

NATHAN PEREIRA DE ANDRADE

**UTILIZAÇÃO DE COMPÓSITO DE FIBRA DE VIDRO/RESINA EPÓXI PARA
REFORÇO ESTRUTURAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO**

Guaratinguetá - SP

2017

Nathan Pereira de Andrade

**UTILIZAÇÃO DE COMPÓSITO DE FIBRA DE VIDRO/RESINA EPÓXI PARA
REFORÇO ESTRUTURAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Msc. Daniel Consoli Silveira
Coorientador: Prof. Dr. Antônio Wanderley Terni

Guaratinguetá - SP

2017

Andrade, Nathan Pereira de
A553u Utilização de compósito de fibra de vidro / resina epóxi para reforço
estrutural de vigas de concreto armado / Nathan Pereira de Andrade –
Guaratinguetá, 2017.
75 f. : il.
Bibliografia : f. 72-75

Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual
Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Me Daniel Consoli Silveira

1. Compósitos poliméricos. 2. Resinas epóxi. 3. Concreto armado.
I. Título

CDU 624.012.45


Ludiana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3595

NATHAN PEREIRA DE ANDRADE

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL



Prof. Dr. ENOS ARNEIRO NOGUEIRA DA SILVA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Msc. DANIEL CONSOLI SILVEIRA
Orientador/UNESP – FEG



Prof. Dr. JOAO UBIRATAN DE LIMA E SILVA
UNESP – FEG



Prof. Dr. ALBERTO LIMA SANTOS
UNESP-FEG

Dezembro 2017

dedico este trabalho
de modo especial, à minha família.

AGRADECIMENTOS

Impossível não agradecer primeiramente àquele que me permite viver e seguir atrás dos meus sonhos dia após dia, obrigado Deus pela vida, pela sabedoria, pela minha família e por todos que tu colocaste em meu caminho para que pudesse conquistar mais esse sonho.

Junto a ele, agradeço aos meus pais Waldecir e Elisabeth, por todo incentivo, educação e investimento em mim, e com eles meus irmãos Renan e Maria Fernanda. Sem a menor dúvida, eu não poderia ter chegado até aqui se eles não estivessem ao meu lado. Isso se chama família, e não há preço que pague por isso.

Aos meus amigos de curso, que me acompanharam e se tornaram parte da minha vida. Obrigado Aline Vital, Caroline Nascimento, David Succi, Lucas Palhano, Lucas Nunes, Gustavo Pagotto, Darci Toledo, Danilo Kataoka, Renan Mendes, Walker Souza, Thais Antunes e Yara Terra.

Aos meus orientadores *Prof. Msc. Daniel Consoli Silveira* e *Prof. Dr. Antônio Wanderley Terni*. Tenho total consciência que sem a confiança, o carinho, e o suporte técnico de vocês não teria condições para concluir minha graduação. E também ao *Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho*, pelo suporte técnico e financeiro.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Civil da FEG-UNESP que se colocaram à minha disposição a todo o momento, para me ensinar e auxiliar nos estudos.

Ao pessoal do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG-UNESP pelo suporte no desenvolvimento do trabalho, em especial ao Sr. Wilson, que deu todo o suporte no agendamento e realização dos ensaios mecânicos.

Ao Técnico Flávio que me auxiliou muito em todo o processo de execução das vigas de concreto.

À empresa Viapol e ao coordenador administrativo de vendas Alexsandro, que forneceu todo suporte para doação do material *Viapol Carbon Primer*, fundamental no processo de execução.

“O único lugar aonde o sucesso vem antes do trabalho é
no dicionário”

Albert Einstein

RESUMO

Fatores como erros de projeto e execução, falta de manutenção e vistorias, além de mudanças no carregamento trazem deficiências às estruturas de concreto armado. Nesse sentido há a necessidade da utilização de sistemas de reforços estruturais. Esse trabalho apresenta algumas das técnicas de reforço estrutural, com ênfase no processo de fabricação, aplicação e execução de reforço estrutural com compósito fabricado a partir de pré-impregnado de tecido de fibra de vidro tipo *plain weave* 1x1 e resina epóxi. Foram realizados ensaios de flexão de 4 pontos em vigas de concreto armado, placas de compósito e em vigas híbridas (vigas de concreto armado reforçadas com compósito). Com os resultados foram feitas comparações entre os valores experimentais e os valores calculados pelos métodos de dimensionamento, possibilitando a aferição da metodologia de cálculo e sua aplicação em vigas com reforço estrutural. Foi possível perceber tanto a eficiência do sistema polimérico reforçado com fibras aplicado para o reforço de vigas de concreto armado, como também a eficiência dos modelos de cálculo utilizados.

