

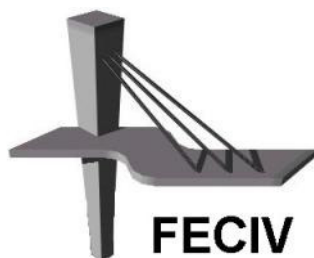
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Nº 094

**ANÁLISE DA LIGAÇÃO COM FILME TERMO-
ATIVADO OU FORMULAÇÃO EPÓXI DO
REFORÇO À FLEXÃO DE PRFC EM VIGAS DE
CONCRETO ARMADO COM VARIAÇÃO DE
TEMPERATURA UTILIZANDO CONFIABILIDADE
ESTRUTURAL**

THIAGO AUGUSTO SILVA RIBEIRO

UBERLÂNDIA, 13 DE MARÇO DE 2012



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Thiago Augusto Silva Ribeiro

**ANÁLISE DA LIGAÇÃO COM FILME TERMO-
ATIVADO OU FORMULAÇÃO EPÓXI DO REFORÇO À
FLEXÃO DE PRFC EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO
COM VARIAÇÃO DE TEMPERATURA UTILIZANDO
CONFIABILIDADE ESTRUTURAL**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de **Mestre em
Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Turibio José da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos

Uberlândia, 13 de março de 2012



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA Nº: 094/2012

CANDIDATO: Thiago Augusto Silva Ribeiro

ORIENTADOR: Prof. Dr. Turibio José da Silva

TÍTULO: "Análise da ligação com filme termo-adesivo ou resina epóxi do reforço à flexão de PRFC em vigas de concreto armado com variação de temperatura utilizando confiabilidade estrutural"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Estruturas e Construção Civil

LINHA DE PESQUISA: Estruturas

DATA DA DEFESA: 13 de março de 2012

LOCAL: Sala de projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa

HORÁRIO DE INÍCIO E TÉRMINO DA DEFESA: 09:30 - 12:30

Após avaliação do documento escrito, da exposição oral e das respostas às arguições, os membros da Banca Examinadora decidem que o candidato foi:

☒ APROVADO

☐ REPROVADO

OBS:

Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que está assinada pelos membros da Banca:

Professor Orientador: Prof. Dr. Turibio José da Silva – FECIV/UFU

Membro externo: Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho – UFRGS

Membro: Prof. Dr. Jesiel Cunha – FECIV/UFU

Uberlândia, 13 de MARÇO de 2012.

*A minha mãe, Coraci, que me ensinou a encontrar
estado limite das minhas capacidades, que é como
reduzo a probabilidade de falha na minha vida.*



AGRADECIMENTOS

A Deus, que me nutre sempre de força e sabedoria para perseverar em todos os momentos da minha vida.

À minha mãe Coraci, que dedica toda sua vida em prol da felicidade de seus filhos, me deu a oportunidade de estudar e ter uma formação. *Mãe que mais esta vitória seja uma recompensa irrefutável pelo seu esforço para comigo!*

Ao meu pai Joel, “sempre presente em todos os momentos da minha vida”.

À minha irmã Danila, por sempre me incentivar a conquistar meus objetivos.

À minha namorada Márcia, que sempre esteve ao meu lado e compreendeu minha abdicação durante parte do período de desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço muito ao meu amigo e orientador, Prof. Turibio, pela confiança e principalmente pela oportunidade em desenvolver uma pesquisa de tal amplitude e responsabilidade, pelas idéias e empenho incondicional no desenvolvimento desta dissertação. O Prof. Turibio sempre esteve ao meu lado, ajudando em tudo aquilo que foi necessário, colocando seu nome à frente e lutou com todas suas forças para o alcance do objetivo final. *Professor, reconheço tudo aquilo que o senhor fez por mim. Muito Obrigado por me orientar desde a graduação!*

Ao Prof. Antonio Carlos, pelas suas sugestões que foram essenciais para a realização dos ensaios.

Aos Profs. Jesiel Cunha, Paulo Cesar Agostinho e Luiz Carlos Pinto Silva Filho pelas leituras atentas dos originais, inestimável ajuda na correção do texto e contribuições indispensáveis referentes a este trabalho.

Agradeço a todos os meus amigos pela força durante todo este período.

Aos meus colegas da Faculdade de Engenharia Civil, que contribuíram de forma direta e indireta para a realização deste trabalho.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Civil, pelos ensinamentos, atenção e dedicação.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Civil, que forneceram o apoio necessário à realização da pesquisa.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento concedido através do edital de demanda universal 01/2008 (TEC-APQ-01106-08), à TESA pela doação de material necessário a realização desta pesquisa e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado.

Ribeiro, T. A. S. Análise da ligação com filme termo-ativado ou formulação epóxi do reforço à flexão de PRFC em vigas de concreto armado com variação de temperatura utilizando confiabilidade estrutural. 130 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

RESUMO

A confiabilidade estrutural tem como objetivo a avaliação da segurança de uma estrutura, ou a avaliação da probabilidade de que a mesma não falhe em atender aos objetivos para os quais foi projetada, durante a sua vida útil. O objetivo da presente pesquisa foi analisar o comportamento estrutural de ruptura prematura de vigas de concreto armado, reforçadas com polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC), cuja adesão entre o reforço e o substrato (concreto) se estabelece com formulação epóxi ou por meio de um filme termo-ativo fenólico. A análise foi efetuada por meio da verificação da capacidade de suporte de carga, da evolução de deformações e o pela avaliação comportamento de ambas as técnicas de adesão. Foram utilizadas 33 vigas de dimensões de 20 cm × 30 cm × 200 cm. O programa experimental constou de uma primeira fase em temperatura ambiente temperaturas de 25°C e a segunda em atmosfera aquecida com 80°C e 120°C. Para a análise da confiabilidade estrutural, foi realizada a caracterização das variáveis de geometria: largura, altura e as resistências do aço e concreto utilizados na confecção das vigas. O ensaio das vigas foi realizado com aplicação de flexão a quatro pontos. A análise foi realizada utilizando-se o método de confiabilidade estrutural “*First Order Reliability Moment*” (FORM). Conclui-se que as vigas com uma camada de PRFC aderida com formulação epóxi ensaiadas à temperatura ambiente e as ensaiadas a 80°C apresentaram os maiores índices de confiabilidade.

Palavras-chave: confiabilidade estrutural, vigas de concreto, descolamento de PRFC.

Ribeiro, T. A. S. Analysis of the link with heat-activated film or formulation epoxy CFRP flexural strengthening of reinforced concrete beams with temperature variation, using structural reliability. 130 pp. MSc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2012.

ABSTRACT

The structural reliability is aimed at assessing the safety of a structure, or evaluation of the probability that it does not fail to meet the objectives for which it was designed during his lifetime. The aim of this study was to analyze the structural behavior of premature rupture of concrete beams reinforced with polymer reinforced with carbon fibers (CFRP), whose adhesion between the reinforcement and the substrate (concrete) is established with epoxy formulation or through a thermo-active phenolic film. The analysis was done by checking the load carrying capacity, changes in deformation behavior and the evaluation of both techniques adhesion. Were used beams 33 of dimensions 20 cm × 30 cm × 200 cm. The experimental program consisted of a first phase at room temperature 25 ° C and the second in an atmosphere heated to 80 ° C and 120 ° C. For the analysis of structural reliability, we performed the characterization of variable geometry: width, height and the resistance of steel and concrete used in the fabrication of the beams. The test of the beams was performed using a four point bending. The analysis was performed using the method of structural reliability "First Order Reliability Moment" (FORM). It is concluded that the beams with a layer of CFRP bonded epoxy formulation was tested at room temperature and tested at 80 ° C showed the highest levels of reliability.

Keywords: structural reliability, concrete beams, CFRP decoupling

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

SÍMBOLOS

f_{ck}	- resistência característica a compressão do concreto
f_Q	- função densidade de probabilidade da solicitação
f_R	- função densidade de probabilidade da resistência
F_R	- função de distribuição acumulada da resistência
R_c	- resistência característica
E	- módulo de elasticidade
L	- comprimento
F_c	- força de compressão axial
A	- área da seção transversal da barra
M_x e M_y	- momento com relação ao eixo x e y respectivamente
M_{ax} e M_{ay}	- corresponde ao momento admissível em relação ao eixo x e y.
σ	- desvio padrão
μ_x	- média da variável aleatória x
μ	- média da <i>f.d.p.</i> log-normal
R	- variável aleatória resistência
S	- variável aleatória solicitação
$G(U)$	- função de falha da variável aleatória U
P_f	- probabilidade de falha
β	- índice de confiabilidade
U	- variável aleatória com <i>f.d.p.</i> qualquer
V	- variável aleatória com <i>f.d.p.</i> normal estaticamente independente

ABREVIATURAS

COV - coeficiente de variação ou dispersão

COV_R - covariância da resistência

COV_Q - covariância da carga

SIGLAS

$FORM$ - Confiabilidade do Momento de Primeira Ordem (*First Order Reliability Moment*)

$PRFC$ - Polímero Reforçado com Fibras de Carbono

NBR - Norma Brasileira Registrada

$f.d.p.$ - função densidade de probabilidade

$f.d.a$ - função de distribuição acumulada

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	13
1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA	13
1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	15
1.3 OBJETIVOS	18
1.4 DELIMITAÇÃO DO TEMA	18
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
 CAPÍTULO 2 REFORÇO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM PRFC . 21	
2.1 INTRODUÇÃO.....	21
2.2 APLICAÇÃO DE PRFC COMO REFORÇO À FLEXÃO	26
2.3 MATERIAIS COMPOSTOS	29
2.3.1 Matriz	30
2.3.2 Fibras de reforço.....	33
2.3.3 Polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC).....	35
2.3.4 Adesivos	38
2.4 ADERÊNCIA	39
2.4.1 Formulação epóxi	40
2.4.2 Filme termo-ativado fenólico	42
2.5 AQUECIMENTO	43
 CAPÍTULO 3 INTRODUÇÃO À CONFIABILIDADE ESTRUTURAL	47
3.1 INTRODUÇÃO.....	47
3.2 VARIÁVEIS ALEATÓRIAS	48
3.3 DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE.....	50
3.4 AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE.....	52

3.5 MÉTODOS ANALÍTICOS PARA A AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE ESTRUTURAL	55
3.6 MÉTODO ANALÍTICO FORM	56
CAPÍTULO 4 MATERIAIS E PREPARAÇÃO DAS VIGAS.....	63
4.1 INTRODUÇÃO.....	63
4.2 VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS COM PRFC	64
4.2.1 Concreto	64
4.2.2 Fôrmas	65
4.2.3 Aplicação, adensamento e cura	66
4.2.4 Aço	67
4.2.5 Composto de PRFC	68
4.2.7 Adesivo à base de formulação epóxi	69
4.2.7 Filme termo-ativado fenólico	70
CAPÍTULO 5 PROGRAMA EXPERIMENTAL	73
5.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	73
5.2 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS	74
5.3 PROCEDIMENTO PADRÃO PARA REFORÇO DAS VIGAS COM PRFC	75
5.3.1 PRFC aderido com adesivo à base de formulação epóxi.....	76
5.3.2 PRFC aderido com filme termo-ativado.....	77
5.4 ENSAIOS DAS VIGAS	78
CAPÍTULO 6 RESULTADOS E ANÁLISES	87
6.1 AVALIAÇÕES DAS CARGAS E MODO DE DESCOLAMENTO.....	87
6.1.2 Descolamento do PRFC nos ensaios da primeira etapa	89
6.1.3 Descolamento do PRFC nos ensaios da segunda etapa.....	90
6.1.4 Modos de rupturas	92
6.2 EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE CONFIABILIDADE	98
6.2.1 Equação do estado limite.....	98
6.3 RESULTADOS DA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE	104
6.3.1 Rupturas das vigas da primeira etapa	104
6.3.2 Descolamento das lâminas de PRFC das vigas da primeira etapa	108

6.3.3 Ruptura das vigas da segunda etapa	109
6.3.4. Descolamento das lâminas de PRFC das vigas da segunda etapa.....	114
6.3.5 Comparação dos resultados das vigas reforçadas.....	116

CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

.....	119
-------	------------

7.1 CONCLUSÕES	119
7.1.1 Conclusões gerais	119
7.1.2 Conclusões da primeira etapa.....	120
7.1.3 Conclusões sobre a segunda etapa.....	121
7.1.4 Considerações finais	122
7.3 RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	123

REFERÊNCIAS	125
--------------------------	------------

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

Os motivos que podem levar à necessidade de execução de trabalhos de recuperação e reforço em estruturas de concreto armado podem ser vários. Dentre eles, inclui-se a 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 e o aumento da capacidade portante da estrutura em função de modificações no uso da edificação em relação ao originalmente projetado (SOUZA E RIPPER, 1998).

A execução de reforços estruturais tornou-se uma alternativa empregada em grande escala na reabilitação de estruturas que apresentem manifestações patológicas, pois evita demolições desnecessárias e reduz o custo final do serviço.

Um dos problemas críticos deste processo é que as soluções de reforço adotadas, em alguns casos, consistem em técnicas recentes, ainda não completamente estudadas. Portanto, a experimentação de técnicas ou materiais de reforço é relevante para o avanço tecnológico.

Também é vital para a segurança de uma estrutura, entender o comportamento dos materiais frente a sinistros. O concreto armado já tem bem caracterizado o seu comportamento frente a altas temperaturas. A experimentação dos materiais de reforço a

usar em situações onde as peças estiverem sujeitas a aquecimento, resulta em informações preciosas para a decisão do tipo mais apropriado.

Dentre as técnicas mais utilizadas para reforço de estruturas de concreto, encontra-se aquela que utiliza materiais composto, em especial os PRFC (polímeros reforçado com fibra de carbono) que são formados por uma fase contínua polimérica (matriz) reforçada por uma fase descontínua (fibras), as quais se agregam físico-quimicamente após um processo de cura.

A seleção de um sistema de PRFC envolve, além da definição do material composto, a seleção de um agente adesivo responsável que dará aderência ao elemento de concreto reforçado. É extremamente importante estudar estes adesivos, buscando entender e otimizar seu comportamento estrutural, sob as mais variadas condições ambientais a que possam estar expostos.

Projetistas se confrontam, em algumas circunstâncias, com condicionantes de projetos que limitam profundamente a solução estrutural e restringem a natureza dos materiais a eleger. A utilização dos materiais tradicionais para adesão de reforço, como polímeros à base de formulação epóxi, pode influenciar a durabilidade estrutural ou funcionalidade da edificação em atmosferas aquecidas. Daí é interessante a experimentação dos materiais de reparo com temperaturas superiores às ambientais, para obtenção de dados que orientem a aplicação do reforço em situações que provocam aquecimento, (fornos, caldeiras, ambiente industriais, etc.).

Por outro lado, um projeto estrutural, ou qualquer intervenção, deve levar em consideração as incertezas inerentes às variáveis envolvidas, que podem ser:

- incertezas sobre a intensidade e a distribuição das cargas permanentes e acidentais;
- incertezas sobre as propriedades mecânicas dos materiais;
- incertezas sobre os parâmetros geométricos da estrutura;
- incertezas sobre os modelos de cálculo e de análise estrutural.

Estas incertezas impossibilitam que uma estrutura apresente segurança absoluta, pois uma determinada combinação de valores das variáveis pode resultar numa condição de falha, visto que sempre haverá uma probabilidade não-nula de a estrutura desempenhar um comportamento não apropriado durante sua vida útil. A confiabilidade mede a probabilidade da estrutura não violar um determinado estado limite e em termos estatísticos é definida pelo complemento da probabilidade de falha.

O conceito de que a verificação da segurança estrutural deve ser estabelecida através de análises probabilísticas é recente. A análise de confiabilidade estrutural tem como objetivo a avaliação da segurança de uma estrutura, ou a avaliação da probabilidade de que a mesma não falhe em atender aos objetivos para os quais ela foi projetada durante a sua vida útil. Não existe uma estrutura 100% confiável, porém o risco de falha deve estar dentro de margens aceitáveis de segurança.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

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 e 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 trabalho vem de encontro com uma preocupação atual, tendo em vista que várias técnicas 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 as suas eficácias em todas as situações que se fizerem necessárias.

Diversas pesquisas indicam uma alternativa na substituição do adesivo a base de epóxi por um adesivo termo-ativado, particularmente usado para a colagem de elemento em placas

de micro-circuitos da engenharia eletrônica. A fibra de carbono é normalmente utilizada fixada no substrato por adesivo epóxi, ou seja, como elemento de reforço resistente ao descolamento da fibra. Na área da construção civil, os materiais compostos 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 dos polímeros reforçados com fibra de carbono – PRFC há algumas incertezas referentes ao desempenho do adesivo à base de formulação epóxi do reforço em determinadas situações. De acordo com a literatura corrente, a situação mais desfavorável para a integridade do mesmo seria a exposição do adesivo a atmosferas aquecidas, fato que pode ocasionar a degradação do material.

Isto é particularmente importante em regiões quentes, ou em empreendimentos industriais que aumentam drasticamente a temperatura do ambiente, como caldeiras, grandes fornos siderúrgicos e termoelétricas, a estrutura e outros elementos da construção absorvem grandes quantidades de calor nestes locais. A temperatura pode alcançar facilmente 40 °C em regiões tropicais e em torno de 120 °C em indústrias. O calor gerado afeta os materiais, provocando a perda da função de alguns deles, deformação e perda de resistência de outros (NANNI, 1993).

Durante uma exposição prolongada às atmosferas aquecidas, por exemplo, pode ocorrer uma perda significativa da resistência do concreto, pois a estrutura e outros elementos da construção absorvem calor.

As formulações epóxi, em especial, apresentam um desempenho decrescente em atmosferas aquecidas, o adesivo epóxi começa a sofrer efeitos de temperaturas a partir de 80 °C. Em condições extremas, a adesão pode comprometer a efetividade de técnicas de reforço com elementos compostos onde um dos constituintes é o adesivo epóxi, pois a possível perda de adesão e a conseqüente redução na capacidade resistente poderiam levar a perda do reforço e ao colapso da estrutura (CAMPAGNOLO, CAMPOS FILHO, SILVA FILHO, 1997).

As dúvidas existentes sobre o desempenho de formulações à base de resina epóxi frente as atmosferas aquecidas justificam o desenvolvimento da presente pesquisa, visto que os conhecimentos nesta situação específica são extremamente escassos, gerando uma carência de referências relacionadas ao assunto, conforme será enfatizado.

Segundo a ACI 440.2R-08 (2008), nos procedimentos de dimensionamento de vigas reforçadas as seguintes hipóteses básicas são consideradas: até a ruptura, as seções transversais permanecem planas (hipótese de Bernoulli); o encurtamento de ruptura do concreto é 3,5‰; o alongamento máximo permitido para a armadura de tração é 10‰; é desprezada a resistência à tração do concreto; existe aderência perfeita entre o aço e o concreto; e por ultimo uma questão preocupante adotada e ainda não comprovada cientificamente que “existe aderência perfeita entre o reforço e a superfície de concreto”.

A aderência é necessária para transferir as forças do concreto para o material composto de PRFC, portanto, os modos de ruptura associados à falta de aderência devem ser verificados. A falha da aderência implica na perda completa da ação conjunta entre o reforço e o concreto, comprometendo a estabilidade do elemento estrutural. É indispensável a realização de ensaios experimentais de aderência, com objetivo de proporcionar uma melhor compreensão dos parâmetros intervenientes no mecanismo de transferência de esforços entre os materiais envolvidos nesta técnica de reforço.

De acordo com Meier (1995), 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.

A pesquisa com utilização da confiabilidade estrutural em vigas submetidas a reforço e a variação da temperatura durante o ensaio contempla os principais problemas no âmbito da segurança de vigas com insuficiência de capacidade portante.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa é analisar, utilizando técnicas de confiabilidade, o comportamento estrutural de vigas de concreto armado, submetidas à temperatura ambientais elevadas (até 120 °C), reforçadas com polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC), cuja adesão entre o reforço e o substrato (concreto) ocorre com formulação epóxi ou por meio de um filme termo-ativo de base fenólica.

Trata-se de um dos poucos trabalhos desta natureza, pois verifica teoricamente e com métodos de confiabilidade estrutural, o desempenho da adesão do PRFC por meio de um filme termo-ativado.

Para atingir o objetivo proposto, a metodologia empregada neste trabalho envolveu comparar vigas com a mesma seção transversal e mesmo carregamento, alterando o tipo de adesão (formulação epóxi ou filme termo-ativado fenólico), o número de camadas de reforço (ausência, uma ou duas) e temperatura de realização dos ensaios (25 °C, 80 °C ou 120 °C). O comportamento, expresso em termos da resistência ao descolamento do PRFC nas diversas temperaturas de exposição, foi representado pela probabilidade de falha.

1.4 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O estudo relativo à utilização de confiabilidade estrutural limita-se à análise do desempenho da ligação com filme termo-ativado fenólico ou formulação epóxi do reforço à flexão de PRFC em vigas de concreto armado ensaiadas à flexão a quatro pontos em temperatura ambiente e em situações que assemelham à atmosfera aquecida, projetadas para que ocorra ruptura prematura na ligação entre concreto e o reforço.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho se inicia com a introdução, justificativa e objetivos, seguido de noções sobre confiabilidade estrutural, da revisão de diversos trabalhos existentes, nacionais e internacionais.

No Capítulo 2 apresentam-se informações referentes a materiais compostos. O mesmo traz informações do reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono, com enfoque em vigas.

No Capítulo 3 fez-se a explanação dos métodos analíticos para a avaliação da confiabilidade estrutural. Apresenta-se o método analítico FORM (*First Order Reliability Method*), utilizado para a avaliação da confiabilidade da estrutura em estudo e apresenta-se um passo a passo para aplicação do método, especificamente para este trabalho.

O Capítulo 4 apresenta os procedimentos adotados para a confecção das vigas de concreto armado, aplicação do reforço com PRFC, ou seja, exposição dos materiais utilizados.

O Capítulo 5 refere-se ao programa experimental desenvolvido. Nele se apresentam os ensaios realizados para adquirir conhecimentos relativos ao desempenho de algumas das variáveis da pesquisa; etapa principal, onde se destaca os parâmetros de controle dos ensaios e as variáveis a serem estudadas na pesquisa.

O Capítulo 6 apresenta uma análise dos resultados obtidos nesta pesquisa. Primeiramente, discutem-se os resultados de uma análise efetuada com os valores obtidos nos ensaios e, em seguida, apresentam-se resultados das probabilidades de falha formuladas para cada grupo de vigas por etapa, tendo-se como base os valores numéricos obtidos nos ensaios.

Finalmente, 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.

CAPÍTULO 2

REFORÇO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM PRFC

2.1 INTRODUÇÃO

No Brasil, assim como em outros países do mundo, o concreto tem um papel de destaque, sendo o principal e mais consumido material de construção. Ao olhar a história da humanidade, principalmente por meio das obras de arquitetura e engenharia, é interessante constatar como as grandes mudanças na forma de construir se devem à descoberta de novos materiais. Pereira e Alencar (2005) ressaltam que, mais do que ícones arquitetônicos, o concreto produziu paisagens urbanas que influenciam e refletem o modo de vida de milhares de cidadãos.

A grande aceitação do concreto como material estrutural adveio da junção do concreto com o aço, o que possibilitou unir a boa resistência à compressão do concreto com a elevada resistência à tração do aço. O trabalho conjunto do concreto armado possibilita boa resistência à flexão, podendo ser obtidos vãos livres que podem ser majorados quando utilizado concreto protendido (ISAIA, 2005).

Vigas são estruturas amplamente utilizadas na engenharia. Elementos obrigatórios no dimensionamento de estruturas simples ou complexas, as vigas possuem diferentes formas de seção. A viga é geralmente usada no sistema laje-viga-pilar para transferir os esforços

verticais recebidos da laje. Uma viga de concreto armado resiste a carregamentos externos primariamente pela mobilização de momentos fletores e forças cortantes. De modo geral, no projeto de uma viga de concreto armado o dimensionamento à flexão e o deslocamento vertical determinam as dimensões da seção transversal e armadura longitudinal (CAMPAGNOLO *et al*, 1997).

As estruturas de concreto armado, como qualquer outro material construtivo têm desde sua concepção uma vida útil média estimada em função de sua finalidade e da sua utilização em serviço. Essa vida útil média pode ser conseguida e mesmo ampliada, desde que se disponha de uma adequada manutenção preventiva. Assim, a partir do instante em a estrutura apresente alguma anomalia, mesmo que durante a sua construção, deve imediatamente ser analisada sob critérios que permitam estabelecer, sem qualquer dúvida, o grau de segurança e a sobrevida remanescente, e em que condição deverá ser utilizada (MONTEIRO, 2005).

A patologia das estruturas tem como objetivo encontrar explicações técnicas para as anomalias encontradas no comportamento das estruturas, seja durante a sua construção, seja em sua fase serviço, para que se determinem as suas origens e suas conseqüências em relação à segurança e à confiabilidade da obra, permitindo que se tome uma decisão correta e segura quanto à utilização posterior das estruturas. Em função de sua duração residual, definir sobre a conveniência da recuperação, do reforço ou mesmo da demolição pura e simples dos elementos ou da estrutura danificada (MACHADO, 2002).

Na atualidade estruturas de concreto armado freqüentemente necessitam ser reforçadas. A maioria das vezes a necessidade de reforço é decorrente de vícios construtivos em alguma ou em várias fases da execução. Outras vezes a necessidade de reforço é conseqüência da alteração da destinação da estrutura ou da necessidade de adequação a novas condições de carregamento, como pode ser visto no Quadro 1 que representa as situações indicadas (HELENE, 1992).

Necessidade de Reforço em Vigas	Diagnóstico
Sobrecargas não previstas	Crescimento das cargas estáticas.
	Estruturas sujeitas à vibração.
	Mudança na utilização da estrutura.
Mudança na disposição	Remoção de parte da estrutura, como pilares.
	Criação de aberturas não esperadas para tubos.
Melhorias no funcionamento	Diminuição nas deformações.
	Diminuição do efeito de fadiga em armações.
	Interrupções na propagação de fissuras.
Defeito de projeto e/ou execução	Insuficiência de armaduras.
	Área de aço inferior à constante em projeto.
Danos estruturais	Deterioração do concreto.
	Corrosão das armaduras.
	Impactos acidentais.
	Situação de incêndio.

Quadro 1 - Síntese das situações indicadas para a aplicação do Sistema de Reforço Estrutural em vigas.

Fonte: Helene (1992).

Um diagnóstico adequado do problema deve indicar em que etapa do processo teve origem o fenômeno. Uma fissura por ação de momento fletor em vigas tanto pode ter origem num projeto inadequado, quanto na qualidade inferior dos materiais, na resistência inadequada do concreto, quanto na má utilização, com a colocação sobre a viga de cargas superiores às previstas inicialmente (CERQUEIRA, 2000).

No caso de uma fissura em viga por ação de momento fletor, o agente causador é a carga. Se não houver carga não haverá fissura. O aparecimento de fissuras verticais nas vigas pode ser resultado da retração hidráulica da cura ou tem origem nos gradientes térmicos que a peça foi submetida, devido à variações sazonais da temperatura (FERREIRA, 2000).

Segundo Juvandes *et al.* (1996), relativamente às condições estruturais da construção, podem ser projetados dois cenários distintos: o primeiro, a construção será reabilitada, isto é, serão recompostas as condições normais de suporte as quais tinham anteriormente; o segundo, a construção será reforçada, isto é, terá a sua condição de suporte aumentada em relação aquela para a qual tinha sido anteriormente desenvolvida.

Muitas técnicas de reforço estrutural foram desenvolvidas nas últimas décadas, procurando aumentar a capacidade de carga de estruturas de concreto armado. Segundo Fortes e Padaratz (2000), técnicas convencionais, tais como o aumento da seção existente por meio de complementos de concreto ou de peças metálicas, protensão externa e, mais recentemente, a utilização de placas metálicas coladas externamente às vigas de concreto com formulação epóxi.

O desenvolvimento de materiais poliméricos avançados possibilitou a utilização em uma diversificada gama de aplicação industrial. Dentre os materiais poliméricos avançados possíveis de serem utilizados nessas estruturas de concreto armado, destacou-se a alternativa da utilização de sistemas poliméricos estruturados com fibra de carbono. Esses materiais compostos, também conhecidos como polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC), começaram a ser produzidos industrialmente a partir de 1982 (MACHADO, 2002).

Para Monteiro (2005) a reabilitação das estruturas de concreto armado é uma atividade complexa que exige um conhecimento profundo do comportamento dos materiais e das técnicas executivas. Um programa de reabilitação se inicia com o diagnóstico da situação existente, e progride com a seleção de materiais e métodos de intervenção, preparação da área deficiente e aplicação do reforço.

Os problemas patológicos são evolutivos e tendem a se agravar com o passar do tempo. Pode-se afirmar que as correções serão mais duráveis, mais efetivas e mais econômicas quanto mais cedo forem efetuadas. A ilustração mais efetiva dessa afirmação é a chamada “Lei de Sitter”, que mostra os custos crescendo segundo uma progressão geométrica.

Na última década, tem havido grande empenho na procura de materiais com características apropriadas aos novos projetos de engenharia. É cada vez mais importante a aplicação de

materiais resistentes, duráveis, não oxidáveis, pouco deformáveis e capazes de absorver e dissipar energia, sem ocorrência de ruptura frágil. Os materiais compostos, neste contexto, representam um enorme avanço no sentido da otimização dos materiais estruturais (BRITO, 1986).

