção do Fogo**

Os métodos de extinção baseiam-se na eliminação de um ou mais dos elementos essenciais que provocam e alimentam o fogo. Os mais usuais são:

#### ***Retirada do material***

Teoricamente, é a forma mais simples de extinguir-se um incêndio. Baseia-se na retirada do material combustível ainda não atingido da área de propagação do fogo, interrompendo a alimentação da combustão. Na prática, não é simples de ser empregado pois muitos materiais estão incorporados à edificação.

#### ***Resfriamento***

É o método mais utilizado, consiste em diminuir a temperatura do material combustível que está queimando, diminuindo assim a liberação de gases ou vapores inflamáveis. A água é o agente extintor mais usado por ter uma grande capacidade de absorver calor e ser facilmente encontrada na natureza. A redução da temperatura está ligada à quantidade e a forma de aplicação da água (jatos), de modo que ela absorva mais calor do que o incêndio é capaz de produzir. É inútil o emprego de água onde queimam combustíveis com baixo ponto de combustão (inferior a 20 °C), pois a água resfria apenas até a temperatura ambiente e o material continuará produzindo gases combustíveis.

#### ***Abafamento***

Consiste em diminuir ou impedir o contato do oxigênio com o material combustível. Não havendo comburente para reagir com o combustível, não haverá fogo. Como exceção, estão os materiais que contêm oxigênio em sua composição e que queimam sem necessidade do oxigênio do ar, como os peróxidos orgânicos e o fósforo branco. Pode-se abafar o fogo com o uso de diversos materiais como areia, terra, cobertores, vapor d'água, espumas, gases especiais, etc.

#### ***Quebra da reação em cadeia***

Certos agentes extintores, quando lançados sobre o fogo, sofrem a ação do calor, reagindo sobre a área das chamas, interrompendo assim a reação em cadeia (extinção química). Isto ocorre porque o oxigênio comburente deixa de reagir com os gases combustíveis. Essa reação só ocorre quando há chamas visíveis.

### **3.4.2 Classificação dos Métodos de Extinção por Tipo de Incêndio**

Agentes extintores são todas as substâncias capazes de eliminar um ou mais dos elementos essenciais do fogo, cessando a combustão. Para cada tipo de incêndio pode ser necessário um certo tipo de agente extintor.

#### **Incêndio Classe “A”**

Necessita de resfriamento para a sua extinção, isto é, o uso de água ou soluções que a contêm em grande porcentagem, a fim de reduzir a temperatura do material em combustão abaixo do seu ponto de ignição. O emprego de pós-químicos irá apenas retardar a combustão, não agindo na queima em profundidade.

#### **Incêndio Classe “B”**

Necessita abafamento ou quebra da reação em cadeia. No caso de líquidos muito aquecidos (ponto de ignição), é necessário resfriamento.

#### **Incêndio Classe “C”**

Necessita de um agente extintor que não conduza corrente elétrica e utilize o princípio do abafamento ou da interrupção da reação em cadeia. Esta classe de incêndio pode ser alterada para “A” se for interrompido o fluxo elétrico. Deve-se ter o cuidado com equipamentos que acumulam energia elétrica, pois estes continuam energizados mesmo após a interrupção da corrente elétrica.

#### **Incêndio Classe “D”**

Necessita de agentes extintores especiais que se fundam em contato com o material combustível, formando uma espécie de capa que isola do ar atmosférico, interrompendo a combustão pelo princípio do abafamento.

Os pós-especiais são compostos dos seguintes materiais: cloreto de sódio, cloreto de bário, monofosfato de amônia, grafite seco. O princípio de retirada do material também é aplicado com sucesso nesta classe de incêndio.

### 3.5 TÉCNICAS DE PROTEÇÃO

Um dos métodos tradicionalmente aceitos para garantir a integridade de um elemento estrutural consiste no revestimento do mesmo com materiais isolantes e incombustíveis, fazendo com que a sua temperatura se mantenha suficientemente baixa por um intervalo de tempo especificado. Este revestimento é usualmente denominado de proteção passiva. A seguir, apresentada-se a rotina de dimensionamento prevista na NBR 14323 – “Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio – Procedimento” [ABNT, 1999], para a definição da necessidade ou não de proteção passiva em estruturas de aço, mas que pode ser adaptado para estruturas em geral:

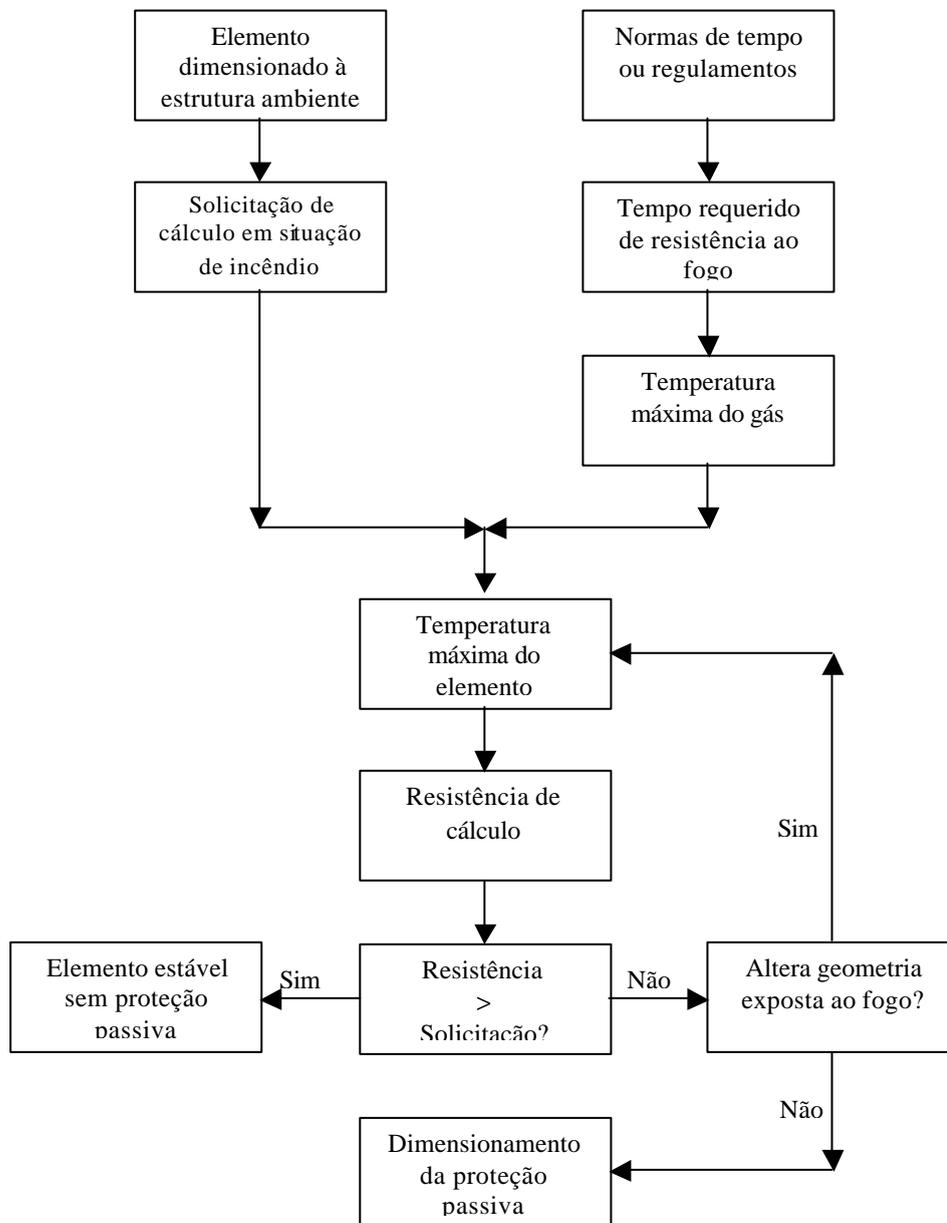


FIGURA 3.1 – Rotina de dimensionamento prevista na NBR 14323

A inclusão de medidas de proteção e extinção de incêndios, além de meios que possibilitem a rápida desocupação dos ambientes em chamas, deve ser conscientemente analisados pelos projetistas e proprietários da edificação, considerando as condições específicas da obra, tais como o porte da edificação, o número de usuários e o tipo de utilização, além das exigências do poder público e as recomendações das normas técnicas para o projeto e as especificações dos equipamentos [Silva, 2000].

### **3.5.1 Tipos de Proteção Passiva**

A resistência ao fogo das peças componentes de uma estrutura pode ser consideravelmente aumentada por meio de revestimentos apropriados. As formas de proteção fornecidas por esses revestimentos são as mais variadas, dependendo do material empregado para este fim; sempre com o objetivo de retardar o efeito da temperatura nas peças que determinam a integridade do edifício. Além de garantir a integridade da estrutura por um certo intervalo de tempo, a proteção de superfície por revestimentos auxilia a fuga em segurança dos ocupantes, quando os meios de evasão são devidamente protegidos por estes materiais [Ruiz, 1976].

Dentre os materiais mais utilizados para conferir proteção passiva aos elementos estruturais de uma edificação, destacam-se:

- *Jateamento de Cimento Amianto*

Muito utilizado em estruturas metálicas pois a reação de pega e a boa aderência ao aço, resultam em uma capa protetora de espessura definida e garantem a segurança da estrutura [Ruiz, 1976]. No entanto, de uma forma geral, tem-se evitado a utilização deste material devido aos riscos que as fibras de cimento amianto oferecem à saúde das pessoas [Gouvêia, 2000b].

- *Revestimentos com Madeira*

A madeira apresenta boas qualidades como elemento isolante ao calor pois possui um baixo coeficiente de transmissão térmica. Sob a ação do fogo, a madeira não dilata e nem funde, e se uma das faces do elemento for diretamente exposta às chamas, a outra permanece fria ou apenas tépida [Ruiz, 1976].

- *Vermiculita*

Entre os materiais que recentemente estão sendo utilizados para conferir proteção passiva a estruturas encontram-se os decorrentes de fibra de rocha ou vermiculita; mineral semelhante à mica expandida, formada essencialmente por silicatos hidratados de alumínio e magnésio. Ao ser submetida a um aquecimento de até 1000 °C, a água contida entre as suas milhares de lâminas transforma-se em vapor, fazendo com que suas partículas explodam e transformem-se em flocos sanfonados. Cada floco expandido aprisiona consigo células de ar inerente, o que confere ao material excepcional capacidade de isolamento térmica e absorção acústica. Estas propriedades tornam a vermiculita expandida um produto de larga aplicação na construção civil.

Ela é fornecida tanto na forma pastosa para ser borrifada diretamente, quanto na forma de placas para a fixação mecânica. A técnica de aplicação através de jatos é a mais barata e mais simples. Porém, a aplicação do material sob forma úmida, gera problemas com a limpeza e o aspecto final da obra. Já o sistema com placas é livre destes problemas, mas tende a ser mais caro devido ao alto custo de fixação das mesmas.

- *Fibra de Vidro*

Este é um material muito empregado como isolante em outras aplicações e que recentemente, tornou-se popular para proteção contra incêndio. Devido à natureza do material, ele requer algum tipo de cobertura para mantê-la ligada ao elemento estrutural.

- *Pintura de Superfície com Tintas Protetoras*

Com a finalidade de satisfazer os requisitos da ação incombustível em estruturas, existem muitos produtos químicos de natureza orgânica à base de resinas que tem a função de proteger a madeira, o metal ou outros materiais contra o excesso de calor. Esses produtos são utilizados em forma de tintas pastosas que revestem a superfície a ser protegida.

Um dos tipos de pintura utilizada para conferir proteção são as tintas intumescentes, as quais são aplicadas sobre a superfície a ser protegida em camadas na ordem de 1,0 cm, sendo que, ao ser submetida ao calor pela ação do fogo, elas liberam um gás que expande, protegendo a superfície com uma espuma carbônica. Existem dois tipos de tinta intumescente no mercado, uma delas resiste à umidade e protege ao fogo por no máximo 120 min; a outra não é indicada para ambientes úmidos e fornece uma resistência máxima ao fogo de 90 min.

- *Revestimento com Argamassa*

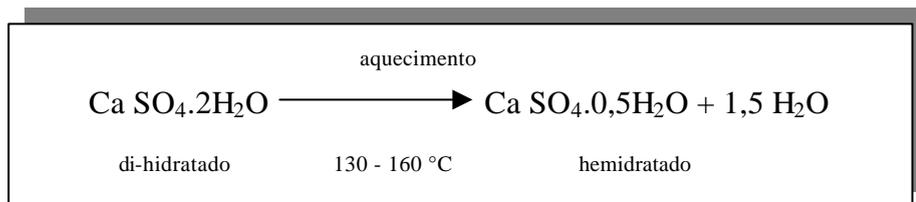
Este tipo de revestimento é um dos mais tradicionalmente aceitos para conferir proteção aos elementos estruturais em situação de incêndio, devido à sua grande eficácia e ao conhecimento do seu comportamento por parte dos projetistas. Apesar do seu bom desempenho, este tipo de revestimento pode acarretar um acréscimo considerável de carga a estrutura, fazendo com que, em muitos casos, os projetistas tenham que optar por outros tipos de revestimentos mais leves. Por suas qualidades foi escolhida para fazer parte da pesquisa.

- *Revestimento com Gesso*

Os materiais em gesso são inorgânicos e não-inflamáveis; com isto, pertencem à classe de materiais indicados para fornecer proteção ao fogo. A boa capacidade de ação protetora em caso de sinistros advém, acima de tudo, da composição do mesmo, que contém cerca de 20% de cristais d'água. Com a ação do fogo, o gesso libera estes cristais d'água sob a forma de vapor. Para tanto, é utilizada energia (para paredes de 15 mm de espessura, são necessários cerca de 8.400kJ, ou seja, 2.000kCal). Além disto, o vapor d'água que surge entre o fogo e o material retarda a expansão do incêndio e, ainda, como meio de isolamento complementar, age a camada de gesso residual, após a evaporação dos cristais d'água, a qual possui uma capacidade menor de condução de calor em relação à camada que possuía os cristais d'água [Brandschutz ..., 1997]. Devido à sua presença no programa experimental decidiu-se fazer uma revisão mais extensa do comportamento deste material como proteção térmica.

### **3.5.2 O Papel do Gesso como Elemento de Proteção Térmica**

O gesso, que encontra usos sob a forma de pasta de revestimento e decorações interiores, é um aglomerante aéreo. Para a sua fabricação utiliza-se uma única matéria prima, que é a gipsita (sulfato de cálcio dihidratado). Este, em geral, é acompanhado de impurezas como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgO}$ , que não devem ultrapassar 6% da massa total do mesmo. A gipsita calcinada ou sulfato de cálcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) é intensamente utilizada pela indústria da construção, tanto para a incorporação ao cimento como retardador de pega, quanto para a fabricação do gesso. Ao ser calcinada em temperatura adequada e moída em forma de pó, transforma-se o sulfato de cálcio dihidratado em sulfato de cálcio hemidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ), pela perda da água de cristalização, obtendo-se o produto usualmente conhecido como gesso [Claire, 1994].



As etapas para obtenção do gesso subdividem-se em três fases: britagem da rocha, trituração e queima [Petrucci, 1982]. Durante a queima ocorrem várias reações de transformação.

Em temperaturas de 130 a 160 °C, a gipsita perde 3/4 partes de água, passando de dihidrato a hemidrato, substância muito mais solúvel que a primeira. Este hemidrato é conhecido por gesso de Paris, gesso de estucador ou gesso de pega rápida.

À temperatura de 250 °C, o gesso se torna anidro. O resultado é a anidrita solúvel, ávida de água e que se transforma rapidamente em hemidrato. À temperatura de 400 a 600 °C, a anidrita se torna insolúvel e não é mais capaz de fazer pega. Finalmente, de 900 a 1200 °C obtém-se um produto de endurecimento, denominado de gesso de pavimentação, gesso hidráulico ou, como conhecido na Alemanha, "estrichgips".

O gesso apresenta características vantajosas para a utilização como material de construção, visto que apresenta características interessantes como: pega e endurecimento rápidos, plasticidade, lisura da superfície endurecida e estabilidade volumétrica [Kern, 1999].

No processo de endurecimento do gesso, o hemidrato se dissolve na água de amassamento à saturação e, pela formação de dihidrato menos solúvel, forma-se a solução super saturada que cristaliza em forma de longas agulhas; então, a água é capaz de dissolver hemidratos, repetindo-se o ciclo. A hidratação se faz com o desprendimento de calor, verificando-se uma dilatação linear da ordem de 0,3% e uma pequena retração após o endurecimento [Petrucci, 1982].

A quantidade de água tem uma grande influência sobre a velocidade da pega e sobre o endurecimento e resistência do gesso. Quanto menor a quantidade de água, mais rápida é a pega e maior é a resistência. O endurecimento e o acréscimo de resistência do gesso, que ocorre quando a pega se dá em condições ambientais não saturadas, são devidos unicamente à evaporação progressiva do excesso de água de amassamento; se o gesso for conservado numa atmosfera saturada após a pega, sua resistência mecânica não varia.

As argamassas de gesso são empregadas em revestimentos internos. Em alguns casos, em lugar de uma argamassa, emprega-se pasta de gesso; entende-se por pasta de gesso o material obtido pela mistura de gesso e água, sem a adição de qualquer agregado.

O gesso como material, é um isolante de tipo médio, equivalente à madeira e ao tijolo cerâmico. Ele oferece um excelente isolamento térmico, sendo capaz de absorver grandes quantidades de calor, transformando-se em sulfato anidro. Para exemplificar, uma camada de gesso de 3,0 cm espessura é capaz de proteger um elemento durante 45 minutos, a uma temperatura de 1000 °C [Petrucci, 1982].

A elevada resistência do gesso a altas temperaturas deve-se à água de cristalização; quando a temperatura atinge aproximadamente 120 °C, parte desta água de cristalização se liberta, formando um véu de vapor que não permite que a temperatura junto ao revestimento ultrapasse os 100 °C. A parte restante da água de cristalização liberta-se a 180 °C e reforça este véu de vapor [Claire, 1994].

Com a finalidade de ilustrar a proteção conferida pelo gesso no caso de temperaturas elevadas, refere-se o ensaio realizado pela British Iron and Steel Federation em um modelo de um edifício metálico, de 20 andares, submetido à ação do fogo, onde as regiões expostas das vigas e colunas foram previamente revestidas por placas de gesso de 12 mm de espessura [Ruiz, 1976]. No decorrer do ensaio, a temperatura do ar elevou-se rapidamente a valores compreendidos entre 900 e 1000 °C, sendo que em certos pontos foi atingida a temperatura de 1200 °C. Graças a proteção passiva com gesso, a estrutura metálica atingiu temperaturas da ordem de 415 °C numa coluna de canto e na maior parte das outras, bem inferiores às externas. As vigas interiores alcançaram temperaturas máximas da ordem de 300 °C. Nos limites das aberturas, a temperatura oscilou entre 375 e 650 °C. Este exemplo demonstra a eficácia de proteções térmicas realizadas com placas de gesso, uma vez que a temperatura alcançada pelo ambiente no decorrer do ensaio ultrapassou a temperatura crítica para aços estruturais ( $T_c = 550$  °C); assim, se os elementos de aço não estivessem protegidos com placas de gesso, os danos sofridos pelos mesmos seriam consideravelmente maior, podendo-se chegar ao colapso da estrutura.

# Capítulo 4

## PROGRAMA EXPERIMENTAL

No decorrer deste capítulo, serão apresentadas as varias etapas do programa experimental desenvolvido neste trabalho, justificando sua execução. Para cada uma delas, serão discutidas as variáveis analisadas e os ensaios realizados.

### 4.1 ESTRUTURA DA PESQUISA

Em função das características da pesquisa proposta, o programa experimental foi dividido em três etapas distintas: estudo preliminar, etapa principal e estudo complementar.

Como discutido no capítulo 1, antes do início da etapa principal do programa experimental foi realizado um estudo preliminar com a finalidade de obter-se um panorama inicial do comportamento dos corpos de prova reforçados com tecidos de fibra de carbono ao serem submetidos a elevadas temperaturas, uma vez que esta tecnologia é extremamente nova e encontra-se em fase exploratória, conseqüentemente há um escasso conhecimento de suas propriedades frente a situações mais específicas.

A etapa principal contemplou a realização de ensaios laboratoriais, onde avaliaram-se as tendências de comportamento dos reforços estruturais em situações de exposição a elevadas temperaturas. As variáveis de estudo contempladas na matriz experimental foram definidas a partir das tendências de comportamento apresentadas pelos corpos de prova no estudo preliminar. Após a avaliação dos resultados obtidos na etapa principal, realizou-se um estudo complementar com a finalidade de melhorar os conhecimentos em algumas situações específicas e esclarecer algumas tendências de comportamento apresentadas pelos corpos de prova durante a etapa principal.

A Figura 4.1 apresenta de forma esquemática a estrutura da pesquisa. Cada fase é explicada em detalhes nos itens seguintes.

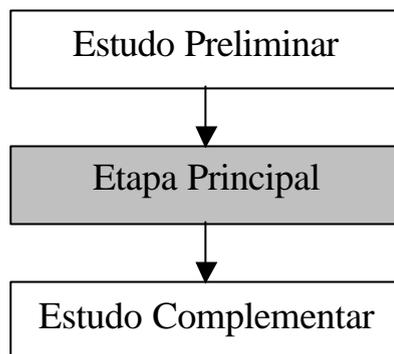


FIGURA 4.1 – Estrutura da pesquisa

## 4.2 ESTUDO PRELIMINAR

O estudo preliminar teve como principal objetivo fornecer subsídios para definir as variáveis que deveriam ser estudadas, através da análise do comportamento dos corpos de prova em diferentes patamares de temperatura, tempos de exposição, número de camadas de reforço, dimensão dos corpos de prova e forma de ruptura. Com base em outras pesquisas realizadas neste laboratório, optou-se por avaliar a capacidade portante das vigas reforçadas com tecidos de fibra de carbono, nas situações propostas nesta pesquisa, através do ensaio de resistência à tração na flexão, normalizado pela NBR 12142 – “Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos” [ABNT, 1991b].

### 4.2.1 Definição dos Corpos de Prova

Optou-se por avaliar o comportamento do reforço estrutural na situação proposta nesta pesquisa através da aplicação de tecido de fibra de carbono em vigas de concreto não armadas. Adotou-se corpos de prova prismáticos de 4x4x16 cm (Figura 4.2), representando vigas em escala reduzida, como padrão para todos os ensaios. Esta opção foi eleita uma vez que a exposição à temperatura dos modelos foi realizada em fornos com dimensões nominais reduzidas. Os mesmos não foram armados devido à dificuldade para confeccionar as armaduras nesta dimensão.