PALAVRAS-CHAVE: Compósitos Poliméricos. Pré-impregnado, Concreto Armado. Reforço Estrutural. Fibra De Vidro/Resina Epóxi.

ABSTRACT

Factors such as project and execution errors, lack of maintenance and inspection, and changes in loading cause deficiencies to reinforced concrete structures. In this sense there is the need of application of structural reinforcement systems. This study presents some of the techniques of structural reinforcement, emphasizing the manufacturing process, implementation and execution of structural reinforcement with composite material based on pre-impregnated of glass fiber fabric type *plain weave* 1 x 1 and epoxy resin. Beams made of steel reinforced concrete, composite material beams and hybrid (steel reinforced beams and composite beams combined together) were submitted to 4 points flexural test. Experimental and calculated results for the dimensioning of the beams were compared, allowing the validation of the calculation method and its implementation. It was possible to notice both the efficiency of the composite material applied to the reinforcement of steel/concrete beams, as well as the efficiency of the calculation models applied in this work.

Keywords: Polymer Composite. Pre-Impregnated Material. Steel Reinforced Concrete. Structural Reinforcement. Glass Fiber/Epoxy Resin.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - FLUXOGRAMA DE RELAÇÕES ENTRE DURABILIDADE E DESEMPENHO.....	177
FIGURA 2 - MANIFESTAÇÃO PATOLÓGICA EM PILAR DE CONCRETO ARMADO.....	188
FIGURA 3 - REFORÇO POR ADIÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS.....	222
FIGURA 4 - TENSÃO DE TRAÇÃO X DEFORMAÇÃO PARA ALGUNS MATERIAIS.....	255
FIGURA 5 - TECIDO TIPO PLANO 1X1.....	288
FIGURA 6 - VARIAÇÕES DE TECIDOS PLANOS: (A) BASKET (B) OXFORD.....	288
FIGURA 7 - TECIDOS TIPO HS (À ESQUERDA); DIAGONAL (À DIREITA).....	299
FIGURA 8 - REFORÇO AO CISALHAMENTO: (A) ENVOLVIMENTO TOTAL DO PILAR; (B) ENVOLVIMENTO PARCIAL DE VIGAS E (C) TIRAS COM ANCORAGEM.....	30
30	
FIGURA 9 - PEÇA REFORÇADA POR CONFINAMENTO.....	3131
FIGURA 10 - (A) BARRAS OU FILETES INSERIDOS PRÓXIMOS À SUPERFÍCIE; (B) LAMINADOS FORMANDO TRELIÇA E (C) COLAGEM DE TECIDO PRF.....	322
FIGURA 11 - MATERIAIS PARA CONCRETO.....	355
FIGURA 12 - CONCRETO UTILIZADO PARA A CONCRETAGEM.....	366
FIGURA 13 - ARMADURAS DAS VIGAS DE AÇO CA-60.....	366
FIGURA 14 - TEMPERATURAS DE CURA E DEGRADAÇÃO DO PRÉ-IMPREGNADO.....	388
FIGURA 15 - (A) CURVAS DSC ISOTÉRMICO E TEMPO DE CURA DO PRÉ-IMPREGNADO; (B) PRENSA CARVER DE MOLDAGEM POR COMPRESSÃO A QUENTE.....	399
FIGURA 16 – LÂMINAS DE PRÉ-IMPREGNADO CORTADAS COM 30 CM X 30 CM E COM PROTEÇÃO POLIMÉRICA AZUL.....	40
40	
FIGURA 17 - PREPEG NO MOLDE E RETIRADA DA PELÍCULA PROTETORA.....	40
FIGURA 18 - COMPÓSITO DE TECIDO DE FIBRA DE VIDRO E RESINA EPÓXI.....	4141
FIGURA 19 - PROCESSO DE CORTE EM SERRA DE FITA.....	41
FIGURA 20 - PROCESSO DE FRESAMENTO NA FRESA DMU 50.....	422
FIGURA 21 - EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA INSPEÇÃO POR ULTRASSOM DO COMPÓSITO POLIMÉRICO.....	433
FIGURA 22 - FORMAS PARA CONCRETAGEM.....	433
FIGURA 23 - FORMAS APÓS CONCRETAGEM.....	444
FIGURA 24 - VIGAS COM <i>VIAPOL CARBON PRIMER</i>	455
FIGURA 25 - VIGAS COM ADESIVO ESTRUTURAL <i>SIKADUR 31</i>	466
FIGURA 26 - VIGAS COM COMPÓSITO JÁ COLADO.....	46
FIGURA 27 - GRÁFICO TENSÃO X DEFORMAÇÃO CONCRETO.....	477
FIGURA 28 - DIAGRAMA TENSÃO X DEFORMAÇÃO AÇO CLASSE A.....	488
FIGURA 29 - (A) SEÇÃO PLANA ANTES DA DEFORMAÇÃO; (B) SEÇÃO PLANA APÓS DEFORMAÇÃO.....	488
FIGURA 30 – DIAGRAMA RETANGULAR SIMPLIFICADO DE TENSÕES DE COMPRESSÃO NO CONCRETO (Σ CD) E DIAGRAMA LINEAR DE DEFORMAÇÕES AO LONGO DA SEÇÃO TRANSVERSAL.....	499
499	
FIGURA 31 - DIAGRAMA DE DEFORMAÇÕES AO LONGO DA ALTURA DE UMA VIGA.....	499
FIGURA 32 - DIAGRAMA DE DEFORMAÇÕES DOS DOMÍNIOS 2, 3 E 4.....	5050
FIGURA 33 - DEFORMAÇÕES E FORÇAS RESULTANTES NOS ELEMENTOS DE UMA VIGA.....	53