Os materiais compostos constituídos por fibras imersas em resinas poliméricas vêm ganhando destaque no mercado como uma alternativa técnica vantajosa frente aos materiais de reforço tradicionalmente utilizados. Nota-se uma confiança crescente nas capacidades resistentes destes materiais, expressa na execução de estruturas principais para satélites, naves espaciais, automóveis, barcos etc. (IYER; ANIGOL, 1991).

Neste âmbito, são de assinalar propriedades como a elevada resistência à tração, o baixo peso específico, a resistência à corrosão, a elevada resistência à fadiga, o bom amortecimento ao choque e isolamento eletromagnético. Os produtos de PRFC são anisotrópicos e na sua composição as fibras regem, praticamente, a capacidade resistente do sistema (NANNI, 1993). Os campos principais de intervenção são:

- *Reabilitação*: traduz as situações de recuperação da resistência de estruturas onde esta ficou comprometida, devido a deficiências traduzidas em degradação contínua de elementos (casos de deterioração natural ou por deterioração dos materiais);
- *Reforço*: designação atribuída ao reforço estrutural de elementos para a correção de anomalias, decorrentes de deficiências de projeto ou de construção, e da resistência a cargas adicionais devido a uma nova utilização. Segundo Bank (1993) o reforço de um elemento de concreto pode classificar-se segundo quatro categorias. No Quadro 2 expõem-se estas categorias por meio da distinção dos objetivos e das áreas de intervenção que as representam.

Técnica de reparação		Tipo do reforço	Áreas de investigação
Reforço por Colagem	1	à flexão	pilares (pontes, edifícios), longarinas (pontes), vigas, lajes, chaminés
	2	ao cortante	pilares (pontes, edifícios), longarinas (pontes), vigas, paredes, aberturas
	3	à compressão	pilares (pontes, edifícios)
	4	prevenção de deterioração	chaminés, túneis, postes

Quadro 2 – Classificação de reforço.

Fonte: Bank (1993).

2.2 APLICAÇÃO DE PRFC COMO REFORÇO À FLEXÃO

Existem diversas formas de reforçar uma viga de concreto armado à flexão utilizando PRFC. A viga pode ser reforçada por meio da colagem do sistema PRFC nas regiões tracionadas.

Segundo Garcez (2007) a instalação do composto PRFC necessita de cuidados especiais quanto à preparação da superfície que receberá o reforço. Imperfeições de superfície devem ser regularizadas para evitar concentrações de tensões que podem levar ao descolamento. A superfície deverá estar limpa, isenta de contaminante e a presença de armaduras corroídas deve ser tratada antes da aplicação do reforço.

Reforços com os materiais compostos de fibra de carbono não são afetados pela corrosão eletroquímica e resistem aos efeitos corrosivos de ácidos, álcalis, sais e outros agentes agressivos diferentemente do aço, uma das primeiras aplicações no Brasil está o viaduto Santa Tereza, mostrado na Figura 1. A habilidade de se conduzir a completa operação de reforço em períodos muito curtos de tempo, sem que seja necessário interromper, completamente, a utilização da estrutura, é, sem dúvida alguma, a maior vantagem dos materiais compostos (MACHADO, 2002).

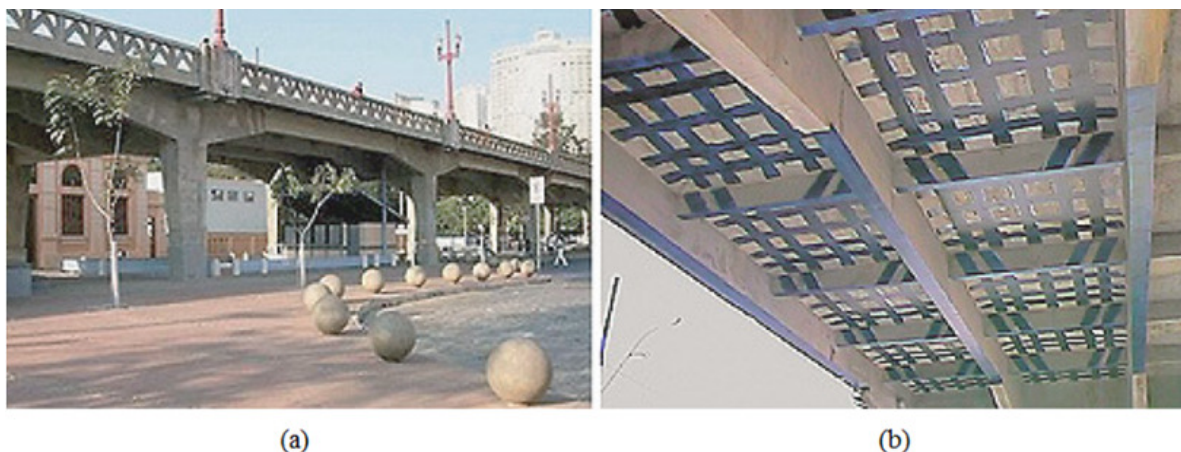


Figura 1 – (a) Viaduto Santa Tereza em Belo Horizonte, (b) reforçado com material composto

Fonte: Machado (2002).

A razão pela qual os reforços constituídos por materiais compostos estão em crescente utilização, deve-se a facilidade de aplicação em áreas de difícil acesso ou locais em que procedimentos usuais de reforço não podem ser utilizados em função de limitações geométricas e a não paralisação das atividades vinculadas à estrutura.

Em vigas de concreto armado as fibras de carbono podem ser utilizadas para absorver os esforços de tração devido aos momentos fletores positivos e negativos, conforme Figura 2, bem como as tensões tangenciais decorrente dos esforços de cisalhamento.

A seguir será apresentada a configuração típica da forma de ocorrência de fissuras. Trata-se de uma representação esquemática.

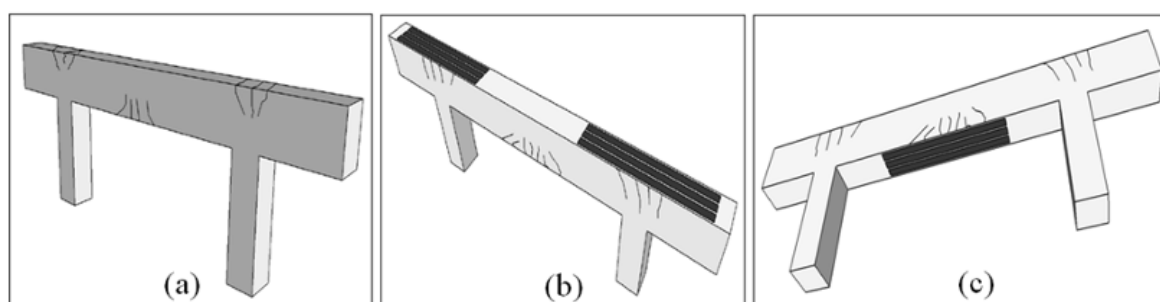


Figura 2 – Em (a) a manifestação típica de fissuras devida à flexão em vigas, (b) e (c) possíveis reforços com lâminas de PRFC

O PRFC é aplicável em todas as peças que necessitam de reforço à flexão e ao cortante. São na maioria das vezes aderidos externamente às estruturas de concreto armado que

reforço. Para que esse tipo de reforço seja eficiente, é condição básica que o substrato de concreto que receberá o reforço esteja íntegro, uma vez que será responsabilidade absorver e transferir os esforços que ocorrerão na interface concreto-PRFC (MACHADO, 2002).

Segundo Fortes e Padaratz (2000) a superfície do concreto deverá sofrer preparações com a utilização de abrasivos, jatos de areia e deverá ser completada com uma limpeza, remoção de poeira, graxas, pinturas e argamassas. No reforço mostrado na Figura 3, exige o recobrimento de mais de uma superfície lateral da peça, será necessário o arredondamento das quinas, para evitar a concentração de tensões na fibra de carbono e eliminar os vazios. Irregularidades superficiais expressivas devem ser corrigidas por meio de preenchimento com argamassa de reparação, compatíveis com as características do concreto base.

As camadas de fibra de carbono destinadas a absorver os esforços de cisalhamento devem ser colocadas após as camadas destinadas a absorver os esforços de flexão, ou seja, as camadas destinadas ao corte envolvem as camadas destinadas à flexão, melhorando com isso as condições de aderência e de transferência de esforços da viga, conforme indicado na Figura 3 (CERQUEIRA, 2000).

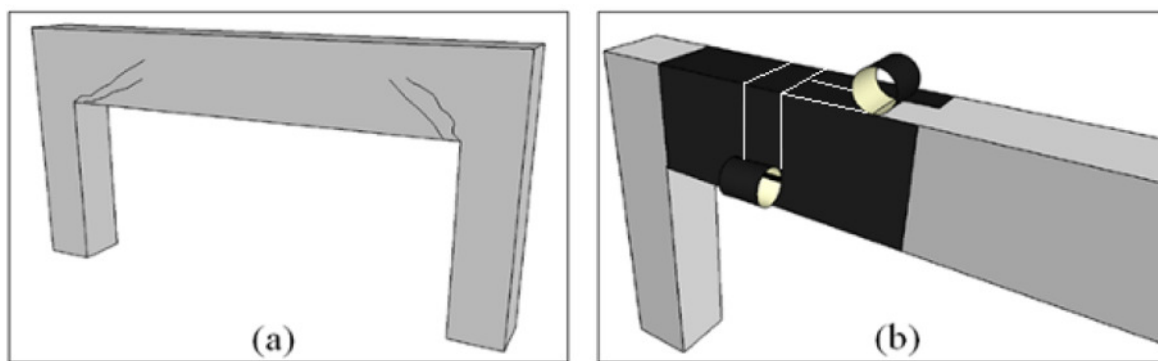


Figura 3 – Em (a) manifestações típicas de fissuras de cisalhamento e em (b) possível reforço com tecido de fibra de carbono colocados nas direções de 0° e 90°

Segundo Garcez (2007) apesar vantagens associadas aos materiais compostos, a técnica de reforço ser relativamente fácil e os resultados obtidos no incremento de capacidade portante, seus estudos experimentais mostraram que a ruptura das estruturas reforçadas freqüentemente acontece por forma prematura, sem o esgotamento da capacidade resistente do PRFC.

2.3 MATERIAIS COMPOSTOS

Os materiais compostos são formados pela união de dois ou mais materiais com naturezas diferentes, resultando em um material com desempenho superior àquele de seus componentes considerados individualmente. O material resultante é constituído de um arranjo de fibras, contínuas ou não, denominadas material resistente e conhecidas como *reforço*, que são envoltas em uma *matriz* de resistência mecânica inferior às fibras.

Segundo Callister (2000) a modernidade requer materiais com propriedades que ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos não podem atender. Hoje, determinados setores da engenharia têm buscado materiais estruturais que tenham baixa densidade, sejam rígidos, resistentes à abrasão, ao impacto e não sofram processos de corrosão. Um material composto, no presente contexto, é um material multifásico que é artificialmente fabricado, e não os que ocorrem de forma naturalmente, como a madeira e os ossos dos seres vivos.

A utilização de materiais compostos data de mais de 5 milênios a.C. De forma artesanal o povo egípcio produzia blocos de argila para serem usados nas alvenarias das construções. Estes blocos eram compostos por reforço em filamentos vegetais de palhas ou capins. A argila responsável pela resistência mecânica a compressão e as fibras vegetais eram responsáveis pelo aumento da resistência à tração dos blocos, além de promoverem a diminuição do peso próprio. A partir da década de 60, o campo de aplicações dos materiais compostos começa a ganhar importância no seu uso devido principalmente ao desenvolvimento de novas fibras, como as de carbono, de boro e de aramida. O setor aeronáutico e espacial foram os grandes incentivadores desses avanços, pois necessitavam de materiais com relações rigidez/peso e resistência/peso altas (MENDONÇA, 2005).

As propriedades dos compostos são função das propriedades das fases constituintes do reforço, de suas concentrações, tamanhos, forma, distribuição e orientação. Materiais compostos reforçados por fibra com excepcionais resistências mecânicas têm sido produzidos e utilizam matrizes de baixas densidades. As características mecânicas de um material composto reforçado com fibra dependem não apenas das propriedades da fibra, mas também do grau no qual uma carga aplicada é transmitida às fibras pela fase matriz.

Importante para a extensão desta transmissão de carga é a magnitude da ligação interfacial, ou seja, a aderência, entre as fases fibra e matriz (BEBER, 1999).

2.3.1 Matriz

As matrizes são as fases contínuas dos materiais compostos e suas principais funções são: interligar as fibras de forma a aglutiná-las; transmitir as cargas mecânicas às fibras; proteger as fibras contra ataques químicos ou danos provenientes durante a manipulação ou desgaste devido ao uso; resistência ao cisalhamento interlaminar quando submetida à flexão, resistência ao cisalhamento no plano, quando submetida à torção e confina as fibras comprimidas protegendo contra flambagem. Além disso, a matriz exerce um papel importante nas propriedades elétricas, químicas e térmicas do composto (BERTHELOT, 1992).

A resina epóxi faz, possui ótimas propriedades mecânicas, baixa retração, boa aderência, boa resistência às até 200°C, alta resistência a meios líquidos corrosivos (Figura 4). O outro grupo de resinas poliméricas são as termoplásticas que podem ser moldadas diversas vezes por aquecimentos e resfriamentos sucessivos (ASKELAND, 1990).

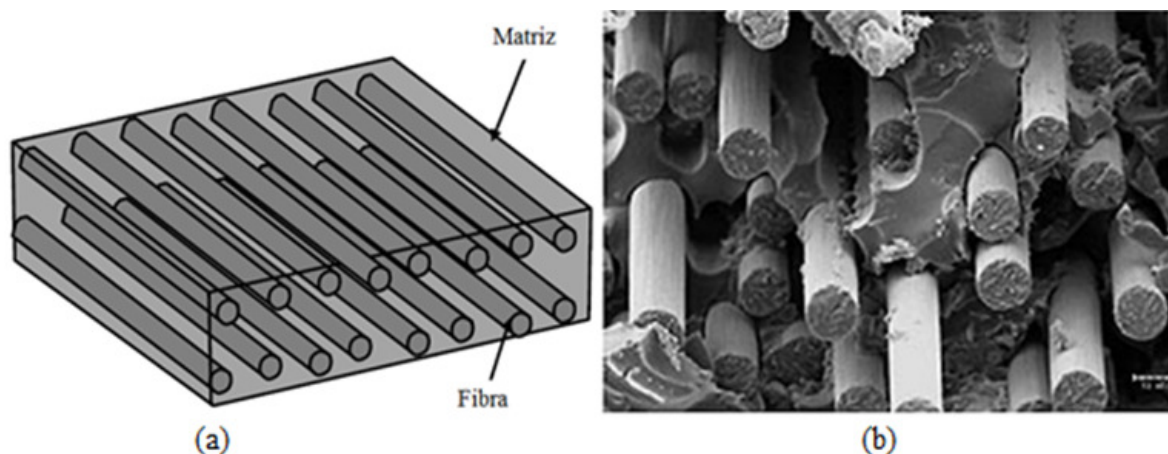


Figura 4 – Em (a) componentes de uma camada, contendo o reforço com fibras envolto por uma matriz e (b) micrografia de PRFC.

Fonte: Machado (2002).

Os materiais compostos são classificados segundo diversos critérios. Do ponto de vista físico e mecânico, está relacionado com o tipo de reforço utilizado na matriz. Os reforços

podem ser distribuídos de maneira regular ou aleatória e serem introduzidos em escala micro, meso e macro. A Figura 5 mostra graficamente as principais classificações.

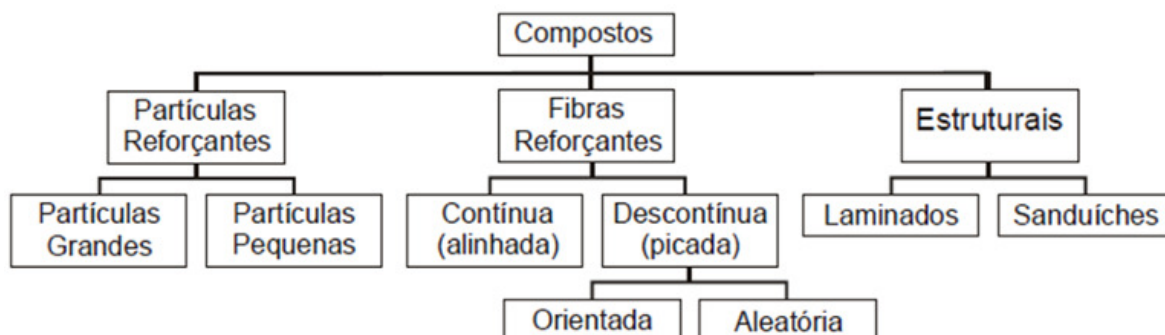


Figura 5 – Esquema de classificação dos materiais compostos
Fonte: Tita (1999).

Brandt (1995) descreveu os compostos em quatro grupos:

- *Compostos com reforço particulados em dispersão*: pequenas partículas são distribuídas aleatoriamente na matriz. Pode ser considerado quase-isotrópico. A matriz pode ser metálica ou polimérica e as partículas são de diferentes origens: pó de sílica, óxido, nitreto, boreto, carboneto etc. O tamanho das partículas é da ordem de micrômetros 10^{-6} m e o volume varia de 1% a 15%, (Figura 6-a);
- *Compostos com reforço de grãos ou flocos*: os grãos possuem diâmetros da ordem de 1µm a 100 mm, sendo o volume acima de 15%. Pode-se citar como exemplo a areia e brita em concretos e argamassas, (Figura 6-b);
- *Compostos com reforço de fibras*: as fibras podem ser curtas ou longas distribuídas uniformemente ou aleatoriamente. Elas tornam o material altamente heterogêneo e anisotrópico. O volume de fibras pode ultrapassar 60%, (Figura 6-c);
- *Compostos estratificados (ou laminados)*: constituídos por várias camadas de reforço de fibras, interligadas entre si e cada camada poderá ocorrer em uma orientação, (Figura 6-d).

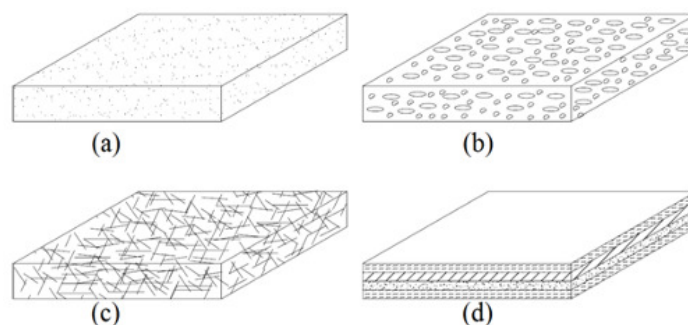


Figura 6 - Representação dos grupos de materiais compostos

Fonte: Brandt (1995)

De acordo com Beber (2003), as propriedades dos materiais compostos reforçados com fibra dependem das propriedades da fibra e da matriz, da proporção de cada uma delas e da orientação das fibras. As fibras podem ser orientadas em qualquer direção para melhorar a resistência e a rigidez onde se deseja. Existe uma grande variedade de configurações para a orientação das fibras, que podem ser divididas em três grandes grupos:

- *Unidirecional*: todas as fibras orientadas em uma só direção;
- *Bidirecional*: as fibras estão alinhadas perpendicularmente em duas direções;
- *Aleatória*: as fibras estão distribuídas aleatoriamente nas várias direções, em um mesmo plano, podendo ser longas (contínuas) ou curtas.

Uma característica marcante dos materiais poliméricos em geral, segundo Garcez *et al* (2008) é que suas propriedades mecânicas são muito sensíveis à taxa de deformação, à natureza química do ambiente e à temperatura. Desta forma, as propriedades térmicas de um polímero são frequentemente especificadas fazendo referência à sua temperatura de Transição Vítrea (T_g). Quando um polímero está submetido a uma temperatura abaixo da T_g as moléculas têm muito pouca mobilidade. Quando a mesma é alcançada, podem ocorrer drásticas mudanças na estrutura e nas propriedades, especialmente em polímeros amorfos.

A (T_g) pode ser considerada uma das propriedades mais importantes dos materiais poliméricos, pois a dureza, volume, resistência, alongamento percentual na ruptura e

módulo de elasticidade do material são significativamente alteradas quando a temperatura se aproxima da (T_g) (GARCEZ *et al.*, 2008).

2.3.2 Fibras de reforço

As fibras são os elementos constituintes que conferem ao material composto suas características mecânicas: rigidez e resistência à ruptura. Berthelot (1992) define fibras como materiais alongados com dimensão na razão de 10/1, no mínimo, com uma secção transversal de $5 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$ e uma espessura máxima de 0,25 mm.

Os tipos mais comuns de fibras são: de vidro, de aramida, carbono e boro. Callister (2000) explica que materiais de diâmetro pequeno como as fibras são mais resistentes do que o material massivo, pois a probabilidade da presença de uma falha superficial crítica que conduza à fratura decresce com a diminuição do volume da amostra.

As principais desvantagens dos materiais compostos reforçados com fibras são: custo elevado, baixos valores referentes às propriedades transversais (cisalhamento), natureza anisotrópica, possuem comportamento mecânico mais complexo, dificuldade de identificação das propriedades dos materiais se comparados com os materiais tradicionais isotrópicos. Nos polímeros reforçados, as fibras representam os componentes de resistência e rigidez do material composto, justificando a existência de um critério de seleção, função de parâmetros como o tipo de fibra disponível (composição química), o seu grau de concentração, o seu comprimento (curtas ou longas) e a forma como se dispõem na matriz. Desta última, conclui-se que a resistência à tração e o respectivo módulo de elasticidade são máximos para a direção principal das fibras e reduzem progressivamente de valor, quando o ângulo em análise se afasta daquela direção (REDDY, 1997).

Os elementos de reforço podem ser definidos como sendo unidirecionais, quando as fibras que compõe o mesmo estão orientadas segundo uma mesma direção ou bidirecionais, quando as fibras estão orientadas segundo duas direções ortogonais, formando tecidos (NANNI, 1993).

As fibras exibem um comportamento perfeitamente elástico, sem presença de deformação plástica, ao contrário dos metais. De um modo geral, as fibras em filamento de

configuração contínua, designadas “*Continuous Fibers*” (ACI 440R-96 1996; JCI TC952, 1998), são as mais apropriadas para o reforço de estruturas de concreto, devido à possibilidade de orientação numa direção específica com vista à otimização do seu desempenho estrutural.

As principais fibras usadas comercialmente para formação do PRF são:

- *Fibras de vidro (G)*: são as mais utilizadas, em particular para compostos de desempenho médio em termos estruturais. A rigidez é relativamente baixa. O componente básico é a sílica (50-60% de SiO_2).
- *Fibras de carbono (C)*: são as mais utilizadas para estruturas de alto desempenho. Os vários tipos são caracterizados pelo valor do módulo de elasticidade (alto, médio e baixo módulo). As principais características são as elevadas relações resistência e rigidez/peso, baixo coeficiente de dilatação térmica (aplicações para atmosfera aquecida) e alta resistência à fadiga;
- *Fibras de aramida (A)*: possuem boa deformabilidade e a elevada resistência à tração, além do bom comportamento a danos e a impactos;

Tabela 1 – Principais características das fibras de carbono, aramida e vidro.

Tipo de fibras		Res. tração (MPa)	Mod. elast. (GPa)	Alongamento último (%)	Peso específico (g/cm ³)
Carbono (C)	Elevada resistência	3430 - 4900	230 - 240	1,5 - 2,1	1,8
	Elevado mod. Elasticidade	2940 - 4600	392 - 640	0,45 - 1,2	1,8 - 2,1
Aramida (A)	Elevado mod. Elasticidade	2900	111	2,4	1,45
	Elevada resistência	3500	74	4,6	1,39
Vidro (G)	Vidro - E	3500	74	4,7	2,6

Fonte: Callister (2002).

- *Fibras de boro*: possuem alta rigidez e alta resistência à compressão, com comportamento caracteristicamente frágil;
- *Outras fibras*: poliméricas (polietileno), metálicas (aço), cerâmicas (carboneto de silício), vegetais (coco, sisal). Na Figura 7 pode ser visto o comportamento mecânico das fibras.

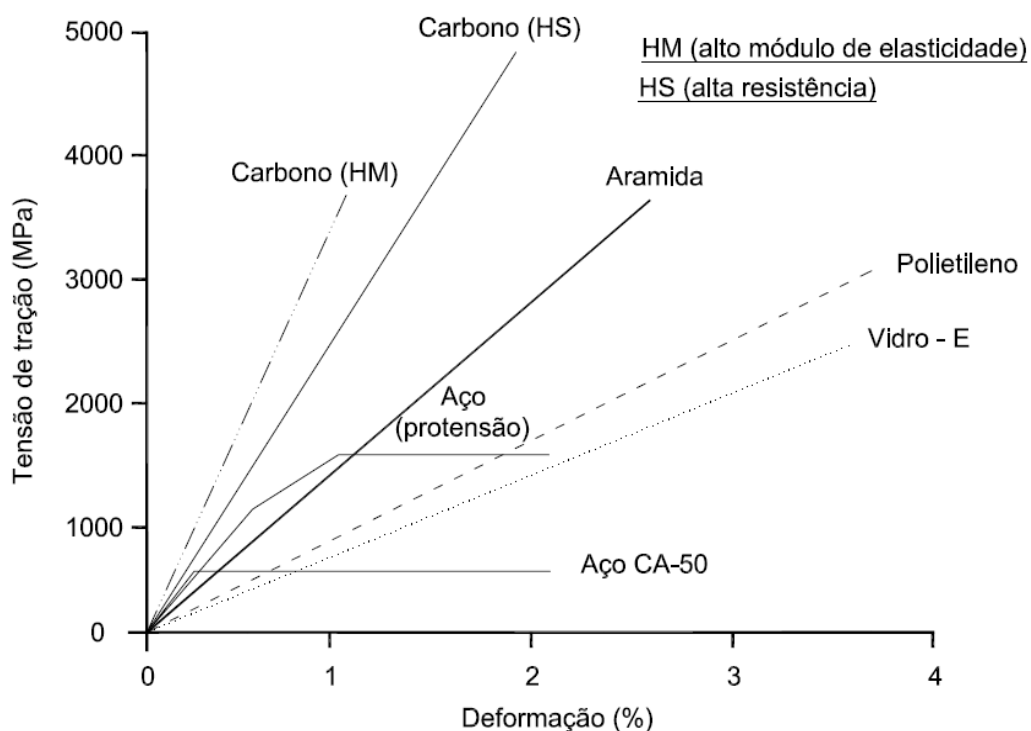


Figura 7 – Diagrama de tensão deformação das principais fibras
Fonte: Beber (2003)

2.3.3 Polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC)

Os polímeros reforçados com fibras de carbono ou do inglês *carbon fibre reinforced polymers (CFRP)* destacam-se como os mais apropriados para o reforço estrutural de elementos de concreto armado por causa do alto desempenho mecânico das fibras de carbono, permitindo uma significativa redução nas dimensões dos elementos empregados para este fim. Segundo Brandt (1995) os materiais compostos de PRFC destacam-se, principalmente porque:

- As fibras de carbono apresentam as maiores relações entre resistência e rigidez com seu peso próprio;
- As fibras de carbono mantêm a alta resistência e rigidez sob atmosfera aquecida;
- À temperatura ambiente as fibras de carbono não são afetadas pela umidade e ação de vários solventes, ácidos e bases;
- As fibras de carbono apresentam uma diversidade de características físicas e mecânicas, permitindo que os materiais compostos apresentem grande versatilidade para diversas aplicações em engenharia;
- Os processos de fabricação de fibras e materiais compostos encontram-se altamente desenvolvidos.

O peso específico (densidade) das fibras de carbono varia entre 1,6 e 1,9 g/cm³. Pode-se observar que o material tem um peso específico quase 5 vezes menor do que o do aço estrutural, da ordem de 7,85 g/cm³. O coeficiente de dilatação térmica dos materiais compostos unidirecionais de PRFC varia segundo sua direção longitudinal e transversal e depende do tipo de fibra, da resina e do volume de fibra no composto. Os coeficientes de dilatação térmica para um composto unidirecional de fibra de carbono típico variam longitudinalmente à fibra entre $-10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a 0 e transversalmente à fibra entre $22 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ e $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. O coeficiente de dilatação térmica indica que material sofre contração com o aumento de temperatura e dilata com a diminuição (REDDY, 1997).

No âmbito desta pesquisa, foram investigados a dois sistemas de reforço estrutural que empregam materiais compostos de PRFC, os sistemas pré-fabricados e os sistemas curados “*in situ*”:

- *Sistemas pré-fabricados*: consistem na substituição das tradicionais chapas metálicas por sistemas laminados semi-rígidos de PRFC do tipo unidirecional. Estes sistemas são resultado da impregnação de um conjunto de feixes ou camadas contínuas de fibras por uma resina termofixa, consolidadas por um processo de pultrusão com controle da espessura e largura do material composto (JUVANDES, 1999). Pultrusão é um processo

contínuo de tração para a produção de um material composto de PRFC com seção final constante, como pode ser observado no diagrama esquemático da Figura 8.

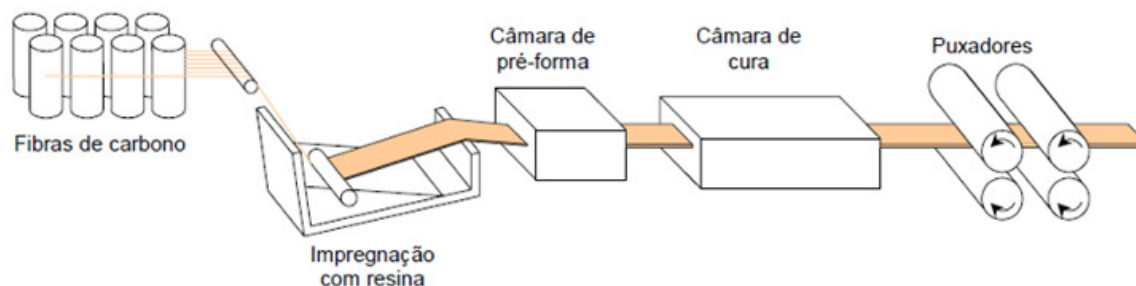


Figura 8 – Processo de fabricação de lâminas de PRFC, utilizando pultrusão
Fonte: Beber (1999).