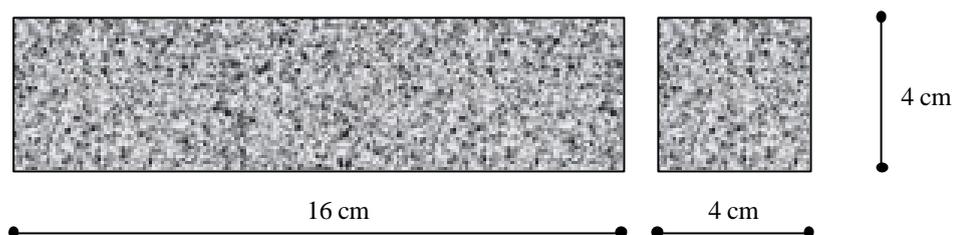


FIGURA 4.2 – Dimensões da viga padrão

Estudos relacionados à dosagem do concreto e à forma de ruptura dos modelos também foram realizados para que se pudesse definir um traço de referência e assegurar que os ensaios funcionassem como o desejado, com os modelos rompendo por flexão e não por cisalhamento.

#### 4.2.2 Matriz Experimental: Estudo Preliminar

Como não se conhecia o comportamento dos modelos reforçados frente a temperaturas elevadas, decidiu-se que as variáveis a serem avaliadas nesta etapa inicial da pesquisa seriam temperatura de exposição e número de camadas de reforço. Admitiu-se nesta escolha que quanto maior a temperatura de exposição, maiores seriam os efeitos nocivos para o reforço; em relação ao número de camadas de reforço, desejava-se correlacionar a suposta redução na capacidade de suporte do elemento estrutural devido à exposição ao calor em função do número de camadas. Os modelos ensaiados nesta etapa inicial estão caracterizados no Quadro 4.1:

QUADRO 4.1 – Matriz experimental do estudo preliminar

Temperatura [°C]	Tempo [min]	Acabamento	Camadas Reforço	Quantidade Modelos
Ambiente	0	Nenhum	0	2
Ambiente	0	Nenhum	1	1
Ambiente	0	Nenhum	2	1
180	660	Nenhum	0	2
180	660	Nenhum	1	1
180	660	Nenhum	2	1
410	660	Nenhum	0	2
410	660	Nenhum	1	2

A análise completa dos resultados obtidos encontra-se no capítulo 6. Os mesmos contribuíram para um melhor entendimento da influência de cada uma das variáveis na pesquisa proposta e ajudaram a definir quais as variáveis que deveriam ser estudadas na etapa a seguir.

Em resumo, os resultados indicaram ser melhor efetuar o reforço dos modelos com apenas uma camada de tecido de fibra de carbono, como forma de evitar a tendência de ruptura por corte apresentada pelos que apresentavam duas camadas. Com relação às dimensões dos corpos de prova, estas se mostraram adequadas aos ensaios realizados. Quanto à temperatura de exposição dos modelos, foi necessário interromper os ensaios na temperatura de 410 °C, devido ao odor gerado no processo de exposição dos modelos ao calor, decorrente da volatilização do adesivo epóxi. Decidiu-se então reduzir os patamares de temperatura de exposição, limitando a temperatura máxima a 240 °C, com a finalidade de evitar estes problemas e, ao mesmo tempo, atingir os objetivos da pesquisa. Esta temperatura foi escolhida por ser um múltiplo da temperatura de 80 °C, tomada como referência para o início da deterioração, e por ser um valor onde a degradação do adesivo deveria ser elevada mas não total. Os resultados da análise termogravimétrica, os quais encontram-se apresentados no capítulo 6, indicaram que a escolha deste valor máximo de temperatura foi adequado para a finalidade deste estudo.

#### 4.3 DELINEAMENTO DA ETAPA PRINCIPAL DA PESQUISA

Com base na normalização específica para incêndios e nas bibliografias da área, levando em consideração as informações levantadas durante o estudo preliminar e considerando os resultados de uma simulação computacional onde fornecia-se os dados a respeito dos ensaios a serem simulados e obtinha-se os resultados teóricos esperados, definiu-se cada variável a ser estudada e a sua melhor configuração em relação as demais. Este procedimento foi adotado devido à falta de normalização específica para reforços com tecidos de fibra de carbono em situação de incêndio. A seguir, serão apresentados o parâmetro de controle e as variáveis que serão investigadas para fornecer os dados necessários à avaliação do comportamento dos modelos.

### 4.3.1 Parâmetros de Controle

O parâmetro de controle utilizado para avaliar o comportamento dos modelos foi a *Carga de Ruptura na Flexão*, uma vez que este parâmetro indica a capacidade portante do elemento, tornando-se fácil à determinação do incremento de resistência conferido pelo reforço, bem como as alterações que venham a ocorrer no seu desempenho em função da exposição dos modelos a elevadas temperaturas, para cada patamar de variáveis de estudo, discutidas no próximo item.

### 4.3.2 Variáveis de Estudo

As variáveis estudadas nesta pesquisa foram: presença do reforço, temperatura de exposição, tempo de exposição e acabamento sobre a superfície.

#### *Presença do Reforço*

Os tecidos de fibra carbono, ao serem fixados à superfície de elementos estruturais, tais como vigas, pilares e lajes, fornecem aos mesmos um aumento considerável na sua capacidade portante, como discutido no capítulo 2. A fixação é normalmente obtida através do uso de formulações epóxi que, segundo a bibliografia, são altamente suscetíveis a temperaturas elevadas, vide capítulo 3. Assim, para avaliar o comportamento de elementos estruturais reforçados com tecidos de fibra de carbono ao serem expostos a altas temperaturas, decidiu-se ensaiar vigas com as características apresentadas no Quadro 4.2.

QUADRO 4.2 – Camadas de reforço

Camadas de Reforço	Convenção	Observação
Nenhuma	R <sub>0</sub>	Vigas testemunho
Uma	R <sub>1</sub>	---

A opção por apenas uma camada de reforço foi decorrente do estudo preliminar realizado (item 4.2), onde observou-se que a utilização de mais de uma camada de tecido não teve caráter significativo no esclarecimento das conseqüências ocasionadas ao reforço pela exposição dos modelos ao calor e aumentou a propensão dos modelos a ruptura por corte.

### *Temperatura de Exposição*

Admite-se que temperaturas mais elevadas tendem a aumentar a probabilidade de ocorrer a volatilização do adesivo epóxi em menor tempo e maior grau. Segundo a bibliografia, estes começam a ser vulneráveis ao calor em temperaturas de 80 °C, podendo-se atingir a volatilização completa aos 300 °C, como enfatizado no capítulo 1. Assim, decidiu-se investigar o comportamento do reforço em patamares de temperatura que reproduzissem pontos significativos do intervalo crítico das formulações epóxi frente ao calor. Quatro patamares foram definidos e estão apresentados no Quadro 4.3.

QUADRO 4.3 – Temperaturas de exposição

Temperatura de exposição	Convenção	Observação
Ambiente	T <sub>A</sub>	Vigas testemunho
80 °C	T <sub>1</sub>	Início vulnerabilidade do adesivo
160 °C	T <sub>2</sub>	Temperatura intermediária
240 °C	T <sub>3</sub>	Proximidade volatilização total

### *Tempo de Exposição*

O requisito de garantia da estabilidade estrutural de uma edificação, durante a ocorrência de um incêndio, geralmente são traduzidos sob a forma de um *tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF)*, expresso em unidades discretas de tempo (30, 60, 90, 120 e 240min), como discutido no capítulo 3. Convém salientar que estes tempos não refletem os tempos permitidos para a evacuação dos ocupantes da edificação e, nem mesmo, os tempos de sobrevivência da estrutura. Eles são apenas uma maneira simplificada de classificar as edificações de acordo com a severidade do incêndio a que estão sujeitas; desde aqueles em que a carga de incêndio é relativamente pequena (edifícios de pequena altura) até aqueles em que a carga de incêndio é elevada (livrarias) [Gouvêia,200b].

No Brasil, os tempos requeridos de resistência ao fogo, referidos ao incêndio padrão, são determinados pela NBR 14432 – “Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimentos” [ABNT, 2000] e foram apresentados na tabela 3.1. Com base no exposto na norma, e para comprovar a hipótese de que o adesivo epóxi apresenta maior probabilidade de volatilização quando exposto ao calor por um maior intervalo de tempo, decidiu-se investigar o comportamento do reforço nos patamares listados no Quadro 4.4.

QUADRO 4.4 – Tempo de Exposição

Tempo de exposição	Convenção	Observação
0 min	$t_0$	Vigas testemunho
30 min	$t_1$	---
60 min	$t_2$	---
120 min	$t_3$	---

#### *Acabamento Sobre a Superfície*

A aplicação de acabamento sobre a superfície do elemento estrutural pode auxiliar na redução do gradiente térmico ao qual o mesmo estará submetido em casos de exposição a elevadas temperaturas, servindo de proteção passiva. Admite-se que a execução de proteção passiva sobre o reforço pode reduzir o calor incidente sobre o adesivo epóxi e, com isto, minimizar a provável redução no desempenho do reforço pela volatilização do adesivo.

Decidiu-se investigar o comportamento de proteções passivas conferidas por argamassa de revestimento e gesso, por se tratarem de materiais usuais em obras de engenharia civil, não requerendo uma equipe especializada para aplicação, além de apresentarem um custo inferior em relação aos demais materiais apresentados no capítulo 3. O Quadro 4.5 apresenta os tipos de proteção passiva avaliados.

QUADRO 4.5 – Acabamentos sobre a superfície

Acabamento	Convenção	Observação
Nenhum	N	---
Argamassa	A	---
Gesso	G	---

#### **Resumo das Variáveis Estudadas**

O Quadro 4.6 apresenta de forma resumida as variáveis que foram investigadas nesta pesquisa. A matriz experimental completa desta etapa encontra-se no Anexo 1 e foi formulada a partir da combinação de todos os níveis das variáveis elegidas para serem investigadas, mostradas no quadro a seguir. Para cada situação investigada, foram moldados lotes com quatro modelos, para dar maior consistência estatística aos resultados.

QUADRO 4.6 – Variáveis de estudo

Variáveis de Estudo	Níveis
Camadas Reforço	0 / 1
Temperatura [°C]	Amb / 80 / 160 / 240
Tempo [min]	0 / 30 / 60 / 120
Acabamento	Nenhum / Argamassa / Gesso

Os ensaios foram divididos em dois lotes, denominados I e II. Em cada um dos lotes, foram ensaiados dois modelos provenientes de cada situação investigada. Cada um dos lotes foi composto de quatro concretagens, sendo as mesmas numeradas de 1 a 4 no lote I, e de 5 a 8 no lote II. Com o intuito de minimizar o ruído gerado por este artifício, procurou-se aleatorizar a moldagem dos corpos de prova ao longo da matriz experimental. Os resultados obtidos nesta etapa da pesquisa são apresentados no capítulo 6.

#### 4.4 ESTUDOS COMPLEMENTARES

Após o término dos ensaios principais previstos nesta pesquisa, e tendo sido realizada a subsequente análise parcial dos resultados obtidos, pode-se ter uma visão mais apurada do comportamento dos reforços com tecidos de fibra de carbono frente a elevadas temperaturas. Isto motivou o aprimoramento da pesquisa com a realização de alguns ensaios complementares específicos para investigar alguns pontos que se mostraram significativos ou para elucidar aspectos que não foram completamente esclarecidos, deixando dúvidas. A finalidade destes ensaios foi consolidar os resultados obtidos na análise inicial e obter uma maior quantidade de subsídios para uma análise aprofundada do comportamento do reforço e as medidas de proteção nas situações propostas neste trabalho.

Três tipos de ensaios foram realizados: análise em microscópio eletrônico de varredura, análise termogravimétrica e avaliação de temperatura de exposição vs. acabamento sobre a superfície; conforme discutido nos próximos itens.

Assim como nas demais etapas, os resultados dos ensaios complementares realizados estão apresentados no capítulo 6.

#### 4.4.1 Análise em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Uma vez confirmados os efeitos nocivos a que os reforços com tecidos de fibra de carbono estão sujeitos ao serem expostos ao calor, decidiu-se realizar uma análise, em microscópio eletrônico de varredura de elétrons secundários, da influência de diferentes patamares de temperatura sobre o tecido de fibra de carbono [TFC], a matriz do compósito [MC] e o concreto [C]. Combinação de condições ensaiadas encontram-se caracterizadas no Quadro 4.7.

QUADRO 4.7 – Matriz experimental da análise em MEV

Material	TFC MC C	TFC MC C	TFC MC C	TFC MC C	TFC MC C	TFC C
Temperatura [°C]	Amb	80	160	240	400	800
Tempo exposição [min]	---	60	60	60	1	1

#### 4.4.2 Análise Termogravimétrica (TGA)

Com base nos resultados dos ensaios realizados até o momento, ficou comprovado que a exposição do modelo reforçado a altas temperaturas ocasionou uma redução ou perda na capacidade mecânica do reforço. Esta alteração nas propriedades do mesmo é ocasionada pela volatilização do adesivo epóxi utilizado na colagem do tecido de fibra de carbono ao concreto, que ocorre em função da exposição ao calor. Em decorrência disto, decidiu-se realizar uma análise termogravimétrica do adesivo epóxi, onde a variação de massa do mesmo foi avaliada em função de um aumento da temperatura para valores de até 1000 °C.

#### 4.4.3 Avaliação de Temperatura de Exposição vs. Acabamento sobre a Superfície

De posse da análise dos resultados obtidos nos ensaios previstos inicialmente para esta pesquisa, deu-se início a modelagem matemática do comportamento do reforço com tecidos de fibra de carbono frente a elevadas temperaturas. Sentiu-se a necessidade de realizar alguns ensaios complementares altamente direcionados a esclarecer o comportamento de algumas variáveis em situações mais específicas que não ficaram perfeitamente entendidas.

Neste ensaio, o ponto de partida foi à situação mais desfavorável ao reforço quando se avaliou a relação entre temperatura de exposição e acabamento sobre a superfície. Os resultados indicavam que a presença de acabamento mostrava-se eficiente para minimizar os efeitos da exposição ao calor; no entanto, com os dados coletados ainda não era possível determinar este nível de eficiência e nem qual dos acabamentos apresentava melhores resultados.

Assim, decidiu-se pesquisar o comportamento do reforço nesta situação específica, sendo as únicas variáveis envolvidas temperatura de exposição e acabamento sobre a superfície. Com o intuito de fortalecer os resultados, optou-se por avaliar o reforço na temperatura mais desfavorável estudada. Desta forma, a matriz experimental ensaiada encontra-se disposta no Quadro 4.8.

QUADRO 4.8 – Matriz experimental para temperatura & acabamento

Temperatura [°C]	Tempo [min]	Acabamento Superfície	Camadas Reforço	Quantidade Modelos
Ambiente	120	N	0	3
Ambiente	120	N	1	4
240	120	N / A / G	0	3 / 4 / 4
240	120	N / A / G	1	3 / 4 / 4

# Capítulo 5

## PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo será apresentado o procedimento adotado para a preparação das amostras a serem ensaiadas, bem como discutidos os ensaios de caracterização realizados nos materiais empregados.

### 5.1 ETAPAS DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental foi realizado em diversas etapas que podem ser conferidas no Quadro 5.1.

QUADRO 5.1 – Etapas do procedimento experimental

Idade do Concreto [Dias]	Etapas
0	Concretagem dos corpos de prova
1	Desforma e cura úmida
14	Cura seca
21	Reforço à flexão
28	Aplicação da proteção passiva
34	Exposição à temperatura
35	Ensaio de resistência à tração na flexão

A seguir, encontram-se descritas de forma detalhada as diversas etapas referenciadas acima:

## 5.2 CONCRETAGEM DOS MODELOS

### 5.2.1 Definição e Caracterização dos Materiais

Optou-se por utilizar como aglomerante cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), conseguindo-se desta forma grande agilidade para a execução dos ensaios devido à elevada resistência obtida pelo concreto nas primeiras idades. As características físicas do cimento, fornecidas pelo fabricante, encontra-se na Tabela 5.1.

Como agregado graúdo utilizou-se brita natural de origem basáltica e como agregado miúdo areia média proveniente do rio Jacuí. A caracterização dos agregados graúdo e miúdo foram realizadas de acordo com as normas NBR 5733 – “Cimento portland de alta resistência inicial” [ABNT, 1991a]; NBR 7217 – “Agregados – Determinação da composição granulométrica” [ABNT, 1987c]; NBR 9776 – “Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman” [ABNT, 1987b]; NBR 9937 – “Agregados – Determinação da absorção e massa específica de agregado graúdo” [ABNT, 1997a]. Os valores obtidos encontram-se nas Tabelas 5.2 e 5.3, respectivamente.

TABELA 5.1 – Características físicas do cimento (dados do fabricante)

<i>Ensaio</i>	<i>Valor</i>	<i>Limite (NBR5733)</i>
<b>Perda ao Fogo</b>	2,24%	4%
<b>Finura (resíduo na peneira 200)</b>	1,20%	6%
<b>Tempo de início de pega</b>	3 h 23 min	> 1 h (pega normal)
<b>Tempo de fim de pega</b>	4 h 46 min	< 10 h
<b>Resistência à compressão</b>	37 MPa/3d	22 MPa/3d
	43 MPa/7d	31 MPa/7d
	51 MPa/28d	-

TABELA 5.2 – Composição granulométrica do agregado graúdo

Abertura peneira [mm]	9,5	4,8	2,4	1,2
% Retida	0	49,9	46,2	1,5
% Retida Acumulada	0	52	98	100
Dimensão Máxima Característica [mm]	9,5			
Massa Específica Seca [g/cm <sup>3</sup> ]	1,73			

TABELA 5.3 – Composição granulométrica do agregado miúdo

Abertura peneira [mm]	4,8	2,4	1,2	0,6	0,3	< 0,15
% Retida Média	0	8,1	14,6	21,3	35,6	20,4
% Retida Acumulada	0	8	23	44	80	100
Dimensão Máxima Característica [mm]						4,8
Módulo de Finura						3,54
Massa Específica [g/cm <sup>3</sup> ]						2,60

### 5.2.2 Definição do Traço

A dosagem do concreto foi realizada a partir de uma definição inicial de um teor de argamassa de 49%. No entanto, a resistência apresentada pelo concreto proveniente do primeiro traço analisado (1:2,49:3,63 a/c = 0,59 ci = 316 kg/m<sup>3</sup>) foi muito baixa e os modelos reforçados romperam por cisalhamento, devido às elevadas tensões de corte na região próxima aos apoios. Decidiu-se modificar o traço e elevou-se o consumo de cimento de 316 kg/m<sup>3</sup> para 321 kg/m<sup>3</sup>, mantendo-se a quantidade de água constante, resultando em um concreto com maior resistência; ainda, adicionou-se superplastificante à mistura a fim de melhorar a trabalhabilidade da mesma, por razões que serão discutidas no próximo item, e aumentou-se o teor de argamassa para 56% para facilitar a moldagem; os corpos de prova foram ensaiados aos 35 dias, em conformidade com o cronograma apresentado no item 5.1. No Quadro 5.2, encontra-se o traço do concreto utilizado para a confecção dos modelos.

QUADRO 5.2 - Traço utilizado para a confecção do concreto

Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado Miúdo (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado Graúdo (kg/m <sup>3</sup> )	Água (l/m <sup>3</sup> )	Super Plastificante (l/m <sup>3</sup> )
321,00	937,32	988,68	144,45	4,81

### 5.2.3 Preparação do Concreto

O concreto utilizado para a moldagem dos modelos foi misturado mecanicamente em uma betoneira de eixo vertical, conforme a Figura 5.1. A consistência do concreto foi controlada através do ensaio de abatimento do tronco de cone, de acordo com o recomendado pela NBR 7223 – “Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone” [ABNT, 1992]. O valor médio medido foi de 10 mm, como pode ser visualizado na

Figura 5.2. Embora a trabalhabilidade tenha sido muito baixa, conseguiu-se uma moldagem adequada dos modelos, graças à utilização de vibração mecânica, conforme discutido a seguir.



FIGURA 5.1 – Mistura dos materiais constituintes do concreto



FIGURA 5.2 – Determinação da consistência do concreto

#### 5.2.4 Moldagem

Utilizaram-se formas metálicas para a moldagem dos corpos de prova, garantindo-se desta maneira a precisão dimensional dos mesmos. Cada forma permitia a concretagem de um conjunto de três modelos; antes do início do processo, aplicou-se desmoldante nas mesmas para facilitar o processo de desforma. Devido às pequenas dimensões do modelo, cada forma foi preenchida em uma só camada, como pode ser visto na Figura 5.3.



FIGURA 5.3 - Concretagem dos modelos

#### 5.2.5 Adensamento

O adensamento do concreto foi realizado de forma mecânica, com o auxílio de um vibrador tipo agulha, o qual era posicionado na lateral da forma metálica por um certo intervalo de tempo, simulando uma mesa vibratória. Cuidado foi dispensado para que este procedimento não causasse a segregação do agregado graúdo e nem a exsudação da água de amassamento, mas que ao mesmo tempo garantisse o perfeito adensamento do material para que não ocorressem ninhos ou falhas de concretagem.

### 5.2.6 Desforma e Cura

A remoção das formas foi feita em uma única etapa após 24 horas do término da concretagem. Neste intervalo de tempo, os corpos de prova ficaram envolvidos em sacos plásticos com o objetivo evitar a evaporação rápida da água de amassamento.

Após a desforma, os corpos de prova foram colocados em câmara úmida, a uma temperatura de 23 °C e umidade de 98%, até o décimo quarto dia subsequente a concretagem, de forma a garantir-se uma boa hidratação do cimento.

Concluído o período estipulado para a cura úmida, os modelos foram deixados ao ar livre durante sete dias com a finalidade de reduzir o seu teor de umidade para que se pudesse realizar os trabalhos de reforço.

### 5.2.7 Controle Tecnológico

Para fins de controle tecnológico do concreto utilizado na moldagem das vigas, em cada concretagem realizada moldou-se um conjunto de seis corpos de prova cilíndricos com dimensões 9,5x19 cm. Estes foram submetidos ao processo de cura descrito acima e ensaiados à compressão simples juntamente com corpos de prova prismáticos. A resistência média foi de 57,30 MPa para os modelos concretados no Lote I e de 53,18 MPa para os no Lote II.