Os fios contínuos, embebidos em resina, são esticados e passados por um molde aquecido, para processar a cura e a forma do PRFC. Por razões técnicas, o processo de pultrusão permite que o volume máximo de fibras contidas no material composto seja da ordem de 70%. Assim, como o módulo de elasticidade e a resistência à tração da matriz podem ser desprezados, os valores destas propriedades do laminado curado representam aproximadamente 70% das propriedades das fibras (JUVANDES, 1999).

- *Sistemas curados “in situ”*: trata-se de um sistema constituído por fibras contínuas, sob a forma de fios, mantas ou tecidos, em estado seco, aplicados sobre um adesivo epóxi previamente espalhado sobre a superfície do elemento de concreto a ser reforçado (JUVANDES, 1999). A Figura 9 apresenta um esquema do processo de fabricação das mantas flexíveis de fibras de carbono. O produto final deste processo constitui-se em um conjunto de fios contínuos de fibra de carbono alinhada. Para Meier (1997) o sistema transforma-se em material composto de PRFC somente após a execução do reforço, isto é, após sua polimerização, ou cura “in situ” e deve apresentar comportamento semelhante ao dos laminados pré-fabricados, desde que a superfície sob reforço esteja regularizada.

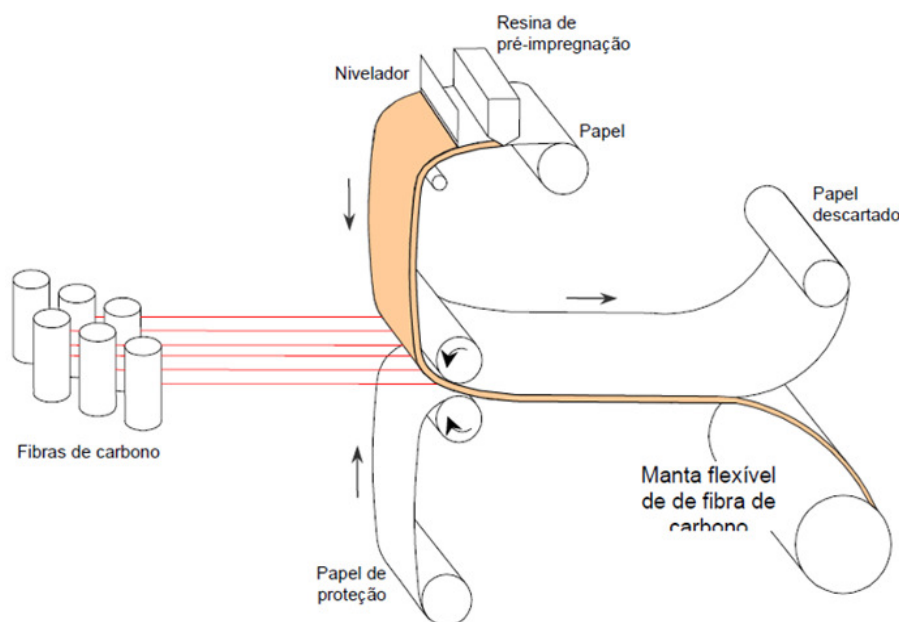


Figura 9 – Processo de fabricação do sistema pré-impregnado
Fonte: Beber (1999).

Barbero (1999) cita como desvantagem dos PRFC a intolerância quanto à preparação da superfície. Uma superfície irregular pode conduzir à possibilidade de modos de ruptura frágeis, associados ao destacamento do reforço.

Segundo Machado (2002) o custo dos materiais compostos é, ainda, maior do que outros materiais de reforço, em especial as chapas de aço. A comparação de custos entre as diversas técnicas de reforço disponíveis deve considerar não somente o custo dos materiais, mas principalmente, a mão-de-obra e os custos operacionais que envolvem cada uma delas. Neste caso as aplicações de materiais compostos têm demonstrado ser a solução mais econômica.

2.3.4 Adesivos

Como descreve Dias (2001), os adesivos são materiais utilizados para colar materiais a elementos estruturais já existentes. Os adesivos disponíveis no mercado podem ser à base de epóxi, PVA e acrílico. A seguir a descrição detalhada:

- *Adesivos de base epóxi:* são polímeros fornecidos em dois componentes: monômero e catalisador. Após a mistura dos dois componentes, o material permanece viscoso durante

certo tempo, depois endurece e se solidifica, adquirindo então elevada resistência mecânica (BANK, 1993).

- *Adesivos poliméricos vinílicos*: comumente designado por PVA, que apresenta boa resistência ao intemperismo, sendo utilizado, na construção civil, em tintas, revestimentos e membranas impermeabilizantes (DIAS, 2001).
- *Adesivos acrílicos* são uma família de compostos resultante da polimerização de monômeros, que, por sua vez são ésteres do ácido acrílico ou do ácido metacrílico, que apresentam transparência cristalina e excepcional resistência química, sendo utilizados na construção civil sob a forma de placas transparentes semelhantes ao vidro e adesivos de base PVA (DIAS, 2001).
- *Adesivos de base resina fenólica*: composto por resinas de fenolformaldeídos e um catalisador, necessariamente ácido. Têm tempo útil para aplicação reduzido e precisam ser mantidas em ambiente refrigerado. Têm propriedades semelhantes às de base furânica, mas não resistem ao ataque de oxidantes fortes, álcalis fortes, nem a temperaturas superiores a 175 °C (SOUZA; RIPPER, 1998).

2.4 ADERÊNCIA

Uma das principais questões que limitam o uso da técnica de colagem de tecidos de PRFC está relacionada com a aderência e a ancoragem destas fibras ao concreto. O ganho de resistência através da execução de reforço com 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 entre a armadura longitudinal e o reforço (BEBER, 1999). Aliado a isto, existem limitações impostas por algumas formas geométricas e condições de superfície na sua aplicação, podendo ocasionar a formação de bolhas nos materiais compostos.

Finalmente, os materiais compostos, ao serem expostos à ação de atmosferas aquecidas e raios ultravioletas, ficam sujeitos a reações químicas na matriz do polímero que causam a

degradação de suas propriedades. 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 em atmosferas aquecidas.

2.4.1 Formulação epóxi

No caso dos laminados pré-fabricados, o agente adesivo é um material distinto do material composto de PRFC, as aplicações mais realizadas são do tipo epóxi. Nestes, são usados dois componentes, a resina a base de epóxi e um catalisador, a primeira é livre de solventes e tem enchimento mineral, por exemplo, quartzo (JUVANDES *et al.*, 1996).

Nos sistemas de PRFC curados “*in situ*” (fios, mantas e tecidos), o agente adesivo é a própria resina de impregnação das fibras e de polimerização do material composto. Neste caso, a literatura internacional atribui o termo “*Saturating Resin*” para distingui-lo da designação corrente de adesivo (situação anterior dos laminados). Este apresenta o papel de matriz do PRFC e promove a transferência de esforços entre as fibras e destas para a superfície colada, conforme Figura 9. O sistema, normalmente, recorre a resinas de saturação do tipo epóxi compostas por dois componentes devidamente dosados, a resina e o catalisador (BEBER 2003).

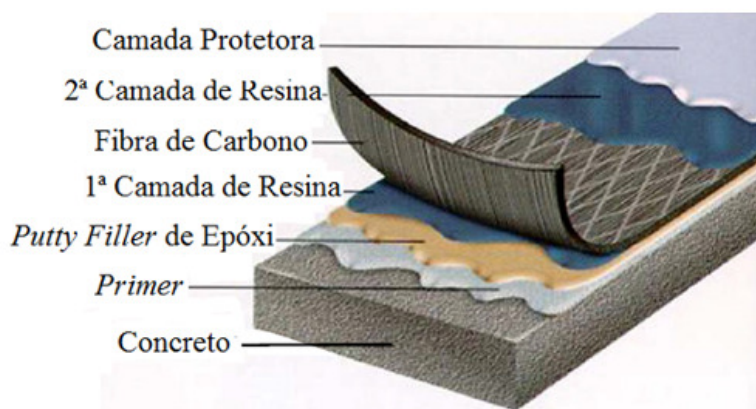


Figura 10 – Sistema de aplicação do tecido PRFC, com as camadas de saturação de resina
Fonte: Adaptado de Master Builders Technologies (MBT,2004)

Os produtos conhecidos como primário apresenta a característica de penetrar na superfície do concreto por capilaridade, de modo a melhorar a propriedade adesiva da superfície, para recebê-la a resina de saturação ou do adesivo. O produto de regularização elimina pequenas irregularidades na superfície com vista a evitar a formação de bolhas de ar e garantir uma superfície lisa para a colagem do PRFC. Estes dois produtos são indispensáveis, principalmente, para as aplicações de sistemas de PRFC endurecidos “*in situ*” (fios, mantas e tecidos), conforme Figura 10 (MBT, 2004).

Como descreve Meier (1995) para as aplicações de reforço em engenharia civil, é muito difícil ajustar um só tipo de adesivo que satisfaça todos os casos desejados. O sucesso do adesivo irá depender da correta preparação e aplicação da mistura, baseada nas especificações do fornecedor e a que condições ambientais a estrutura estará sujeita ao longo da sua vida útil.

As principais características de um adesivo epóxi não endurecido consistem na viscosidade, no tempo de utilização, no tempo de cura, na toxicidade e no endurecimento em contato com água. No contexto deste estudo, são importantes as noções dos tempos de utilização e de contato descritas na publicação de Mano (1991), pois as mesmas podem afetar fortemente a aderência:

- *Tempo de utilização*: intervalo de tempo, após a mistura da resina base e componentes restantes, durante o qual o material líquido é utilizável sem dificuldade (MANO, 1991). Esgotado o tempo de utilização, qualquer formulação de resina perde drasticamente as suas características de aderência, pelo que não deve ser utilizada. O tempo de utilização diminui com o aumento da temperatura e da quantidade de material a preparar, uma vez que há libertação de calor durante a cura.
- *Tempo de contato*: termo aplicado às formulações para colagem. É o intervalo de tempo que decorre entre o momento em que a formulação é aplicada na superfície a colar e o instante em que esta principia a endurecer e deixa de ser possível efetuar a colagem (MANO, 1991). A junção das peças deve ser realizada neste intervalo de tempo para que a colagem apresente as características desejadas. O tempo de contato é influenciado pela temperatura ambiente e pela temperatura do suporte. A natureza da superfície a colar condiciona também as características da colagem.

Os adesivos estabelecem um meio de transferência das tensões de cisalhamento entre substrato de concreto e o laminado, ou mesmo entre diversas camadas de materiais compostos laminados. Segundo Machado (2002) devido à existência de mecanismos de transferência das tensões de cisalhamento e de regiões locais submetidas a tensões normais na interface entre o concreto e o PRFC, surge a possibilidade de que ocorra o fenômeno de delaminação do PRFC antes que seja alcançada a resistência de ruptura do concreto. As causas desse fenômeno são complexas, sendo que a distribuição das tensões devidas a colagem do PRFC é dificultada pela fissuração do concreto.

Segundo Crea *et al.* (1997) os descolamento do PRFC pode ocorrer devido a deficiências da área de colagem do reforço. O concreto não consegue absorver as tensões normais e de cisalhamento interfaciais e o material composto descola do substrato, mantendo aderida tão somente uma relativa fina camada de concreto.

2.4.2 Filme termo-ativado fenólico

Uma alternativa ao uso dos adesivos tradicionais consiste no emprego de filmes termo-ativados, que são fitas adesivas que polimerizam quando expostos à temperatura, o que possibilita a realização de cura com aquecimento, em torno de 120°C a 250°C.

Segundo Garcez (2007) a utilização de filmes termo-ativados ou *heart activated films* (HAF), se caracterizam por ter elevada (T_g). Ensaios realizados por Garcez mostraram que é uma vertente promissora, mas que ainda demanda estudos mais aprofundados conforme Figura 11.

O filme termo-ativado é utilizado na indústria de eletro-eletrônicos, sua principal qualidade em relação às colas usualmente utilizadas são a baixa espessura e a boa adesão. Segundo catálogo do fornecedor, estes produtos aderem apenas depois de ser aplicado calor, e são utilizados para situações de “adesividade” fora do normal, tais como, quando é necessário unir metal a plástico, ou quando estão disponíveis para união apenas superfícies muito estreitas.

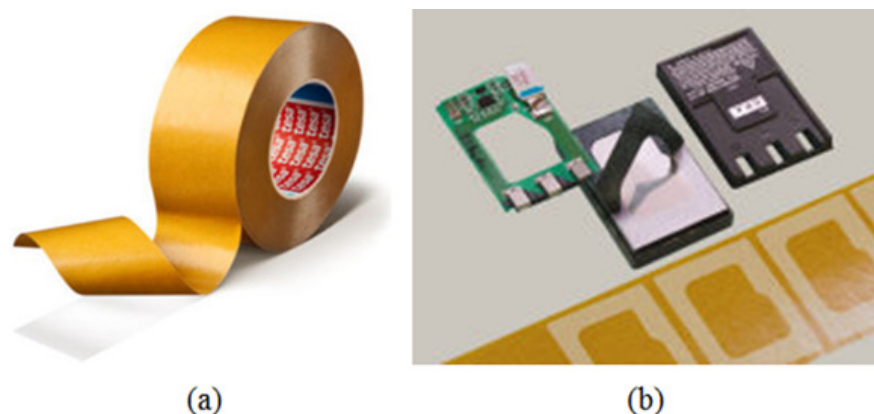


Figura 11 - (a) Filme termo-ativado e (b) usado para a fixação de módulos em chips de cartões e micro-circuitos elétricos.

Fonte: Catalogo do fornecedor

2.5 AQUECIMENTO

Muitos materiais compostos foram criados para melhorar combinações de características mecânicas tais como rigidez, tenacidade e resistências mecânicas à temperatura ambiente e à alta temperatura. Uma vez que as propriedades mecânicas de polímeros sejam sensíveis às mudanças de temperatura, discussões de características térmicas e termomecânicas destes materiais são importantes para entender seus comportamentos (CALLISTER, 2000).

Segundo Padilha (1997) uma diferença básica de aplicação dos compostos se refere à temperatura de trabalho. Compostos de matriz polimérica são usados em temperaturas de (200 °C à 300 °C) já compostos com matriz metálica trabalham a temperaturas (de até 1.370 °C), enquanto compostos cerâmicos podem ser especialmente desenvolvidos para aplicações em temperaturas até (1.650 °C). Os compostos carbono-carbono possuem elevada resistência, sendo particularmente indicados para ambientes com altas temperaturas.

A temperatura a partir da qual o polímero começa a perder sua consistência, é conhecida como *temperatura de transição vítrea* (Tg). Acima desta temperatura o módulo de elasticidade é significativamente reduzido, devido a mudanças em sua estrutura molecular. O valor do Tg depende fundamentalmente do tipo de resina, mas normalmente se situa na faixa entre 80 °C e 100 °C. Abaixo da Tg, o material é considerado como um sólido

amorfo; acima de (T_g), ele é um sólido tipo-borracha ou então um líquido viscoso (VAN VLACK, 1982).

Para Padilha (1997), em um material composto tipo PRFC, as fibras possuem melhores propriedades térmicas do que as resinas, por isso, as fibras podem continuar suportando alguma carga na sua direção longitudinal até que a sua temperatura limite seja alcançada, situada no entorno de 1.500 °C. Entretanto, devido à redução da força de transferência por meio da aderência entre as fibras, as propriedades de tração do material composto como um todo são reduzidas após a ultrapassagem da temperatura T_g . Experimentos de Machado (2002) demonstram que para temperaturas da ordem de 240°C, ocorre redução de cerca de 20% na resistência à tração do material composto formado com formulação epóxi.

Segundo Callister (2000), a fusão do polímero cristalino corresponde à transformação de um material sólido, tendo uma estrutura ordenada de cadeias moleculares alinhadas, para um líquido viscoso. Em baixas temperaturas, os átomos vibram com amplitudes pequenas e de modo relativamente independente entre si. Consequentemente, um grande número de ligações secundárias ou não-covalentes se forma entre cadeias adjacentes. Com o aumento da temperatura, entretanto, as vibrações crescem em magnitude e eventualmente se tornam coordenadas até o grau em que movimentos translacionais da cadeia são produzidos, os quais envolvem muitos átomos da cadeia em temperaturas elevadas. Na temperatura de fusão, estes movimentos de cadeia se tornam suficientemente enérgicos para cortar grande número de ligações secundárias, e produzindo uma estrutura molecular altamente desordenada (ASKELAND, 1990).

O desempenho de vigas, pilares, lajes e outros componentes estruturais da edificação, em situações de exposição à atmosfera aquecida, é 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, 1998).

Estabelecer cientificamente a dependência entre a estabilidade à ação de atmosfera aquecida em elemento estrutural e o tempo de resistência é uma tarefa muito complexa e, atualmente, constitui um tópico vital na área de Engenharia. 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).

Segundo Neville (1997), 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 sob aquecimento, diferença na duração da exposição à temperatura elevada e diferença nas propriedades dos agregados.

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 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, 2008).

No caso específico de estruturas de concreto reforçadas com fibras de carbono e submetidas a atmosfera aquecida, uma atenção especial deve ser dada pelos projetistas. Segundo Meier (1997), um aquecimento no material composto 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 da fibra de carbono após o resfriamento.

Devido a esta suscetibilidade a alta temperatura, as consequências 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 às ações permanentes e a uma percentagem de ações variáveis. 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).

CAPÍTULO 3

INTRODUÇÃO À CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

3.1 INTRODUÇÃO

O cálculo estrutural em engenharia tem como princípio básico assegurar o desempenho satisfatório da estrutura, de acordo com as solicitações definidas em projeto, durante sua vida útil, de tal forma a obter um nível aceitável entre segurança e o custo do empreendimento. Garantir um nível aceitável de segurança com custos mínimos, não é uma tarefa fácil, pois tanto as ações como as resistências máximas das estruturas são difíceis de serem previstas com exatidão. Também há uma variabilidade da resistência e do peso dos elementos componentes da estrutura em função das dimensões geométricas e do processo de moldagem utilizados.

A análise de confiabilidade estrutural mensura a segurança de uma estrutura, ou a avaliação da probabilidade de que a mesma não falhe em atender aos objetivos para os quais ela foi projetada. Risco de falha deve estar dentro de margens aceitáveis de segurança.

A maioria dos parâmetros envolvidos nos processos de danos em vigas de concreto armado é de natureza aleatória, principalmente as condições usuais, como resistência à compressão do concreto, resistência à tração do aço, módulo de elasticidade do concreto, geometria da seção transversal, cobrimento das armaduras, carga permanente e sobrecarga.

Em geral, na prática, os problemas de engenharia não possuem valores quantitativos exatos para que se possa equacionar e resolver o problema de maneira direta e precisa. Nota-se que existe uma natureza probabilística tanto da ação como da resistência.

3.2 VARIÁVEIS ALEATÓRIAS

Na engenharia e outras ciências, muitos fenômenos aleatórios de interesse estão associados a resultados numéricos de alguma quantidade física. Em alguns casos, os resultados de um evento podem ser identificados através de valores de uma função, tais como valores de uma função de variáveis aleatórias, os quais geralmente são representados por letras maiúsculas $E(x)$. Em resumo, variável aleatória é uma função que associa elementos de conjuntos reais a evento do espaço amostral de um experimento.

As dimensões de um elemento estrutural, a densidade do material, os valores de cargas e as resistências dos materiais são alguns exemplos típicos desse conjunto de variáveis. De acordo com Melchers (1987), algumas variáveis básicas são correlacionadas com algumas variáveis chamadas pelo autor de fundamentais.

Um exemplo claro é a resistência à compressão do concreto (variável básica), que é função de algumas variáveis fundamentais, tais como a relação a/c , o consumo de cimento e a granulometria dos agregados, entre outras.

As características probabilísticas de uma variável aleatória seriam completamente descritas se a forma da função densidade de probabilidade ($f.d.p.$) e os parâmetros associados fossem plenamente conhecidos. Nem sempre é conhecida a forma que representa a função de distribuição de probabilidade de uma variável aleatória, de tal modo que certas aproximações são necessárias. Neste caso, esta variável aleatória pode ser descrita por sua média e por uma medida de dispersão da variável aleatória, através dos seguintes parâmetros:

- *Média*: se X é uma variável aleatória discreta, tem-se a seguinte equação para o valor esperado ou a média de X :

$$\mu_X = E(X) = \sum_{xi} x_i p_x(x_i) \quad \text{Equação 1}$$

Onde $p_x(x_i)$ é a função de probabilidade da variável X .

Se X é uma variável aleatória contínua, com *f.d.p* de $f_x(x)$, o valor médio é dado por

$$\mu_X = E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x f_x(x) dx \quad \text{Equação 2}$$

Onde $f_x(x)$ é a função de densidade de probabilidade.

• *Variância*: é uma quantidade que dá uma medida da dispersão dos dados em relação à média. A variância é definida por:

$$V(x) = E(x^2) - \mu_x^2 \quad \text{Equação 3}$$

• *Desvio Padrão*: a medida de dispersão mais indicada é a raiz quadrada da variância, que é chamada de desvio padrão e definido por:

$$\sigma_x = \sqrt{V(X)} \quad \text{Equação 4}$$

• *Coefficiente de variação*: somente com a variância e o desvio padrão é difícil mensurar se a dispersão é grande ou pequena. O indicativo desta amplitude é dado pelo coeficiente de variação (*COV*), definido por:

$$COV = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad \text{Equação 5}$$

3.3 DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE

Muitas funções podem ser utilizadas para descrever a distribuição de probabilidade de variáveis aleatórias, desde que se enquadrem nas condições expostas nas equações. Por meio de análise e pesquisa de dados históricos de fenômenos físicos, algumas funções tiveram sucesso em representar tais fenômenos e são largamente utilizados na engenharia. Neste item apresentam-se as principais distribuições de probabilidade (MELCHERS, 1987):

- *Distribuição Normal ou Gaussiana*: é uma das distribuições mais conhecidas e aplicadas para representar variáveis aleatórias. σ_x e μ_x são o desvio padrão e a média, respectivamente da *f.d.p.* Uma notação resumida desta distribuição é $N(\mu, \sigma)$. A distribuição normal é simétrica em relação à média. Tem-se na Figura 12 o gráfico da *f.d.p.* e da função de distribuição acumulada *f.d.a* de uma variável aleatória $N(0, 1)$ padrão.

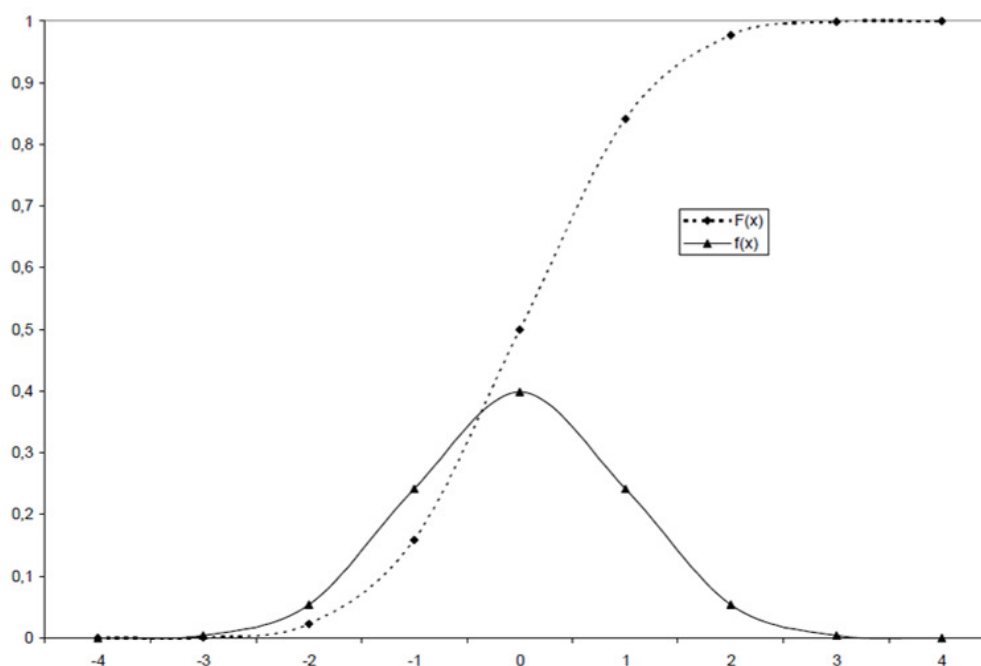


Figura 12 - Representação de $f(x)$ – f.d.p normal e $F(X)$ – f.d.a normal
Fonte: Hatashita (2007)

- *Distribuição Normal Padronizada*: esta distribuição é uma particularidade da função distribuição de probabilidade normal e apresenta média zero e desvio padrão igual a 1. É denotada como $N(0, 1)$ ou $\phi(z)$. Suponha uma variável X com distribuição de probabilidade

$N(\mu, \sigma)$. A probabilidade entre a e b é mostrada na Figura 13, representada pela área escura. Integrando-se esta equação obtém-se a probabilidade para valores de X entre a e b .

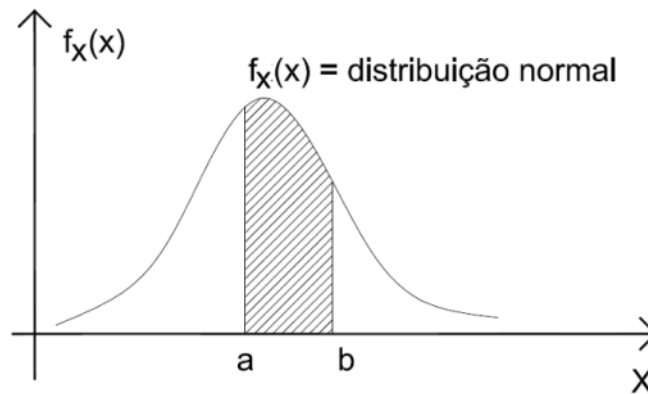


Figura 13 – f.d.p. normal – $N(\mu, \sigma)$
Fonte: Hatashita (2007)

Para facilitar a solução, faz-se uma mudança de variável, a qual é conhecida como variável reduzida.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Equação 6

O resultado desta integral pode ser representado por:

$$P(a \leq X \leq b) = f\left(\frac{b - \mu}{\sigma}\right) - f\left(\frac{a - \mu}{\sigma}\right)$$

Equação 7

- **Distribuição Log-normal:** uma variável X tem uma distribuição log-normal se a variável aleatória $Y = \ln X$ é normal.

- **Estatística de Valores Extremos:** a teoria estatística de valores extremos, ou de *Gumbel* é caracterizada por um exemplo de aplicação importante da estatística de extremos é na consideração sobre segurança estrutural. Altos valores de carregamento, baixa resistência estrutural são os valores mais relevantes para assegurar o nível de confiabilidade da estrutura.

Várias publicações apresentam as equações existentes para as distribuições estatísticas citadas. Dentre elas Melchers (1987) conforme representado Tabela 2.

Tabela 2 – Exemplo de distribuições estatísticas.

Distribuição	Densidade de probabilidade	Parâmetros	Intervalos
Normal ou Gaussiana	$f_x(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x} \right)^2}$	$N(\mu, \sigma)$	$-\infty < x < +\infty$
Normal Padronizada	$f_y(z) = \varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} z^2}$	$z = \frac{x-\mu}{\sigma}$ onde $N(0,1)$	$-\infty < z < +\infty$
Log-normal	$f_x(x) = \frac{1}{\varepsilon x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \omega}{\varepsilon} \right)^2}$ onde $\varepsilon^2 = \ln \left[1 + \frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2} \right]$ e $\omega = \ln \mu_x - \frac{1}{2} \varepsilon^2$	ε, ω	$\varepsilon = \ln x$
Gumbel	$f(x) = \exp [-e^{-\alpha(x-\mu)}]$	μ, α	$-\infty < x < +\infty$

Fonte: Melchers (1987).

3.4 AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE

A confiabilidade de estruturas ou de sistemas de engenharia pode ser entendida como sendo a capacidade ou chance da resistência da estrutura ser superior em relação à solicitação imposta à mesma durante sua vida útil.

Comumente a avaliação da confiabilidade de sistemas de engenharia é obtida por meio do uso de fatores ou margens de segurança e suposições conservadoras adotadas no projeto. Procura-se adequar a resistência mínima da estrutura com a solicitação máxima. Por intermédio de julgamentos subjetivos são definidos os extremos da resistência e solicitação, devido à dificuldade de quantificação destes valores. Estas dificuldades são inerentes em sistemas de engenharia, por causa da falta de informações completas (MELCHERS, 1987).

Desta forma, a confiabilidade pode ser mensurada mais realisticamente em termos de probabilidades. Com este intuito, definem-se as seguintes variáveis aleatórias:

R – variável aleatória correspondente à resistência;

S – variável aleatória correspondente à solicitação.

O objetivo da confiabilidade é expressar que a probabilidade de que o evento $(R > S)$ ocorra durante toda a vida útil ou tempo especificado para um sistema de engenharia. O evento complementar $(R < S)$ corresponde à falha. Deste modo a função de falha $G(U)$, com $U(R, S)$ é dada por:

$$G(U) = Z = R - S \quad \text{Equação 8}$$

Considera-se que as *f.d.p.* e *f.d.a.* de R e S sejam conhecidas, então a probabilidade de falha Pf associada aos eventos acima pode ser definida da seguinte forma:

$$Pf = P(R < S) = \sum_S P(R < S | S = s) P(S = s) \quad \text{Equação 9}$$

Assumindo-se que R e S são estatisticamente independentes e portanto:

$$P(R < S | S = s) = P(R < s) \quad \text{Equação 10}$$

Se na equação anterior R e S são contínuos e, a Pf pode ser representada como:

$$Pf = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^s f_R(r) f_S(s) dr ds = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(s) f_S(s) ds \quad \text{Equação 11}$$

Onde $f_R(r)$ e $f_S(s)$ são as funções densidade de probabilidade da resistência e da solicitação respectivamente.

A Figura 14 mostra a sobreposição das curvas $f_S(S)$ e $f_R(R)$ que representa uma medida qualitativa da probabilidade de falha P_f .

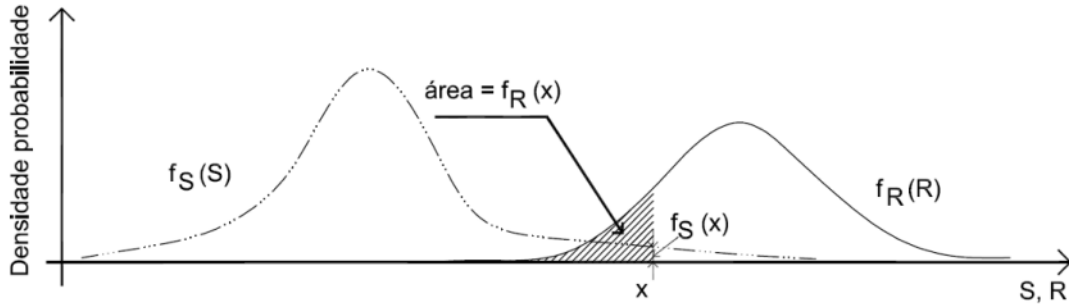


Figura 14 - f.d.p. da solicitação $f_S(S)$ e f.d.p resistência $f_R(R)$
Fonte: Hatashita (2007)

Da observação da Figura 14, nota-se que a sobreposição entre as duas curvas depende da posição relativa entre elas. Logo, se as curvas $f_S(S)$ e $f_R(R)$ estão mais distantes, a P_f diminui. Por outro lado, se elas estão mais próximas, a P_f aumenta.

A região de sobreposição depende do grau de dispersão de $f_S(S)$ e $f_R(R)$. Estas dispersões podem ser expressas em termos das covariâncias de R e S . Considerando-se R e S independentes e com distribuições normais $N(\mu_R, \sigma_R)$ e $N(\mu_S, \sigma_S)$, respectivamente. Neste caso $Z = R - S$ também é uma distribuição normal $N(\mu_Z, \sigma_Z)$. Assim:

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S ; \sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad \text{Equação 12}$$

Utilizando-se da distribuição normal padronizada, a probabilidade de falha pode ser indicada como:

$$P_f = P(Z \leq 0.0) = \varphi\left(\frac{0.0 - \mu_Z}{\sigma_Z}\right) = \varphi(-\beta) = 1 - \varphi(\beta) \quad \text{Equação 13}$$

Onde a função φ é a distribuição cumulativa normal padrão e β é o *índice de confiabilidade* que é expresso como:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad \text{Equação 14}$$

A probabilidade de falha Pf pode ser obtida pela Equação 13 ou Equação 14 descritas anteriormente. A resolução das integrais da equação de Pf pode ser complexa devido às equações que representam as *f.d.p*'s da resistência e solicitação. Por meio do cálculo do β a obtenção da Pf é muito mais simples, devido a algumas propriedades das *f.d.p.* normais (MELCHERS, 1987).

3.5 MÉTODOS ANALÍTICOS PARA A AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

A probabilidade de falha pode ser determinada pela Equação 11. Nesta equação, a Pf está sendo representada pela *f.d.a.* da resistência e *f.d.p* da solicitação. Porém, genericamente, a mesma pode ser representada pela seguinte integral:

$$Pf = \int_F f_u(U) du \quad \text{Equação 15}$$

Onde $f_u(U)$ é a *f.d.p* conjunta de todas as variáveis aleatórias envolvidas na análise, ou seja, todas as variáveis que compõem a resistência e solicitação. A avaliação da probabilidade de falha é baseada na função de falha, ou função de estado limite, ou margem de segurança, simbolizada como $G(U)$.

A Equação 14 mostra uma função de falha bidimensional G representada pelas variáveis aleatórias $U1$ e $U2$. Observa-se que a função de falha divide a superfície de falha em duas regiões distintas, uma que é indicada como a região no domínio da falha $G(U1, U2) < 0$ e outra da segurança $G(U1, U2) > 0$. A linha que delimita a região de falha e a segura é $G(U1, U2) = 0$, conforme Figura 15.

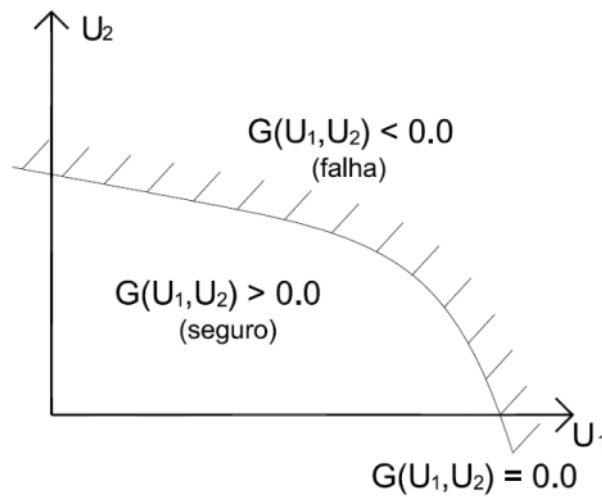


Figura 15 – Representação da função falha
Fonte: Hatashita (2007)

Em suma, a P_f é definida como a probabilidade da função de falha assumir valores dentro da região de falha, ou seja: $P_f = P(G(U_1, U_2) < 0)$

Dependendo do número e da complexidade das funções das variáveis envolvidas, a solução da integral se torna bastante difícil, mesmo utilizando-se recursos numéricos para obtenção da solução. Em função destas dificuldades, foram desenvolvidos métodos analíticos para avaliação da confiabilidade estrutural. A seguir apresenta-se o método analítico tipo *FORM* (*First Order Reliability Method*).

3.6 MÉTODO ANALÍTICO FORM

Para obter o índice de confiabilidade β considerando-se um sistema tipo $R \times S$ (Resistência \times Solicitação), onde R e S são variáveis aleatórias com *f.d.p.*'s normais e estatisticamente independentes, a Equação 14 é usada.

Quantitativamente pode-se obter β utilizando-se variáveis reduzidas, onde se têm variáveis normais com média zero e desvio padrão um. O primeiro passo consiste em transformar as variáveis R e S em variáveis reduzidas r e s , obtidas através das seguintes equações:

$$s = \frac{S - \mu_S}{\sigma_S} \quad \text{Equação 16}$$

$$r = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} \quad \text{Equação 17}$$

A função de falha no espaço reduzido Z ou $G(U)$ é representada por:

$$Z = R - S \quad \text{Equação 18}$$

$$Z = r\sigma_R + \mu_R - s\sigma_S - \mu_S \quad \text{Equação 19}$$

Após as transformações das variáveis e obtenção da função de falha no espaço reduzido, pode-se representar esta função de falha neste espaço por meio da Figura 16:

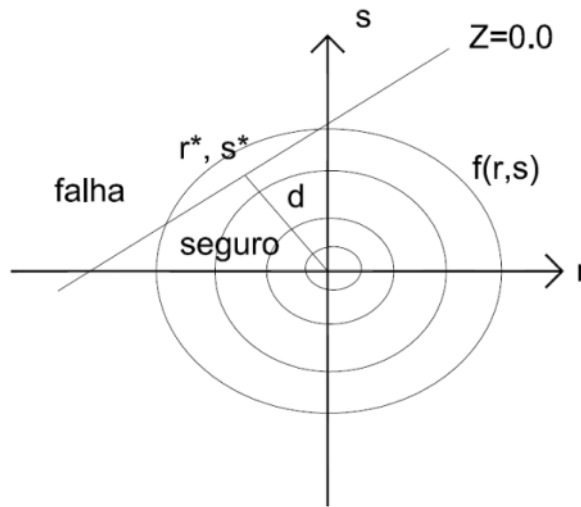


Figura 16 – Função de falha no espaço reduzido
Fonte: Hatashita (2007)

A Figura 16, mostra a linha de falha $Z=0,0$ que separa a região do domínio da falha do domínio seguro. A distância d representa a menor distância entre a origem e o ponto (r^*, s^*) que está sobre a superfície de falha, ou seja, distância mínima entre a equação de estado limite e a origem do espaço normal padrão. Este ponto é chamado de ponto de

projeto ou ponto mais provável de falha. Através do cálculo da distância entre dois pontos pela geometria analítica, obtém-se que a distância d é representada pela seguinte, fórmula:

$$d = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad \text{Equação 20}$$

Observa-se que a distância d é idêntica à fórmula do índice de confiabilidade β da Figura 15. O método *FORM* adota o processo descrito anteriormente, onde se busca a função de falha no espaço reduzido, através da transformação das variáveis no espaço original para espaço reduzido e, em seguida, calculando-se a menor distância entre a origem e o ponto de projeto sobre a superfície de falha (Figura 17).

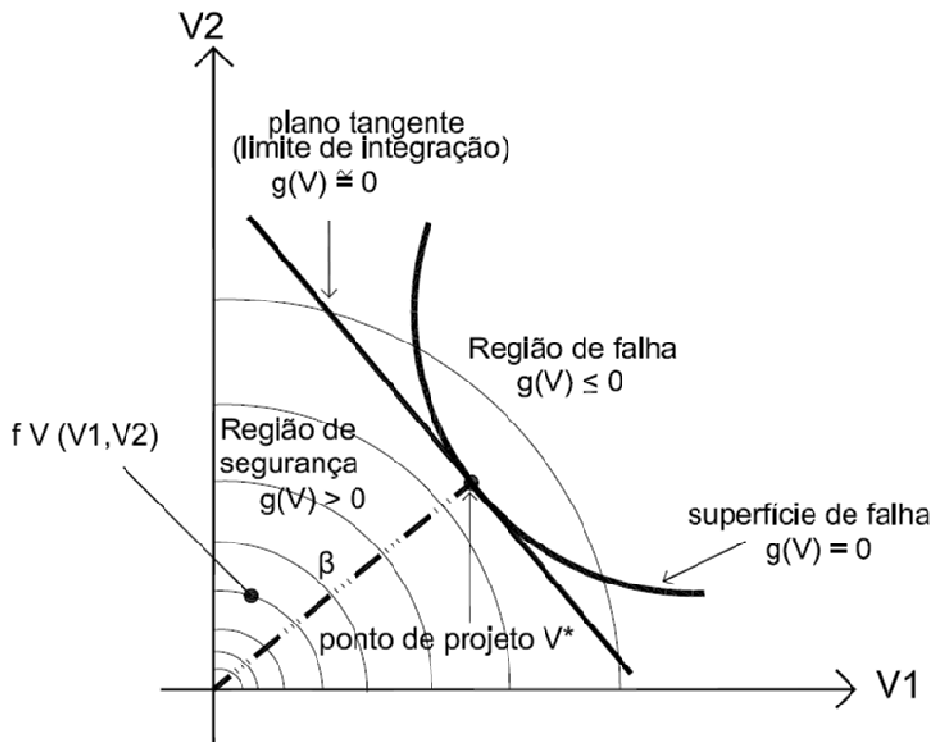


Figura 17 - Função de falha pelo método FORM
Fonte: Hatashita (2007)

De forma ampla os principais passos do método FORM são:

- As variáveis aleatórias U (com distribuições quaisquer) são transformadas em variáveis V (normais do tipo padrão estatisticamente independentes);

- A função de falha $G(U)$ passa a ser função da variável V como $g(V)$;
- A superfície de falha $g(V)=0$ é aproximada para uma superfície linear no ponto da menor distância com a origem, que é o ponto de projeto V^* ;
- Efetua-se cálculo do β , que é representado pela distância da origem ao ponto V^* e $\beta=|V^*|$ é obtido graficamente na Figura 17.

Na Figura 17 observa-se que a superfície de falha é convexa, onde $g(V)=0$, já representada com as variáveis no espaço reduzido, que separa a região de falha $g(V)\leq 0$ da região de segurança $g(V)>0$. A reta tangente à superfície de falha original é a aproximação obtida pelo método para uma superfície linear. O ponto de tangência representa a menor distância da origem à superfície de falha e denomina-se ponto de projeto.

Em função do exposto, nota-se que há dois passos relevantes para a obtenção da probabilidade de falha P_f pelo método *FORM*, que são a transformação das variáveis aleatórias com distribuições quaisquer para distribuições normais padrões e a determinação do ponto de projeto.

A determinação do ponto de projeto V^* no método *FORM* é condição essencial para a obtenção da probabilidade de falha e conseqüentemente a confiabilidade do sistema. Por definição, o ponto de projeto V^* é o ponto sob a função de estado limite no espaço reduzido com a maior densidade de probabilidade, ou seja, o ponto mais próximo entre a origem e a superfície de falha.

Será aplicado o método analítico *FORM* na análise do desempenho da ligação de PRFC em vigas de concreto armado com variação de temperatura, devido à natureza eminentemente aleatória dos fenômenos existentes, as variáveis que representam um determinado fenômeno apresentam uma determinada função densidade de probabilidade. Uma variável aleatória pode ser ajustada a alguma função densidade de probabilidade e assim possibilitar por meio da Confiabilidade Estrutural determinar a probabilidade de falha elemento de adesão.

A confiabilidade estrutural é usada nas mais diferentes áreas de engenharia, Know *et al.* (2010) utilizou confiabilidade estrutural para aferir a fadiga de estruturas de navios com base no efeito de cargas marítimas que são probabilísticas, fornecendo uma estimativa mais confiável do desempenho estrutural de longo prazo.

Zhu e Frangopol (2012) usaram a confiabilidade estrutural em pontes e confirmaram que o risco estrutural e o desempenho mudam ao longo do tempo devido à deterioração estrutural, a intensidade e duração de cargas atuantes, todas estas de naturezas probabilísticas. Salientam a importância da consideração dos efeitos realistas do sistema estrutural para encontrar a função falha do problema.

Azevedo (2007) avalia as distribuições de probabilidade associadas aos valores de deslocamentos de fundações de torres estaiadas de linhas de transmissão, neste trabalho é aplicada a confiabilidade para obtenção da probabilidade de falha das fundações dos estais de uma torre.

Corelhano *et al.* (2012) investigaram a incerteza dos modelos simplificados propostos ABNT NBR 6118, determinaram a confiabilidade de estruturas de edifícios projetadas segundo esta norma nos estados limites de serviço para deslocamentos horizontais, concluíram que os modelos são conservadores, pois resultam índices de confiabilidade elevados.

Krüger (2008) utilizou a análise de confiabilidade estrutural em barragens de concreto, e comparou os resultados com os procedimentos determinísticos normalmente utilizados nas análises de estabilidade. Foram desenvolvidas equações de estado limite para os vários modos de falha analisados em barragens de concreto à gravidade: flutuação, tombamento, deslizamento e tensões normais.

Paliga *et al.* (2008) estudou a confiabilidade de vigas de concreto armado que sofreram uma perda de 10%, 20% e 30% na armadura tracionada de flexão, e foram recuperadas pela colagem, em suas faces tracionadas, de polímeros reforçados com fibras de carbono. Os resultados mostraram que a confiabilidade das vigas recuperadas ficou igual ou superior a confiabilidade das vigas originais que estavam sem perda de armadura e sem reforço.

Hatashita *et al.* (2009) fez a análise de confiabilidade estrutural de torres de transmissão de energia elétrica quando sujeitas a ventos fortes via método analítico *FORM*, considerando que há uma variabilidade de natureza probabilística dos efeitos das solicitações, bem como da resistência dos perfis tipo cantoneiras que compõe a torre, detectaram que a barra que apresentou o menor nível de confiabilidade também se apresentou como a mais crítica no dimensionamento.

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E PREPARAÇÃO DAS VIGAS

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por finalidade apresentar a metodologia adotada para produzir vigas de concreto armado reforçadas com PRFC. São apresentadas também as características das vigas utilizadas, bem como de todos os equipamentos, materiais intervenientes, técnicas de instrumentação empregadas, número e condições de ensaios para condução confiável do programa experimental.

Segundo o CEB-FIP Bulletin 14 (2001) os modos de ruptura de uma viga de concreto armado, reforçada à flexão com materiais compostos, podem ser divididos em dois grupos: (i) aqueles em que a aderência entre concreto e reforço permanece intacta até o esmagamento do concreto ou ruptura do reforço à tração (modos de ruptura “clássicos”) e (ii) aqueles em que ocorre uma ruptura prematura na ligação concreto/reforço.

No estado limite último, os diferentes modos de ruptura que podem ocorrer devem ser investigados, é importante ressaltar que este programa experimental tem como foco analisar o comportamento apenas do grupo (ii). A avaliação do comportamento experimental das vigas com incrementos elevados de resistência devido ao excelente desempenho do reforço à flexão inviabilizaria o estudo, ou seja a ocorrência de ruptura no grupo(i).

4.2 VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS COM PRFC

O programa experimental compreendeu a investigação do comportamento de vigas de concreto armado, de seção retangular, reforçadas a flexão externamente no sentido longitudinal com PRFC. O número de vigas e seu respectivo dimensionamento foram elaborados buscando atender a uma série de condições.

O número de vigas foi determinado com base na revisão da literatura e nos objetivos inicialmente elaborados para condução do programa experimental deste trabalho. Foram fabricadas 33 vigas em escala real, com seção transversal de $(20 \times 30 \times 200)$ cm. Estas vigas foram divididas em 12 grupos. Na Figura 18 pode-se observar as vigas citadas.



Figura 18 - Parcela das vigas utilizadas no programa experimental

Quanto à sua geometria e dimensionamento, buscou-se na medida do possível utilizar elementos que se aproximassem das vigas usualmente executadas em estruturas de concreto armado.

4.2.1 Concreto

O concreto utilizado para a confecção das vigas foi do tipo convencional, dosado em central. As vigas foram concretadas em duas etapas distintas, a primeira ocorreu no dia 26 de agosto de 2009 e a segunda no dia 15 de dezembro de 2009. As especificações dos materiais permaneceram iguais para os concretos utilizados, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Dados dos materiais utilizados no concreto dosado em central

Materiais	Características
Aglomerante	Cimento CP-II Z 32
Agregados	Areia natural (fina e média) e brita basáltica 01
Aditivo	Polifuncional 1,59 kg/m ³
Água	Rede pública de abastecimento (tratada)
Traço (1 : areia : brita : a/c)	1: 2,65 : 3,35 : 0,58 (C= 318 kg/m ³)
Cura	Úmida por 7 dias
Abatimento de tronco de cone	Entre 75 mm e 95 mm
Resistência à compressão	$f_{ck} = 25 \text{ MPa}$ $f_{c28} = 40 \text{ MPa}$

A especificação informada para a empresa fornecedora de concreto foi a resistência característica de $f_{ck} > 25 \text{ MPa}$, a trabalhabilidade esperada medida por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone de $80 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$, como pode ser visto na Figura 19.



Figura 19 - Ensaio de Abatimento de tronco de cone do concreto

4.2.2 Fôrmas

Foram executadas fôrmas conforme as dimensões esperadas para as vigas ($20 \times 30 \times 200$) cm, elaboradas de tábuas cerradas e painéis de madeira compensada resinada. Aplicou-se o desmoldante, conforme pode ser visualizado na Figura 20.



(a)

(b)

Figura 20 – Fôrmas utilizadas para confecção das vigas

4.2.3 Aplicação, adensamento e cura

O concreto foi lançado e o adensamento realizado foi mecânico utilizando um vibrador de imersão, conforme Figura 21. O vibrador era do tipo agulha com 420 mm de comprimento, diâmetro de 25,4 mm.



Figura 21 - Concretagem das vigas

Iniciou-se a cura por aspersão superficial de água tão logo a superfície concretada estava resistente à ação da água e se estendeu o procedimento por 7 dias.

4.2.4 Aço

As vigas possuem armações longitudinais com aço, sendo 3 barras de Ø 10,0 mm na parte inferior, 2 barras de Ø 10,0 mm na parte superior e estribos de Ø 5,0 mm a cada 16 cm, conforme Figura 22. O cobrimento nominal especificado foi de 2,5 cm obtidos com a utilização de espaçadores plásticos.



Figura 22 – Armação das vigas

As barras de aço longitudinais foram ensaiadas à tração segundo a ABNT NBR 6152 para a determinação de sua tensão de escoamento e ruptura. Foram ensaiadas quatro amostras de Ø 10 mm. Na Tabela 4 são apresentadas as propriedades destas armaduras.

Tabela 4 - Resultado do ensaio de tração das armaduras usadas nas vigas

Amostra	Área mm ²	Massa linear g/mm	Força máxima kgf	Tensão máxima(falar da variação) MPa	Tensão de escoamento MPa	Alongamento na ruptura %
CP1	76,88	0,60	7065	901,16	637,99	14,00
CP2	76,52	0,60	6842	876,91	615,86	15,00
CP3	76,82	0,60	6776	865,03	588,95	15,00
CP4	76,54	0,60	7255	929,58	637,46	18,00

4.2.5 Composto de PRFC

Na condução do programa experimental, foi empregado o sistema de reforço com material composto de PRFC em lâmina pré-fabricada unidirecional, disponível atualmente no mercado nacional, proveniente de apenas um fornecedor, para evitar variabilidade nos resultados. Esta lâmina foi colada depois da preparação da superfície do concreto, não necessitando de nenhuma instalação adicional. As propriedades do laminado, segundo informações do fabricante, são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades do laminado pré-fabricado

Propriedades	Valores
Base	Fibra de Carbono em matriz epóxi
Cor	Preta
Conteúdo de fibras em volume	> 68%
Densidade	1,6 g/cm ³
Resistência à temperatura	> 150 °C
Largura	50 mm
Espessura	1,2 mm
Seção transversal	60 mm ²
Módulo de elasticidade	> 155.000 MPa
Resistência à tração	> 2.400 MPa
Resistência à tração na ruptura	3.100 MPa
Deformação	> 1,9 %

Fonte: Catálogo do fornecedor

As propriedades mecânicas citadas anteriormente correspondem à direção longitudinal da fibra.

4.2.7 Adesivo à base de formulação epóxi

Na colagem do reforço de PRFC de 15 vigas foi utilizado um adesivo à base de resina epóxi com consistência de massa, de elevada viscosidade, misturado na proporção três partes da formulação epóxi para uma parte do catalisador. O produto usado foi proveniente de apenas um fornecedor, conforme pode ser visto na Figura 23.



Figura 23 - Recipientes do catalisador e da formulação epóxi

Foi determinado experimentalmente o limite da temperatura de trabalho da formulação epóxi. Colocaram-se duas amostras de PRFC sob temperaturas fixas de (60, 70, 80, 90 e 100) °C durante 24 horas. Por meio deste procedimento verificou que temperaturas acima de 80 °C, a formulação epóxi tornava-se mais viscosa, evidenciando a mudança microestrutural. Este artifício foi utilizado porque não foi informada em manuais técnicos a temperatura de transição vítrea do material.

As características técnicas do adesivo epóxi foram obtidas do rótulo do produto, conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Características técnicas da formulação epóxi

Propriedade	Valores
Massa Específica	1,65 kg/dm ³
Tempo para aplicação	1 a 1,5 horas
Cura inicial	24 horas
Cura final	7 dias
Resistência à compressão à 1 dia	> 40 MPa
Resistência à compressão à 7 dias	> 55 MPa
Temperatura de aplicação	5 °C a 35 °C

Fonte: Catálogo do fornecedor

4.2.7 Filme termo-ativado fenólico

O filme utilizado possui dupla face linear separado por um filme amarelo conforme mostrado na Figura 24. As características do adesivo estão descritas na Tabela 7.

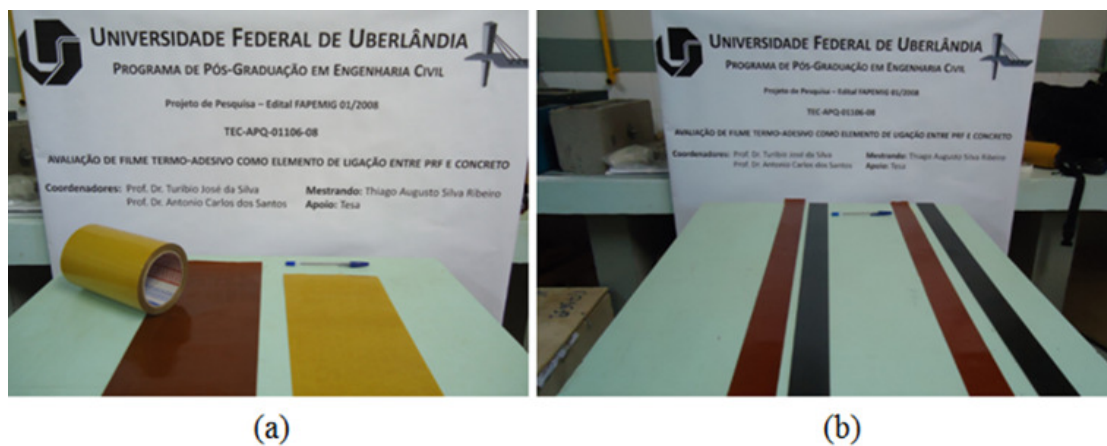


Figura 24 – (a) filme termo-ativado e (b) filme termo-ativado cortado de acordo com o PRFC

Tabela 7 – Características do filme fornecido pelo fabricante

Característica	Filme termo-ativado
Resina do adesivo	Resina fenólica
Resistência à tração (MPa)	>2
Espessura	0,25 mm
Largura	165 mm
Temperatura de armazenagem	Ambiente
Tempo e temperatura recomendados para a cura	120 °C - 250°C durante 30 min.

Fonte: Catálogo do fornecedor

CAPÍTULO 5

PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para experimentos envolvendo ensaios é importante determinar a influência de uma ou mais variáveis sobre outra variável de interesse. Nesse trabalho, o reforço foi projetado para que durante os ensaios as vigas falhem prematuramente na aderência, estimulando o descolamento do PRFC, fato não usual nas práticas de reforço estrutural. Com base nas recomendações de Barros Neto *et al.* (1995) o programa experimental adotado foi do tipo fatorial 2^2 . Para executar um planejamento fatorial, especificam-se os níveis em que cada fator deve ser estudado, para fazer os experimentos. O estudo foi dividido em duas etapas distintas nas quais se avaliou os fatores (a) tipo de adesão, (b) número de camadas de adesão e (c) temperatura de exposição.

Todas as vezes que o sistema foi submetido a um conjunto de níveis definido é considerado um ensaio experimental. As interações analisadas foram divididas em fases, a primeira fase compreende (Tipo de adesão \times Número de camadas) e a segunda fase refere-se (Tipo de adesão \times Temperatura). Na Tabela 8 têm-se os fatores escolhidos com seus respectivos níveis.

Tabela 8 - Fatores e características analisadas para o reforço

Fatores	Níveis
Elemento de adesão	Formulação epóxi
	Filme termo-adesivo fenólico
Número de camadas de reforço	1 camada
	2 camadas
Temperatura máxima atingida durante ensaio	25 °C
	80 °C
	120 °C

5.2 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS

A primeira etapa deste estudo avaliou, de forma comparativa, o desempenho do reforço variando o número de camadas e o tipo de adesão do PRFC. Para tanto, foram moldados 15 vigas de concreto armado, divididas em 5 grupos com 3 vigas cada. Um destes grupos (G0) denominado “controle 1” gerou resultados que, dentre outras coisas, permitiram aferir o reforço a ser aplicado nas demais vigas. Os grupos restantes (G1, G2, G3 e G4) forneceram resultados com distintas combinações dos fatores: tipo de adesão e número de camadas aderidas conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9 - Descrição dos grupos de ensaiados, pertencentes à Fase 1

Grupo	Vigas	Tipo de adesão	Número de camadas
G0	1, 2 e 3	Ausência de reforço	-
G1	4, 5 e 6	Formulação epóxi	1
G2	7, 8 e 9	Filme termo-ativado	
G3	10, 11 e 12	Formulação epóxi	2
G4	13,14 e 15	Filme termo-ativado	

Na segunda etapa foi avaliado o desempenho dos tipos de formulações adesivas submetidas a condições de variação térmica. Nesta etapa foi utilizada apenas uma camada do elemento de adesão do reforço. Esta fase é composta por 6 grupos distintos (G5, G6, G7, G8, G9 e G10), cada grupo composto por 3 vigas.

Os ensaios dos grupos (G5 e G6) foram realizados sob temperatura ambiente em torno de 25 °C, denominado “controle 2” e teve a função de fornecer dados para aferir a adesão do reforço aplicado nas demais vigas que foram submetidas à atmosfera aquecida. Deste modo, para a Fase 2 foi necessário confeccionar 18 vigas, conforme Tabela 10.