## 5.3 PROCEDIMENTOS DE EXECUÇÃO DO REFORÇO

A película de compósito de fibra de carbono utilizada para o reforço foi fabricada no Japão pela Mitsubishi Chemical Corporation. O sistema, denominado *Replark 20*, consiste em filamentos de fibra de carbono posicionados em uma mesma direção e impregnados levemente com adesivo epóxi, formando uma espécie de tecido, que é fornecido em rolos juntamente com um *primer* e o adesivo epóxi.

O *primer* tem a função de reforçar a camada superficial do concreto, criando uma ponte de aderência entre o tecido e o substrato. O adesivo epóxi é utilizado para colar o tecido ao substrato, formando a matriz do polímero reforçado. Ambos são fornecidos em dois componentes (catalisador e adesivo epóxi), os quais devem ser misturados na proporção 2:1, respectivamente.

Nos Quadros 5.3 e 5.4 são apresentadas, respectivamente, as propriedades do tecidos de fibra de carbono e as características do *primer* e do adesivo.

QUADRO 5.3 – Propriedades dos tecidos de fibra de carbono

Propriedade	Valor
Módulo de elasticidade	230.000 Mpa
Resistência à tração	3.400 Mpa
Peso de fibra por área	200 g/m <sup>2</sup>
Seção transversal por unidade de largura	1,11 cm <sup>2</sup> /m

QUADRO 5.4 – Características do *primer* e adesivo

Material	Temperatura de utilização	Tempo de utilização	Composição
PRIMER EPOTHERM PS401	25 – 35 °C	30 °C – 140 min 23 °C – 240 min	Catalisador: amida poliamina Principal: resina epóxi BPA líquida
RESINA EPOTHERM L700S	15 – 35 °C	30 °C – 50 min 23 °C – 70 min	Catalisador: poliamina alifática modificada Principal: resina epóxi BPA líquida

Como discutido anteriormente, os modelos foram reforçados sete dias após terem sido retirados da câmara úmida e colocados ao ar livre com a finalidade de reduzir o teor de umidade. Conforme salientado no capítulo 2, o reforço de elementos estruturais com tecidos de fibra de carbono constitui uma nova tecnologia que está sendo estudada sob vários aspectos tecnológicos no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME). Tendo em vista esta conectividade com a linha de pesquisa em andamento, os procedimentos utilizados para a aplicação do reforço foram os mesmos adotados na pesquisa desenvolvida por Beber [1999a], um dos pesquisadores do grupo. Estes procedimentos estão listados a baixo.

### 5.3.1 Preparação do Substrato

Com o auxílio de uma esmerilhadeira com disco diamantado, removeu-se a camada superficial de concreto de modo que o agregado graúdo ficasse exposto. Isto é necessário porque a camada superficial de concreto apresenta uma resistência inferior em relação ao elemento como um todo. Ao contrário do que é comum nos reforços com chapa de aço, é de fundamental importância que a superfície do elemento tratado fique o mais regular possível, evitando-se que imperfeições, posteriormente, causem o aparecimento de tensões de corte na fibra.

Neste sentido, é interessante ressaltar, que no caso de reforço em elementos estruturais deteriorados, dever-se-ia proceder à regularização da superfície com adesivo epóxi ou argamassa de alto desempenho antes da aplicação do reforço.

Na Figura 5.4, observa-se o momento da escarificação da superfície do modelo.

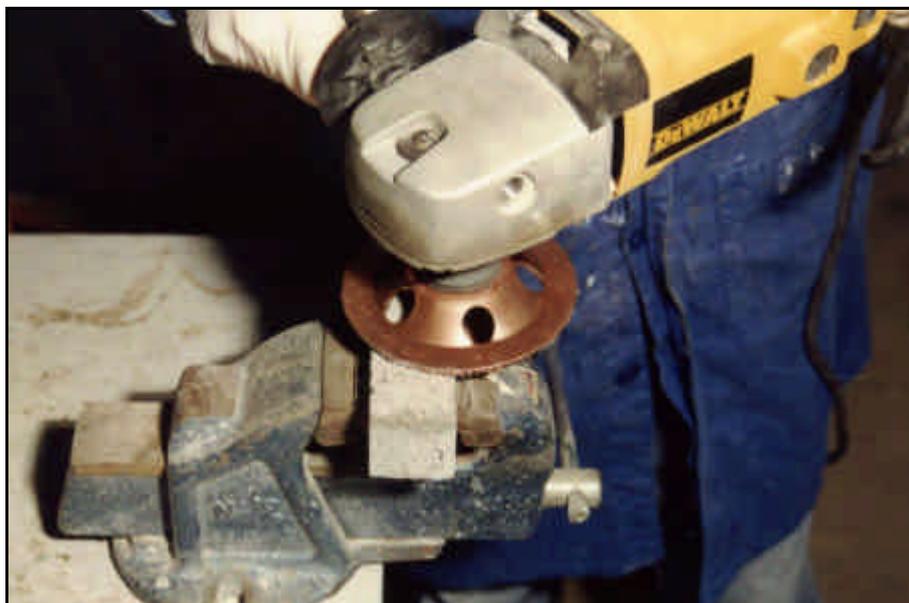


FIGURA 5.4 - Escarificação da superfície do modelo

### 5.3.2 Imprimação do Substrato

Esta etapa consiste na aplicação do *primer* (Figura 5.5) em toda a superfície do elemento estrutural onde será executado o reforço. De acordo com o fabricante, são necessários, aproximadamente, 250 gramas de *primer por* metro quadrado de reforço. Esta foi a taxa adotada.



FIGURA 5.5 - Aplicação do *primer*

### 5.3.3 Execução do Reforço

Decorridas duas horas do término da imprimação do substrato, deu-se início ao processo de reforço do elemento estrutural. Para isto, o tecido de fibra de carbono foi cortado com o auxílio de uma tesoura na dimensão especificada para o reforço. Devido à baixa resistência ao corte apresentada pelo tecido, esta é uma atividade bastante simples de ser executada.

No estudo preliminar, efetuou-se o reforço com o tecido nas dimensões de 4x14cm. No entanto, através da simulação computacional mencionada no capítulo 4, verificou-se que, para restringir as rupturas por cisalhamento, seria mais indicado que o reforço tivesse as dimensões de 2x16 cm. Desta forma, estas foram as medidas adotadas na etapa principal do estudo.

Para a colagem do tecido de fibra de carbono ao concreto, o fabricante aconselha um consumo de adesivo na faixa de 500 a 700 g por metro quadrado de superfície de aplicação. Segundo o mesmo, este valor consiste na quantidade necessária para que o adesivo envolva completamente o tecido, formando a matriz do compósito. Este valor foi, portanto, o adotado na pesquisa.

O procedimento de colagem consiste na aplicação de uma fina camada de adesivo em toda a superfície da viga onde será efetuado o reforço (Figura 5.6). Imediatamente após, procede-se ao posicionamento e impregnação do tecido com adesivo (Figura 5.7). Com o auxílio de um rolo de borracha, retira-se o excesso de adesivo e o ar aprisionado sob o mesmo, de forma a uniformizar a colagem e melhorar a matriz resultante (Figura 5.8).



FIGURA 5.6 - Aplicação da primeira camada de adesivo epóxi



FIGURA 5.7 - Posicionamento e colagem do tecido



FIGURA 5.8 - Retirada do ar aprisionado e excesso de adesivo

Dando continuidade à operação de colagem, retira-se o papel protetor do tecido de fibra de carbono (Figura 5.9) e aplica-se a camada final de adesivo epóxi (Figuras 5.10), formando a matriz do elemento compósito (Figura 5.11) e concluindo os procedimentos necessários ao reforço.



FIGURA 5.9 - Retirada do papel protetor

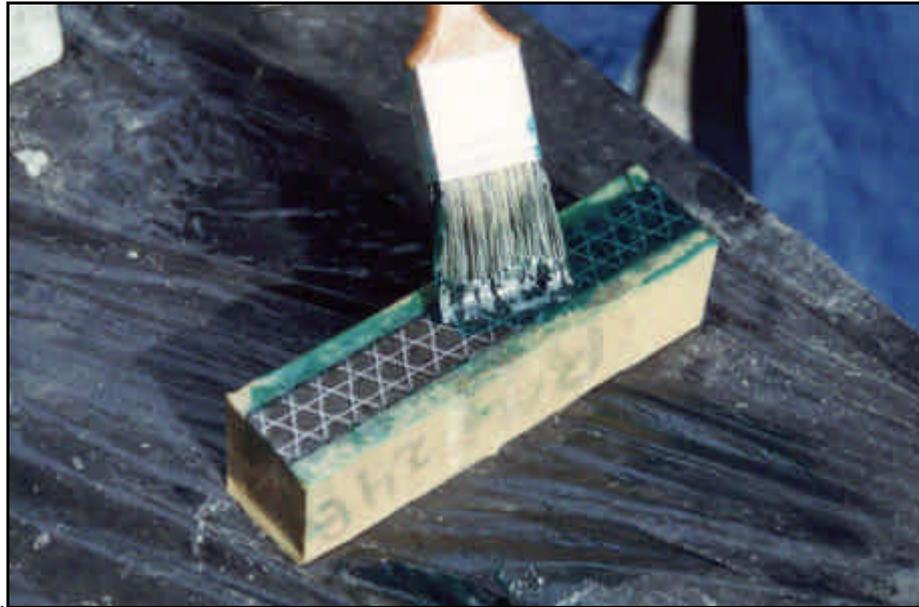


FIGURA 5.10 - Aplicação da segunda camada de adesivo epóxi



FIGURA 5.11 - Panorama da superfície reforçada

No caso de reforços estruturais em que o dimensionamento previsse a aplicação de mais de uma camada de tecido de fibra de carbono, proceder-se-ia as mesmas etapas descritas anteriormente sobre a camada já concluída.

O processo de cura do adesivo epóxi, em condições favoráveis, demanda um intervalo de 24h para que se atinja aproximadamente 60% de resistência final e secagem total ao toque. No entanto, a velocidade de cura depende das condições climáticas de temperatura e umidade, podendo ser necessário em condições extremas, aguardar um período maior para que se atinja este estágio. A cura total do adesivo geralmente se dá num intervalo inferior a sete dias, sendo este, portanto, o adotado nesta pesquisa.

#### 5.4 PROCEDIMENTOS DE EXECUÇÃO DA PROTEÇÃO

A aplicação do revestimento sobre os corpos de prova ocorreu sete dias após a aplicação do reforço. Conforme discutido no capítulo 3, pretendia-se avaliar o comportamento de proteções passivas com argamassa de revestimento e gesso. A espessura do revestimento, tanto para a argamassa quanto para o gesso, foi definida em 1,50 cm. Os modelos foram envolvidos pela camada de proteção na face que recebeu o reforço, bem como nas faces laterais do mesmo, como pode ser visualizado da Figura 5.12. No próximo item, serão apresentados os procedimentos adotados para a execução de cada um dos tipos de proteção.

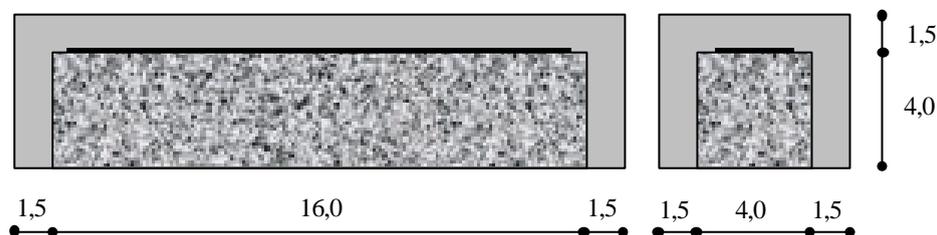


FIGURA 5.12 – Esquema do cobrimento da proteção passiva

##### 5.4.1 Proteção com Argamassa de Revestimento

Os materiais utilizados para a execução da argamassa foram cimento Portland pozolânico (CP IV-32), cal hidratada e agregado miúdo. A razão de mistura entre os mesmos foi de  $1 : 2 : 9$ . Este traço foi adotado pois é freqüentemente utilizado na construção civil. De modo a favorecer a maturação completa da cal, procedeu-se à mistura da mesma com o agregado miúdo e a água cinco dias antes da aplicação da argamassa. Quanto aos modelos, estes foram chapiscados um dia antes da aplicação da argamassa (Figura 5.13), com o intuito

de favorecer a aderência entre o modelo e o revestimento. O processo de execução do revestimento consistiu de lançamento e desempeno da argamassa por um pedreiro especializado (Figura 5.14).



FIGURA 5.13 – Modelos chapiscados



FIGURA 5.14 – Desempeno da argamassa de revestimento

Na Figura 5.15 pode-se visualizar a aparência final dos modelos após ter sido concluída a aplicação da proteção passiva com argamassa de revestimento.



FIGURA 5.15 – Modelo protegido com argamassa de revestimento

#### **5.4.2 Proteção com Gesso**

O material utilizado para revestir o modelo foi gesso de pega rápida e a razão de mistura entre a água e o pó de gesso foi de 0,5. Misturava-se manualmente os mesmos até a completa homogeneização, obtendo-se uma pasta de gesso (Figura 5.16). Aplicava-se a mesma em torno do corpo de prova, previamente posicionado em uma forma de madeira com dimensões compatíveis ao cobrimento especificado (Figura 5.17). Adensava-se manualmente o conjunto e regularizava-se a superfície (Figura 5.18). Após um intervalo de dez minutos, tempo necessário para o endurecimento da pasta, procedia-se à desforma, obtendo-se o modelo envolvido pelo gesso (Figura 5.19).



FIGURA 5.16 - Mistura manual da pasta de gesso



FIGURA 5.17 – Aplicação da pasta de gesso



FIGURA 5.18 - Regularização da superfície



FIGURA 5.19 – Modelo protegido com gesso

## 5.5 MÉTODO DE EXPOSIÇÃO DOS MODELOS À TEMPERATURA

Devido à indisponibilidade de uma câmara de fogo, a alternativa encontrada para expor os modelos a temperaturas elevadas foi colocá-los em fornos com grande capacidade de aquecimento (Figura 5.21), tendo como objetivo simular a quantidade de calor a que o elemento estrutural ficaria sujeito se estivesse em uma situação real de incêndio. A opção pelos fornos também foi motivada devido à possibilidade de controle mais preciso da temperatura de exposição e pela facilidade de ajuste da temperatura em diferentes patamares.

Convém salientar que a forma de desenvolvimento de um incêndio real é muito difícil de ser prevista, uma vez que um grande número de variáveis estão envolvidas, tornando o fenômeno aleatório, como explicado no capítulo 3. A simulação dos efeitos ocasionados por um incêndio real em elementos construtivos através de fornos de grande capacidade é uma alternativa bastante usual para simular esta situação. Admite-se que, para efeito de pesquisas, os resultados obtidos são válidos, uma vez que os elementos estruturais são submetidos a uma determinada quantidade de calor, em função da temperatura atingida pelo forno, que corresponderia a uma exposição real qualquer.

A exposição à temperatura foi realizada seis dias após o revestimento dos modelos com a proteção passiva. O tempo de aquecimento do forno dependia do patamar de temperatura a que os modelos seriam expostos; uma vez atingido este patamar, os modelos ficavam submetidos a uma temperatura constante pelo tempo prescrito na matriz experimental; ao terminar este tempo de exposição, os modelos eram retirados do interior do forno e deixados para resfriar ao ar livre. A capacidade de aquecimento do forno utilizado nos ensaios é de 1050 °C e a taxa de aquecimento definida para o aquecimento do mesmo até o patamar desejado foi de 8 °C/min. A Figura 5.20 apresenta graficamente a curva utilizada para a elevação da temperatura.

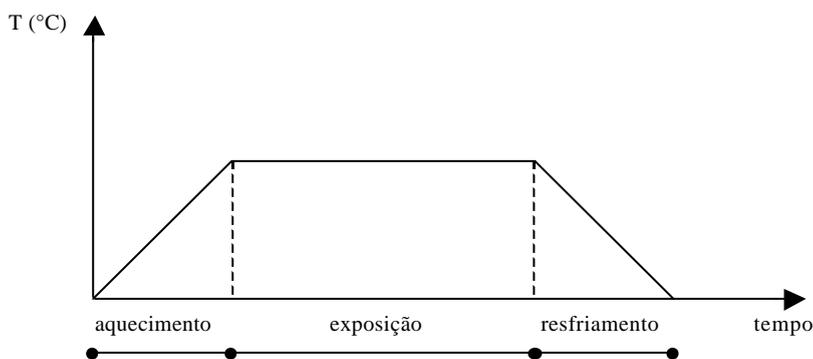


FIGURA 5.20 – Gráfico da forma de exposição dos modelos à temperatura



FIGURA 5.21 – Forno utilizado para expor modelos a temperaturas elevadas

## 5.6 MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Como discutido no capítulo 4, a avaliação do comportamento dos modelos foi efetuada com um procedimento adaptado da NBR 12142 – “Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos” [ABNT, 1991b]. Este procedimento encontra-se descrito a seguir:

No dia seguinte à exposição dos modelos a elevadas temperaturas no forno, retirou-se a proteção passiva que os envolvia e realizou-se o ensaio de resistência à tração na flexão em uma prensa hidráulica *Shimadzu* (Figura 5.22) com capacidade de carga de 10 ton, sendo o incremento de carga realizado a uma velocidade constante de 1,1 MPa/min. Durante os ensaios, o carregamento aplicado foi medido através de um sistema de aquisição de dados monitorado por um computador.

O esquema de ensaio, mostrado na Figura 5.23, consistiu na colocação dos corpos de prova sobre dois apoios de 1ª ordem e na aplicação de duas cargas concentradas de igual intensidade.

Na Figura 5.24, pode-se visualizar um modelo sendo submetido ao carregamento.



FIGURA 5.22 – Prensa hidráulica *Shimadzu*

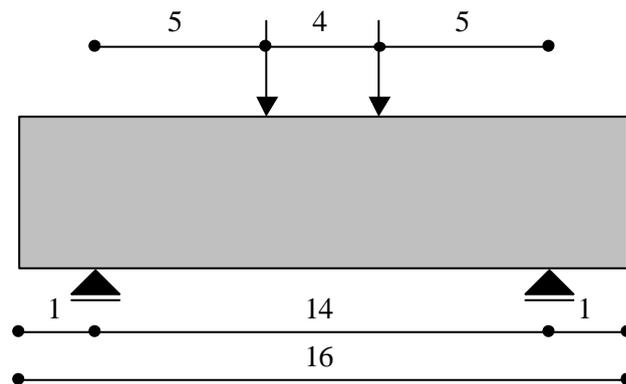


FIGURA 5.23 – Esquema de aplicação de carga



FIGURA 5.24 – Aplicação de carga ao modelo

## 5.7 ENSAIOS COMPLEMENTARES

A seguir, apresentam-se os procedimentos adotados para a preparação das amostras que foram enviadas a outros laboratórios para serem analisadas e, também, a descrição do ensaio de avaliação de temperatura de exposição vs. acabamento sobre a superfície.

### 5.7.1 Análise em Microscópio Eletrônico de Varredura

Este ensaio foi realizado no Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. As amostras foram extraídas de corpos de prova moldados em conformidade com os procedimentos adotados no estudo principal. Após a exposição das mesmas à temperatura especificada na matriz experimental através do forno, os corpos de prova foram rompidos e amostras para análise foram retiradas. Estas foram preparadas e analisadas em um microscópio eletrônico de varredura com faixa de magnificação entre 18x e 300.000x. A preparação para a análise consistiu em retirar a umidade das amostras de concreto com auxílio de acetona e após, juntamente com a matriz do compósito e a fibra de carbono, metalizá-las em banho de solução de ouro, a fim de favorecer o contraste durante a análise, pois a detecção é feita por dispersão de energia.

### 5.7.2 Análise Termogravimétrica (TGA)

Neste ensaio, submeteu-se uma amostra de adesivo epóxi já curado a uma rampa de aquecimento e, com o auxílio de uma balança de precisão, mediu-se a variação de massa da amostra em relação à massa inicial. A rampa de aquecimento utilizada foi de 20 °C/min e a temperatura máxima atingida foi de 1000 °C; o ensaio foi realizado em atmosfera de nitrogênio. Este ensaio foi realizado pelo Laboratório de Polímeros (LAPOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Na Figura 5.25, pode-se visualizar o equipamento utilizado para efetuar a análise.



FIGURA 5.25 – Equipamento utilizado na análise termogravimétrica

### 5.7.3 Avaliação de Temperatura de Exposição vs. Acabamento sobre a Superfície

Os procedimentos para confecção dos corpos de prova foram os mesmos utilizados na etapa principal da pesquisa. Tendo sido feito uma concretagem específica para produzir os novos modelos, onde a resistência média do concreto foi de 50,48 Mpa.

# Capítulo 6

## AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, apresentam-se os resultados obtidos em cada etapa da pesquisa, efetua-se a análise dos mesmos e discutem-se as tendências apresentadas.

### 6.1 ESTUDO PRELIMINAR

Conforme mencionado no capítulo 4, esta etapa da pesquisa teve por finalidade dar um panorama geral do comportamento dos modelos nas situações propostas para estudo. Os ensaios realizados foram em número reduzido e, conseqüentemente, os resultados obtidos foram de fácil análise, não necessitando de uma avaliação estatística mais apurada.

Inicialmente, é interessante ressaltar que, no decorrer dos ensaios, ocorreu um imprevisto, uma vez que a matriz experimental prevista determinava que os modelos seriam expostos ao patamar de temperatura por um intervalo de 11h. No entanto, os modelos reforçados e expostos à temperatura de 410 °C tiveram que ser retirados do forno após 6h de exposição ao calor, em função de um odor muito forte liberado pelo adesivo. Este fato não prejudicou os dados coletados, pois neste momento o reforço já tinha sido completamente destruído, como será discutido a seguir.

A Figura 6.1 apresenta o gráfico *temperatura de exposição x camadas de reforço x carga* para os modelos ensaiados no estudo preliminar. Através da análise dos resultados obtidos, observa-se que a exposição dos modelos a elevadas temperaturas influenciou na resistência à tração tanto para os modelos não reforçados quanto para os reforçados com tecido de fibra de carbono. Nos modelos não reforçados, houve uma gradativa redução na resistência à tração como aumento da temperatura. Nos modelos reforçados com tecido de fibra de carbono, observou-se que o acréscimo de resistência oferecido pelo reforço apresentou pequena redução para os modelos que foram submetidos a temperaturas menores de 180 °C. Já para os modelos submetidos à temperatura de 410 °C, verificou-se que o reforço foi completamente destruído, em função da volatilização total do adesivo epóxi utilizado na colagem do tecido ao substrato. Em relação ao reforço com duas camadas de tecido, constatou-se que os modelos romperam com uma carga inferior aos reforçados com uma camada; este fato pode ter sido decorrente da ruptura por cisalhamento apresentada pelos modelos, fato que provavelmente foi devido ao acréscimo de rigidez conferido pelo reforço e pela deficiência na ancoragem do mesmo na região dos apoios. Na Figura 6.2, observa-se que, antes da exposição a temperaturas elevadas, a superfície do reforço apresentava-se homogênea e com coloração esverdeada; à medida que os modelos foram submetidos ao calor, a superfície do reforço apresentou um escurecimento gradual, em função dos danos causados pelo calor ao adesivo epóxi; para a temperatura de 410 °C, observou-se a volatilização completa do adesivo, conforme mencionado anteriormente.

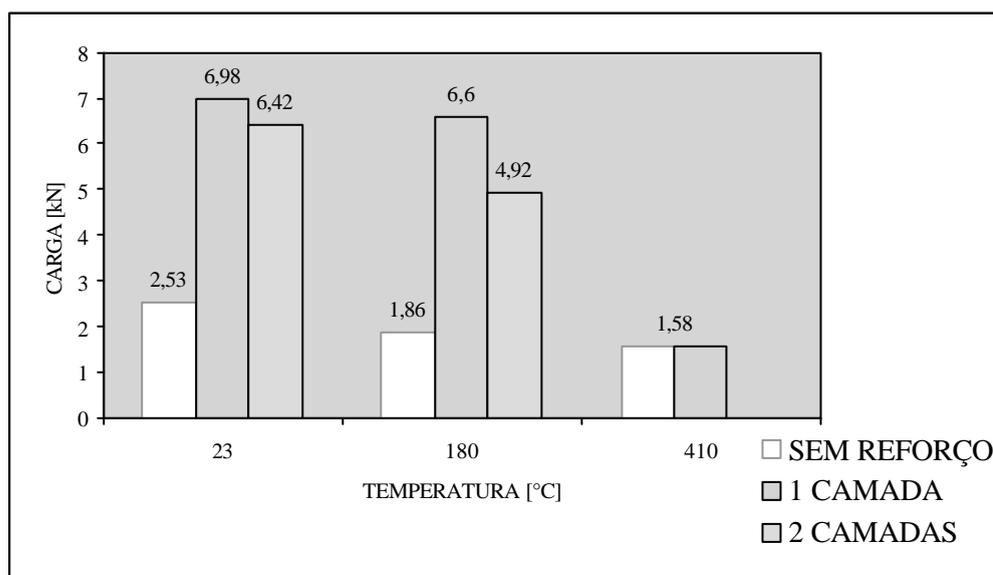


FIGURA 6.1 – Cargas de ruptura dos modelos durante o estudo preliminar

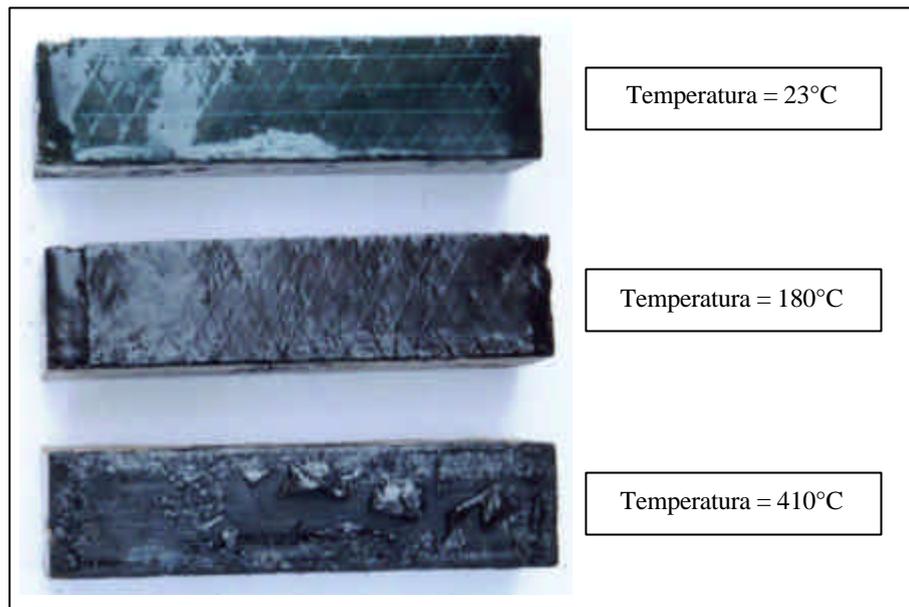


FIGURA 6.2 – Aparência dos modelos reforçados após exposição ao calor

Os resultados obtidos nesta etapa ajudaram na escolha das variáveis que deveriam ser estudadas no programa experimental e a melhor configuração das mesmas nos ensaios. Quanto à presença de reforço, a utilização de duas camadas de tecido de fibra de carbono favoreceu a ruptura dos modelos por corte, sendo, portanto, mais indicado realizar os ensaios com apenas uma camada. Em relação à temperatura de exposição, decidiu-se que a mesma deveria contemplar valores inferiores à temperatura de 410 °C, em função da degradação sofrida pela matriz epoxídica durante os experimentos e da necessidade de interromper os mesmos devido ao odor liberado no processo volatilização do adesivo epóxi, como discutido no item 4.2.2; desta forma, estipulou-se a temperatura de 240 °C como sendo a temperatura máxima adequada para a pesquisa. Quanto às dimensões dos corpos de prova, estas foram consideradas adequadas para a continuação dos ensaios.

## 6.2 ETAPA PRINCIPAL

Nesta etapa, a avaliação do comportamento dos corpos de prova foi realizada em duas fases. Na primeira, foi feita uma análise estatística dos resultados obtidos nos ensaios com auxílio do software *Statística*; através da mesma, ficaram evidenciados quais os efeitos significativos para o estudo presente. Na segunda, modelou-se o comportamento teórico esperado para os corpos de prova através de regressão linear múltipla, tendo como base os resultados obtidos na primeira fase. Finalizando, efetuou-se uma discussão conjunta dos resultados obtidos para cada uma das fases.

Esta foi a etapa mais importante para a avaliação do comportamento do reforço. Foram ensaiados 228 corpos de prova prismáticos a fim de reproduzir todas as combinações das variáveis de estudo: presença de reforço (2 níveis), temperatura de exposição (4 níveis), tempo de exposição (4 níveis) e acabamento de superfície (3 níveis) em seus diversos níveis, de acordo com o que foi definido na matriz experimental discutida no capítulo 4. Os resultados numéricos destes ensaios encontram-se apresentados no Anexo 2.

### 6.2.1 Análise da Variância

Neste item, serão apenas discutidos os resultados experimentais e a análise estatística preliminar realizada com os mesmos. A abordagem estatística utilizada foi a *de Análise da Variância (ANOVA)*; este tipo de abordagem é empregada para identificar se os valores da variável de resposta, medidos nos diversos níveis do fator controlável (variáveis de estudo), diferem entre si, sendo adequados para extrair a tendência de comportamento das amostras. Este procedimento de cálculo permite comparar os valores de uma variável de resposta medidos em diversos grupos, determinando se há ou não diferenças significativas entre as médias dos grupos. Cada nível do fator controlável estudado configura um grupo. A comparação de vários grupos está baseado na relação da *variabilidade das médias entre os grupos* com a *variabilidade das observações dentro dos grupos* [Ribeiro, 1996].

Utilizou-se o software *Statística* para a realização da análise. Foi necessário fornecer ao programa todos os dados pertinentes ao ensaio e os respectivos resultados para cada fator controlável em seus diversos níveis; com estes dados, o programa efetua a avaliação estatística dos dados e informa quais são os fatores significativos e os não-significativos.

No Quadro 6.1, apresenta-se os fatores significativos para o conjunto de dados obtidos nesta pesquisa. O valor de F representa o nível de significância de cada fator ou da interação entre eles. Quanto maior o valor de F, maior é a significância do fator.

QUADRO 6.1 – Fatores significativas à pesquisa

Fatores Significativos	F
Presença de Reforço	3449.675
Temperatura de Exposição	63.015
Temperatura x Reforço	11.875
Temperatura x Acabamento x Reforço	4.540
Temperatura x Acabamento	3.707
Tempo de Exposição	3.144

A seguir, será realizada a análise de cada um dos fatores significativos a partir do gráfico que representa a tendência de comportamento do mesmo durante os ensaios. Para o perfeito entendimento destes gráficos, vale lembrar que ele unifica a tendência de comportamento a partir da média de todos os valores obtidos nos ensaios para cada fator controlável.

#### **Efeito: Presença de Reforço**

Na Figura 6.3 apresenta-se o gráfico *carga x presença de reforço*. A execução do reforço com tecidos de fibra de carbono conferiu aos corpos de prova um aumento considerável na sua capacidade de carga, em torno de 138%. Este comportamento é proveniente da elevada resistência à tração que os tecidos apresentam, que faz com que os mesmos sejam indicados para a recuperação ou reforço de elementos estruturais, conforme discutido no capítulo 2.

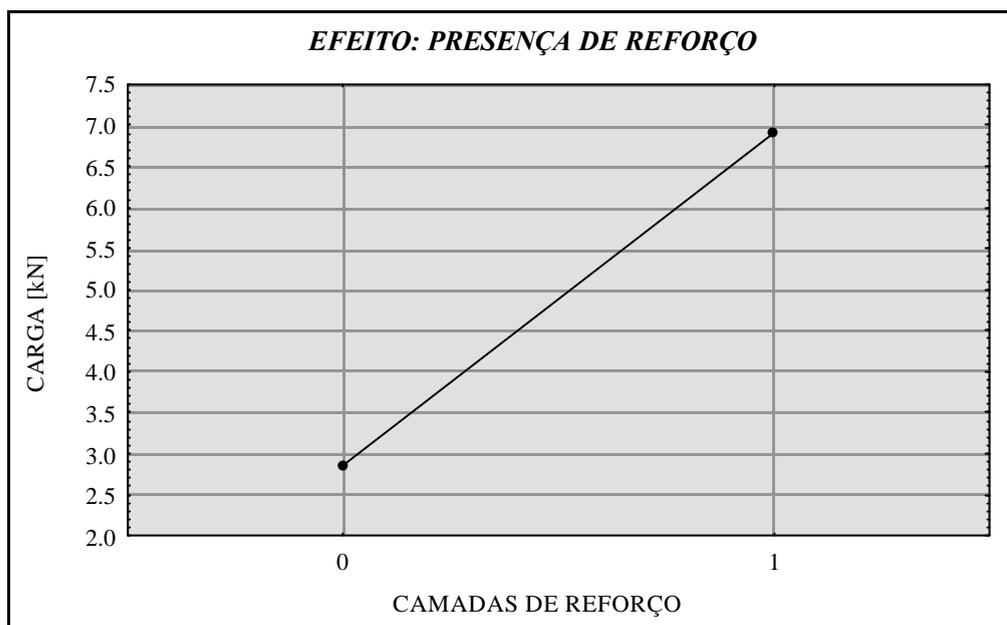


FIGURA 6.3 – Efeito presença de reforço

### **Efeito: Temperatura de Exposição**

Na Figura 6.4 apresenta-se o gráfico *carga x temperatura de exposição*. Pode-se constatar que a exposição dos modelos ao calor ocasionou uma redução gradual na capacidade de carga dos mesmos. Esta queda foi mais pronunciada até a temperatura de 80 °C, intervalo onde ocorreu uma redução, em relação aos testemunhos reforçados, de 17%; nos demais intervalos, a redução ficou na faixa de 5%. A provável causa desta redução mais intensa até a temperatura de 80 °C deve ter sido em função do início do processo de perda de umidade e de volatilização do adesivo epóxi utilizado na colagem do tecido de fibra de carbono, visto que a presença de reforço foi o efeito mais significativo entre os estudados nesta pesquisa como seria de esperar. Ainda, convém salientar que a capacidade de carga residual dos modelos reforçados na temperatura de 240 °C foi 33% superior à capacidade de carga dos modelos testemunhos não reforçados; este fato demonstra que, apesar dos problemas ocasionados pela volatilização do adesivo epóxi com o calor, a eficiência do reforço ainda não havia sido completamente comprometida para este patamar de temperatura.

Ficam comprovados, a partir deste gráfico, os efeitos negativos da exposição dos corpos de prova ao calor, manifestado através da redução na capacidade de carga dos mesmos. Justifica-se assim a realização de pesquisas que busquem entender melhor o comportamento de elementos estruturais e de técnicas de reforço frente a situações de exposição a elevadas temperaturas, bem como a avaliação de alternativas de proteção que visem minimizar estas conseqüências, com o intuito de projetar estruturas que forneçam melhores condições de segurança aos usuários em situações peculiares.

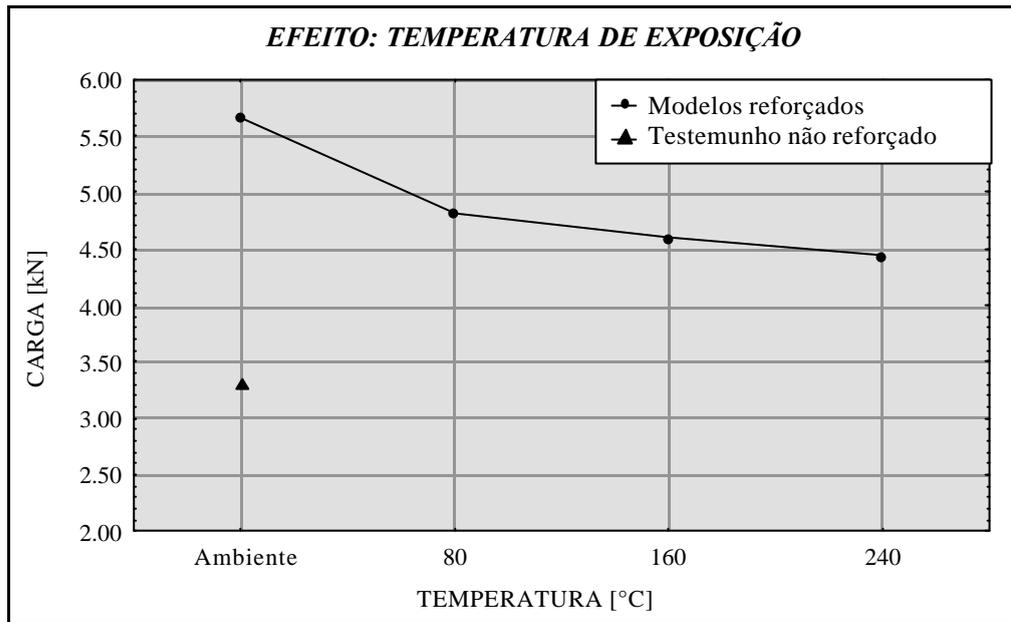


FIGURA 6.4 – Efeito temperatura de exposição

### **Efeito: Temperatura de Exposição x Presença de Reforço**

Na Figura 6.5 apresenta-se o gráfico *carga x temperatura de exposição x presença de reforço*. O comportamento apresentado pelos modelos, neste caso, foi condizente com o esperado a partir da revisão bibliográfica. Observou-se que, para os modelos não reforçados, a exposição ao calor ocasionou uma redução média de 20% na capacidade de carga dos mesmos; sendo que os expostos a maiores temperaturas foram os mais afetados. Com relação aos modelos reforçados, eles apresentaram a mesma tendência de comportamento apresentado pelos não reforçados, sendo a perda na capacidade de carga em torno de 23%.

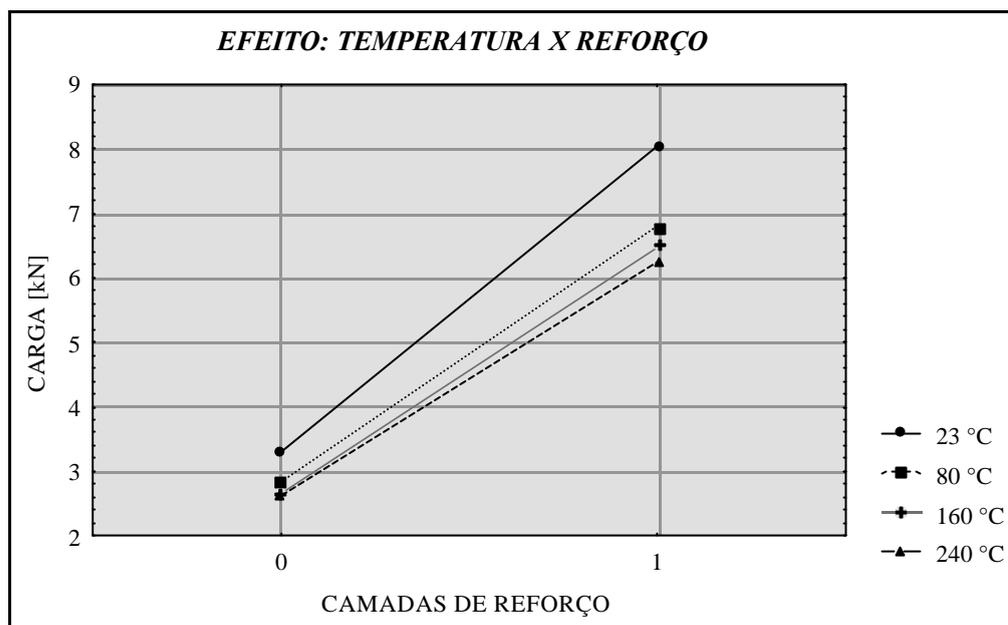


FIGURA 6.5 – Efeito temperatura de exposição x presença de reforço

#### **Efeito: Temperatura x Acabamento de Superfície x Presença de Reforço**

Na Figura 6.6 apresenta-se o gráfico *carga x temperatura de exposição x acabamento de superfície x presença de reforço*.

A partir da análise gráfica, observou-se que, para os modelos não reforçados, ocorreu uma pequena redução na sua capacidade de carga quando da exposição dos mesmos a temperaturas crescentes e que a presença de acabamento de superfície não ocasionou alterações significativas no desempenho dos modelos. Acredita-se que as pequenas variações de desempenho tenham sido ocasionadas pela variabilidade inerente dos ensaios de tração por flexão. Quanto aos modelos reforçados, a redução na capacidade de carga com a exposição a temperatura foi mais acentuada, sendo que a análise detalhada deste comportamento será realizada durante a discussão do efeito: temperatura de exposição x acabamento de superfície.

Salienta-se que o comportamento inesperado apresentado pelos modelos neste efeito incentivou a realização de um estudo complementar mais direcionado, conforme já foi discutido no capítulo 4, com o objetivo de esclarecer estas tendências.

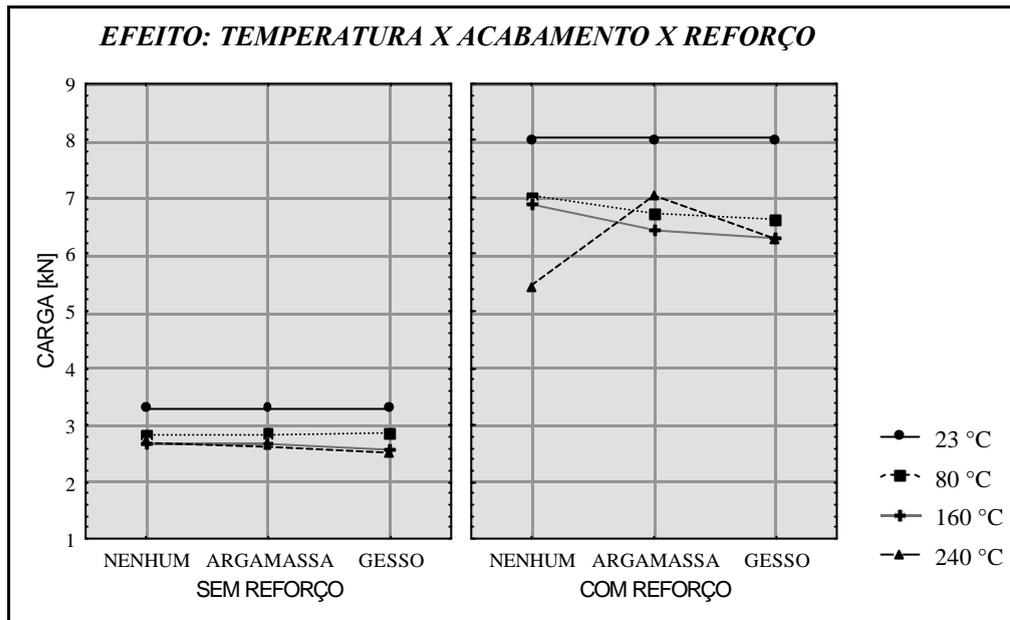


FIGURA 6.6 – Efeito temperatura x acabamento de superfície x presença de reforço

### Efeito: Temperatura de Exposição x Acabamento de Superfície

Na Figura 6.7 apresenta-se o gráfico *carga x temperatura de exposição x acabamento de superfície*.

A partir da análise gráfica, observou-se que os modelos submetidos à temperatura de 240 °C foram os únicos que apresentaram um comportamento similar ao esperado. Nesta temperatura, os modelos não protegidos apresentaram uma redução de 38% na capacidade de carga em relação ao testemunho com a exposição ao calor. Esta perda foi minimizada com a aplicação do revestimento, onde a alternativa que apresentou melhor resultado foi a argamassa de revestimento com uma redução de 16%; seguida pelo gesso com uma redução de 28%.

Os modelos submetidos à temperatura de 80 °C e 160 °C apresentaram um comportamento oposto ao esperado, pois a aplicação da proteção passiva sobre os mesmos ocasionou uma redução média de 2 a 5% na capacidade de carga em relação aos não protegidos e submetidos à mesma temperatura. No entanto, os modelos não protegidos tiveram uma perda média de apenas 16% na capacidade de carga em relação aos testemunhos.