Tabela 10 - Descrição dos grupos, pertencentes à Fase 2

Grupo	Vigas	Tipo de adesão	Temperatura
G5	16, 17 e 18	Filme termo-ativado fenólico	25 °C
G6	19, 20 e 21	Formulação epóxi	
G7	22, 23 e 24	Filme termo-ativado fenólico	80 °C
G8	25, 26 e 27	Formulação epóxi	
G9	28, 29 e 30	Filme termo-ativado fenólico	120 °C
G10	31, 32 e 33	Formulação epóxi	

5.3 PROCEDIMENTO PADRÃO PARA REFORÇO DAS VIGAS COM PRFC

A aderência do reforço ao substrato de concreto é condição indispensável para a transferência de tensões entre o concreto e o PRFC. Para isso, as superfícies das vigas de concreto foram preparadas segundo procedimento já adotado por vários pesquisadores e fabricantes dos produtos.

A primeira operação consistiu na retirada da camada frágil de nata de cimento com equipamentos com ação abrasiva. Utilizou-se disco de lixa grossa acoplado a uma lixadeira elétrica. Falhas de concretagem e imperfeições superficiais eram identificadas e completamente expostas, para posterior correção.

Os grandes vazios do substrato eram preenchidos com material de resistência compatível à do concreto existente. Problemas de nivelamento foram minimizados com o lixamento e raspagem da superfície utilizando-se uma pedra porosa acoplada à lixadeira. Neste procedimento os agregados graúdos começavam a ficar expostos, antes da aplicação da formulação adesiva. Toda a superfície era seca, com remoção de todos os tipos de poeira e partículas residuais da nata de cimento dos procedimentos anteriores com jateamento de ar comprimido. Utilizou-se também neste procedimento um secador industrial. Serão relatados a seguir os procedimentos executados para preparação da faixa de concreto onde ocorreu a aplicação do reforço PRFC.

5.3.1 PRFC aderido com adesivo à base de formulação epóxi

Iniciou-se a preparação da formulação epóxi logo após a superfície estar totalmente preparada. Necessitou-se pré-misturar separadamente os componentes A e B. Em seguida, despejou-se todo o conteúdo do componente B (catalisador) ao recipiente do componente A (resina), e procedeu-se à mistura mecânica com o uso de uma haste metálica acoplada a um dispositivo giratório, por no mínimo 3 minutos, até se obter um material homogêneo e sem grumos.

Para a aplicação do produto utilizou-se de espátulas metálicas e de plástico com uma abertura de (2 × 50) mm para distribuição na superfície da viga, formando uma camada da ordem de 2 mm de espessura por 50 mm de largura quando distribuída. Durante a aplicação do produto sobre o substrato de concreto, tinha-se o cuidado de observar a eficiência da penetração e completa cobertura da superfície. O laminado composto de PRFC era instalado imediatamente após a regularização da camada ainda pegajosa do adesivo. Pressionava-se manualmente o reforço para a saída do ar no momento da colagem. Colocava-se uma fita adesiva de uso escolar para delimitar o espaço no qual seria colado o PRFC, que era um retângulo de (100 × 5) cm, promovendo assim uma

padronização dos corpos-de-prova. O excesso de adesivo das laterais era removido com a própria espátula, fazendo-se um acabamento chanfrado (concreto/adesivo/lâmina de PRFC). Esse procedimento ocorria em temperatura ambiente de aproximadamente 25 °C, conforme Figura 25.

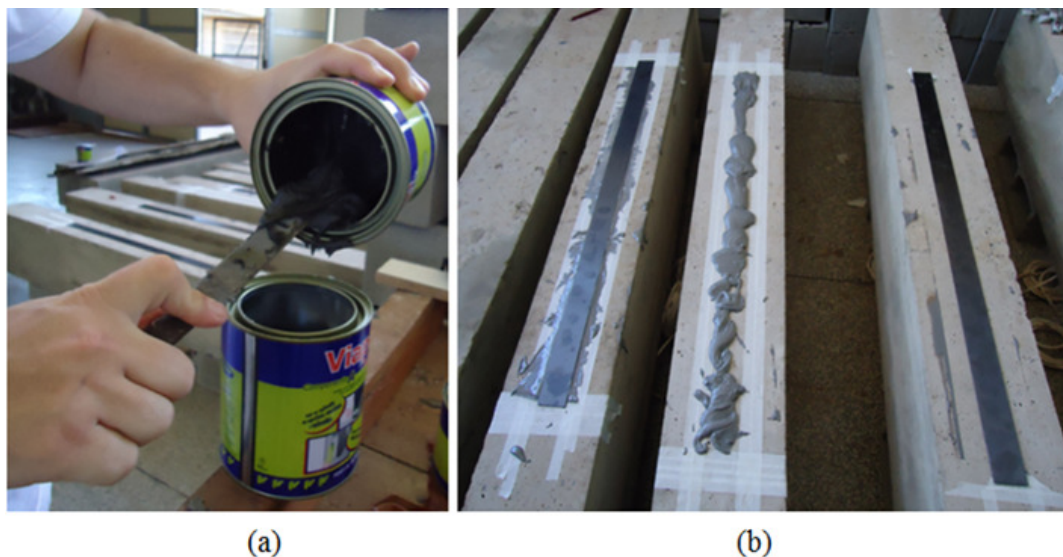


Figura 25 – (a) Procedimento de preparo do produto, misturando o componente B no A.
(b) Processo de aplicação da formulação epóxi e fixação do PRFC

5.3.2 PRFC aderido com filme termo-ativado

Inicialmente cortou-se o filme termo-ativado com a largura de 6 cm. Em seguida foi colocado sobre a viga que estava em posição invertida sobre os apoios para a aplicação de carga controlada por meio do macaco hidráulico e aferição por um anel manométrico, conforme Figura 26. Após a aplicação de uma carga de 30 kN iniciava-se a aplicação de calor em torno de 120 °C por aproximadamente 30 minutos distribuídos em cada lateral para facilitar a cura do adesivo, para evitar a variabilidade, utilizou um termopar para aferir a temperatura.



Figura 26 – Aplicação de (a) temperatura e (b) carga distribuída controladas sobre o PRFC

5.4 ENSAIOS DAS VIGAS

O valor de uma análise experimental está associado à qualidade das informações obtidas durante a sua execução e sua relevância para a compreensão do comportamento do elemento estrutural sob análise.

Dentro desta perspectiva, idealizou-se um sistema em que fosse possível a completa automatização dos ensaios, tanto do ponto de vista de carregamento quanto de aquisição de dados, buscando-se assim, garantir a qualidade e fidelidade destes resultados. Serão descritos a seguir os procedimentos para a execução dos ensaios:

- *Extensometria:* para medições de deformações do aço e do concreto foram utilizados extensômetros elétricos de resistência, um meio de se medir e registrar o fenômeno da deformação nos materiais constituintes das vigas. Foram utilizados dois tipos de extensômetros elétricos, um de menor dimensão específico para o aço e PRFC com (3×9) mm, e outro para o concreto de maior dimensão (6×36) mm (Figura 27).

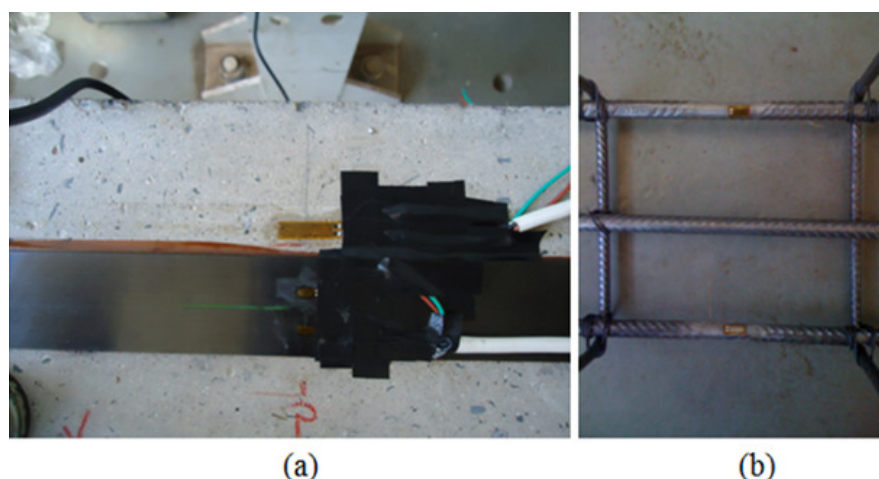


Figura 27 (a) Tipos de extensômetros utilizados, no meio do vão no concreto inferior e PRFC (b) instalados nas armaduras inferiores do concreto

Para que a deformação aplicada no extensômetro seja a mesma que a da peça examinada, foram adotadas algumas técnicas durante sua aplicação que eliminaram efeitos indesejáveis.

Inicialmente fez-se a locação do ponto em que se deseja a medida da deformação tanto nas barras de aço, na superfície do concreto e na lâmina de PRFC.

Em seguida foi feita a limpeza da superfície de maneira a evitar a contaminação do local de colagem e dos próprios extensômetros, como óleos, graxas, óxidos, poeiras e outros agentes prejudiciais à boa colagem. Esta operação foi feita com o auxílio de ferramentas e materiais como limas finas, esmeril e lixas.

Após a limpeza, utilizou-se um solvente para eliminar todo resíduo oleoso que pudesse existir na superfície onde era colado o extensômetro. O solvente utilizado foi a acetona, pois não reage com o material que estava sendo limpo.

Com a superfície perfeitamente limpa e isenta de contaminantes, procedeu-se à locação dos extensômetros. Esta operação foi feita com auxílio de ferramentas para traçados como réguas e riscadores. Depois de marcada a posição na superfície de colagem, foi feita uma nova limpeza com solvente. Esta operação foi feita com gaze embebida em acetona,

friccionando por várias vezes em uma única direção. Refez-se esta operação até obter-se uma gaze limpa.

Após o extensômetro ter sido colado e convenientemente curado, foi necessário um teste das condições elétricas, com o auxílio de um ohmímetro com escala apropriada. Em seguida foi medido o isolamento entre o extensômetro e a peça onde está colado. Isto se faz com uma ponta do ohmímetro ligado em uma das pernas do extensômetro e a outra ponta ligada à peça.

- *Compensadores de temperatura:* a técnica previu a instalação de pares de extensômetros para cada ponto de controle da deformação. Para cada par, um extensômetro foi instalado em corpos de prova (concreto, aço e PRFC) semelhante ao material da viga ensaiada, mas que não sofreu deformação nenhuma devido a carregamento, como o visto na Figura 28. Esse extensômetro é chamado de compensador de temperatura enquanto o outro instalado na viga é chamado de extensômetro ativo. O objetivo desta ligação é anular a variações no extensômetro com relação à variação de temperatura ambiente sofrida pelos corpos de prova. Nos ensaios para simular atmosfera aquecida os corpos de prova do concreto e PRFC com compensadores de temperatura foram colocados dentro do forno. Para a aferição das deformações do aço foram colocados dois extensômetros por barra antes da concretagem, na face inferior e superior. Todos os extensômetros foram instalados em $\frac{1}{2}$ ponte.



Figura 28 - Corpos de prova com extensômetros compensadores de temperatura no aço, concreto e PRFC, respectivamente

- *Deslocamento vertical*: para controle e medições de deslocamentos das vigas no meio do vão durante os ensaios foram utilizados transdutores do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) (Figura 29).

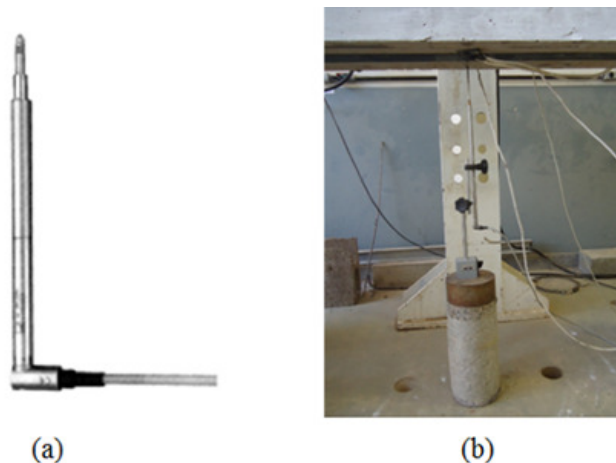


Figura 29 - LVDT utilizado no ensaio, no meio do vão da viga

- *Sistema de aquisição de dados*: foi utilizado um sistema para aquisição e visualização dos valores dos ensaios, este aparelho acoplado a um computador foi usado para o monitoramento de forças, deformações por meio de extensômetros e deslocamentos medidos pelos transdutores indutivos, conforme pode ser visto na(Figura 30).

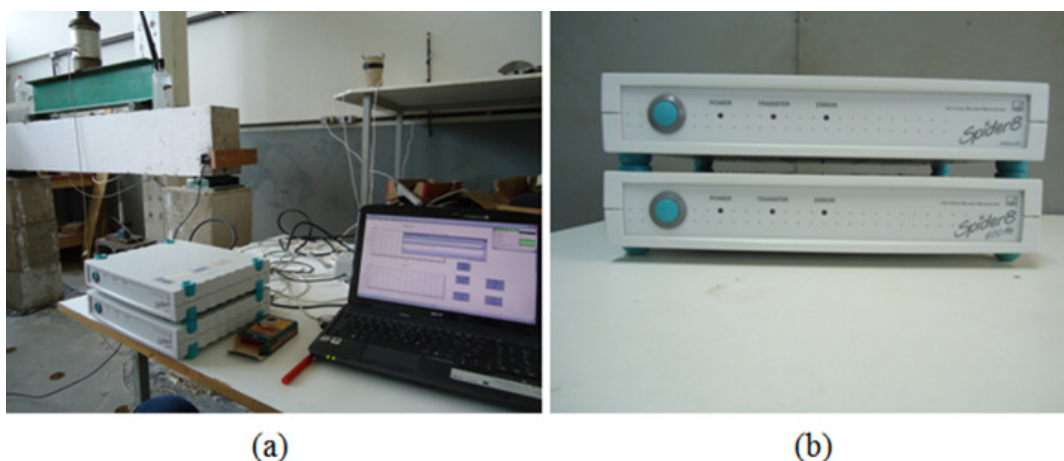


Figura 30 – Sistema de aquisição de dados utilizados nos ensaios

- *Forno do tipo câmara com montagem modulada*: foi projetado um forno para ser utilizado nos ensaios com as vigas de concreto armado sujeita a variações de temperatura.

O forno está em processo de patente, portanto somente serão informadas as características principais.

O forno foi construído em chapas de aço inoxidável com estrutura composta por 6 módulos independentes para facilitar a montagem durante os ensaios. É dotado de um Pannel de Controle de temperatura com programador que desliga o forno automaticamente.

Este sistema não sofre desgaste mecânico e reduz o efeito da inércia térmica, melhorando a homogeneização e economizando energia durante a permanência no patamar. Existe uma recirculação indireta mantendo um fluxo constante do calor irradiado pelos elementos. O isolamento foi feito com painéis em lã de rocha (Figura 31).



Figura 31 – Forno construído e suas partes principais.

- *Carregamento*: implementou-se um sistema de carregamento através de um atuador hidráulico conectado à uma célula de carga com capacidade 500 kN. Desta forma, tornou-se possível a condução de um ensaio com deslocamento controlado. Em função da

configuração da prensa (pistão localizado em sua parte superior), as vigas foram ensaiadas com o carregamento sendo aplicado de cima para baixo. Foram, construídas, então, duas estruturas auxiliares, para abrigar os apoios. Um esquema do sistema de ensaio é apresentado na Figura 32.

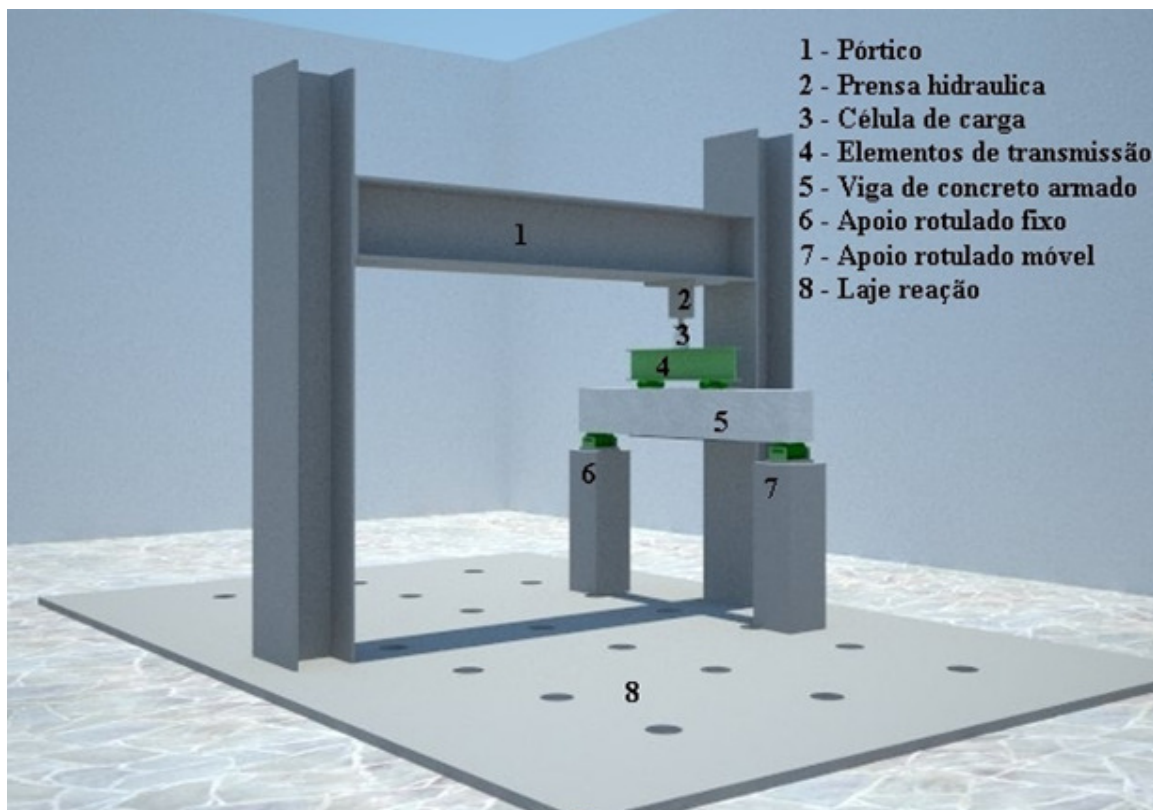


Figura 32 – Componentes e esquema do ensaio (corrigir o 2).

O esquema da viga com o reforço pode ser observado na Figura 33 e na Figura 34 pode-se notar a célula de carga sobre a viga de distribuição de carga (perfil I de aço).



Figura 33 – Ensaio realizado em temperatura ambiente.



Figura 34 - Ensaio com forno à elevada temperatura.

O ensaio das vigas foi realizado com aplicação de carga do tipo quatro pontos (*four points bend*), com duas cargas concentradas aplicadas em seus terços médios da viga.

O esquema de carregamento gera um esforço cortante constante, no vão de cisalhamento (entre apoio e aplicação de carga), com um momento constante entre os pontos de aplicação da carga que vai a zero nos apoios. Embora não se caracterize como um carregamento usual na prática, onde freqüentemente são mais comuns carregamentos

distribuídos, esta configuração é geralmente utilizada, uma vez que permite uma análise simplificada e precisa dos resultados. As vigas reforçadas foram projetadas para falharem na aderência do reforço em situação de ruptura prematura do elemento de adesão nos ensaios conforme Figura 35 e Figura 36.

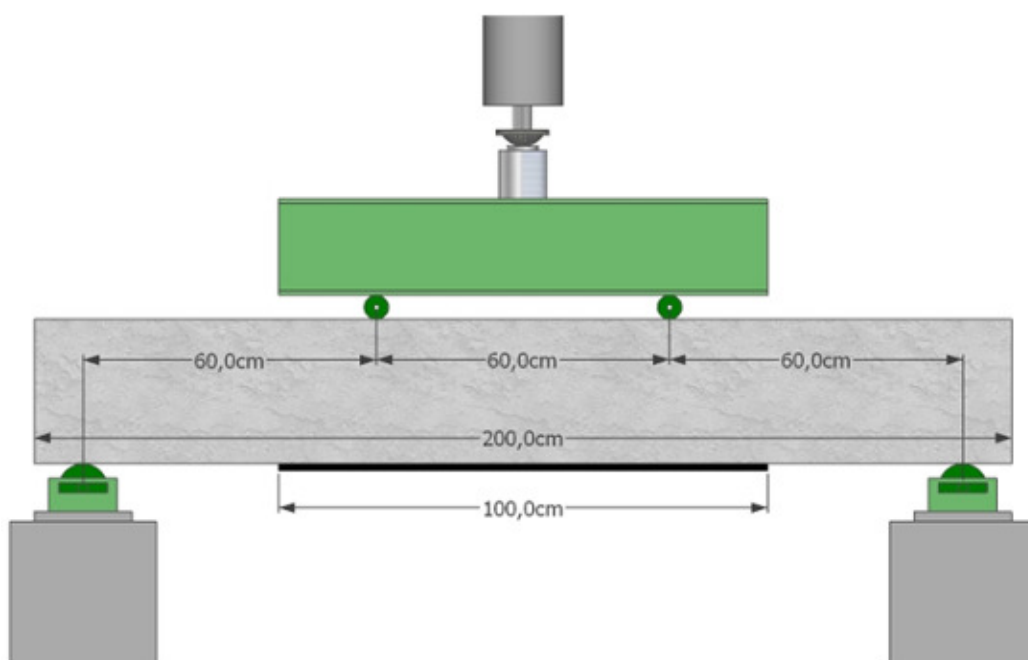


Figura 35 – Posicionamento e dimensão dos elementos utilizados no ensaio.

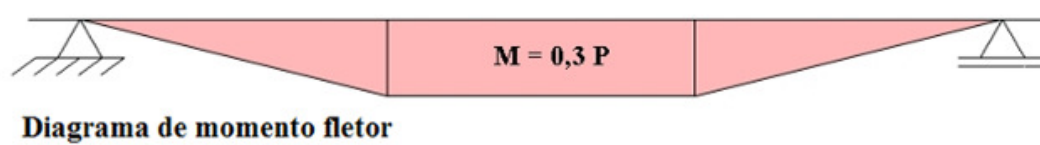
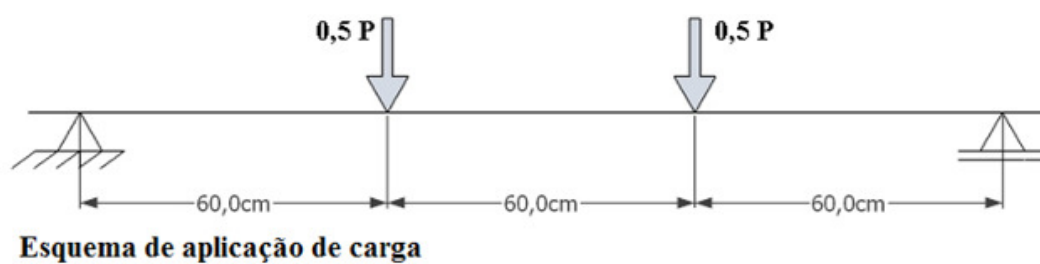


Figura 36 – Esquema de aplicação de carga e esforços gerados na viga, momento e cortante respectivamente, para provocar o descolamento precoce.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E ANÁLISES

6.1 AVALIAÇÕES DAS CARGAS E MODO DE DESCOLAMENTO

As utilizações de diferentes sistemas de adesão do reforço apresentam, inerentemente, diferenças quanto à sua eficiência. Desta forma, considerou-se interessante avaliar, separadamente, a influência da colagem do reforço nos ensaios da primeira etapa à temperatura ambiente e na segunda etapa, com a exposição à temperatura. Em ambos os casos, realiza-se, uma avaliação do comportamento ao descolamento do reforço, e das formas de rupturas das vigas, analisando as distribuições de tensões com a evolução do carregamento.

Deve-se salientar que todas as análises realizadas são comparativas e referem-se aos resultados obtidos nos ensaios concebidos para permitir a análise somente da ligação entre o reforço e o concreto na região de tração devido ao momento fletor. Em condições reais de reforço, projeta-se o reforço buscando assegurar sua ancoragem nas extremidades, o que propositalmente não foi feito nesta pesquisa, para estimular o descolamento.

O descolamento do reforço nas vigas ensaiadas caracterizou-se pela ruptura prematura na interface adesivo/material composto, a partir de sua extremidade, conduzindo, na sequência, ao progressivo descolamento do reforço, como era previsto. Para a delimitação deste programa experimental, baseou-se nos dizeres do CEB-FIP *Bulletin 14* (2001), segundo o qual os modos de ruptura de uma viga de concreto armado, reforçada à flexão com materiais compostos, podem ser divididos em dois grupos: (i) aqueles em que a aderência entre concreto e reforço permanece intacta até o esmagamento do concreto ou

ruptura do reforço à tração (modos de ruptura “clássicos”) e (ii) aqueles em que ocorre uma ruptura prematura na ligação concreto/reforço.

O objetivo previsto e alcançado na presente pesquisa foi o (ii). Na Figura 37 apresenta-se um aspecto geral do descolamento do reforço para as vigas reforçadas com uma camada de laminado.



Figura 37 – Momento do ensaio que houve o primeiro descolamento

Basicamente, quando uma fissura se forma, a tensão de tração correspondente é transferida para o reforço, resultando no surgimento de tensões tangenciais entre concreto e reforço, próximo a esta fissura. É possível observar, na Figura 38, em detalhe, o ponto de início do descolamento, junto à extremidade do reforço.

O incremento na carga aplicada conduz a um aumento natural nas tensões de tração e a conseqüente elevação da tensão tangencial na interface concreto/reforço. Quando esta tensão tangencial atinge valores críticos, o descolamento tem início neste ponto e se propaga para uma das extremidades, geralmente a mais próxima.



Figura 38 – Descolamento do PRFC com formulação epóxi e a remoção do substrato de concreto

6.1.2 Descolamento do PRFC nos ensaios da primeira etapa

Na primeira etapa, para cada um dos grupos de vigas analisados, G1, G3 e G4, foram obtidos valores para a carga atuante que levou ao descolamento do reforço de PRFC. O grupo G2 foi excluído, pois alguns resultados foram perdidos pelo sistema de aquisição de dados. Foi considerada, para este trabalho, a distribuição normal de probabilidade, os valores médios e o desvio padrão na Tabela 11.

A partir dos valores das cargas aplicadas às vigas no momento do descolamento, foram obtidos os momentos fletores utilizados nesta análise, considerando a distância entre o apoio e o ponto de aplicação da carga. Os valores corresponderão na função falha à parcela da solicitação (S).

Tabela 11 - Valores obtidos para o descolamento do PRFC nos ensaios da primeira etapa

Descrição			Descolamento do reforço de PRFC					
Grupo	Tipo de adesão	Elemento	F (kN)	Desloc. vertical (mm)	Momento de descolamento (kN x m)			
					M=0,3×F	Média μ_M	Desvio padrão σ_M	Coefic.de variação %
1	Formulação epóxi 1 camada	Viga 4	107,05	7,28	32,12	33,73	2,15	6,36
		Viga 5	120,56	9,06	36,17			
		Viga 6	109,73	7,83	32,92			
3	Formulação epóxi 2 camadas	Viga 10	105,2	6,44	31,56	31,55	1,46	4,63
		Viga 11	100,3	5,35	30,09			
		Viga 12	110,04	6,66	33,01			
4	Filme 2 Camadas	Viga 13	105,79	5,50	31,74	31,11	3,82	12,28
		Viga 14	90,05	6,68	27,015			
		Viga 15	115,25	6,22	34,575			

Nas análises dos grupos das vigas G1, G3 e G4, dotadas de três diferentes formas de adesão na colagem de lâminas de PRFC, geraram-se probabilisticamente as variáveis físicas conforme as distribuições que lhes foram prescritas, e então, foi obtida a carga para o descolamento das lâminas de PRFC. Para cada uma das análises, foram obtidos β diferentes, obtendo-se, deste modo, três valores para a carga de ruptura e três valores para o índice de confiabilidade.

6.1.3 Descolamento do PRFC nos ensaios da segunda etapa

De forma similar à primeira etapa, nesta segunda etapa, para cada um dos grupos de vigas analisados sob o efeito da temperatura G7, G8, G9 e G10, também foram obtidos valores para a carga atuante que levou ao descolamento do reforço de PRFC e comparados com os

grupos de controle o G5 e G6, ensaiados à temperatura ambiente. A distribuição normal de probabilidade, os valores médios e o desvio padrão pode ser visto na Tabela 12.

Tabela 12 - Valores máximos obtidos para a ruptura por descolamento do PRFC nos ensaios da segunda etapa

Grupo	Tipo de adesão - temp.	Elemento	F (kN)	Desloc. vertical (mm)	Momento (kN x m)			
					M=0,3×F	Média μ_M	Desvio padrão σ_M	Coefic.de variação %
5	Filme temp. ambiente	Viga 16	86,41	5,65	25,92	28,90	3,98	13,79
		Viga 17	111,45	9,06	33,43			
		Viga 18	91,20	5,62	27,36			
6	Formulação epóxi temp. ambiente	Viga 19	110,56	6,494	33,16	32,28	1,71	5,32
		Viga 20	111,29	6,49	33,38			
		Viga 21	101,03	4,96	30,30			
7	Filme 80 °C	Viga 22	54,85	4,2	16,45	21,00	6,17	29,40
		Viga 23	61,75	5,15	18,52			
		Viga 24	93,45	5,01	28,03			
8	Formulação epóxi 80 °C	Viga 25	113,21	6,74	33,96	35,85	1,98	5,53
		Viga 26	118,93	5,43	35,67			
		Viga 27	126,42	5,88	37,92			
9	Filme 120 °C	Viga 28	40,62	2,07	12,18	7,02	5,52	78,70
		Viga 29	25,62	1,41	7,68			
		Viga 30	21,23	4,71	1,19			
10	Formulação epóxi 120 °C	Viga 31	118,89	9,03	35,66	14,96	17,93	119,89
		Viga 32	91,24	5,08	4,93			
		Viga 33	71,43	4,26	4,28			

6.1.4 Modos de rupturas

O modo de falha associado ao início do descolamento do material composto ocorreu em decorrência da formação de uma fissura diagonal, entre os apoios e a aplicação da carga. Inicialmente formam-se fissuras verticais de flexão, originadas a partir da zona tracionada da viga, no terço médio. Em seguida, algumas fissuras propagaram-se em direção ao ponto de aplicação da carga, inclinando-se. Com o aumento da abertura desta fissura, a deformação no reforço pode atingir seu valor máximo, geralmente próximo ao terço de tração pura da viga. A ruptura do reforço ocorre quando a deformação máxima é atingida.