Na tentativa de entender o comportamento apresentado, foram lançadas algumas hipóteses tais como: algum fator não controlável estaria gerando um ruído muito forte nos

resultados ou o processo de remoção da proteção passiva estaria danificando os corpos de prova. Mas, ao comparar-se este efeito com o efeito tempo, que indicou que o concreto sofreu um pequeno ganho de resistência ao ser exposto a temperatura, provavelmente devido a um processo de maturação do mesmo, chegou-se à seguinte alternativa: em temperaturas baixas, a aplicação da proteção passiva impediu o ganho de resistência por maturação do concreto; para temperaturas mais elevadas, a exposição ao calor tornou-se prejudicial ao mesmo e, também, ao adesivo utilizado na aplicação do reforço. No entanto, a aplicação de proteção passiva em temperaturas mais elevadas ajudou a minimizar os efeitos nocivos do calor ao adesivo, implicando numa menor redução da capacidade de carga dos modelos. Segundo se pode deduzir da análise de dados de Neville [1997], os corpos de prova com idades mais avançadas não apresentam este comportamento, provavelmente devido ao fato de que neste momento todas as reações químicas no concreto já aconteceram. Ainda, para tempos de exposição muito grandes, pode-se conjecturar que este fenômeno deverá ficar mascarado.

É importante salientar que este fenômeno não foi previsto para ser avaliado durante o programa experimental realizado; desta forma, necessita-se de um estudo mais direcionado para a sua confirmação. Este estudo constitui em uma das sugestões para trabalhos futuros que serão apresentadas no capítulo 7.

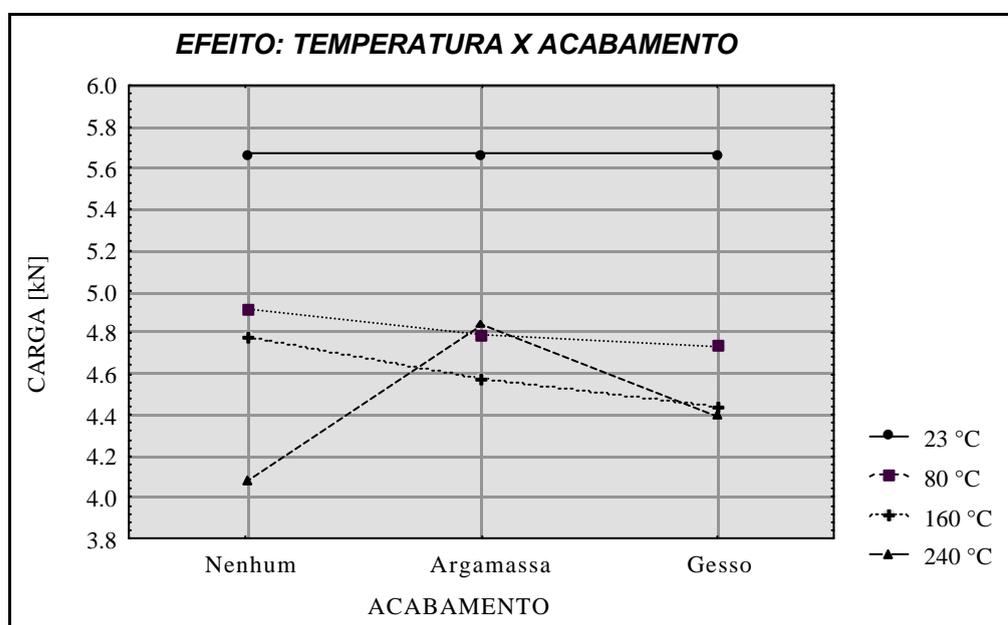


FIGURA 6.7 – Efeito temperatura de exposição x acabamento de superfície

### Efeito: Tempo de Exposição

Na Figura 6.8, apresenta-se o gráfico *carga x tempo de exposição*. Este gráfico apresentou uma peculiaridade, uma vez que para tempos de exposição maiores, houve um acréscimo na capacidade portante dos modelos. Este aumento foi pouco pronunciado, em torno de 2% para cada um dos intervalos de tempo analisados. Tal comportamento não foi considerado muito importante no presente estudo, uma vez que a análise de variância demonstrou que a significância deste efeito é muito pequena.

No entanto, imagina-se que este comportamento pode ter ocorrido devido a um provável fenômeno de maturação do concreto ao ser exposto à temperatura, fazendo com que houvesse um pequeno acréscimo na sua resistência, conforme discutido no efeito: temperatura de exposição x acabamento de superfície. Comparando-se este efeito com os demais efeitos significativos a pesquisa, observou-se que esta tendência de comportamento é condizente com o comportamento de determinados modelos nas temperaturas inferiores a 180 °C.

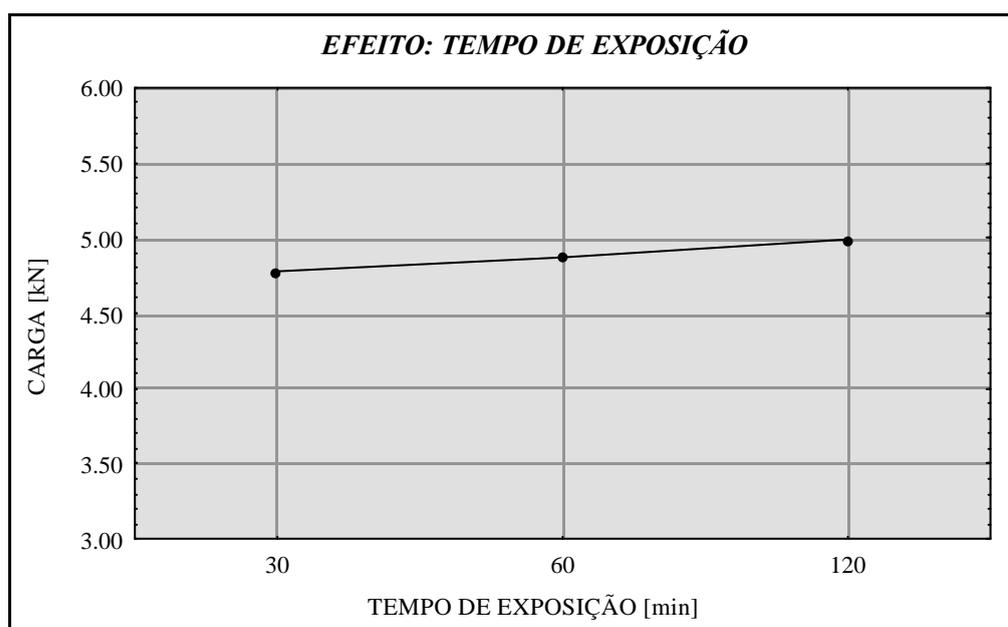


FIGURA 6.8 – Efeito tempo de exposição

### 6.2.2 Regressão Linear

Uma vez concluída a avaliação dos efeitos significativos à pesquisa através da análise de variância, procedeu-se à modelagem do comportamento teórico esperado para os corpos de prova através de regressão linear, tendo-se como base a tendência apresentada por cada efeito durante os ensaiados.

O modelo matemático foi composto pelas variáveis: presença de reforço, temperatura de exposição e tempo de exposição; convenientemente dispostas no modelo. A variável acabamento de superfície não foi incluída neste modelo uma vez que a sua influência não se mostrou significativa durante a análise dos ensaios realizados durante a etapa principal. Diante desta ocorrência inesperada, decidiu-se avaliar a influência desta variável de uma forma mais direcionada no estudo complementar.

Sendo assim, o modelo matemático formulado teve a seguinte configuração:

$$C = [b_0 + (b_1 \cdot x_1) + (b_2 \cdot x_2) + (b_3 \cdot x_3) + (b_4 \cdot x_4)]$$

Onde,

C – capacidade de carga expressa pela resistência à tração na flexão;

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_4$  – coeficientes obtidos a partir da regressão linear;

$x_1, x_2, x_3, x_4$  – variáveis independentes, fatores controláveis.

Os fatores controláveis foram dispostos da seguinte maneira:

$X_1$  = Presença de reforço – de acordo com a Figura 6.3 “Presença de reforço”, observa-se que a aplicação de reforço aos modelos ocasionou um acréscimo na capacidade de carga dos mesmos de forma linear;

$X_2 = 1/(\text{Temperatura de exposição})^n$  – de acordo com a Figura 6.4 “Temperatura de exposição”, observa-se que a capacidade de carga dos corpos de prova foi inversamente proporcional a temperatura, onde admitiu-se que a redução na capacidade de carga com o aumento da temperatura ocorreu de uma forma não linear, gerando o parâmetro  $n$ ;

$X_3$  = Tempo de exposição – observando-se a Figura 6.8 “Tempo de exposição”, verifica-se que a capacidade de carga dos corpos de prova aumentou para tempos de exposição maiores, apresentando um comportamento linear;

$X_4 = (\text{Presença de reforço/temperatura de exposição})$  – observando-se a Figura 6.5 “Temperatura de exposição x presença de reforço”, verifica-se que o aumento na capacidade de carga foi diretamente proporcional a presença de reforço e inversamente proporcional a temperatura de exposição.

Ou seja,

$$Carga = \{b_0 + (b_1 \cdot Reforço) + [b_2 / (Temperatura)^n] + (b_3 \cdot Tempo) + [b_4 \cdot (Reforço / Temperatura)]\}$$

A equação matemática estabelecida para modelar o comportamento teórico dos corpos de prova nesta pesquisa, foi a seguinte:

$$Carga = \{-0,13 + (3,63 \cdot Reforço) + [4,50 / (Temperatura)^{0,104}] + (0,0023 \cdot Tempo) + [26,10 \cdot (Reforço / Temperatura)]\}$$

Os coeficientes da equação obtida foram condizentes com as suposições levantadas durante a sua formulação, sendo que a presença de reforço apresentou o coeficiente mais elevado, ou seja, mais significativo e o tempo de exposição o coeficiente menos elevado; os demais fatores controláveis apresentaram coeficientes intermediários aos citados acima, o que era de se esperar. Os sinais dos coeficientes concordam com as tendências de comportamento esperadas.

Na Figura 6.9, apresenta-se o gráfico *carga x temperatura* obtido com esta equação, onde pode-se observar o comportamento teórico esperado para os modelos a partir da regressão linear e o comportamento real obtido com os ensaios realizados no programa experimental.

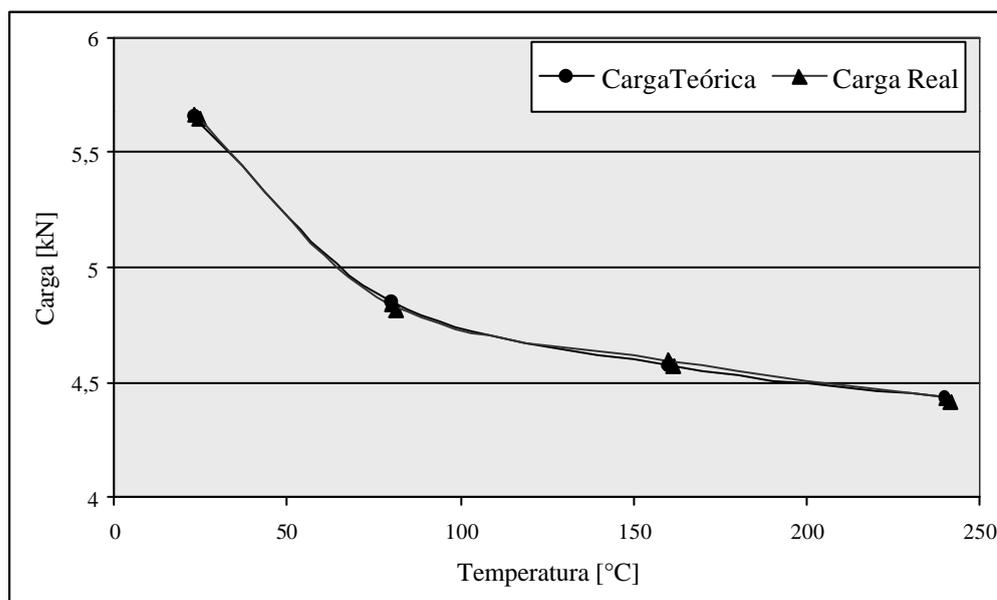


FIGURA 6.9 – Gráfico comparativo entre o comportamento teórico e real

Como pode ser visualizado no gráfico acima, o modelo matemático formulado a partir da regressão linear conseguiu reproduzir de forma eficaz o comportamento real dos modelos, com grau de confiabilidade de 95% ( $R = 0,9591$ ). É importante ressaltar que esta expressão matemática é válida para simular com precisão apenas o comportamento de corpos prova com as mesmas características dos modelos ensaiados. Sua forma, no entanto, é indicativa da tendência geral do fenômeno.

### 6.3 ESTUDOS COMPLEMENTARES

Nesta etapa da pesquisa, conforme já foi discutido no capítulo 4, foram realizados ensaios complementares específicos com o objetivo de investigar alguns pontos que se mostraram significativos ou esclarecer algumas tendências que não foram perfeitamente entendidas, gerando dúvidas. Os resultados obtidos encontram-se discutidos a seguir.

#### 6.3.1 Análise em Microscópio Eletrônico de Varredura

Neste ensaio, foram avaliadas as mudanças na micro-estrutura do tecido de fibra de carbono, da matriz do compósito e do concreto provocadas pela exposição dos mesmos a diferentes patamares de temperatura, atingindo-se até 800 °C, de acordo com a matriz experimental apresentada no capítulo 4. Os resultados obtidos encontram-se dispostos a seguir.

##### **Tecido de Fibra de Carbono**

Na Figura 6.10, visualiza-se um conjunto de quatro tecidos de fibra de carbono submetidos a diferentes patamares de temperatura e, posteriormente analisados a uma mesma magnitude, com auxílio de microscópio eletrônico de varredura. Os resultados deste ensaio demonstraram que os tecidos de fibra de carbono não sofreram alteração significativa em sua micro-estrutura com a exposição a elevadas temperaturas.

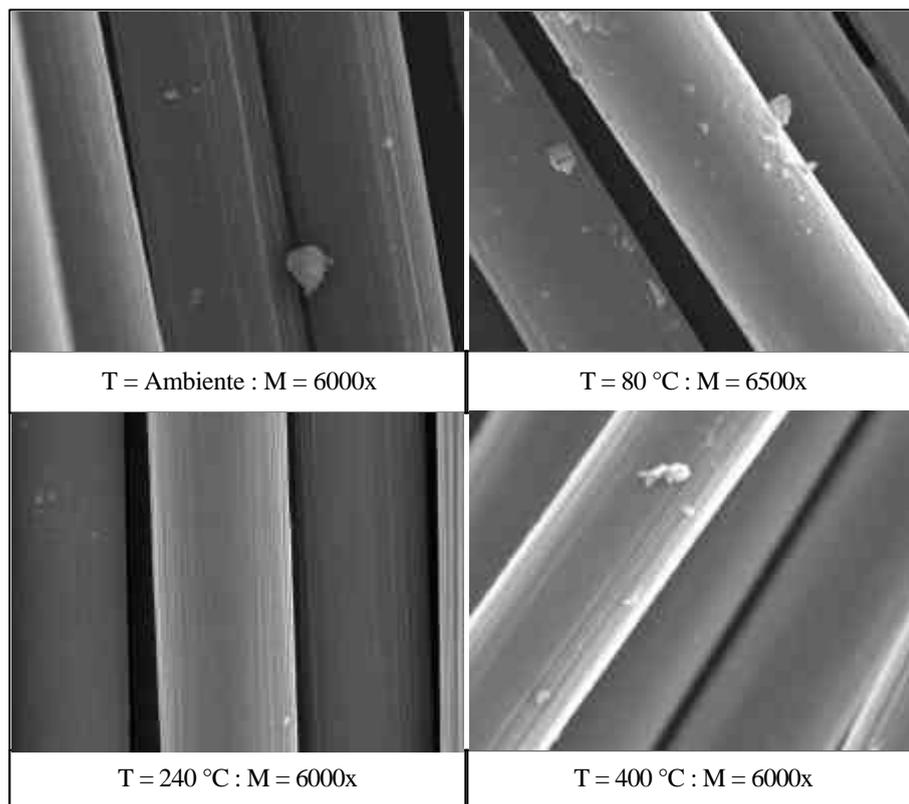


FIGURA 6.10 – MEV do tecido de fibra de carbono

### Matriz do Compósito

Conforme a revisão bibliográfica, o principal motivo da perda de capacidade de carga de elementos estruturais reforçados com tecidos de fibra de carbono é a volatilização do adesivo utilizado na colagem do tecido ao substrato, quando o mesmo é exposto ao calor. A matriz do compósito era formada por tecido de fibra de carbono envolvido por adesivo epóxi. Com o microscópio eletrônico de varredura pode-se visualizar as alterações na microestrutura do compósito, devido à volatilização do adesivo com o aumento da temperatura.

Na Figura 6.11, apresenta-se uma seqüência de imagens que caracterizam o processo de volatilização do adesivo. Na temperatura ambiente, a matriz do compósito apresentava uma superfície bem homogênea e com uma estrutura bem fechada; na temperatura de 80 °C, a superfície já não estava tão homogênea quanto antes, existindo alguns pontos salientes em forma de bolha e regiões onde era possível enxergar a orientação dos filamentos de fibra de carbono; na temperatura de 240 °C, a matriz apresentava várias falhas em pontos concentrados caracterizando a volatilização do adesivo; na temperatura de 400 °C, o adesivo epóxi volatilizou completamente restando apenas o tecido de fibra de carbono, onde era possível visualizar perfeitamente o sentido dos filamentos de fibra.

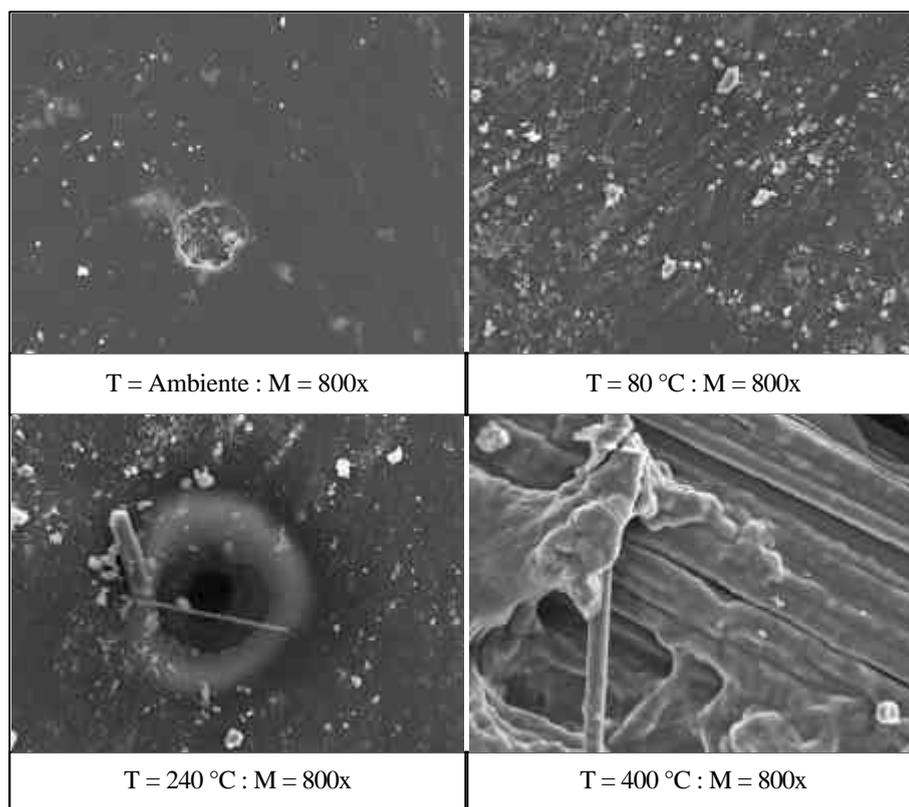


FIGURA 6.11 – MEV da matriz do compósito

Este ensaio permitiu comprovar a hipótese formulada nesta pesquisa referente à perda gradativa de capacidade de carga de elementos reforçados com tecido de fibra de carbono devido ao processo de volatilização do adesivo epóxi com o aumento da temperatura; sendo que a volatilização total do adesivo ocorreu para o patamar de temperatura de 400 °C.

### Concreto

Na Figura 6.12, são apresentadas uma seqüência de fotos mostrando o concreto quando exposto a vários patamares de temperatura. Na temperatura ambiente pode-se visualizar a presença de cristais de etringita e de monossulfato. À medida que o concreto foi sujeito a temperaturas mais elevadas, observou-se uma redução nestes compostos e começaram a aparecer fraturas no mesmo, provavelmente devido à ocorrência de tensões térmicas provocadas pela exposição ao calor, como pode ser visto nas microfotografias abaixo. À temperatura de 400 °C o material apresentou pequenas alterações em algumas zonas do C-S-H, mas de forma geral a microestrutura manteve-se estável. O perfeito entendimento da natureza das alterações sofridas pelo concreto não era objetivo do trabalho e acredita-se que a mesma requer uma análise mais direcionada, o que será sugerido no capítulo 7.

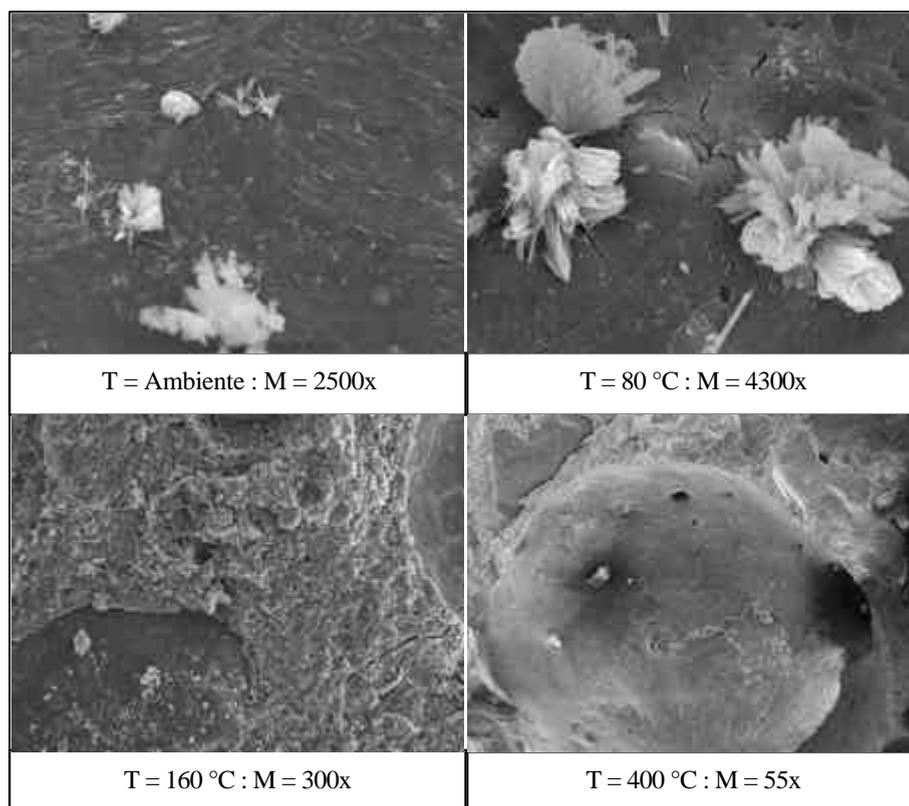


FIGURA 6.12 – MEV do concreto utilizado na moldagem

### 6.3.2 Análise Termogravimétrica

Analisando-se os resultados obtidos na análise termogravimétrica, apresentados na Figura 6.13, pode-se observar que o início da perda de massa do adesivo foi na temperatura de 100 °C; sendo esta perda de 2,11% e ocasionada, provavelmente, devido à evaporação de voláteis, especialmente água, oclusos na amostra durante o processo de polimerização.