Em algumas situações, observou-se um descolamento parcial do reforço de apenas um dos lados que fissurou. O descolamento ocorreu nas imediações desta fissura e, uma vez iniciado o processo de descolamento, a viga sofre seu colapso rapidamente, com emissão de um som, que auxilia a identificar o momento da falha. Este modo de ruptura é controlado pela aderência entre o material composto e o substrato de concreto, conforme Figura 39.

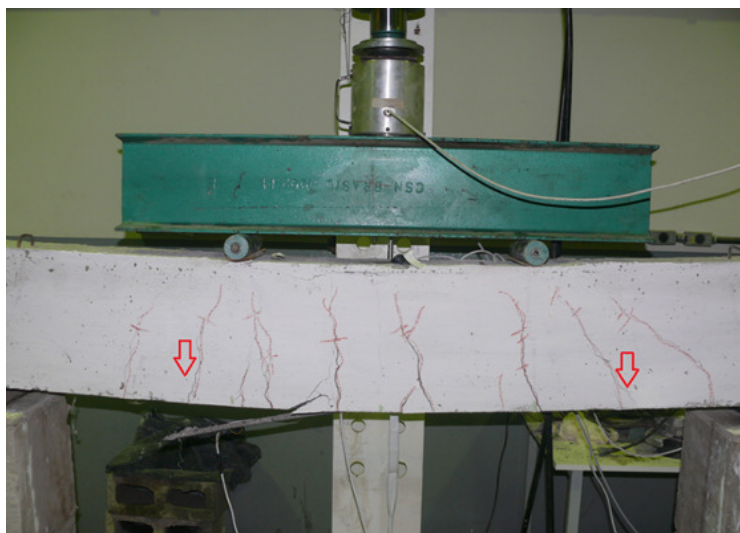


Figura 39 – Detalhe do modo de ruptura

A partir da avaliação do comportamento experimental de todos os grupos, suas cargas e modos de ruptura, confirmou-se que a aplicação de PRFC conduz a modificações no comportamento de uma viga reforçada, atestando principalmente, seu modo de ruptura. A utilização dos PRFC aderido com formulação epóxi reduziu a abertura de fissuras, além de

distribuí-las de forma uniforme ao longo do comprimento da viga, fato não detectado nas vigas reforçadas com o filme termo-ativado. Em algumas vigas, concentrações de tensões próximas aos pontos de aplicação de carga, dando indicio da não divisão da carga aplicada, como pode ser visualizado na Figura 40.

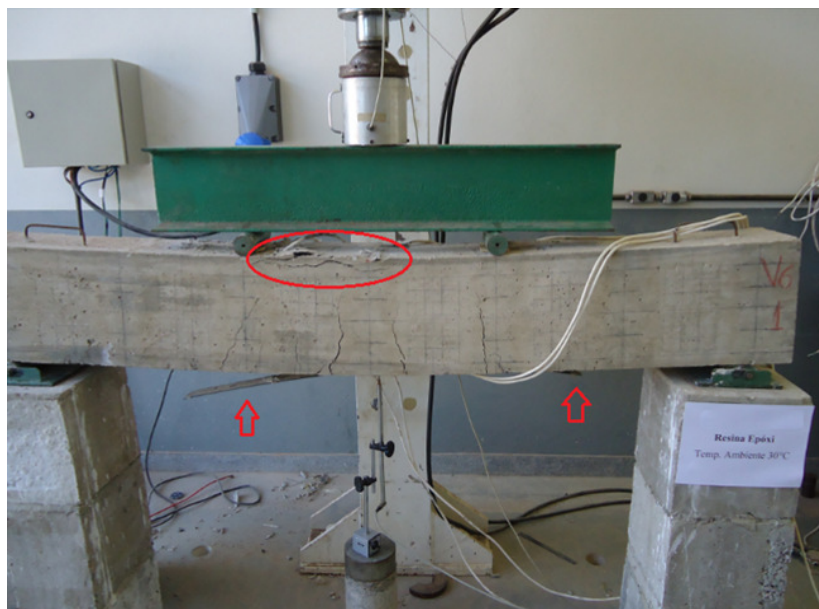


Figura 40 – Concentrações de tensões no concreto e destacamento do material composto na interface

Nas Figura 41 e Figura 42 ilustram detalhadamente os modos de descolamento do reforço observados no experimento.



Figura 41 - Destacamento do laminado ocasionado pela falta de regularidade da superfície de concreto e possíveis falhas na interface

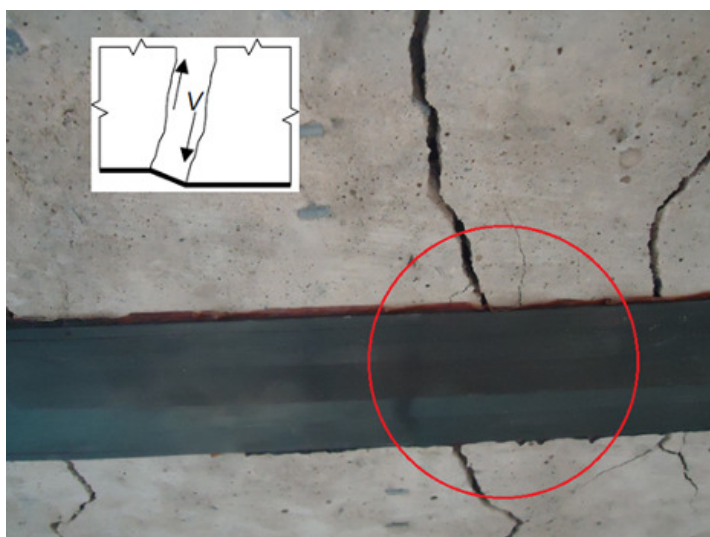


Figura 42 - Destacamento do laminado devido ao deslocamento relativo entre dois lados de uma fissura de cisalhamento

O modo de ruptura apresentado pelas vigas aconteceu principalmente em decorrência da fissuração excessiva na região tracionada. Este modo de ruptura está associado ao mecanismo de transferência de esforços entre reforço e concreto. Como a formulação epóxi utilizada nos sistemas de reforço apresenta uma resistência à tração maior que a do concreto, este acaba tornando-se o elemento frágil nesta ligação e, conseqüentemente aquele que desencadeará o processo de ruptura. A ruptura está, portanto, associada à combinação de tensões tangenciais e de tração nesta região, conforme pode se visto na Figura 43.

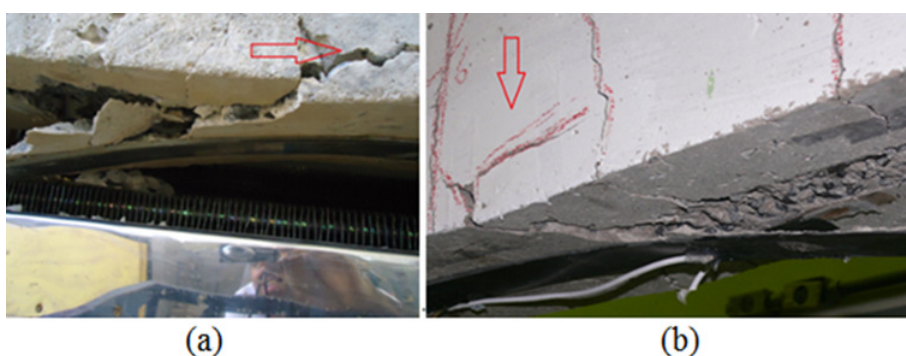


Figura 43 - Cisalhamento horizontal do concreto na região tracionada

Com base nos estudos de Teng *et al.* (2001), foram classificados sete modos de ruína observados nos elementos reforçados com PRFC:

- Modos de ruptura clássicos:

- (a) flexão com ruptura do reforço por tração e/ou escoamento da armadura;
- (b) flexão com esmagamento do concreto;
- (c) esforço de cisalhamento.

- Modos de ruptura prematuros:

- (d) destacamento do concreto de cobrimento, Figura 46;
- (e) descolamento da camada de reforço; Figura 47
- (f) fissuração na interface concreto-reforço pela propagação de uma fissura de flexão na interface (*end-peeling*), Figura 48;
- (g) fissuração concreto-reforço pela propagação de uma fissura de cisalhamento na interface (*shear-peeling*), Figura 43,

O destacamento do concreto de cobrimento (d) acontece junto à armadura longitudinal e é resultado da associação das tensões de cisalhamento e de tração atuantes na interface concreto-reforço, com as fissuras de flexão e cisalhamento desenvolvidas no concreto (*peeling-off*). O descolamento da camada de reforço (e) acontece quando há uma má aderência entre o concreto e a camada de PRFC. Nesse caso, as tensões de tração e de cisalhamento que atuam na interface concreto-reforço superam a capacidade de aderência do material utilizado na colagem. Isso pode depender da qualidade do material, da execução do serviço ou do número de camadas. A ruptura na interface concreto-reforço pela propagação de uma fissura de flexão na interface (f) ou de uma fissura de cisalhamento (g) irá ocorrer devido à elevada concentração de tensões na ponta das trincas, que tenderão a se propagar na interface concreto-reforço. A seguir na Figura 44 e Figura 45 outros modos de ruptura observados nos ensaios.



Figura 44 - Cisalhamento na interface com deslizamento da (a) formulação epóxi em e (b) do filme termo-adesivo removido, em ensaios simulando atmosfera aquecida.



Figura 45 - Propagação de fissuras na própria formulação epóxi;

Estas falhas estão associadas à combinação de tensões tangenciais e de tração, conduzindo à separação do reforço de forma frágil e abrupta. Em algumas vigas ocorreu o destacamento do reforço e o arrancamento da camada longitudinal de concreto, conforme pode ser visto na Figura 46.



Figura 46 - Arrancamento do concreto entre armadura longitudinal e o reforço

Esse tipo de ruptura é similar aos obtidos em diversos ensaios de Beber (2003) e Juvandes (1999) que demonstraram que o arrancamento da camada de concreto junto à armadura longitudinal tem se caracterizado como um modo de ruptura prematuro, frequente quando não se usam sistemas de ancoragem. O início desta falha deve-se à alta concentração de tensões na interface concreto/reforço, junto à extremidade do reforço. A seguir na Figura 47, Figura 48 e Figura 49 os modos de rupturas foram separados de acordo com as temperaturas do ensaio da segunda etapa.



Figura 47 - Detalhe do descolamento, (a) utilizando formulação epóxi, e (b) do filme termo-ativado, nas vigas ensaiadas à temperatura ambiente



Figura 48 – Detalhe do descolamento do reforço utilizando(a) formulação epóxi e (b) filme termo-adesivo, nas vigas ensaiadas a 80°C



Figura 49 – Detalhe do descolamento, utilizando (a) formulação epóxi em e (b)filme termo-adesivo, nas vigas ensaiadas à 120 °C

6.2 EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE CONFIABILIDADE

6.2.1 Equação do estado limite

A aplicação da confiabilidade estrutural requer, conforme descrito no Capítulo 3, o conhecimento das variáveis que participam do sistema. O método que será aplicado na determinação do índice de confiabilidade, portanto, a obtenção da probabilidade de falha P_f será por meio do método *FORM* que necessita da definição da equação de estado limite. Neste trabalho, a equação foi desenvolvida a partir da equação de equilíbrio (Equação 22) da seção de concreto armado submetida à flexão normal simples no estado limite último, representada na Figura 50.

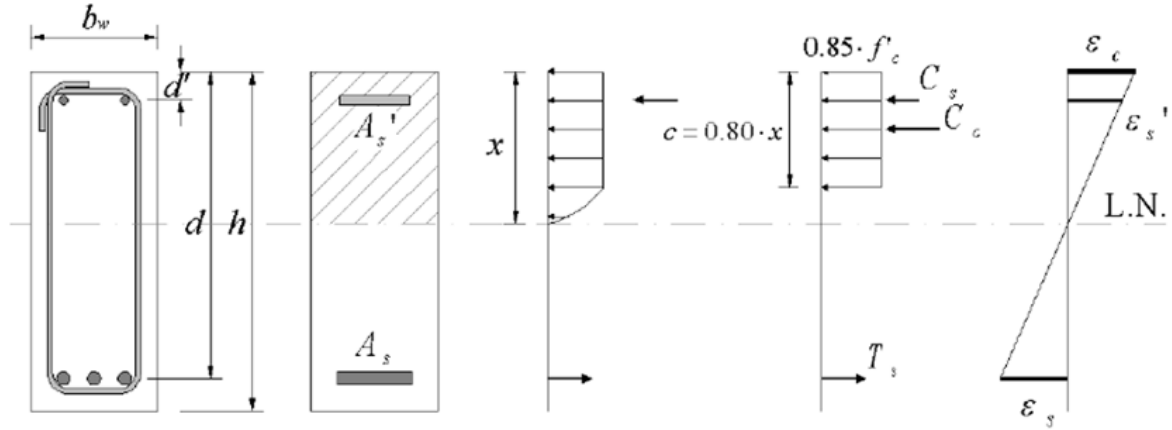


Figura 50 – Equilíbrio na seção transversal da viga de concreto armado

Para o somatório dos momentos temos:

$$M_d = 0,85 \times f'_c \times b_w \times 0,8 \times x \times (d - 0,4 \times x) + A'_s \times f'_s \times (d - d') \quad \text{Equação 21}$$

Para o somatório das forças temos:

$$A'_s \times f_{ys'} + 0,85 \times f'_c \times b_w \times 0,8 \times x = A_s \times f_{ys} \quad \text{Equação 22}$$

Da Equação 22, foi extraída a Equação 23, para a posição da linha neutra da seção.

$$x = \frac{A_s \times f_{ys} - A_{s'} \times f_{ys'}}{0,68 \times f'_c \times b_w} \quad \text{Equação 23}$$

Como já informado no Capítulo 4, a moldagem e cura dos corpos-de-prova obedeceram às prescrições da ABNT NBR 5738 e o ensaio de compressão, as indicações da ABNT NBR 5739. O aço teve também nesta data, sua caracterização definida por meio do ensaio de resistência à tração na ruptura. Com os resultados dos ensaios do aço, foi determinado o desvio padrão que foi utilizado nas equações de estado limite. As variáveis de geometria, base e altura da seção transversal, foram obtidas nos 5 pontos indicados na Figura 51.

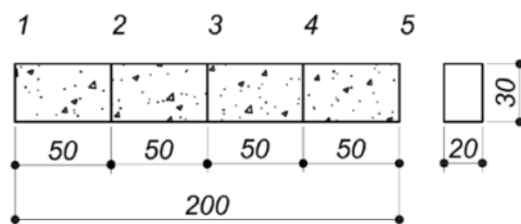


Figura 51 – Representação da viga com as cinco seções medida, cotas em cm

Com os dados obtidos nos ensaios e medições, foram realizados os cálculos para definição estatística das variáveis relativas às propriedades mecânicas e geométricas, conforme relacionada na Tabela 13. Para este trabalho, foi adotada a função normal de distribuição de probabilidade e no caso do concreto, o desvio padrão adotado foi o da ABNT NBR 12655, considerando controle rigoroso. O valor da média foi determinado em função da resistência característica à compressão (f_{ck}) de 25 MPa e considerada a probabilidade de 5% de que este valor não será inferior. Assim, a resistência média à compressão foi de 31,6 MPa. O mesmo procedimento foi adotado para a resistência média do aço. Com a resistência característica à tração de 500 MPa e o desvio padrão de 23,16 MPa, obteve-se a valor médio de 538,2 MPa.

Tabela 13 - Propriedades mecânicas e geométricas das vigas

	Variáveis de resistência		Variáveis geométricas	
	Concreto (MPa)	Aço (MPa)	Base b_w (cm)	Altura h (cm)
Média (μ)	31,6	538,2	20,2	30,04
Desvio Padrão (σ)	4	23,16	0,39	0,35
Função de Distribuição de Probabilidade	Normal	Normal	Normal	Normal

Utilizando-se a Equação 21, foi possível determinar o valor do momento de referência, o qual, teoricamente, é o maior valor com os valores médios que a viga resiste. Na equação, as variáveis foram substituídas pelos valores das médias apresentadas na Tabela 13, sendo a largura (b_w), a altura (h) da seção transversal retangular e variáveis mecânicas de resistência do concreto à compressão (f_c) e resistência à tração do aço (f_y). O cobrimento

nominal executado foi de 2,5 cm, a área da armadura inferior, A_s , foi de 2,356 cm² (3Ø10,0 mm) e a área da armadura superior, A'_s , de 1,571 cm² (2Ø10,0 mm).

Além das áreas das armaduras e da distância entre o centro das armaduras e a borda, foi verificado, mediante uma análise de sensibilidade, que a variação da contribuição da armadura comprimida para o momento fletor era proporcionalmente pequena, conforme pode ser visto na Figura 52.

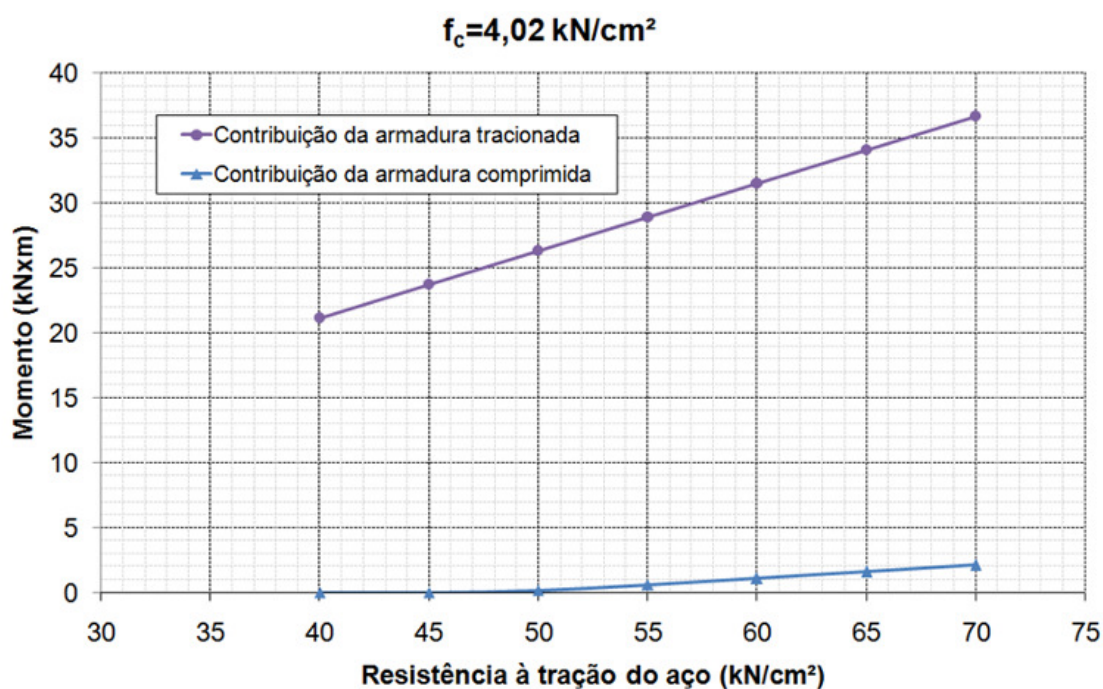


Figura 52 - Contribuição da armadura comprimida no momento fletor total

Apesar da pequena contribuição, foi considerado fixo para C_s o valor de 4,923 kN, o qual corresponde ao valor encontrado quando consideradas as médias para as variáveis indicadas na Tabela 3.

Notou-se ainda que a variação da resistência à compressão do concreto produz uma pequena variação no momento de referência, conforme Figura 64.

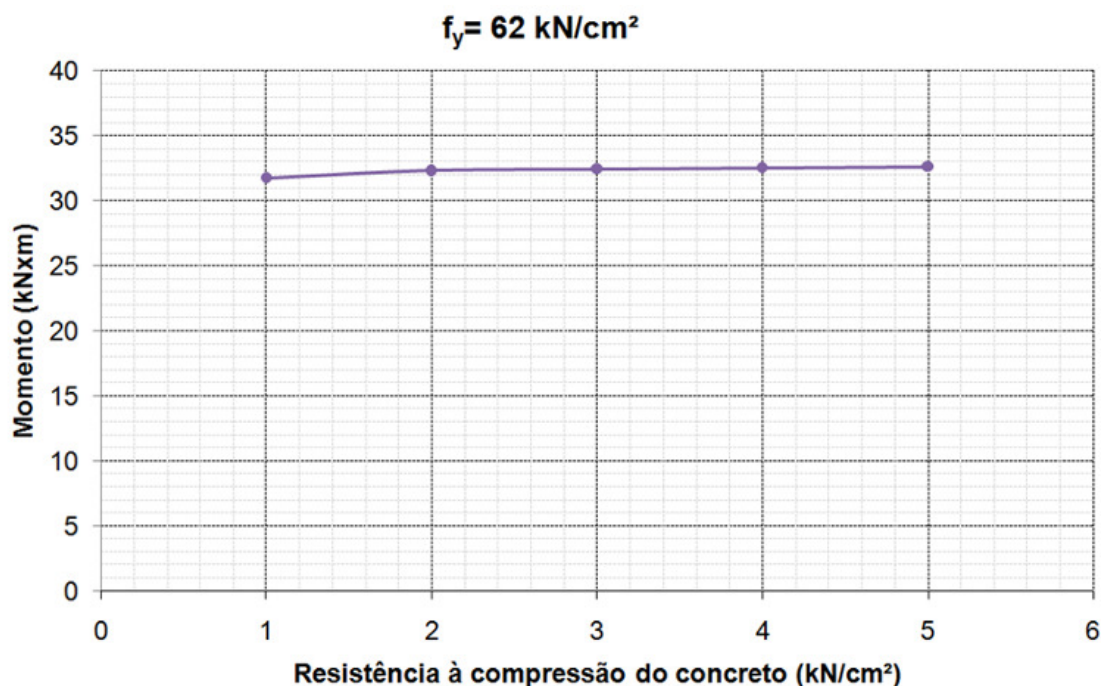


Figura 53 - Contribuição da resistência à compressão de concretos no momento fletor total

Desta forma optou-se por considerar fixa a resistência à compressão do concreto e a resultante de esforço, C_s , gerada pela armadura comprimida. Com as considerações apresentadas, os valores da Tabela 13 e a Equação 23, obteve-se a Equação 24, para a posição da linha neutra.

$$x = \frac{2,356 \times f_{ys} - 4,92}{214,88 \times b_w} \quad \text{Equação 24}$$

Substituindo-se o valor de x e os valores considerados fixos na Equação 21, obteve-se a Equação 25 para obtenção do valor do momento de referência.

$$M_R = (2,356 \times f_{ys} - 4,92) \times \left[\frac{h}{100} - 0,03 - 0,4 \times \left(\frac{2,356 \times f_{ys} - 4,92}{214,88 \times b_w} \right) \right] + 4,92 \times \left(\frac{h}{100} - 0,06 \right) \quad \text{Equação 25}$$

A segurança na seção transversal é garantida se for atendida a Equação 26, na qual, substituindo o momento de referência, define-se a função de estado limite conforme a Equação 27. A função de falha $g(x)$ a ser empregada na determinação do índice de confiabilidade estrutural para as vigas ensaiadas sem reforço fica expressa pela equação do estado limite (Equação 28).

$$M_R - M_S \geq 0 \quad \text{Equação 26}$$

$$\begin{aligned} (2,356 \times f_{ys} - 4,92) \times \left[\frac{h}{100} - 0,03 - 0,4 \times \left(\frac{2,356 \times f_{ys} - 4,92}{214,88 \times b_w} \right) \right] \\ + 4,92 \times \left(\frac{h}{100} - 0,06 \right) - M_S \geq 0 \end{aligned} \quad \text{Equação 27}$$

$$\begin{aligned} g(x) = (2,356 \times f_{ys} - 4,92) \\ \times \left[\frac{h}{100} - 0,03 - 0,4 \times \left(\frac{2,356 \times f_{ys} - 4,92}{214,88 \times b_w} \right) \right] + 4,92 \\ \times \left(\frac{h}{100} - 0,06 \right) - M_S \end{aligned} \quad \text{Equação 28}$$

Para a aplicação do método FORM, foi necessária a transformação das variáveis aleatórias com distribuições quaisquer para distribuições normais padrões, com suas respectivas médias e desvios padrões e posterior determinação do ponto de projeto. A região segura será $g(x) \geq 0$, para a região de falha tem-se $g(x) \leq 0$ e o espaço das variáveis tipificadas pode ser definido conforme Equação 29, desenvolvida a partir da Equação 28.

$$\begin{aligned}
g(x) = & -\frac{0,0451}{Z_1 \times \sigma_{bw} + \mu_{bw}} + \frac{0,0432 \times (Z_3 \times \sigma_{fy} + \mu_{fy})}{Z_1 \times \sigma_{bw} + \mu_{bw}} + 0,0236 \\
& \times (Z_2 \times \sigma_h + \mu_h) \times (Z_3 \times \sigma_{fy} + \mu_{fy}) - 0,0707 \\
& \times (Z_3 \times \sigma_{fy} + \mu_{fy}) - \frac{0,0103 \times (Z_3 \times \sigma_{fy} + \mu_{fy})^2}{Z_1 \times \sigma_{bw} + \mu_{bw}} \\
& - 0,1476 - (Z_4 \times \sigma_M + \mu_M)
\end{aligned}
\tag{Equação 29}$$

Por meio do modelo teórico de dimensionamento conseguiu-se obter a função de estado limite considerado o momento de referência dado na Equação 28. Nesta análise o M_s é definido pelas cargas de ruptura das vigas. Esta equação está no espaço reduzido de variáveis tipificadas, pois são levadas em consideração as respectivas médias e desvios padrões.

Para análises da perda efetiva de aderência PRFC, faz-se necessário considerar M_s como sendo as cargas medidas no instante do descolamento do reforço, parcela solicitante. O cálculo se deu por processo iterativo, utilizando a referência circular para encontrar o menor β , ponto sob a função de estado limite no espaço reduzido com a maior densidade de probabilidade, ou seja, o ponto mais próximo entre a origem e a superfície de falha, mostrada na Figura 17.

6.3 RESULTADOS DA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

6.3.1 Rupturas das vigas da primeira etapa

Os resultados de ruptura foram analisados de forma relativa, tendo como base o resultado do índice de confiabilidade obtido para o grupo de controle G0, com as informações da Tabela 14 e a Equação 27. Por meio de simulação para as vigas de controle sem reforço (G0), utilizando o modelo de cálculo estrutural para a função de estado limite e a análise probabilística, foi obtida uma carga média de ruptura de 98,46 kN, índice de confiabilidade β de 3.19 e uma correspondente probabilidade de falha de 0,07%.

Nos ensaios das vigas do grupo G0, de referência, as cargas de ruptura obtidas foram de 130,98 kN a 150,37 kN. Conforme pode ser observado na Tabela 14, a carga de ruptura das

vigas reforçadas (G1, G3 e G4), não apresentam diferenças significativas em relação às vigas de referência conforme se pode notar nos gráficos das Figura 54, Figura 55, Figura 56 e Figura 57, a seguir. A perda de aderência do reforço de PRFC ocorre entre as cargas de 90,05 kN da viga 14 do G4 a 120,56 kN da viga 5 do G1 conforme Tabela 11. Após o descolamento as vigas passam a apresentar comportamento similar às vigas sem reforço, Os deslocamentos são um pouco menores pela presença do reforço, mas a ruptura prematura não permite aumento de carga.

Tabela 14 - Valores obtidos para ensaios até a ruptura para as vigas da primeira etapa em temperatura ambiente

Descrição			Ruptura das vigas	
Grupo	Tipo de adesão - camada	Elemento	Deslocamento vertical no meio do vão (mm)	F _{MAX} (kN)
0	Controle sem reforço	Viga 2	31,51	150,37
		Viga 3	31,00	130,98
1	Formulação epóxi 1 camada	Viga 4	28,34	144,12
		Viga 5	29,36	141,93
		Viga 6	32,81	140,22
3	Formulação epóxi 2 camadas	Viga 10	37,53	143,67
		Viga 11	29,04	143,49
		Viga 12	27,48	144,06
4	Filme 2 camadas	Viga 13	22,96	142,13
		Viga 14	29,44	145,88
		Viga 15	23,89	143,27

Como preconiza o CEB-FIP *Bulletin* 14 (2001), o descolamento do reforço destas vigas caracterizou-se pela ruptura prematura na interface adesivo/materiais composto, a partir de sua extremidade, conduzindo, na seqüência, ao progressivo descolamento do reforço. Esta

ruptura só foi possível de ocorreu pelo fato das vigas possuírem altas taxas de armadura.

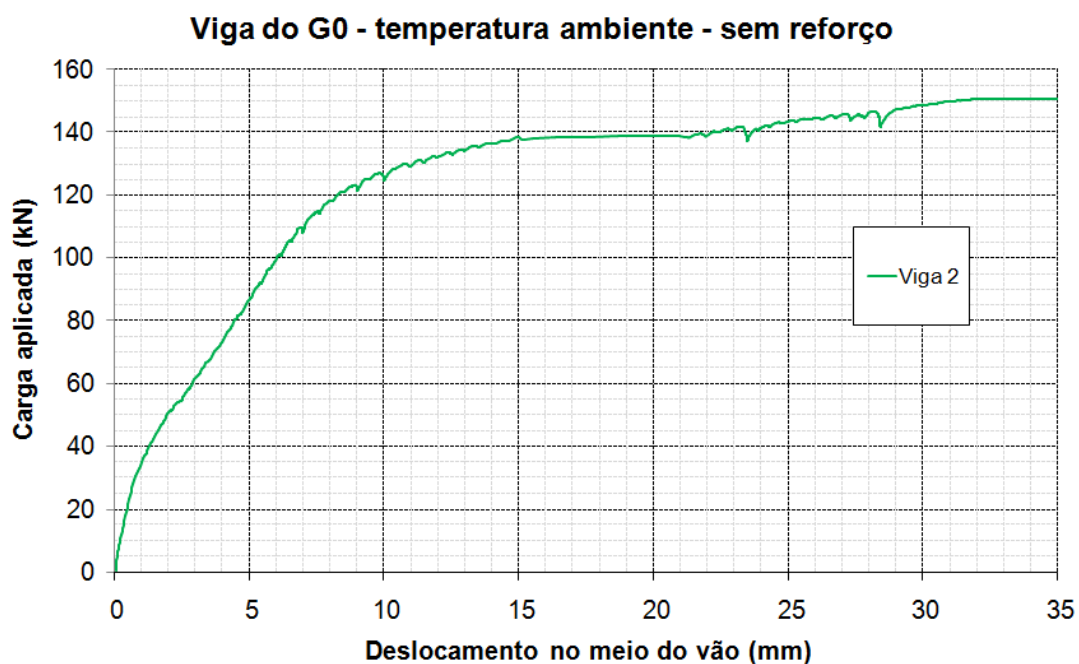


Figura 54 – Diagrama carga × deslocamento da viga do grupo G0

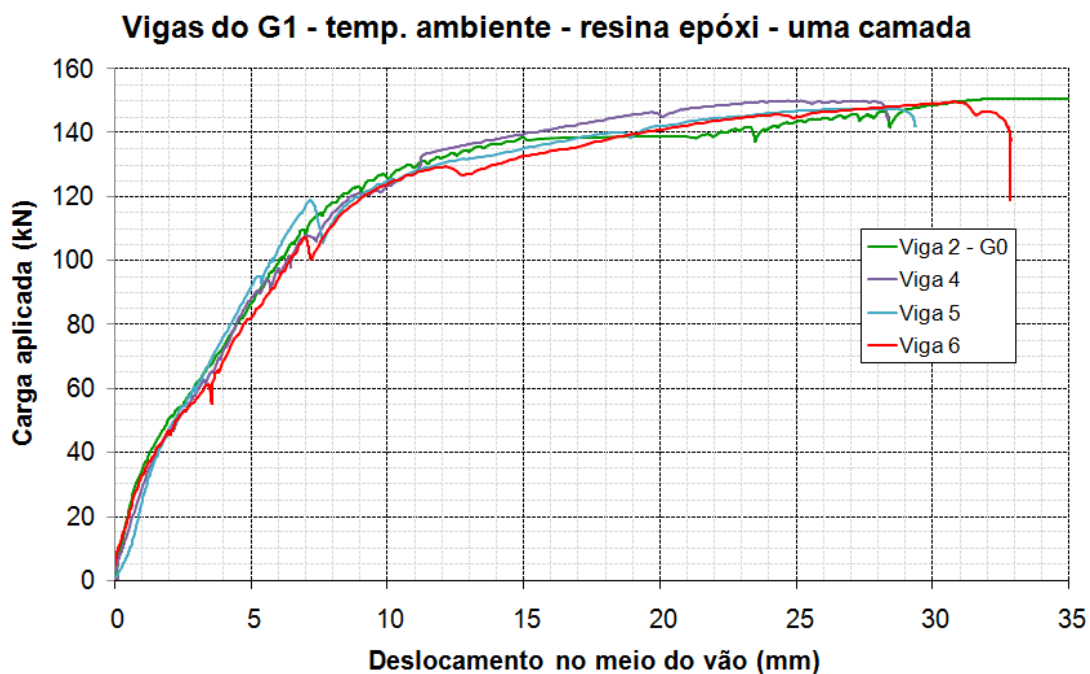


Figura 55 – Diagrama carga × deslocamento das vigas do grupo G1

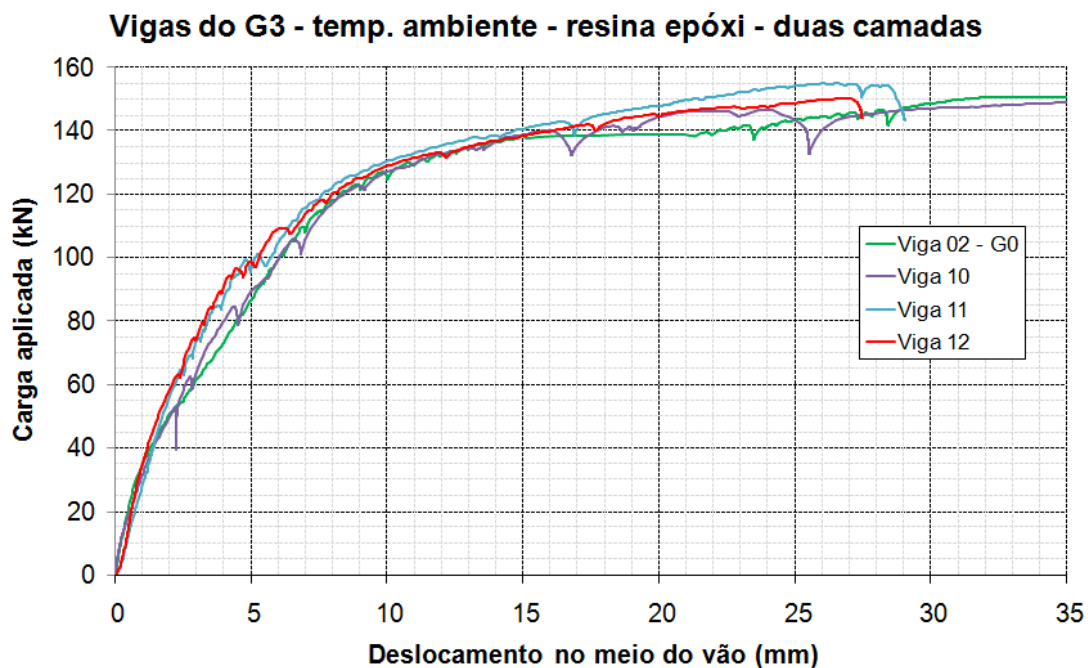


Figura 56 – Diagrama carga × deslocamento das vigas do grupo G3

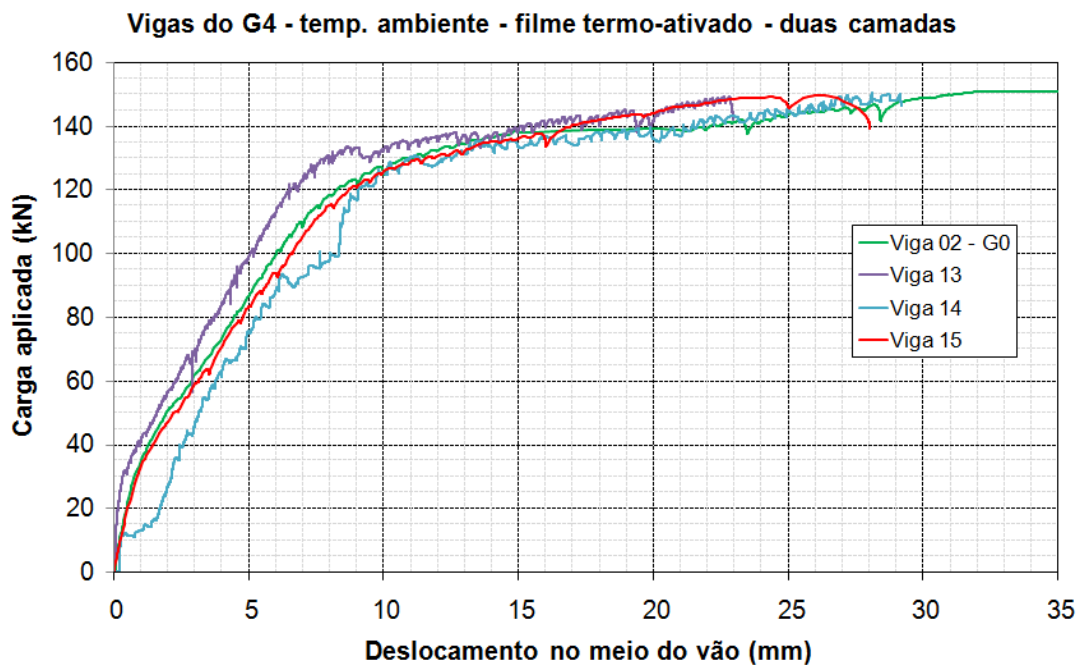


Figura 57 – Diagrama carga × deslocamento das vigas do grupo G4

6.3.2 Descolamento das lâminas de PRFC das vigas da primeira etapa

Após a definição dos índices de confiabilidade para os grupos, foram determinados os respectivos valores das variáveis físicas nos pontos de projeto, ou seja, o tamanho da base, altura das vigas, a resistência do aço e os momentos fletores que geraram as situações de menor índice de confiabilidade, por meio da Equação 26. Os valores assim definidos e as variáveis físicas encontram-se na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados obtidos por meio da análise de confiabilidade, por grupos

G r u p o	Índice de Confiabilidade	Probabilidade de Falha		Variáveis Físicas					
	β	$\Phi=(-\beta)$	$\Phi(\%)$	Base bw cm	Altura h cm	Aço fy kN/cm ²	MS kN×m	MR kN×m	MS-MR
1	1,72	0,0427	4,27	20,20	30,16	56,36	30,28	29,59	0,69
3	1,46	0,0722	7,22	20,21	29,96	51,92	32,73	27,13	2,89
4	0,69	0,2451	24,51	20,20	30,02	53,27	33,43	27,87	5,56

As vigas do grupo G1 que possuíam uma lâmina de PRFC aderida com formulação epóxi, apresentaram para o descolamento da fibra um índice de confiabilidade de 1,72, com correspondente probabilidade de falha de 0,0427.

As vigas do grupo G3 que possuíam duas lâminas de PRFC aderidas com formulação epóxi apresentaram um índice de confiabilidade com o valor de 1,46, com correspondente probabilidade de falha de 0,0722.

As vigas do grupo G4 que possuíam duas lâminas de PRFC aderidas com filme termotratado fenólico apresentaram um índice de confiabilidade com o valor de 0,69, com correspondente probabilidade de falha de 0,2451.

O índice de confiabilidade estrutural e a aquisição do ponto de projeto é muito influenciado pela variabilidade dos parâmetros que compõem o modelo estrutural, expressa pelo coeficiente de variação apresentado na Tabela 11. Salienta-se que, o índice de confiabilidade superior a 3 é bastante sensível ao coeficiente de variação. Um exemplo é o caso do G3 e do G4, que tem o valor da média dos momentos próxima (26,3881 kN×m e 27,7101 kN×m) e coeficientes de variação bem diferentes de 4,6% e 12,3%, respectivamente. Esta combinação gerou índices de confiabilidade de 1,46 e 0,69, comprovando a influência da variabilidade no índice de confiabilidade.

Analisando as vigas sob o critério do descolamento da fibra, nota-se que as probabilidades de falha aumentam para cada tipo de adesão, sendo $G1 < G3 < G4$.

6.3.3 Ruptura das vigas da segunda etapa

Cada uma das 14 vigas ensaiadas até a ruptura gerou planilhas de ensaios correspondentes à Tabela 16, (Figura 58). Em seguida, foram extraídos os valores referentes às rupturas e aos respectivos deslocamentos. As vigas dos grupos desta etapa foram ensaiadas com uma única camada de PRFC, aderidas com formulações epóxi ou filme termo-ativado fenólico submetidas às diversos patamares de temperatura. Desta forma, torna-se mais interessante avaliar, separadamente, a influência da temperatura no elemento de aderência do reforço à viga de concreto armado.

Conforme Tabela 16, a carga de ruptura das vigas reforçadas (G5, G6, G7, G8, G9 e G10), não apresentam diferenças significativas em relação às vigas de referência G0 (Tabela 12). Os valores para ruptura foram obtidos por meio de análises dos gráficos de carga × deslocamento.

Tabela 16 - Valores obtidos para ensaios até a ruptura para as vigas da segunda etapa

Descrição				Ruptura das vigas	
Grupo	Temperatura de ensaio	Tipo de adesão	Elemento	Deslocamento no meio do vão (mm)	F _{MAX} (kN)
5	Temperatura ambiente	Filme termo-adesivo	Viga 16	28,93	143,77
			Viga 17	25,95	156,07
6		Formulação epóxi	Viga 19	27,35	151,51
			Viga 20	23,95	148,81
			Viga 21	27,81	153,94
7	80 °C	Filme termo-adesivo	Viga 22	21,17	140,58
			Viga 23	30,91	149,16
			Viga 24	23,71	149,47
8		Formulação epóxi	Viga 25	17,27	146,52
			Viga 26	17,33	141,59
			Viga 27	18,38	153,10
9	120 °C	Filme termo-adesivo	Viga 28	19,9	149,35
			Viga 29	34,62	158,12
			Viga 30	23,98	152,06
10		Formulação epóxi	Viga 31	20,7	148,77
			Viga 32	29,01	150,93
			Viga 33	23,15	149,82

Após o descolamento, as vigas passam a apresentar comportamento similar às vigas sem reforço, conforme se pode notar nos gráficos da Figura 58, Figura 59, Figura 60, Figura 61, Figura 62 e Figura 63.

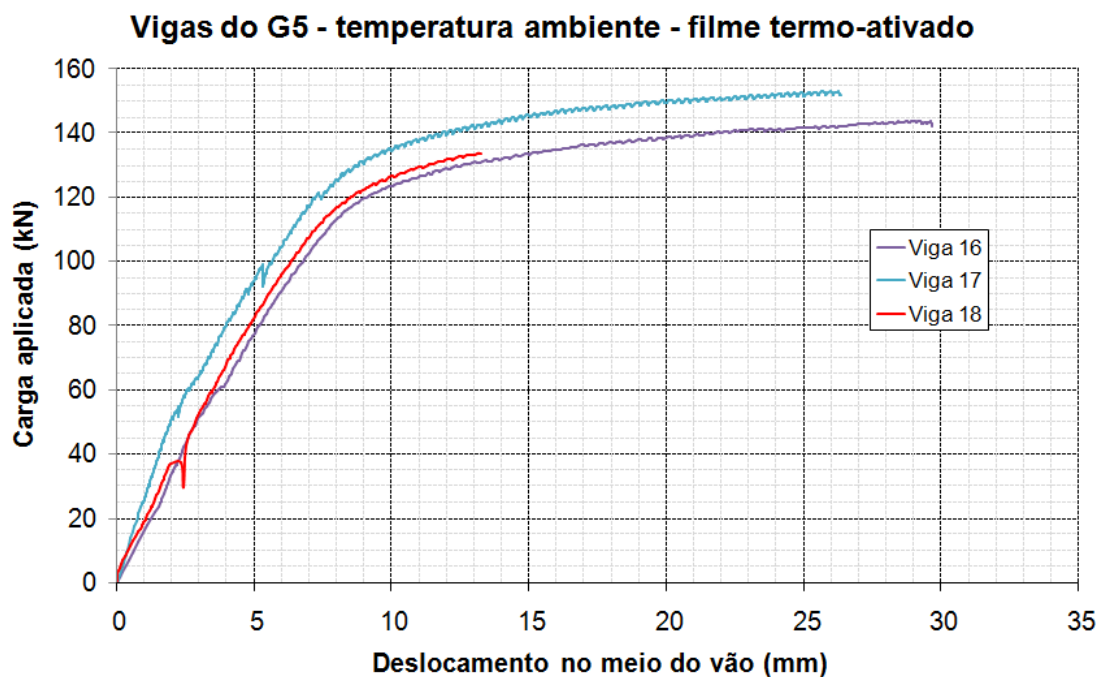


Figura 58 – Diagrama carga × deslocamento das vigas do grupo G5

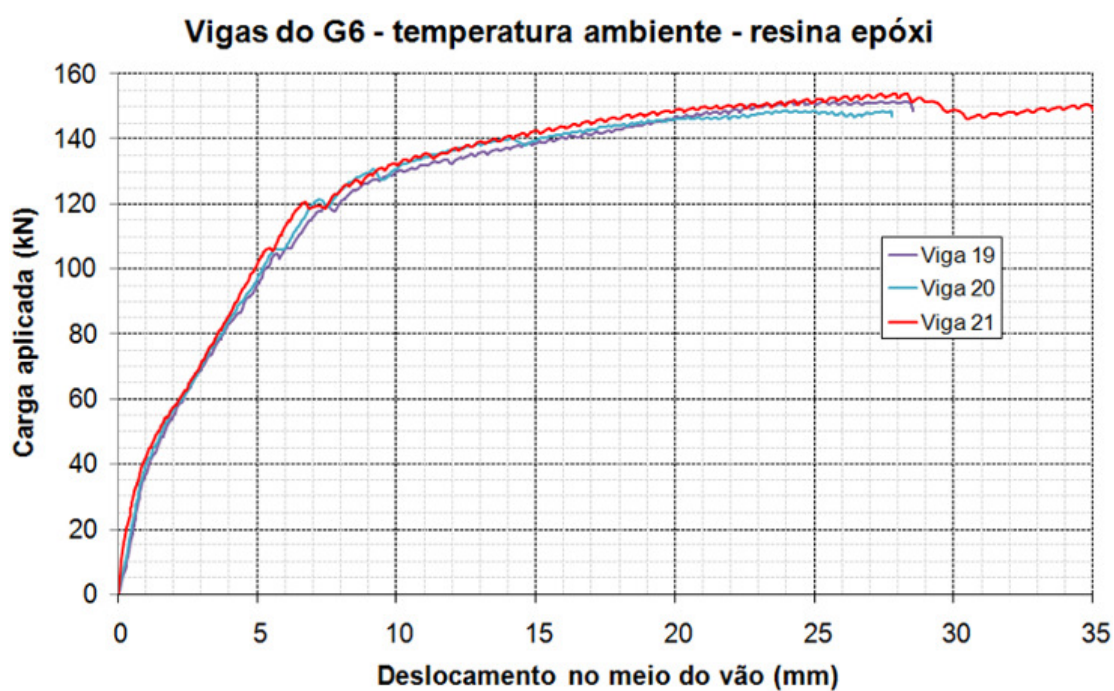


Figura 59 - Diagrama carga × deslocamento das vigas do grupo G6

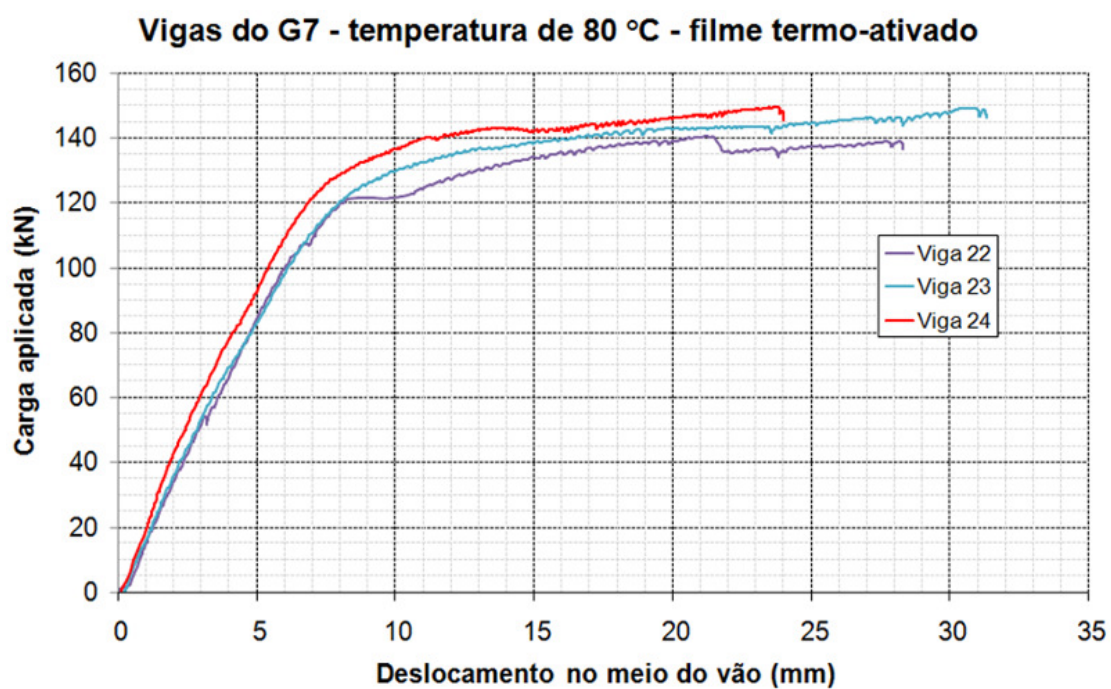


Figura 60 - Diagrama carga × deslocamento das vigas do grupo G7

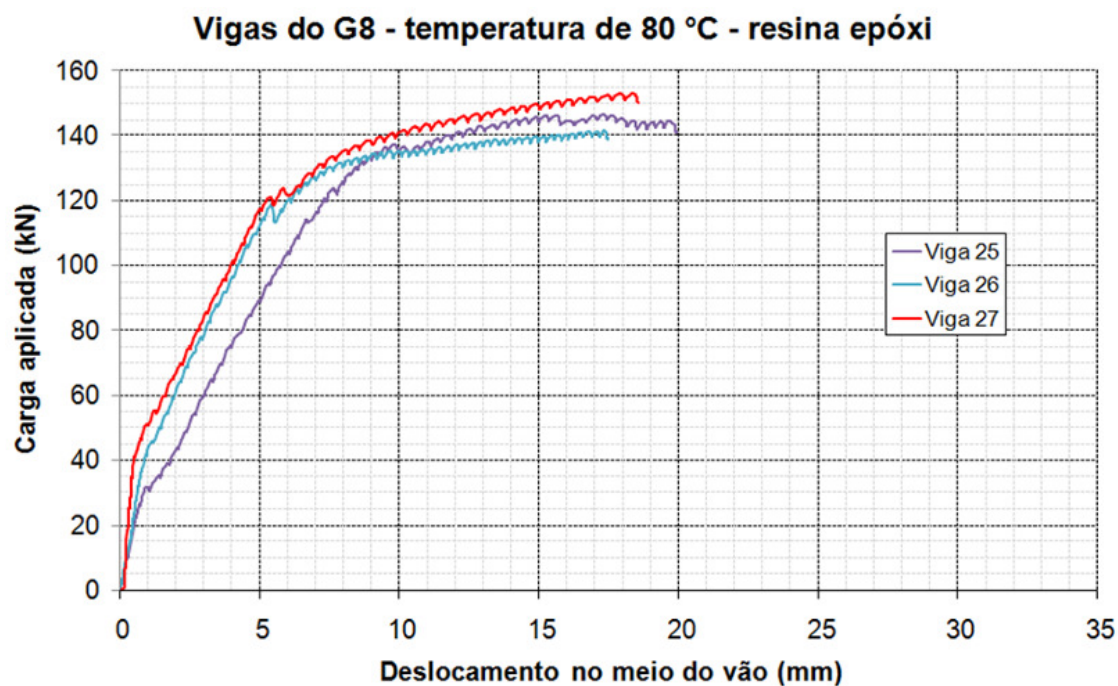


Figura 61 - Diagrama carga × deslocamento das vigas do grupo G8

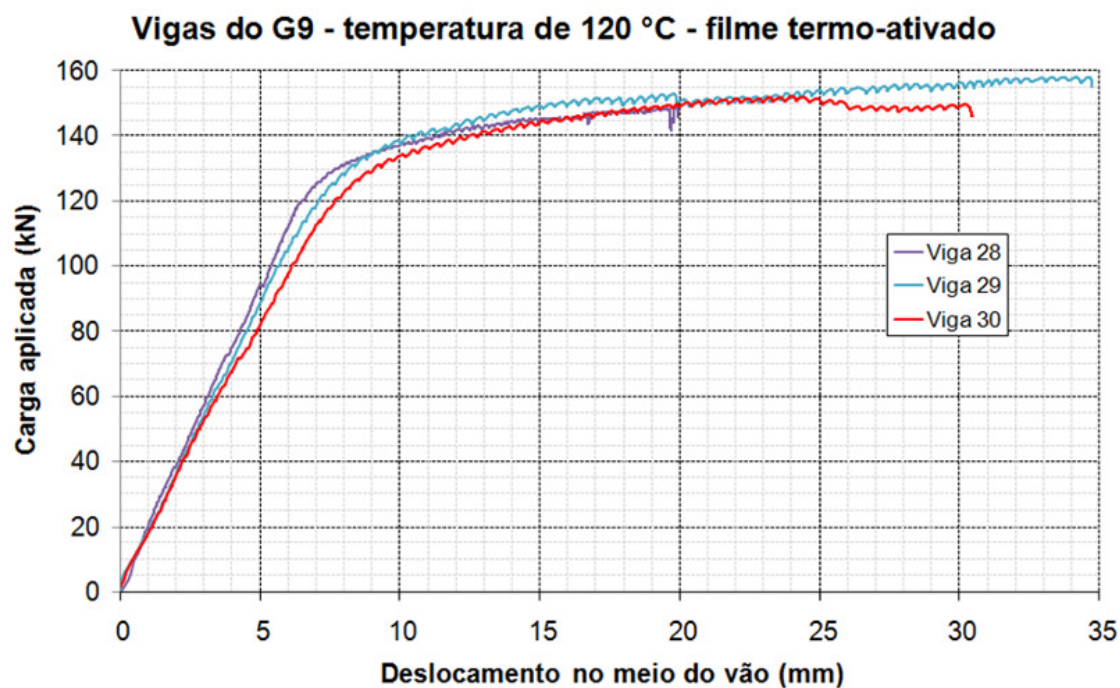


Figura 62 - Diagrama carga × deslocamento das vigas do grupo G9

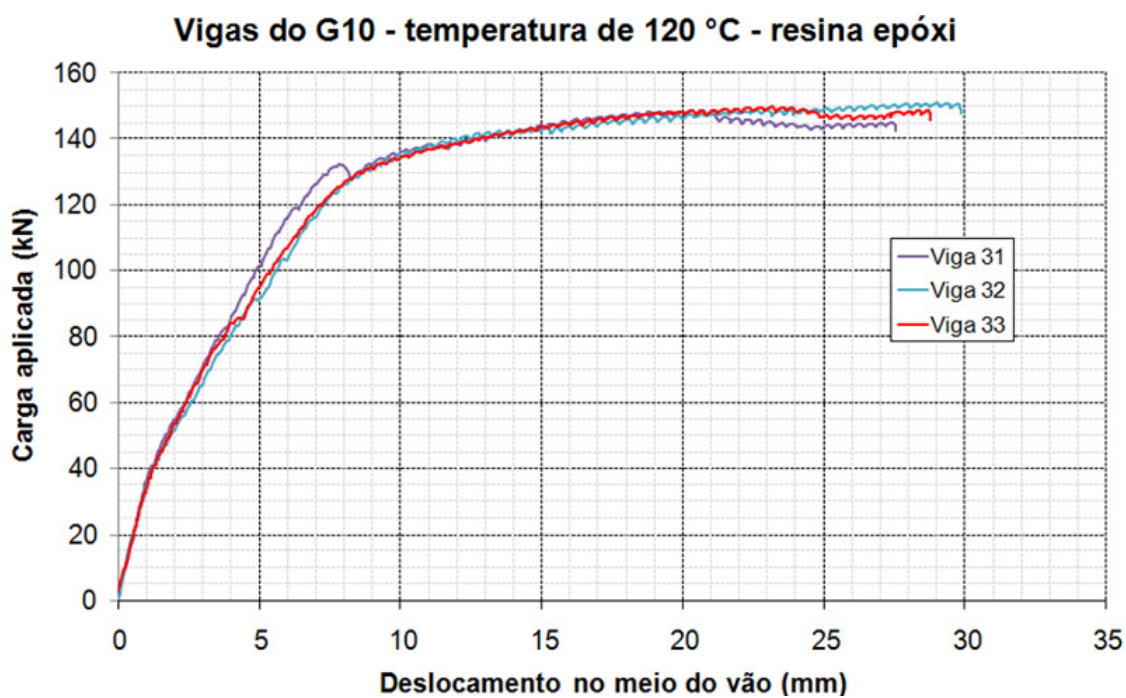


Figura 63 - Diagrama carga × deslocamento das vigas do grupo G10

6.3.4. Descolamento das lâminas de PRFC das vigas da segunda etapa

Seguindo o mesmo procedimento quanto à avaliação, após a definição dos índices de confiabilidade para os grupos, foram determinados os respectivos pontos de projeto, ou seja, os momentos fletores que geraram as situações de menor índice de confiabilidade. Os valores assim definidos e as variáveis físicas encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultados obtidos por meio da análise de confiabilidade por grupos

G r u p o	Índice de Confiabilidade	Probabilidade de Falha		Variáveis Físicas					
	β	$\Phi=(-\beta)$	$\Phi(\%)$	Base bw cm	Altura h cm	Aço fy kN/cm ²	MS kN×m	MR kN×m	MS-MR
5	0,16	0,4364	43,64	20,20	30,05	53,95	28,28	28,24	0,04
6	1,72	0,0427	4,27	20,19	30,13	55,79	29,81	29,26	0,55
7	1,14	0,8729	87,29	20,20	30,02	53,30	27,89	27,72	0,00
8	2,54	0,0055	0,05	20,18	30,32	59,55	32,86	31,38	1,49
9	5,92	1,0000	100,00	20,19	29,83	48,68	25,37	25,24	0,00
10	7,16	1,0000	100,00	20,18	29,68	43,97	22,86	22,75	0,00

Os grupos do G5, G7, G9 e G10 apresentaram cargas de descolamento abaixo da média da carga de referência, gerando elevadas probabilidade de falha, que variaram de 43,64 à 100%.