No intervalo compreendido entre a temperatura de 230 °C e 495 °C, ocorreu uma grande perda de massa do adesivo, em média 81,15%; sendo que na temperatura de 387,52 °C, a velocidade de degradação do polímero foi máxima. Este intervalo de temperatura é característico do ponto onde o adesivo perde as suas propriedades e acontece a decomposição da cadeia carbônica do polímero.

A partir desta temperatura, a perda de massa ocorreu lentamente, chegando-se a temperatura de 1000 °C com um resíduo de 11,59%; este resíduo era formado, provavelmente, por compostos não orgânicos, ou seja, a carga.

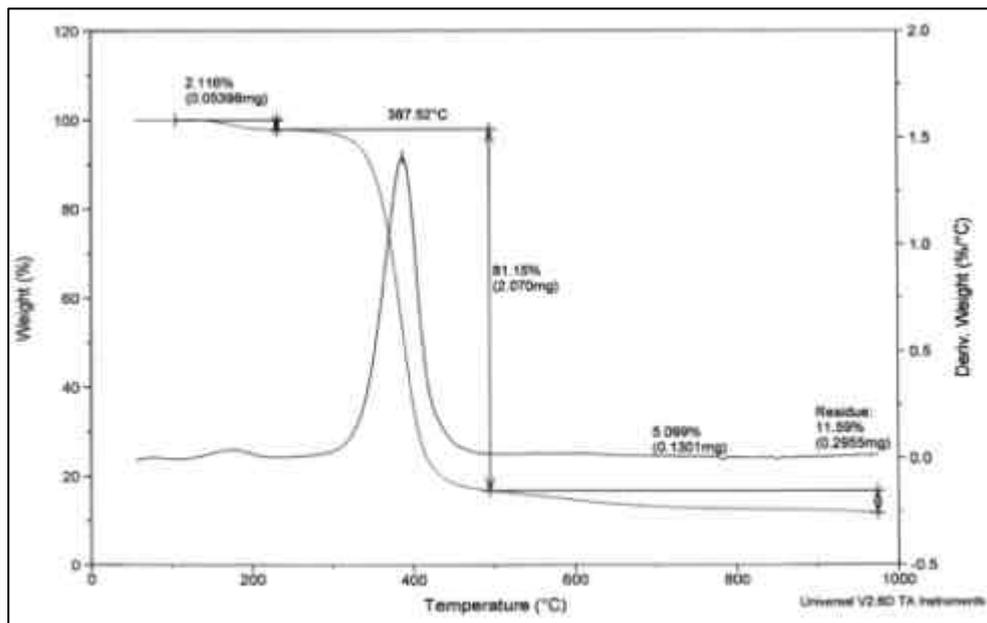


FIGURA 6.13 – Análise termogravimétrica do adesivo epóxi

### 6.3.3 Avaliação de Temperatura de Exposição vs. Acabamento sobre a Superfície

O efeito temperatura de exposição x acabamento de superfície mostrou-se pouco significativo durante os ensaios realizados na etapa principal. Desta forma, decidiu-se avaliar o comportamento deste efeito de uma forma mais específica, como já foi discutido no capítulo 4.

A matriz experimental prevista para este ensaio contemplava a exposição dos modelos a temperaturas de 240 °C por um intervalo de 120 min. A seguir, será apresentada a análise de variância dos resultados coletados e, logo em seguida, o modelo matemático formulado a partir destes resultados, com a finalidade de simular o comportamento teórico dos modelos. No Anexo 2, encontram-se os resultados numéricos desta etapa.

## Análise da Variância

O Quadro 6.2 apresenta os fatores significativos para esta etapa da pesquisa.

QUADRO 6.2 – Fatores significativos: Efeito Temperatura x Acabamento

Fatores Significativos	F
Presença de Reforço	500.821
Temperatura de Exposição	74.849
Temperatura x Reforço	38.344
Acabamento x Reforço	7.656
Temperatura x Acabamento x Reforço	7.656
Acabamento de Superfície	6.499
Temperatura x Acabamento	6.499

Abaixo, apresenta-se a análise de cada um destes fatores significativos, bem como os respectivos gráficos com as tendências de comportamento.

### Efeito: Presença de Reforço

Na Figura 6.14 apresenta-se o gráfico *carga x presença de reforço*. Os resultados confirmaram a tendência apresentada na etapa principal, sendo que o acréscimo na capacidade de carga dos modelos nesta etapa foi de, aproximadamente, 160%, superior ao acréscimo obtido na etapa principal que foi de, aproximadamente, 138%. Novamente, pode-se verificar o considerável ganho de resistência conferido pela execução de reforços estruturais com tecidos de fibra de carbono.

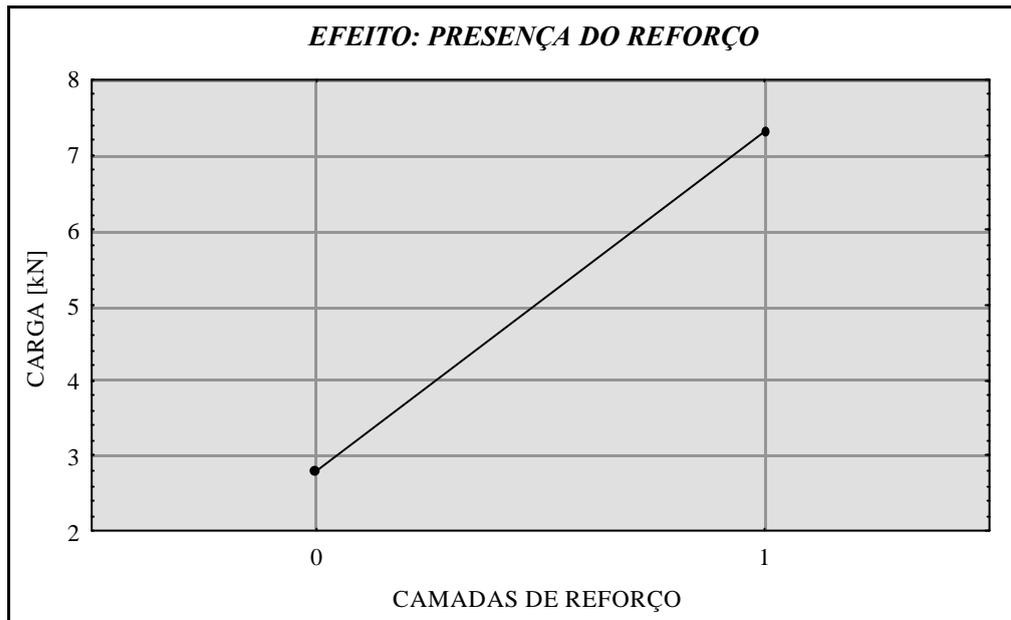


FIGURA 6.14 – Efeito presença de reforço

### **Efeito: Temperatura de Exposição**

Na Figura 6.15 apresenta-se o gráfico *carga x temperatura de exposição*. Pode-se observar que a exposição dos modelos à temperaturas elevadas ocasionou novamente uma redução significativa na capacidade de carga dos corpos de prova. Nesta situação, a redução foi de, aproximadamente, 40%; superior à obtida na etapa principal para o mesmo intervalo de temperatura. É conveniente salientar que o comportamento linear apresentado pelo gráfico é resultante do caráter bivalente da análise. Os dados anteriores indicavam, entretanto, que a redução da capacidade de carga neste intervalo apresenta um comportamento exponencial.

Esta tendência confirmou novamente os efeitos nocivos de se expor reforços estruturais com tecidos de fibra de carbono a temperaturas elevadas; justificando, mais uma vez, a necessidade de se realizar estudos que esclareçam este comportamento e encontrem uma solução para o mesmo.

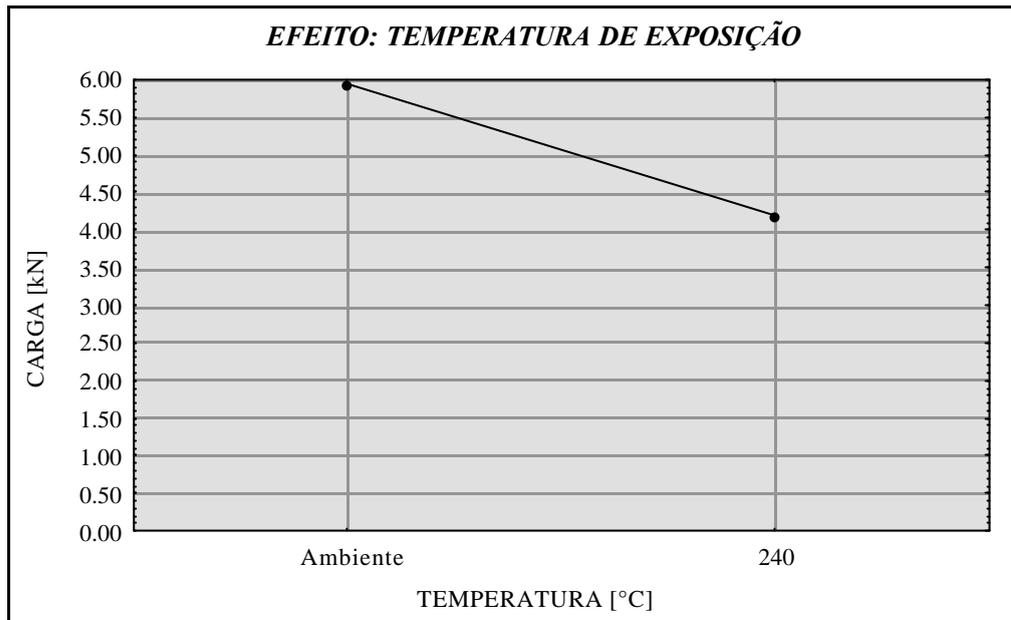


FIGURA 6.15 – Efeito temperatura de exposição

### **Efeito: Temperatura de Exposição x Presença de Reforço**

Na Figura 6.16 apresenta-se o gráfico *carga x temperatura de exposição x presença de reforço*. Este efeito apresentou a mesma tendência observada no estudo principal; porém, nesta etapa o efeito mostrou-se bem mais significativo. Os modelos não reforçados perderam, aproximadamente, 19% e os reforçados 50% na capacidade de carga pela exposição ao calor. Analisando-se o ganho na capacidade de carga pela execução do reforço em determinado patamar de temperatura, observa-se que os modelos expostos à temperatura ambiente tiveram um acréscimo de, aproximadamente, 185%, enquanto que os expostos a temperatura de 240 °C de, aproximadamente, 125%.

A partir destes resultados pode-se verificar o seguinte comportamento: tanto os modelos não reforçados quanto os reforçados tem a sua capacidade de carga reduzida ao serem expostos a temperaturas elevadas, o que indica que a exposição ao calor é prejudicial tanto ao concreto quanto ao reforço com fibra de carbono. No entanto, esta redução é bem mais pronunciada nos modelos que apresentam reforço, uma vez que é motivada pela volatilização do adesivo epóxi utilizado na colagem do mesmo ao substrato.

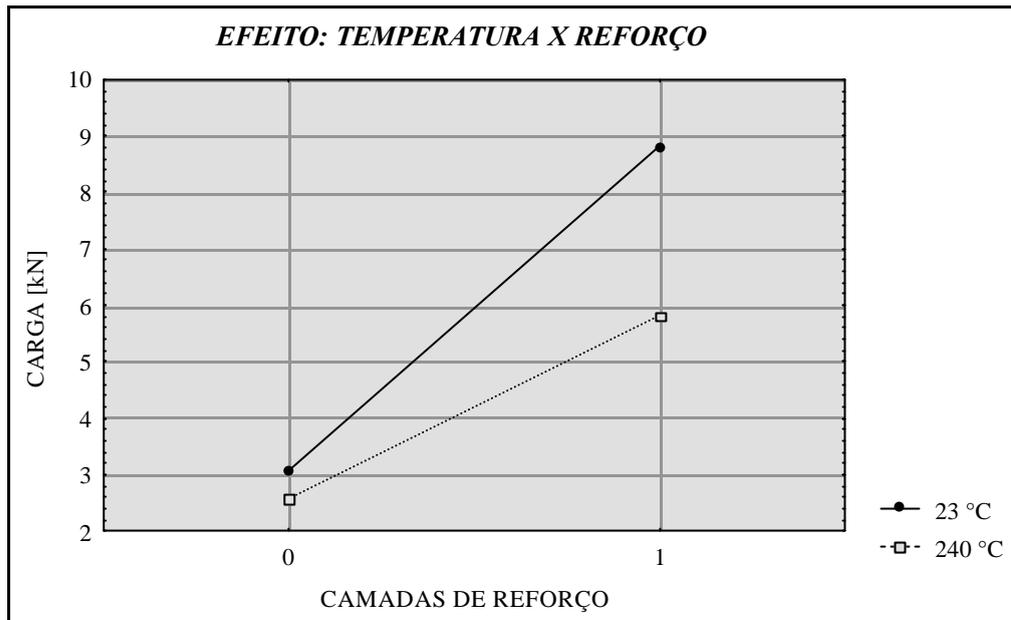


FIGURA 6.16 – Efeito temperatura de exposição x presença de reforço

#### **Efeito: Acabamento de Superfície x Presença de Reforço**

Na Figura 6.17 apresenta-se o gráfico *carga x acabamento de superfície x presença de reforço*.

Pode-se observar que os modelos que apresentavam proteção passiva apresentaram um acréscimo na capacidade de carga superior aos que não tinham proteção. Ainda, verifica-se que os modelos protegidos com argamassa e com gesso apresentaram praticamente o mesmo desempenho. Em termos numéricos, os modelos com proteção passiva tiveram um acréscimo de, aproximadamente, 175% na capacidade de carga e os sem proteção passiva, 120%.

Uma alternativa que pode melhorar a significância do acabamento de superfície é aumentar a sua espessura na tentativa de reduzir ainda mais o gradiente de temperatura a que o modelo estará sujeito com a sua exposição ao calor.

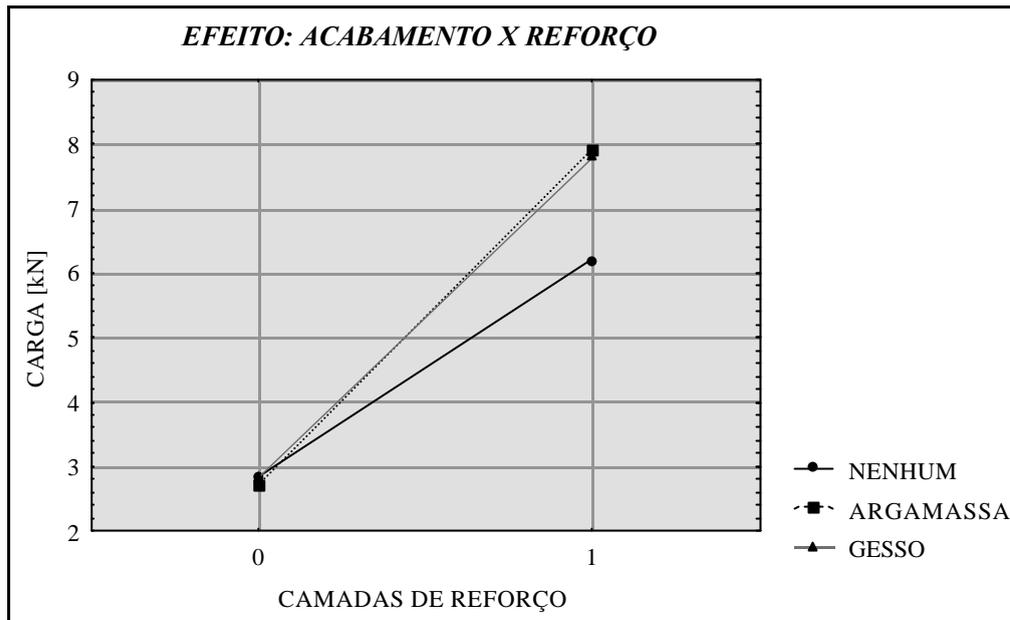


FIGURA 6.17 – Efeito acabamento de superfície x presença de reforço

#### **Efeito: Temperatura x Acabamento de Superfície x Presença de Reforço**

Na Figura 6.18 apresenta-se o gráfico *carga x temperatura de exposição x acabamento de superfície x presença de reforço*.

A partir do gráfico, pode-se observar que os modelos não reforçados tiveram uma redução na capacidade resistente com a exposição ao calor de, aproximadamente, 11%, 25% e 11%; e os modelos reforçados de 147%, 27% e 29%; para modelos sem acabamento, protegidos com argamassa e com gesso, respectivamente.

Através destes resultados numéricos, pode-se verificar a importância da execução do acabamento de superfície quando realiza-se o reforço de uma estrutura com tecidos de fibra de carbono; embora a sua presença não consiga minimizar completamente a degradação do adesivo com a exposição ao calor, pode-se retardar esta degradação, o que pode ser muito importante para garantir a desocupação e propiciar as operações de combate ao incêndio de uma edificação.

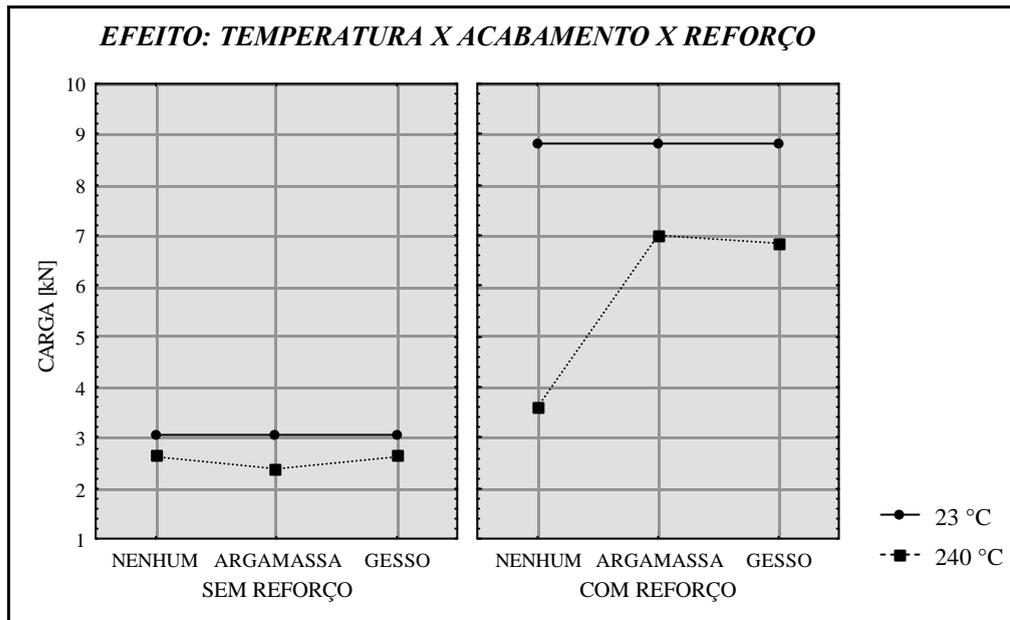


FIGURA 6.18 – Efeito acabamento de superfície x presença de reforço

### Efeito: Acabamento de Superfície

Na Figura 6.19 apresenta-se o gráfico *carga x acabamento de superfície*. A tendência apresentada pelo mesmo é condizente com os resultados esperados, motivando a realização de estudos com espessuras maiores de cobrimento e outros materiais indicados para fornecer proteção ao calor, na tentativa de melhorar este desempenho.

A partir da análise gráfica, pode-se observar que o desempenho geral apresentado pelos modelos protegidos com argamassa ou gesso foi equivalente para a espessura em estudo. Ainda, pode-se verificar que a melhora no desempenho dos modelos com acabamento de superfície em relação aos sem acabamento foi de, aproximadamente, 18%.

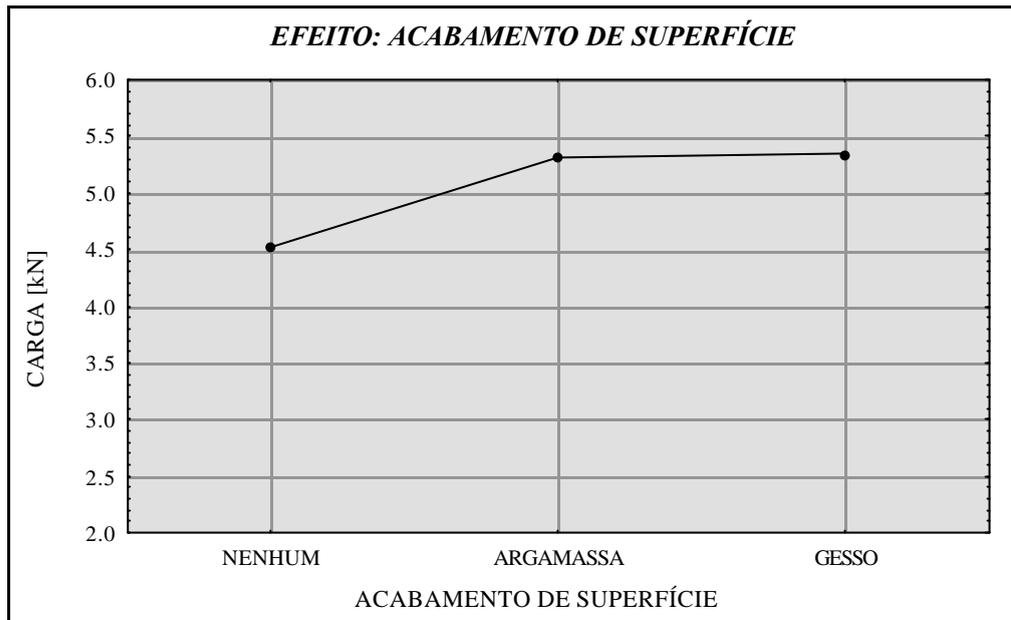


FIGURA 6.19 – Efeito acabamento de superfície

### **Efeito: Temperatura de Exposição x Acabamento de Superfície**

Na Figura 6.20 apresenta-se o gráfico *carga x temperatura de exposição x acabamento de superfície*.