As vigas do grupo G5, ensaiadas à temperatura ambiente, que possuíam uma lâmina de PRFC aderida com filme termo-ativado fenólico apresentaram um M_S quando do descolamento da fibra de 28,28 kN×m. Isso produziu um índice de confiabilidade de 0,16 com correspondente probabilidade de falha de 0,5675. A probabilidade de falha de G5 foi muito superior que as vigas do grupo G6, também ensaiadas a temperatura ambiente, com uma lâmina de PRFC aderida com formulação epóxi. Para G6 o índice de confiabilidade de 1,72 correspondente a uma probabilidade de falha de 0,0427.

Como na determinação da confiabilidade das vigas da primeira etapa, alguns comportamentos se repetiram. A parcela referente à resistência da formulação epóxi no descolamento do reforço devido ao cisalhamento na interface, foi de fundamental importância a determinação da probabilidade de falha, onde $G5(43,64\%) > G6(4,27\%)$.

Para avaliar o impacto no desempenho do adesivo com exposição à temperatura de 80 °C, foram comparado os resultados experimentais das vigas de controle e reforçadas. Houve aumento da probabilidade de falha de G5 para G7, coladas com filme termo-ativado fenólico. Já se compararmos o grupo G6 para G8 houve um aumento da confiabilidade do desempenho da formulação epóxi. A análise destes resultados conflitou com o proposto pela literatura, que haveria um impacto negativo no desempenho de polímeros quando submetido a temperaturas próximas da transição vítrea do polímero.

Os resultados de probabilidade de falha de G7 foram maiores que G8, o filme termo-ativado dando indícios de quando exposto a temperatura superiores a 80°C perde sua capacidade de aderência.

A temperatura de 120 °C teve um impacto nocivo no comportamento de adesão dos dois tipos de adesivos , comprovado pelos elevados valores de probabilidade de falha obtidos.

Analisando o comportamento do filme termo-ativado frente às diversas temperaturas, mediante análise confiabilidade, verificou-se que as probabilidades de falhas aumentam com a temperatura $G5(43,64\%) < G7(87,29\%) < G9(100\%)$, induzindo que este material não é adequado para técnicas de reforço em elementos que podem estar sujeitos a estes níveis de temperatura, como esperava no planejamento experimental deste trabalho.

Assim como na primeira etapa, o aumento da probabilidade foi muito influenciado pela variabilidade dos parâmetros que compõem o modelo estrutural, expressa pelo coeficiente de variação apresentado. No caso do descolamento do PRFC, o coeficiente de variação do G9 e G10 foi o maior, daí a confiabilidade foi a menor, gerando uma $Pf = 100\%$. O G8 teve o menor coeficiente de variação, resultando em maior confiabilidade e $Pf = 0,05\%$. Salienta-se que, o índices de confiabilidade superiores a 3 são bastante sensíveis ao coeficiente de variação.

Os resultados confirmaram o baixo desempenho do reforço utilizando filme termo-ativo, o que contribui para que os incrementos de resistência fossem pouco pronunciados, exceto quando aderidos com formulação epóxi no G8 (Figura 61, Tabela 17)

6.3.5 Comparação dos resultados das vigas reforçadas

A comparação entre os resultados teóricos e experimentais da primeira etapa é realizada através do quociente da carga de ruptura experimental pela teórica de 98,46 kN, para cada viga. Estes resultados conduzem a um valor médio de 1,448, com um coeficiente de variação de 0,901%, que podem ser confirmados na Tabela 19, referente à primeira etapa.

Tabela 18 – Comparação entre cargas de rupturas experimentais, referência e controle G0

Grupo	Elemento de adesão	Número de Camadas	Temp. atingida para ensaios	Carga de Ruptura	Experimental/ Referência F=98,46 kN	Experimental / Controle da etapa	
G0 - Controle 1	ausente	ausente	Temp. ambiente	140,68	1,43	1,00	G0/G0
G1	Formulação epóxi	Uma	Temp. ambiente	142,09	1,44	1,01	G1/G0
G3	Formulação epóxi	Duas	Temp. ambiente	143,74	1,46	1,02	G3/G0
G4	Filme termo-ativado	Duas	Temp. ambiente	143,76	1,46	1,02	G4/G0
				Média	1,45	1,01	

A análise dos resultados da primeira etapa aponta, naturalmente, para um aumento médio das relações desses valores de 1,45. Salienta-se a pequena variabilidade destes resultados quando se considera os diferentes sistemas de adesão do reforço, comparados com o ensaio de G0, que compreende as vigas sem reforço. A média das relações de valores de 1,01, demonstrando um inexpressivo aumento dos resultados das vigas reforçadas comparadas com as sem reforço.

Realiza-se uma comparação dos ensaios da segunda etapa entre estes mesmos resultados experimentais e os resultados de projeto e partir dos ensaios do G0, vigas sem reforço da primeira etapa. Estes resultados são apresentados nas Tabela 19.

Tabela 19 - Comparação entre cargas de rupturas experimentais, teóricas e controle G5, G6 e G1

Grupo	Elemento de adesão	Número de Camadas	Temp. atingida para ensaios	Carga de Ruptura	Experimental / Referência F=98,46 kN	Exp. / Controle da etapa e adesão		Exp. / Controle 1 F=140,675 kN
G5 - Controle 2	Filme termo-ativado	Uma	Temp. ambiente	149,92	1,52	1,00	G5/G5	1,07
G6 - Controle 2	Formulação o epóxi	Uma	Temp. ambiente	151,42	1,54	1,00	G6/G6	1,08
G7	Filme termo-ativado	Uma	80 °C	146,40	1,49	0,98	G7/G5	1,04
G8	Formulação o epóxi	Uma	80 °C	147,07	1,49	0,97	G8/G6	1,05
G9	Filme termo-ativado	Uma	120 °C	153,18	1,56	1,02	G9/G5	1,09
G10	Formulação o epóxi	Uma	120 °C	149,84	1,52	0,99	G10/G6	1,06
Média					1,52	0,99		1,06

Os resultados da segunda etapa também mostrou um aumento entre os resultados de projeto e experimentais com coeficiente de variação 1,715%, considerado baixos para programas experimentais que visam repetibilidades de ensaios. Os resultados maiores que o esperado de projeto são confirmados por meio da média das relações desses valores de 1,520.

Porém, houve uma diminuição dos valores de ruptura das vigas comparadas com as ensaiadas em temperatura ambiente, levando a média para valores de 0,99, o que mostra

prejudicial diminuição ao desempenho quando submetidas a atmosfera aquecida, acima de 80 °C. Estas abordagens caracterizam-se como ferramentas analíticas comparativa.

Pelo fato do reforço ter sido projetado para descolamento antes das cargas de ruptura, estas cargas foram próximas em ordem de grandeza, conforme Figura 64. Deve-se salientar que os resultados das cargas da segunda etapa foram ligeiramente superiores, porém, devido à idade do concreto, houve aumento de sua resistência.

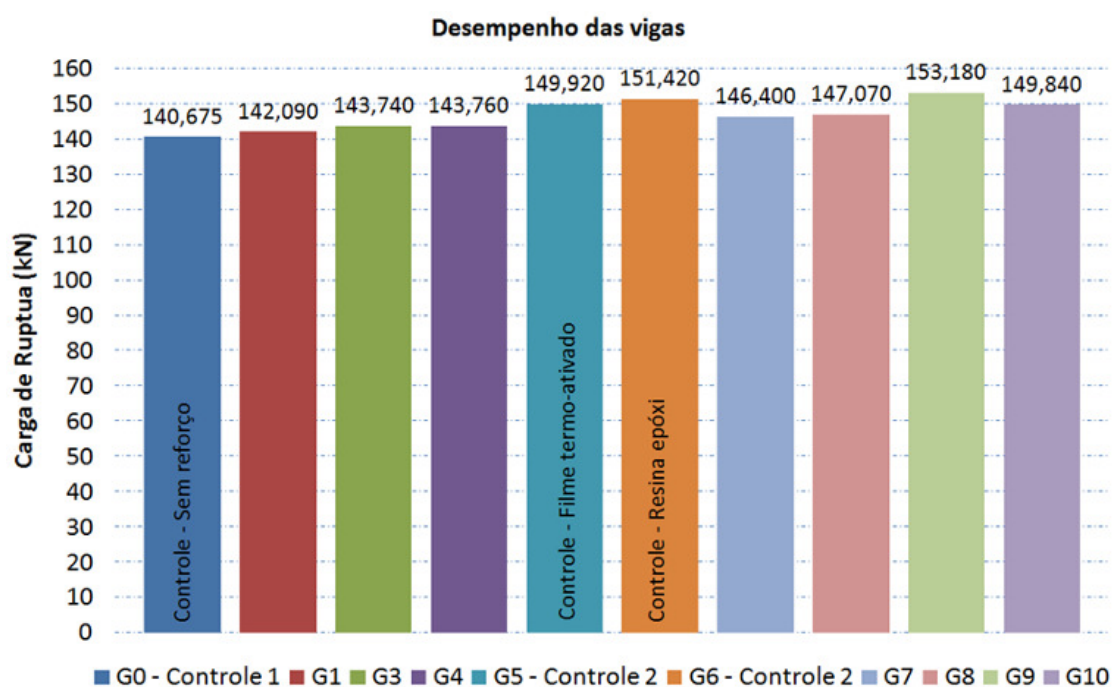


Figura 64 – Desempenho dos grupos de vigas ensaiadas

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÕES

7.1.1 Conclusões gerais

Inicialmente, como primeira conclusão geral, deve-se salientar que a pesquisa experimental é trabalhosa e nem sempre os resultados obtidos são os esperados. Em se tratando de avaliação da confiabilidade estrutural de vigas de concreto armado com reforço à flexão, por meio da colagem de material PRFC com formulação epóxi ou filme termo-ativo fenólico na região de tração, as várias interferências oriundas do processo acrescentam dificuldades na avaliação dos resultados.

Muitos problemas em engenharia envolvem processos e fenômenos naturais inerentemente aleatórios. Fenômenos aleatórios são caracterizados por observações experimentais que são invariavelmente diferentes de um experimento para outro (mesmo quando executados sob condições aparentemente idênticas). Existe usualmente uma faixa de valores medidos ou observados. Dentro desta faixa, alguns valores ocorrem com maior frequência que outros. Ao contrário do conceito determinístico, onde se considera uma única possibilidade, existem mais de uma possibilidade da ocorrência de um evento em relação a outros eventos.

Neste contexto, os problemas probabilísticos são quantificados como a medida da possibilidade de ocorrência de um evento em relação a eventos alternativos. A formulação de um problema probabilístico consiste na identificação do conjunto de todas as possibilidades, ou seja, o espaço de possibilidades do evento de interesse.

Em relação aos problemas probabilísticos, foi observado que a probabilidade de um evento depende das probabilidades dos resultados individuais em um dado espaço de possibilidades;

A utilização de ferramentas de confiabilidade estrutural que necessitam da caracterização das variáveis requer um número adequado de amostras, o qual nem sempre é viável, porém, neste trabalho, a amostra possibilitou, pelo menos, indicar a forma de se realizar a análise.

7.1.2 Conclusões da primeira etapa

Nas duas etapas, a característica focada foi a aderência entre a fibra PRFC e o concreto.

Na primeira etapa, após a apresentação dos resultados utilizando o método de confiabilidade estrutural “*First Order Reliability Moment*” (*FORM*) obtido das análises probabilísticas, juntamente com os ensaios, pode-se obter as seguintes conclusões:

- O índice de confiabilidade para a ruptura das vigas do G0 em relação ao valor de referência é β de 3,12, por consequência a sua probabilidade de falha e P_f de 0,09%. Isto indica que as vigas, sem reforço, foram dimensionadas e executadas dentro dos padrões de segurança exigidos para este tipo de elemento estrutural;
- Os resultados indicaram que as vigas reforçadas com filme termo-ativo fenólico em relação ao descolamento do reforço não foram a melhor solução;

Devido ao fato da proximidade das cargas médias de ruptura das vigas reforçadas e das vigas originais sem reforço, houve uma diminuição nos índices de confiabilidade das vigas de controle para as recuperadas em G3, por exemplo, indicando uma maior probabilidade de falha das vigas reforçadas deste grupo. Isto pode ser explicado pelo fato de que, na

ruptura, o reforço não mais está atuando, visto que o descolamento das fibras ocorre em níveis de carga inferiores, portanto, são esperados valores distintos, inclusive menores, para as vigas reforçadas.

Assim, um projeto de reforço estrutural analisando a aderência do PRFC com formulação epóxi em situações de serviço geraria melhores níveis de segurança para as vigas analisadas em G1 e G3. A confiabilidade das vigas do G4 ficou bastante baixa, dando indícios de não serem eficientes.

O filme termo-ativado fenólico utilizado na substituição à formulação epóxi para a adesão de PRFC em vigas de concreto, em temperatura ambiente, não resultou em ganho de resistência ao descolamento do reforço à flexão.

7.1.3 Conclusões sobre a segunda etapa

As principais conclusões obtidas com a realização deste trabalho na segunda etapa foram:

- O filme termo-ativado fenólico como elemento de adesão de materiais composto de fibra de carbono mostrou-se pouco eficiente para os ensaios em atmosfera aquecida (G7 e G9). Com relação à formulação epóxi, o efeito da temperatura não mostrou ser degradante em temperaturas de trabalho em torno de 80°C como se esperava, obtendo-se resultados satisfatórios para as cargas de descolamento do G8 com relação aos outros grupos desta etapa, proporcionando maior rigidez às vigas, dando indícios que estudos devem ser estendidos para controlar melhor as ações ou mecanismos responsáveis pelo descolamento prematuro dos adesivos em atmosfera aquecida.
- Os resultados obtidos permitiram observar que, em linhas gerais, quando o momento de descolamento do grupo aumenta, a probabilidade de falha tende a diminuir (G6 e G8).
- A maior probabilidade associada ao modo de falha “descolamento do PRFC” encontrada corresponde às vigas do G9 e G10, sendo igual a 100%. Pode-se concluir que tais probabilidades associadas a este modo de falha são preocupantes.

7.1.4 Considerações finais

Incrementos de resistência são somente alcançados quando evita a ocorrência dos modos de ruptura prematuros (falhas de aderência). Nessa pesquisa se priorizou esta forma de ruptura para atingir os objetivos propostos, representar em termos de probabilidade de falha a resistência ao descolamento do PRFC nas diversas temperaturas de exposição, alterando o tipo de adesão e números de camadas do reforço.

Quantificar o desempenho da ligação de um reforço pela simples adição da contribuição nos valores de descolamento, não necessariamente retrata a realidade do comportamento de vigas reforçadas. Com o objetivo de uniformizar as comparações, se tentou utilizar um modelo para a determinação da contribuição de diversas variáveis na resistência ao descolamento do PRFC.

A análise de um simples valor isolado de ruptura ou descolamento, não considera as possíveis interações entre os diversos materiais como aço, concreto e dimensões geométricas e sua influência sobre o comportamento global das vigas reforçadas, incertezas e variabilidades que são consideradas pela teoria de confiabilidade estrutural para encontrar a probabilidade de falha, e que muitas vezes parece possuir a princípio resultado controverso.

A capacidade resistente à flexão, correspondente aos modos de ruptura clássicos, pode ser avaliada com base nos procedimentos convencionais preconizados nos principais códigos normativos de projeto de estruturas de concreto armado reforçadas com PRFC, supondo que, além das hipóteses básicas da flexão, seja revista a hipótese considerada de aderência perfeita entre o concreto e o reforço. É conveniente ressaltar, porém, que, embora sejam necessárias para permitir uma simplificação da análise, algumas destas hipóteses não refletem plenamente o comportamento fundamental de uma viga reforçada com material composto de PRFC. Estes procedimentos consideram apenas a ruptura à flexão por falha do material composto à tração ou esmagamento do concreto, sem ruptura prematura por descolamento.

Um importante aspecto da aplicação de materiais compostos de PRFC no reforço de estruturas de concreto está relacionado à sua resistência de aderência, o que pode significar que a máxima tensão de tração do material composto pode não ser necessariamente alcançada, portanto, os modos de ruptura associados à falta de aderência devem ser verificados.

Além disso, o mecanismo de transferência de esforços entre o reforço e o substrato de concreto depende do desempenho do adesivo. A consolidação de uma estrutura monolítica, formada pelo concreto e o reforço, permite a transmissão eficiente das tensões entre os materiais.

A falha da aderência implica na perda completa da ação conjunta entre o reforço e o concreto, comprometendo a estabilidade do elemento estrutural.

A avaliação deste conjunto de ensaios permitiu identificar que estes modos de ruptura geralmente conduzem a uma dispersão bastante grande nos resultados, que podem impactar nas resistências de aderência e ao cisalhamento entre o concreto e a camada de reforço.

7.3 RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Este trabalho se concentrou na análise de confiabilidade de vigas de concreto armado reforçadas com PRFC para o estado limite último de flexão. As recomendações e sugestões para novos trabalhos são:

- Avaliação probabilística dos dados de ensaios com determinação de distribuições de probabilidade para os valores fixos medidos no ensaio de deformação do concreto, aço ou PRFC;
- Realização de um estudo mais amplo de confiabilidade estrutural para verificar probabilidades de falha adotando limites inferiores ou superiores de deslocamentos e cargas para comparação com os valores adotados neste trabalho;
- Utilizar simulação de Monte Carlo para a verificação da probabilidade de falha.

Este estudo verificou os modos de ruptura prematuros, associados ao arrancamento/descolamento do reforço, baseado na observação e análise estatística de resultados experimentais. Propõe-se um segundo estudo baseado na mecânica da fratura e finalmente uma terceira análise de modelos analíticos, visando a implementação de ferramentas para o dimensionamento e verificação de estruturas reforçadas com materiais compostos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 440, State of the art report on application of FRP composites, American Concrete Institute, 1993.

_____. 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. **ASTM E119**: Standard test methods for fire tests of building construction and materials, Pennsylvania, 1998.

ANDERSON, J. C.; LEAVER, K. D.; RAWLINGS, R.D.; ALEXANDER, J.M. **Materials science**. 4. ed. Chapman & Hall, 1990.

ASKELAND, D. R. **The science and engineering of materials**. London: Chapman & Hall, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 6152**: Materiais metálicos – Determinação das propriedades mecânicas à tração. Rio de Janeiro, 2002.

ATADERO, R.; LEE, L.; KARBHARI, V. M. **Consideration of material variability in reliability analysis of FRP strengthened bridge decks**. Composites Structures, No.70, p. 430-443, 2005.

AZEVEDO, C. P. B. **Avaliação da confiabilidade de fundações de torres estaiadas em linhas de transmissão**. 2007. 173 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

BANK, L. C. **Properties of FRP reinforcements for concrete**, Elsevier science publishers B.V., vol. 42, 1993., p. 59 – 86.

- BARBERO, E. J. **Introduction to composite materials design**. Philadelphia: Taylor & Francis, 1999.
- BARROS NETO, B.; SCARMÍNIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**. UNICAMP, Campinas, 1995.
- BEBER, A. J. **Avaliação do desempenho de vigas de concreto armado reforçadas com lâminas de fibra de carbono**. 1999. 108f. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003. 317 f. Tese de Doutorado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- BERTHELOT, J.-M. **Matériaux composites: comportement mécanique et analyse des structures**. Paris: Masson, 1992.
- BRADY, G. S. **Materials handbook**; an encyclopedia for purchasing managers, engineers, executives, and foremen. 10 ed., New York: McGraw-Hill Book, 1971.
- BRANDT, A. M. **Cement-based composites**: materials, mechanical properties and performance. London: E & FN Spon, 1995.
- BRITO, F. J. M., **Caracterização do comportamento dos plásticos reforçados com vista a aplicações estruturais**, LNEC, Dep. de Materiais de Construção, Núcleo de Cerâmica e Plásticos. Lisboa, 1986.
- CALLISTER JR., W.D. **Materials science and engineering an introduction**. 14 ed., John Wiley & Sons, 2000.
- CALLISTER, JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2002.
- CAMPAGNOLO, J. L.; CAMPOS FILHO, A.; SILVA FILHO, L. C. P. Estudo teórico-experimental sobre vigas de concreto armado reforçadas. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 4., 1997, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, UFRGS/CPGEC, 1997, v2, p 127-134.
- CARTER, G. F.; PAUL, D. E. **Materials Science & Engineering**. 16 ed. London: ASM International, 1991.
- CERQUEIRA, E. C. **Reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado com fibras de carbono**. 2000. 107 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: 2000.
- CHOU, T. W. **Microstructural design of fiber composites**. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

CREA, F.; PORCO, G.; ZINNO, R. **Experimental evaluation of thermal effects on the tensile mechanical properties of pultruded GFRP rods.** Applied composite materials. Netherlands, 1997, p.133- 143.

CORELHANO, A. G. B.; CORRÊA M. R. S.; BECK A. T. Confiabilidade de edifícios no estado limite de serviço para deslocamentos horizontais máximos **Structures and materials journal** 2012, v. 5, n1 p. 84-103,

DIAS, S. J. E., **Verificação experimental do reforço com CFRP de estruturas de betão à flexão.** 2001. 153 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia, FEUP, 2001.

EMMONS, P. H.; VAYSBURD, A. M.; THOMAS, J. **Strengthening concrete structures,** In: Concrete International, Detroit, 1998, v.20, p.53-58.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Externally bonded FRP reinforcement for RC Structures.** Lausanne, 2001. Bulletin 14.

FERREIRA, A. J. M. **Analysis of Reinforced Concrete with External Composite Strengthening.** Composites: Part B. 2000, p. 527- 534.

FORTES, A. S.; PADARATZ, I. J. Vigas de concreto armado reforçadas com polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC). In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 42, 2000, Fortaleza. **Anais...** IBRACON, 2000. CD-ROM.

GARCEZ, M. R. **Alternativa para melhoria no desempenho de estruturas de concreto armado reforçadas pela colagem de polímeros reforçados com fibras.** 2007. 267 f. Tese de Doutorado em Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

GARCEZ, M. R., QUININO, U. C. M, FILHO, L. C. P. S. e MEIER, U. Utilização de filmes termo-ativados como um adesivo de nova geração para a colagem de polímero reforçado com fibras (PRF) ao concreto. **Structures and materials journal**, IBRACON, 2008, v. 1, n.4.

HATASHITA, L. S. **Análise de confiabilidade de torres de transmissão de energia elétrica quando sujeitas a ventos fortes via método analítico FORM.** 2007. 112 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia - Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Curitiba 2007.

HATASHITA, L. S.; JUSTINO FILHO, M. R.; ABDALLA FILHO, J. E. Análise de confiabilidade estrutural de torres de transmissão de Energia elétrica quando sujeitas a ventos fortes via método Analítico FORM. In: **Encuentro regional iberoamericano de cigré**, Puerto Iguazú, Argentina 2009.

HE, J. H. **CFRP plate strengthening of RC beams.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL FAULTS AND REPAIR, Edinburgh, 1997, p.119-127.

HELENE, P. R. L. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto.**

2.ed. São Paulo: Pini, 1992. 213 p.

HYER, M. W. **Stress analysis of fiber-reinforced composite materials**. WCB/McGraw-Hill, Boston: 1998.

ISAIA, G. C. O concreto da era Clássica à Contemporânea. In: ISAIA, G. C. (Org.) **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005, v. 1 p. 2-43.

IYER, S. L., ANIGOL, M., **Testing and evaluation fiber glass, graphite and steel cables for pretensioned beams**, Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures, Proceedings of the Specialty Conference, ASCE, Las Vegas, 1991, p. 44-56.

JAPAN CONCRETE INSTITUTE. Technical report on continuous fiber reinforced concrete. JCI TC952 on continuous reinforced concrete, 1998, p. 116-24.

JUVANDES, L. F. P. **Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP**. 1999. 302 f. Tese de Doutorado em Engenharia. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1999.

JUVANDES, L. F. P.; MARQUES, A. T.; FIGUEIRAS, J. A. **Materiais compósitos no reforço de estruturas de betão**. Relatório Técnico. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto: 1996. 112 p.

KWON K.; FRANGOPOL D. M.; KIM S. Fatigue performance assessment and service life prediction of high-speed ship structures based on probabilistic lifetime sea loads. **Journal structure and infrastructure engineering**, Taylor & Francis, 2010, p. 1-14

KRÜGER C. M. **Análise de confiabilidade estrutural aplicada às barragens de concreto**. 2008. 157 f. Tese de Doutorado em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

MACHADO, A. P. **Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. São Paulo: Pini, 2002. 282 p.

MAERZ, N.; NANNI A.; MYERS, J.; GALECKI, G. **Laser profilometry for concrete substrate characterization prior to frp laminate application**. Bulletin of the International Concrete Repair Institute, 2000.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais na engenharia**. São Paulo: Edgar Blücher, 1991.

MBT - Master Builders Technologies. Mbrace® **Composite Strengthening System - Engineering Design Guidelines**, 2004.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ed. IBRACON, 2008.

MEIER, U. Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites. **Construction and building materials**, vol. 9, 1995, 6. p. 341-355.

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

MELCHERS, R. E.; **Structural reliability: analysis and prediction**. Ed. Chichester: Ellis Horwood Limited, 1987.

MENDONÇA, P. T. R. **Materiais compostos e estruturas-sanduiche**. Manole, 2005.

MONTEIRO, E. B. Reabilitação de Estruturas de Concreto. In: ISAIA, G. C. (Org.) **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005, v. 2 p. 1109-1125.

NANNI, P. B. 1993, **Fiber Reinforced Plastic (FRP)** - Reinforcement for concrete structures: Properties and applications, Elsevier Science Publishers B.V., Vol. 42, Amsterdam, p 450.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto** 2.ed. São Paulo : Pini, 1997, 828p.

OKEIL, A. M.; EL-TAWIL, S.; SHAHAWY, M. Flexural reliability of reinforced concrete bridge girders strengthened with carbon fiber-reinforced polymer laminates. **Journal of bridge engineering**, 2002.

PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia** – Microestrutura e Propriedades. 1 ed. São Paulo: Hemus Editora Ltda., São Paulo, 1997.

PALIGA, C. M.; CAMPOS FILHO, A.; REAL, M. V. Confiabilidade estrutural de vigas de concreto armado danificadas e recuperadas com lâminas de PRFC. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, n.12, p.49-58, 2008

PEREIRA, M. F.; ALENCAR R. S. A. O concreto na Arquitetura Brasileira. In: ISAIA, G. C. (Org.) **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. 1 v. p. 75-107.

PINTO, C. T. M. P. **Reforço à flexão de vigas de concreto armado com fibras de carbono**. 2000.142 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

PLEVRIS, N; TRIANTAFILLOU, T. C.; VENEZIANO, D. **Reliability of RC Members Strengthened with CFRP Laminates**. *Journal of Structural Engineering*, 1995.

REDDY, J. N. **Mechanics of laminated composite plates: theory and analysis**. New York: CRC Press, 1997.

RIPPER, T. **Plásticos armados com fibras como solução para o reforço de estruturas**, 1998.

SANTOS, A. C.; DA SILVA, T. J.; SANTIAGO, P. H. B. Avaliação de filme termo adesivo na adesão entre PRF e concreto. 52º Congresso Brasileiro do Concreto. In: **Anais do** ISSN 2175-8182, IBRACON, outubro/2010, Fortaleza, CE, 10 p., CD, 2010.

SIKA. **Carbodur sistema de reforço com lâminas de fibra de carbono**. Disponível em <<http://www.sika.com.br>>. Acesso em: 22 nov. de 2010.

SITTER, W. Cost for service life optimization. The “Law of lives”. In: CEB-RILEM. **Durability of concrete structures**. Copenhagen, 1984

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1. ed. São Paulo: Pini, São Paulo 1998.

TÄLJSTEN, B. **Defining anchor lengths of steel and CFRP plates bonded to concrete**. International Journal of Adhesion and Adhesives, London, Elsevier Science, v.17, n.4, 1997, p.319-327.

TENG, J. G. **Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs**. 1.ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2001, 245 pp.

TESA **Fitas filmicas termo-ativadas**. Disponível em <<http://www.tesatape.com.br>> , Acesso em: 22 nov. de 2010.

VAL, D. V. **Reliability of fiber-reinforced polymer-confined reinforced concrete columns**. Journal of Structural Engineering, 2003.

VAN VLACK, L. H. **Materials for engineering concepts and applications**. Massachusetts: Addison-Wesley, 1982.

ZHU B., FRANGOPOL D. M. **Reliability, redundancy and risk as performance indicators of structural systems during their life-cycle**. Engineering Structures, Elsevier, 2012, 34-49.