Os modelos a 23 °C são os testemunhos, por isso não apresentaram diferenças entre si. Quanto aos modelos submetidos à temperatura de 240 °C, pode-se observar a mesma tendência apresentada pelos gráficos anteriores, ou seja, os modelos protegidos com argamassa ou gesso tiveram praticamente o mesmo comportamento; mas ao compará-los com os não protegidos, pode-se observar que eles apresentaram, em média, uma capacidade de carga superior em 47%. Este resultado demonstra novamente a importância da execução de proteção passiva ao efetuar-se reforços de estruturas com tecidos de fibra de carbono.

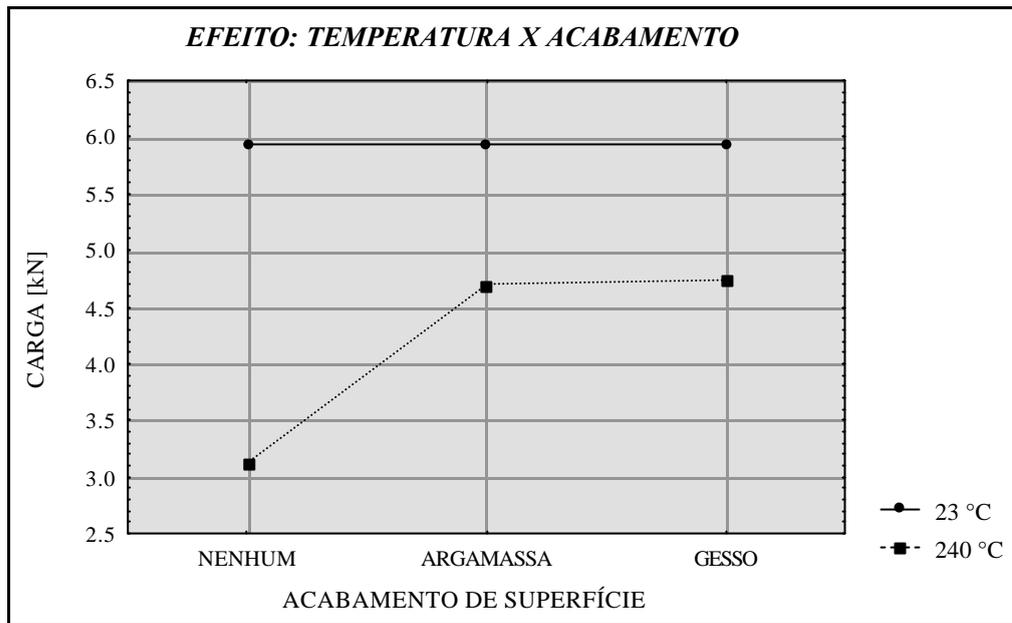


FIGURA 6.20 – Efeito temperatura de exposição x acabamento de superfície

### Regressão Linear

O modelo matemático formulado foi composto pelas variáveis: presença de reforço, temperatura de exposição e acabamento de superfície; convenientemente dispostas.

A configuração do mesmo foi a seguinte:

$$C = [b_0 + (b_1 \cdot x_1) + (b_2 \cdot x_2) + (b_3 \cdot x_3) + (b_4 \cdot x_4)]$$

Os fatores controláveis foram dispostos da seguinte maneira:

$X_1$  = Presença de reforço – de acordo com a Figura 6.14 “Presença de reforço”, novamente o acréscimo de carga com a aplicação do reforço ocorreu de uma forma linear;

$X_2 = 1/(\text{Temperatura de exposição})^n$  – de acordo com a Figura 6.15 “Temperatura de exposição”, observa-se que a capacidade de carga dos corpos de prova foi inversamente proporcional a temperatura. Admitiu-se que a redução na capacidade de carga com o aumento da temperatura ocorreu de uma forma não linear, gerando o parâmetro  $n$ ;

X<sub>3</sub> = Proteção com argamassa – observando-se a Figura 6.17 “Acabamento de superfície x presença de reforço”, verifica-se que a capacidade de carga dos corpos de prova aumentou de forma linear para os modelos protegidos com argamassa;

X<sub>4</sub> = Proteção com gesso – observando-se a Figura 6.17 “Acabamento de superfície x presença de reforço”, verifica-se que a capacidade de carga dos corpos de prova aumentou de forma linear para os modelos protegidos com gesso.

Ou seja,

$$Carga = \{b_0 + (b_1.Reforço) + [b_2 / (Temperatura)^n] + (b_3.Argamassa) + (b_4.Gesso)\}$$

Portanto, a equação matemática estabelecida para modelar o comportamento teórico dos corpos de prova nesta etapa, foi a seguinte:

$$Carga = \{- 1,38 + (4,00*Reforço) + [16,24 / (Temperatura)^{0,350}] + (2,00*Argamassa) + (1,54*Gesso)\}$$

Os coeficientes da equação são condizentes com as suposições levantadas durante a sua formulação, onde o mais elevado relaciona-se à presença de reforço, como era de se esperar; em relação ao acabamento de superfície, os coeficientes indicaram que os dois revestimentos apresentaram comportamentos equivalentes, pois o coeficiente da proteção com argamassa de revestimento foi ligeiramente superior ao do gesso.

Na Figura 6.21, apresenta-se o gráfico *carga x temperatura*. Neste gráfico, podemos observar o comportamento teórico esperado para os modelos a partir da regressão linear e o comportamento real obtido com os ensaios realizados.

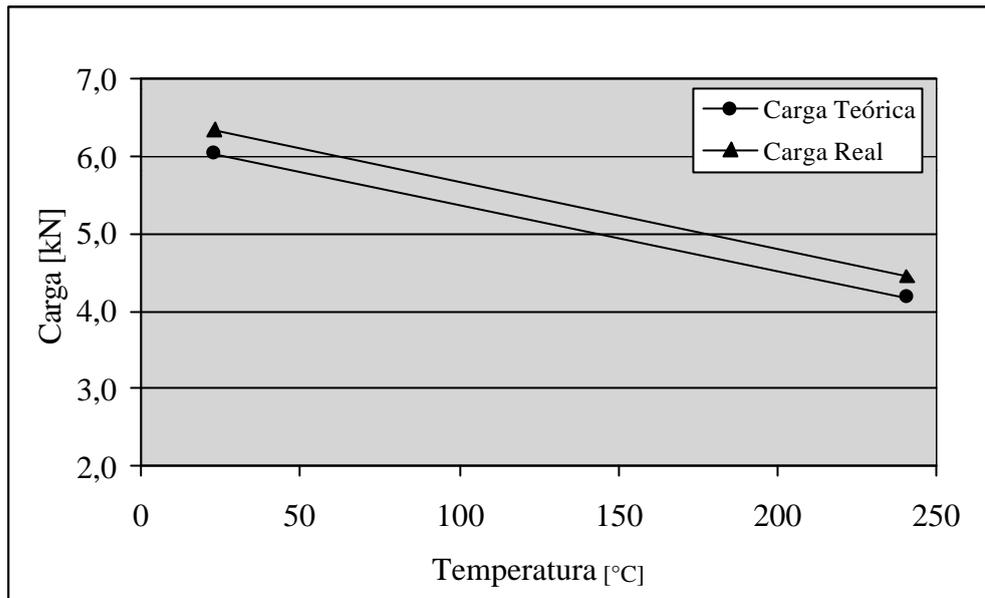


FIGURA 6.21 – Gráfico comparativo entre o comportamento teórico e real

O gráfico acima apresenta as curvas teórica e real da capacidade de carga dos modelos em função da temperatura de exposição. Pode-se observar que o modelo matemático formulado conseguiu reproduzir a tendência apresentada nos ensaios efetuados; no entanto, o grau de confiabilidade foi de 90% ( $R=0,9004$ ), ocasionando a defasagem de uma curva em relação à outra.

# Capítulo 7

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo, serão apresentadas as conclusões decorrentes da realização desta pesquisa e sugeridos alguns assuntos ligados ao tema que merecem ser avaliados de uma forma mais específica em trabalhos futuros.

### 7.1 CONCLUSÕES

De forma geral, a primeira conclusão foi que a realização da presente pesquisa permitiu a comprovação prática da eficácia, em termos de aumento na capacidade portante de elementos estruturais, da técnica de recuperação e reforço de estruturas patológicas com tecido de fibra de carbono. Demonstrou-se novamente que os procedimentos necessários à execução do reforço são bastante simples, não necessitando de uma equipe especializada para a sua aplicação, desde que exista um profissional qualificado para orientar e supervisionar os trabalhos.

Por outro lado, evidenciou-se, através dos dados experimentais, que a segurança estrutural dos elementos reforçados com esta técnica, ao serem submetidos a elevadas temperaturas, deve efetivamente ser motivo de preocupação. Os ensaios realizados demonstraram que a perda de desempenho do reforço é crescente com o aumento da temperatura e é ocasionada principalmente pela volatilização do adesivo epóxi utilizado para a formação do elemento compósito.

Como pode ser visto nos dados apresentados no capítulo 6, durante os ensaios preliminares a eficiência do reforço manteve-se uniforme para os corpos de prova submetidos até a temperatura de 180 °C; já para os submetidos à temperatura de 410 °C, houve a perda total do reforço em consequência da volatilização completa do adesivo epóxi da matriz do compósito. Na etapa principal, observou-se, que para a temperatura de 240 °C, situação mais desfavorável avaliada, houve uma redução na capacidade portante dos modelos reforçados em torno de 30%, sendo esta reduzida de 5.72 kN para 4.40 kN.

Quanto ao tempo de exposição dos modelos ao calor, a principal conclusão formulada foi que, em temperaturas mais baixas, os mesmos apresentaram um pequeno ganho de resistência para tempos de exposição maiores. Este fenômeno não era esperado, porém, através da análise conjunta com os demais efeitos analisados, pode-se atribuir este comportamento a um possível processo de maturação do concreto e conseqüente aumento da sua resistência em temperaturas mais baixas. Infelizmente, o programa experimental não estava direcionado a avaliar de uma maneira mais ampla este comportamento, decorrendo portanto a necessidade de se realizar estudos mais direcionados, a fim de confirmar ou descartar esta tendência.

A análise em microscópio eletrônico de varredura confirmou que o principal motivo do baixo desempenho frente ao calor é a volatilização do adesivo epóxi utilizado para colar o tecido de fibra de carbono ao substrato, embora alguns dados indicassem que o concreto também sofreu alterações em sua estrutura com a exposição ao calor.

Através da análise termogravimétrica, verificou-se que a grande perda de massa do adesivo epóxi devido a sua volatilização ocorreu na faixa de temperatura compreendida entre 230 °C e 495 °C; sendo que, para a temperatura de 400 °C aproximadamente, este processo foi mais acentuado. Estes valores vêm ao encontro e confirmam as tendências de comportamento apresentadas pelos modelos ensaiados durante o programa experimental.

Com base nos resultados obtidos durante o programa experimental, reforça-se a hipótese inicial de que incêndios que por ventura possam ocorrer em edificações constituem a principal ameaça a este tipo de reforço. É importante ressaltar que a matriz experimental desenvolvida contemplou apenas temperaturas que ocorrem na fase inicial de um incêndio ou pré-flashover; sendo que na fase de flashover ou queima livre os gases podem atingir temperaturas de aproximadamente 700 °C e na fase de queima lenta ou backdraft a temperatura pode atingir 1100 °C, conforme discutido no capítulo 3.

Diante do exposto, concluí-se que as estruturas reforçadas com tecidos de fibra de carbono apresentam uma vulnerabilidade muito grande em situação de incêndio, gerando a necessidade de pesquisas destinadas a adequar esta técnica a esta situação específica.

Como era objetivo do trabalho, avaliou-se o comportamento de proteções passivas aplicadas sobre o reforço com o intuito de retardar esta perda de desempenho em caso de incêndio e garantir a integridade da estrutura por um maior intervalo de tempo, favorecendo a desocupação da edificação e o combate ao fogo em segurança. Os resultados obtidos indicaram que tanto a aplicação de argamassa de revestimento quanto de gesso foram importantes como forma de retardar a degradação do elemento compósito. Pode-se verificar que a perda na capacidade de carga do reforço, em função da exposição a elevadas temperaturas, foi menor para os modelos que apresentavam proteção passiva, porém não em níveis satisfatórios capazes de garantir a sanidade estrutural de forma condizente. Admite-se que um dos motivos desse desempenho pouco favorável foi a reduzida espessura do cobrimento utilizado, de maneira que a proteção passiva permitiu ainda a passagem de gradientes de temperatura muito elevados, capazes de danificar o reforço.

Na Figura 7.1, apresenta-se a aparência de três modelos reforçados e submetidos a uma mesma temperatura de 240 °C durante 120 min, porém com alternativas de proteção diferentes. Através de uma análise visual, observa-se que a degradação do polímero ocorreu em maior intensidade no modelo sem proteção passiva, o qual apresentou um escurecimento acentuado do adesivo epóxi e a formação de pequenas bolhas de ar na superfície do reforço com a exposição ao calor; o modelo protegido com argamassa apresentou apenas o escurecimento do adesivo epóxi, porém em menor intensidade; no modelo protegido com gesso, o escurecimento da superfície ocorreu em menor intensidade que nas demais alternativas avaliadas, o que poderia sugerir um desempenho melhor da proteção. A análise de resultados entretanto não encontrou diferenças significativas entre a eficiência dos dois tipos de proteção.

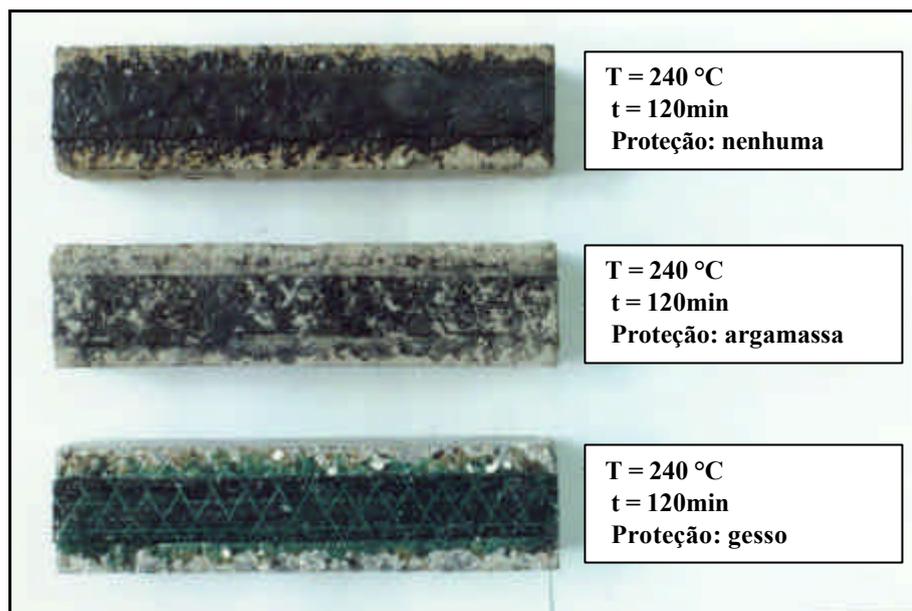


FIGURA 7.1 – Aparência de modelos expostos ao calor com diferentes tipos de proteção

## 7.2 RECOMENDAÇÕES

Como sugestão para trabalhos futuros, seria interessante realizar um estudo onde diferentes espessuras de proteção passiva fossem aplicadas sobre o reforço; neste estudo, poderiam ser avaliados os materiais que foram utilizados neste trabalho bem como outros destinados a este fim, tais como vermiculita e tintas intumescentes. Quanto ao revestimento com gesso, outra alternativa a ser estudada seria a aplicação de chapas de gesso parafusadas no elemento estrutural, ao invés do sistema de moldagem utilizado nesta pesquisa; este método alternativo oferecia uma maior segurança em termos de aderência do revestimento ao substrato, pois em situações reais, o gesso e o concreto apresentam coeficientes de dilatação diferentes, gerando tensões de cisalhamento nas suas interfaces com a exposição ao calor, podendo levar ao destacamento do gesso.

Uma vez que a perda de desempenho do reforço é devida principalmente à alteração na estrutura do adesivo com a sua exposição ao calor, seria interessante avaliar o comportamento de adesivos utilizados para a colagem do tecido ao substrato capazes de resistir a um gradiente de temperatura maior; é necessário investigar se este efeito poderia ser conseguido pela adição de compostos ao adesivo capazes de retardar o efeito do fogo sobre a sua estrutura química.

Também devem ser realizados estudos que esclareçam as alterações que ocorrem no concreto e nas armaduras decorrentes da exposição dos mesmos ao calor. Nesta pesquisa, em temperaturas baixas pareceu se manifestar uma tendência de maturação tardia do concreto para tempos de exposição crescentes; este fenômeno não ficou perfeitamente esclarecido e comprovado, pois o programa experimental não estava direcionado a analisar este efeito. Ensaios adicionais poderiam ser planejados para investigar este aspecto, especialmente para concretos jovens.

Quanto ao sistema de exposição dos corpos de prova à temperatura, sabe-se que é muito difícil simular um incêndio em situações reais; no entanto, uma maior aproximação com a realidade poderia ser conseguido se os ensaios fossem realizados em uma câmara de incêndio, uma vez que poderiam ser ensaiados protótipos em escala superior aos possíveis de serem ensaiados em fornos, com a garantia de uma melhor distribuição do calor incidente sobre os mesmos e, também, podendo-se efetuar um controle da temperatura de exposição de forma mais adequada.

Finalmente, outra questão relacionada a este tema que demanda um estudo mais aprofundado diz respeito à toxicidade e irritabilidade da fumaça e dos gases gerados na inflamação do compósito, uma vez que os mesmos podem ser nocivos a saúde das pessoas e, ainda, podem causar um estado emocional perigoso devido à redução da visibilidade, gerando um estado de pânico. Durante os ensaios realizados, foi necessário interromper a exposição dos modelos ao calor devido ao odor liberado durante o processo de inflamação do compósito para a temperatura de 410 °C.

### 7.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa realizada teve um caráter exploratório, uma vez que esta técnica de reforço é extremamente nova, fazendo que as pesquisas desenvolvidas no meio científico preocupem-se fundamentalmente em avaliar o desempenho estrutural de reforços executados em vigas, pilares e lajes, e esqueçam de avaliar o seu comportamento em situações mais específicas.

Este trabalho foi motivado em grande parte pelo processo de conscientização em termos de segurança contra incêndio que está ocorrendo no meio acadêmico brasileiro desde a publicação da NBR 14432 - “Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos estruturais de edificações” [ABNT, 1999b]. Acredita-se que dentro deste espírito,

e considerando os objetivos propostos no capítulo 1, a mesma foi exitosa uma vez que comprovou-se os efeitos nocivos a que estão sujeitos os reforços estruturais com tecidos de fibra de carbono ao serem expostos a temperaturas elevadas; o principal motivo desta suscetibilidade ao calor é a volatilização do adesivo epóxi da matriz do compósito ocasionando o desprendimento do tecido de fibra de carbono do substrato e conseqüente perda do reforço. Com a realização dos ensaios, foi possível definir patamares de temperatura que caracterizam o processo de degradação do polímero, desde o seu início até a sua volatilização total. Ainda, demonstrou-se que a aplicação de proteção passiva é uma alternativa importante no sentido de retardar a degradação do polímero com a exposição ao calor. Finalizando, considera-se fundamental a continuidade desta pesquisa e a realização de outras pesquisas relacionadas a este tema, com o propósito de melhor entender o comportamento, em situações de incêndio, de estruturas em geral e de estruturas reforçadas com fibra de carbono em particular, pois é mister que as tecnologias empregadas na construção civil apresentem um desempenho adequado em todas as situações que por ventura as mesmas possam ser solicitadas, de modo a garantir o conforto e a segurança de seus usuários.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, Hany; ELBADRY, Mamdouh. Temperature effects on concrete members reinforced with FRP reinforcement. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE CANADIAN SOCIETY FOR CIVIL ENGINEERING, 1997, Canadá. **Proceedings...** Montreal, 1997. v.6, p.171-180.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Committee 440. ACI 440R-96. **State of the art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures**, Farmington Hills, Michigan, 1996. 68p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test methods for fire tests of building construction and materials: ASTM E119**. Pennsylvania, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado – Determinação da absorção e massa específica de agregado graúdo: NBR 9937**. Rio de Janeiro, 1987a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio de frasco Chapman: NBR 9776**. Rio de Janeiro, 1987b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Determinação da composição granulométrica: NBR 7217**. Rio de Janeiro, 1987c.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos: NBR 12142**. Rio de Janeiro, 1991b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone: NBR 7223**. Rio de Janeiro, 1992. (Método de Ensaio).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio - Procedimento:** NBR 14323. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimentos:** NBR 14432. Rio de Janeiro, 2000.

BARTON, Richard. The engineering of adhesives for external reinforcement of bridges and buildings. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL FAULTS AND REPAIR, 7, 1997, Edinburgh. **Proceedings ...** Edinburgh: Engineering Technics Press, 1997. 3v. v.1, p.277-292.

BAYON, Rene. **La proteccion contra incendios en la construccion.** Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1978.

BEBER, Andriei José. **Avaliação do desempenho de vigas de concreto armado reforçadas com lâminas de fibra de carbono.** Porto Alegre, 1999a. 108p Dissertação de Mestrado em Engenharia - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BEBER, Andriei José. **Reforço de estruturas de concreto armado com compósitos de fibra de carbono.** Porto Alegre: UFRGS/PPGEC, LEME - Laboratório de Ensaios e modelos Estrutrais, 1999b. 34p. (Caderno LEME, 09).

BRANDSCHUTZ mit KNAUF. [s.l., s.n.] 1997.64p.

BUYUKOZTURK, Oral; HEARNIG, Brian. Failure behavior of precracked concrete retrofitted with fiber reinforced plastic laminates. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL FAULTS AND REPAIR, 7, 1997, Edinburgh. **Proceedings ...** Edinburgh: Engineering Technics Press, 1997. 3v. v.2, p.21-32.

CAMPAGNOLO, João Luiz; SILVA FILHO, Luiz Carlos Pinto. Avaliação do desempenho de formulações epóxi visando sua utilização como reforço de estruturas. In: SIMPÓSIO SOBRE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES: PREVENÇÃO E RECUPERAÇÃO, 1989, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, UFRGS/CPGEC, 1989.

CAMPAGNOLO, João Luiz; SILVA FILHO, Luiz Carlos Pinto; BEBER, Andriei. **Recuperação de estruturas de concreto armado**. Porto Alegre: UFRGS/PPGEC, LEME - Laboratório de Ensaios e modelos Estrutrais,1999. 34p. (Caderno LEME, 08).

CÁNOVAS, Manuel Fernandez. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: Pini, 1988.

CLAURE, Héctor Raimundo Castellón. **Estudo da viabilidade técnica para a bolívia de painéis de gesso reforçados com fibra de vidro para paredes internas não portantes**. Porto Alegre, 1994. 97p Dissertação de Mestrado em Engenharia - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CORPO DE BOMBEIROS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Segurança estrutural dos edifícios: resistência ao fogo dos elementos construtivos**. Instrução Técnica CB-01.33-99, 1999.

CREA, F.; PORCO, G.; ZINNO, R Experimental evaluation of thermal effects on the tensile mechanical properties of pultruded GFRP rods. **Applied Composite Materials**, Netherlands, v.4, n.3, p.133-143, 1997.

EMMONS, Peter; VAYSBURD, Alexandre; THOMAS, Jay. Strengthening concrete structures, part I. **Concrete International**, Detroit, ACI, v.20, n.3, p.53-58, Mar. 1998a.

EMMONS, Peter; VAYSBURD, Alexandre; THOMAS, Jay. Strengthening concrete structures, part II. **Concrete International**, Detroit, ACI, v.20, n.4, p.56-60, Apr. 1998b

FAILLACE, Raul Rego. **Proteção contra incêndio no projeto**. 9.ed.Porto Alegre: UFRGS/EE/DECIV, 1989. 56p.

GOUVÊIA, Antonio Maria Claret. **Resistência ao fogo de estruturas**: alternativas técnicas para a redução do custo da proteção passiva. Ouro Preto: UFOP/EM/MCM, LARIN - Laboratório de Análise de Risco em Incêndio, 2000a. 30p. (Relatório Técnico 01/2000).

GOUVÊIA, Antonio Maria Claret. **Engenharia de Incêndio**. Ouro Preto: UFOP/EM/MCM, LARIN - Laboratório de Análise de Risco em Incêndio, 2000b. (Notas de aula).

HE, Jin Hong; PILAKOUTAS, Kypros; WALDRON, Peter. CFRP plate strengthening of RC beams. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL FAULTS AND

REPAIR, 7, 1997, Edinburgh. **Proceedings ...** Edinburgh: Engineering Technics Press, 1997. 3v. v.2, p.119-127.

HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Manual prático para reparo e reforço de estruturas de concreto.** 2.ed. São Paulo: Pini, 1992. 213p.

HOLLAWAY, L. C. **Polymer composites for civil and structural engineering.** Cambridge: Blackie Academic & Professional, 1993.

HOLLAWAY, L. C.; LEEMING, M. B. **Strengthening of reinforced concrete structures using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering.** Cambridge: Woodhead Publishing, 1999. 327p.

HUTCHINSON, R.; ABDELRAHMAN, A; RISKALLA, S. Shear strengthening using frp sheets for a highway bridge in Manitoba, Canada. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL FAULTS AND REPAIR, 7, 1997, Edinburgh. **Proceedings ...** Edinburgh: Engineering Technics Press, 1997. 3v. v.1, p.263-269.

JANG, Bor. **Advanced polymer composites.** 2.ed. Ohio, USA: ASM International, 1996. 297p.

JUVANDES, Luís Felipe Pereira. **Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP.** Lisboa, 1999. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.

KERBER, João Manoel. **Manual de tática de combate ao fogo.** Porto Alegre: Estado do Rio Grande do Sul, Brigada Militar, Quartel do Comando Geral, Estado Maior, PM 3, 1979. 53p.

KERN, Andréa Parisi. **Estudo da viabilidade da incorporação de resíduos de contrafortes de calçados em matriz de gesso para uso como material de construção civil.** Porto Alegre, 1999. Dissertação de Mestrado em Engenharia - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

KOGA, Masajirou; OHTSU, Masayasu. A retrofitting system for concrete structures with CFRP sheet and CFRP strand – it's basic mechanism and applications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL FAULTS AND REPAIR, 7, 1997, Edinburgh. **Proceedings ...** Edinburgh: Engineering Technics Press, 1997. 3v. v.2, p.63-67.

MANUAL DE FUNDAMENTOS DE BOMBEIROS. [s.n.t.] cap.1: Comportamento do fogo, p. 3-20.

MCKENNA, J. K.; ERKI, M. A. Strengthening of reinforced concrete flexural members using externally applied steel plates and fibre composite sheets - a survey. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v.21, p.16-24, 1994.

MEIER, Urs. Repair using advanced composites. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE CONSTRUCTION – CONVENTIONAL AND INNOVATIVE, 1997, Innsbruck. **Conference report ...** Zurich: IABSE: ETH\_Hönggerberb, 1997. p.113-124.

MEHTA, Provindar Kumar; MONTEIRO, Paulo Melaragno. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

NANNI, Antonio. Concrete repair with externally bonded FRP reinforcement. **Concrete International**, Detroit, ACI, v.17, n.6, p.22-26, June. 1995.

NEUBAUER, Uwe; ROSTÁSY, Ferdinand. Strengthening of bridges with externally bonded CFRP plates. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL FAULTS AND REPAIR, 7, 1997, Edinburgh. **Proceedings ...** Edinburgh: Engineering Technics Press, 1997a. 3v. v.1, p.191-196.

NEUBAUER, Uwe; ROSTÁSY, Ferdinand. Bond behaviour of CFRP-laminates for the strengthening of concrete members. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE CONSTRUCTION – CONVENTIONAL AND INNOVATIVE, 1997, Innsbruck. **Conference report...** Zurich:IABSE: ETH\_Hönggerberg, 1997b, p.717-722.

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

NORRIS, Tom; SAADATMANESH, Hamid; EHSANI, Mohammad. Shear and flexural strengthening of R/C beams with carbon fiber sheets. **Journal of Structural Engineering**, New York, ASCE, v.123, n.7, p.903-911, July 1997.

PETRUCCI, Eladio Requião. **Materiais de construção**. 6.ed. Porto Alegre: Globo, 1982. p.319-322.

REZENDE, Mirabel. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.10, n.2, p.E4-E10, 2000.

RIBEIRO, José Luis Duarte. **Projeto de experimentos na otimização de produtos e processos**. Porto Alegre: UFRGS/PPGEP,1996. 100p. (Notas de aula).

RITCHIE, P. A.; THOMAS, D. A.; LU, L.; CONNELLY, G. M. External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastics. **ACI Structural Journal**, Detroit, v.88, n.4, p.490-500, July-Ago 1991.

ROBERY, Peter; INNES, Craig. Carbon fibre strengthening of concrete structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL FAULTS AND REPAIR, 7, 1997, Edinburgh. **Proceedings ...** Edinburgh: Engineering Technics Press, 1997. 3v. v.1, p.197-208.

RUIZ, Marcos Paschoal. **Proteção contra incêndio no planejamento de edificações**. São Paulo, 1976. Monografia de Especialização, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SCHWEGLER, Gregor. Earthquake resistance of masonry structures strengthened with CFRP-sheets. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE CONSTRUCTION – CONVENTIONAL AND INNOVATIVE, 1997, Innsbruck. **Conference report ...** Zurich: IABSE: ETH\_Hönggerberb, 1997. p.735-740.

SHAPIRA, Aviad; BANK, Lawrence. Constructability and economics of FRP reinforcement cages for concrete beams. **Journal of Composites for Construction**, v.1, n.3, Aug. 1997.

SILVA, Valdir Pignatta. Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações. **Construção Metálica – Publicação Especializada da Associação Brasileira da Construção Metálica**, v.10, n.43, p.27-34, 4º bim.2000.

SOUZA, Vicente Custódio; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

THOMAZ, Ercio. **Trincas em edifícios; causas, prevenção e recuperação**. São Paulo: Pini / EPUSP / IPT, 1989.

TRIANAFILLOU, Thanasis. Behaviour of masonry structures strengthened with composites. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE CONSTRUCTION – CONVENTIONAL AND INNOVATIVE, 1997, Innsbruck. **Conference report...** Zurich:IABSE: ETH\_Hönggerberg, 1997, p.729-734.

VERÇOZA, Enio José. **Materiais de construção**. 3.ed. Porto Alegre: Sagra, 1987. p.7-10.

## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard practice for determining permanent effect of heat on plastics:** ASTM D794. Pennsylvania, 1993.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for effect of impact on bonding of sprayed fire-resistive material applied to structural members:** ASTM E760. Pennsylvania, 1992.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test methods for effect of moisture and temperature on adhesive bonds.** ASTM D1151. Pennsylvania, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo:** NBR 5628. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos:** NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto:** NBR 5738. Rio de Janeiro, 1994b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Paredes e divisórias sem função estrutural - Determinação da resistência ao fogo:** NBR 10636. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e execução de obras de concreto armado:** NBR 6118. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Proteção contra incêndio por chuveiro automático -Procedimento:** NBR 10897. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Proteção contra incêndio por sistema de chuveiros automáticos para áreas de armazenamento em geral - Procedimentos:** NBR 13792. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Saídas de emergência em edifícios - Procedimentos:** NBR 9077. Rio de Janeiro, 1993.

BONILHA, Juliana Zart. **Textos didáticos de engenharia;** instruções para apresentação de trabalhos. Porto Alegre: UFRGS, Escola de Engenharia, Biblioteca, 1996. 45p.

CUNHA, Albino Joaquim; LIMA, Néelson Araújo; SOUZA, Vicente Custódio. **Acidentes estruturais na construção civil.** São Paulo: Pini, 1996. vol.1.

DEURING, Martin. **Brandversuche an nachträglich vertärkten trägern aus beton.** Frühjahr: EMPA, 1994. (EMPA nr. 148'795).

KLEIN, Dario Lauro. **Teoria de modelos.** Porto Alegre: UFRGS/CPGEC, 1988. 22p. (Cadernos de Engenharia, 26).

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA. Biblioteca Central Ir. José Otão. **Modelo recomendado pela Biblioteca Central para referências bibliográficas.** Capturado em 01 ago. 2000. Online. Disponível na Internet <http://www.pucrs.br/biblioteca/modelo.html>.

ROSSO, Teodoro. Comportamento do concreto ao fogo (conclusão). **Incêndio - Revista Brasileira de Proteção Contra Incêndio**, v.3, n.9, p.18-23, 1981.

ROSSO, Teodoro. Comportamento do concreto ao fogo. **Incêndio - Revista Brasileira de Proteção Contra Incêndio**, v.2, edição especial, p.24-27, Mar./Abr.1980.

# ANEXO 1

A seguir, encontra-se a matriz experimental que foi ensaiada na etapa principal da pesquisa, utilizada para a avaliação do desempenho de reforços estruturais com tecidos de fibra de carbono quando submetidos a elevadas temperaturas.

Salienta-se que, para cada grupo de variáveis de estudo, foi confeccionado um grupo de quatro modelos, para que os resultados obtidos fossem mais representativos da situação em estudo.

Os modelos foram numerados de 1 a 56, representando as situações estudadas em seus diversos níveis. Cada repetição do mesmo grupo de variável de estudo foi representada pelas letras A, B, C e D. Cada célula foi hachurada de acordo com o lote de concretagem a que pertenceu o modelo, numerados de 1 a 8.

## Etapa Principal

QUADRO A1.1 – Matriz experimental do lote I para os modelos não reforçados

		<i>LOTE I - Sem Reforço</i>					
		1A	<i>Referências</i>		1B		
		<i>Temperatura</i>					
<i>Tempo</i>	80°C		160°C		240°C		<i>Proteção</i>
30 min	3A	3B	21A	21B	39A	39B	Nenhuma
60 min	9A	9B	27A	27B	45A	45B	
120 min	15A	15B	33A	33B	51A	51B	
30 min	5A	5B	23A	23B	41A	41B	Argamassa
60 min	11A	11B	29A	29B	47A	47B	
120 min	17A	17B	35A	35B	53A	53B	
30 min	7A	7B	25A	25B	43A	43B	Gesso
60 min	13A	13B	31A	31B	49A	49B	
120 min	19A	19B	37A	37B	55A	55B	
	1	2	<i>Concretagem</i>		3	4	

QUADRO A1.2 – Matriz experimental do lote I para os modelos reforçados

		<i>LOTE I - Com Reforço</i>					
		2A	<i>Referências</i>		2B		
		<i>Temperatura</i>					
<i>Tempo</i>	80°C		160°C		240°C		<i>Proteção</i>
30 min	4A	4B	22A	22B	40A	40B	Nenhuma
60 min	10A	10B	28A	28B	46A	46B	
120 min	16A	16B	34A	34B	52A	52B	
30 min	6A	6B	24A	24B	42A	42B	Argamassa
60 min	12A	12B	30A	30B	48A	48B	
120 min	18A	18B	36A	36B	54A	54B	
30 min	8A	8B	26A	26B	44A	44B	Gesso
60 min	14A	14B	32A	32B	50A	50B	
120 min	20A	20B	38A	38B	56A	56B	
	1	2	<i>Concretagem</i>		3	4	

QUADRO A1.3 – Matriz experimental do lote II para os modelos não reforçados

	<b>LOTE II - Sem Reforço</b>						
	1C	1D	<i>Referências</i>		1C	1D	
	<i>Temperatura</i>						
<i>Tempo</i>	80°C		160°C		240°C		<i>Proteção</i>
30 min	3C	3D	21C	21D	39C	39D	Nenhuma
60 min	9C	9D	27C	27D	45C	45D	
120 min	15C	15D	33C	33D	51C	51D	
30 min	5C	5D	23C	23D	41C	41D	Argamassa
60 min	11C	11D	29C	29D	47C	47D	
120 min	17C	17D	35C	35D	53C	53D	
30 min	7C	7D	25C	25D	43C	43D	Gesso
60 min	13C	13D	31C	31D	49C	49D	
120 min	19C	19D	37C	37D	55C	55D	
	5	6	<i>Concretagem</i>		7	8	

QUADRO A1.4 – Matriz experimental do lote II para os modelos reforçados

	<b>LOTE II - Com Reforço</b>						
	2C	2D	<i>Referências</i>		2C	2D	
	<i>Temperatura</i>						
<i>Tempo</i>	80°C		160°C		240°C		<i>Proteção</i>
30 min	4C	4D	22C	22D	40C	40D	Nenhuma
60 min	10C	10D	28C	28D	46C	46D	
120 min	16C	16D	34C	34D	52C	52D	
30 min	6C	6D	24C	24D	42C	42D	Argamassa
60 min	12C	12D	30C	30D	48C	48D	
120 min	18C	18D	36C	36D	54C	54D	
30 min	8C	8D	26C	26D	44C	44D	Gesso
60 min	14C	14D	32C	32D	50C	50D	
120 min	20C	20D	38C	38D	56C	56D	
	5	6	<i>Concretagem</i>		7	8	

## ANEXO 2

A seguir, encontram-se os resultados dos ensaios realizados nas etapas preliminar, principal e complementar da pesquisa para a avaliação do comportamento de reforços estruturais com tecidos de fibra de carbono quando submetidos a elevadas temperaturas.

Os mesmos foram distribuídos conforme a matriz experimental definida para cada etapa. Estes resultados estão sendo disponibilizados na sua íntegra para que outros pesquisadores possam usá-los como referência ou reanalisá-los com a finalidade de obter conclusões adicionais.

## Estudo Preliminar

TABELA A2.1 – Resistência à tração dos modelos ensaiados no estudo preliminar

Modelo	Temper [°C]	Tempo [h]	Proteção	N° Camadas	Carga [kN]	C. Média [kN]	Ruptura
1	Ambiente	0	Nenhuma	0	2.50	2.53	Flexão
2	Ambiente	0	Nenhuma	0	2.56		Flexão
3	Ambiente	0	Nenhuma	1	6.98	6.98	Cisalham
4	Ambiente	0	Nenhuma	2	6.42	6.42	Cisalham
5	180	11	Nenhuma	0	1.96	1.86	Flexão
6	180	11	Nenhuma	0	2.36		Flexão
7	180	11	Nenhuma	1	6.60	6.60	Cisalham
8	180	11	Nenhuma	2	4.92	4.92	Cisalham
9	410	6	Nenhuma	0	1.52	1.58	Flexão
10	410	6	Nenhuma	0	1.64		Flexão
11	410	6	Nenhuma	1	1.36	1.58	Cisalham
12	410	6	Nenhuma	1	1.80		Cisalham

## Etapa principal

TABELA A2.2 – Resistência característica à compressão das concretagens

Concretagem	1	2	3	4	5	6	7	8
Fck [MPa]	57.08	56.75	57.03	58.36	52.53	50.95	52.88	56.38

TABELA A2.3 – Resistência à tração do lote I para os modelos não reforçados

		<b>LOTE I - Sem Reforço</b>					
		3,375	Referências		3,425		
		Temperatura					
Tempo	80°C	160°C		240°C		Proteção	
30 min	3,385	2,860	3,170	2,645	2,520	2,530	Nenhuma
60 min	3,185	2,890	2,230	2,505	2,995	2,475	
120 min	2,835	3,565	2,845	2,455	2,380	2,210	
30 min	3,205	2,950	3,230	2,985	2,190	2,120	Argamassa
60 min	2,970	2,935	2,300	2,760	2,605	2,635	
120 min	2,905	3,345	2,425	3,155	2,365	2,900	
30 min	3,365	2,470	2,555	2,950	2,460	2,650	Gesso
60 min	3,190	2,965	2,540	2,535	2,240	1,980	
120 min	3,285	3,265	2,195	2,060	2,540	2,675	

TABELA A2.4 – Resistência à tração do lote I para os modelos reforçados

		<b>LOTE I - Com Reforço</b>					
		7,230	<i>Referências</i>		8,305		
		<i>Temperatura</i>					
<i>Tempo</i>	80°C		160°C		240°C		<i>Proteção</i>
30 min	6,930	7,435	6,080	6,635	5,790	5,145	Nenhuma
60 min	6,515	6,705	7,140	7,340	6,310	6,450	
120 min	7,080	6,786	6,200	7,530	5,150	4,565	
30 min	7,040	6,730	6,130	6,490	6,480	6,330	Argamassa
60 min	6,940	6,695	6,000	5,890	7,840	5,450	
120 min	7,350	7,100	7,650	7,385	6,340	9,480	
30 min	5,455	6,835	5,955	5,690	6,585	5,970	Gesso
60 min	7,690	6,345	6,940	5,615	5,420	5,975	
120 min	6,480	6,625	4,895	7,285	7,280	7,695	

TABELA A2.5 – Resistência à tração do lote II para os modelos não reforçados

		<b>LOTE II - Sem Reforço</b>					
		3,375	3,145	<i>Referências</i>		2,935	2,935
		<i>Temperatura</i>					
<i>Tempo</i>	80°C		160°C		240°C		<i>Proteção</i>
30 min	2,185	2,670	2,290	1,890	2,660	2,680	Nenhuma
60 min	2,480	2,860	2,605	3,055	3,370	3,030	
120 min	2,730	2,100	3,050	3,290	2,450	3,150	
30 min	2,255	2,855	1,505	2,290	2,875	2,580	Argamassa
60 min	2,955	- - -	3,370	3,045	3,320	2,915	
120 min	2,445	2,355	2,585	2,605	3,165	2,410	
30 min	2,340	2,650	2,505	2,455	2,585	2,525	Gesso
60 min	2,825	2,790	2,750	2,730	2,220	2,850	
120 min	2,610	2,400	3,255	2,420	2,705	2,845	

TABELA A2.6 – Resistência à tração do lote II para os modelos reforçados

		<b>LOTE II - Com Reforço</b>					
		7,88	9,35	<i>Referências</i>		7,79	8,215
		<i>Temperatura</i>					
<i>Tempo</i>	80°C		160°C		240°C		<i>Proteção</i>
30 min	7,265	7,055	5,895	6,080	4,645	6,935	Nenhuma
60 min	7,835	7,565	6,835	6,380	4,345	4,075	
120 min	7,250	5,875	7,450	9,115	4,800	7,180	
30 min	6,735	5,920	6,590	6,900	6,735	7,285	Argamassa
60 min	5,455	6,585	6,280	6,475	6,305	7,610	
120 min	8,355	5,640	5,880	6,380	6,750	7,975	
30 min	6,495	5,920	5,610	5,780	6,580	6,235	Gesso
60 min	6,500	7,155	7,185	6,605	5,365	6,350	
120 min	7,130	6,850	8,255	5,760	6,100	5,785	

## Estudo Complementar

TABELA A2.7 – Resistência à tração dos modelos ensaiados no estudo complementar

Modelo	Temper [°C]	Tempo [h]	Proteção	N° Camadas	Carga [kN]	C. Média [kN]	Obs.
T1	Ambiente	120	Nenhuma	0	3,43	3,05	
T2	Ambiente	120	Nenhuma	0	3,03		
T3	Ambiente	120	Nenhuma	0	2,70		
T5	Ambiente	120	Nenhuma	1	7,93	8,81	
T6	Ambiente	120	Nenhuma	1	9,34		
T7	Ambiente	120	Nenhuma	1	9,18		
T8	Ambiente	120	Nenhuma	1	8,82		
11	240	120	Nenhuma	0	2,51	2,64	
12	240	120	Nenhuma	0	---		Perdido
22	240	120	Nenhuma	0	2,77		
9	240	120	Nenhuma	1	2,87	3,60	
10	240	120	Nenhuma	1	3,90		
21	240	120	Nenhuma	1	4,04		
3	240	120	Argamassa	0	2,60	2,39	
4	240	120	Argamassa	0	2,57		
15	240	120	Argamassa	0	2,05		
16	240	120	Argamassa	0	2,36		
1	240	120	Argamassa	1	7,83	7,00	
2	240	120	Argamassa	1	5,59		
13	240	120	Argamassa	1	7,11		
14	240	120	Argamassa	1	7,50		
7	240	120	Gesso	0	2,10	2,64	
8	240	120	Gesso	0	3,51		
19	240	120	Gesso	0	2,31		
20	240	120	Gesso	0	---		Perdido
5	240	120	Gesso	1	7,80	6,85	
6	240	120	Gesso	1	7,24		
17	240	120	Gesso	1	5,95		
18	240	120	Gesso	1	6,43		