FIGURA 34 - (A) MONTAGEM EXPERIMENTAL E DIAGRAMAS DMF E DEC; (B) MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS.	555
FIGURA 35 - VISTA EM PERSPECTIVA.	555
FIGURA 36 - VISTA FRONTAL E LATERAL.	566
FIGURA 37 - ULTRASSOM DOS PRF.	577
FIGURA 38 - DIAGRAMA TENSÃO DEFORMAÇÃO CDP 05 E 06, RESPECTIVAMENTE.	660
FIGURA 39 - DIAGRAMA TENSÃO X DEFORMAÇÃO CDP 07 E 08, RESPECTIVAMENTE.	660
FIGURA 40 - DIAGRAMA TENSÃO X DEFORMAÇÃO (CDP01).	660
FIGURA 41 - DIAGRAMA TENSÃO X DEFORMAÇÃO (CDP02).	6060
FIGURA 42 - DIAGRAMA TENSÃO X DEFORMAÇÃO (CDP03).	6161
FIGURA 43 - DIAGRAMA TENSÃO X DEFORMAÇÃO (CDP04).	6161
FIGURA 44 - RUPTURA CDP 01 A 04.	6464
FIGURA 45 - MODOS DE RUPTURA NO ENSAIO DE FLEXÃO EM 4 PONTOS.	655
FIGURA 46 - DIAGRAMA TENSÃO X DEFORMAÇÃO (CDP09).	666
FIGURA 47 - DIAGRAMA TENSÃO X DEFORMAÇÃO (CDP10).	677
FIGURA 48 - DIAGRAMA TENSÃO X DEFORMAÇÃO (CDP11).	677
FIGURA 49 - DIAGRAMA TENSÃO X DEFORMAÇÃO (CDP12).	688
FIGURA 50 - CDPs 09 A 12 ROMPIDOS.	699

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS E SUAS POSSÍVEIS CAUSAS	16
TABELA 2 - PROPRIEDADES FIBRAS DE CARBONO, ARAMIDA E VIDRO.	27
TABELA 3 - TRAÇO CONCRETO POR M ³	35
TABELA 4 - TABELA COM OS PARÂMETROS OBTIDOS E ADICIONADOS NO DIMENSIONAMENTO.....	59
TABELA 5 - TENSÕES MÁXIMA DE CÁLCULO E DE ENSAIO VIGAS SEM REFORÇO.	62
TABELA 6 - TENSÕES MÁXIMA DE CÁLCULO E DE ENSAIO VIGAS COM REFORÇO	666
TABELA 7 - MÉDIAS DAS CARGAS DE RUPTURA E VARIAÇÃO PERCENTUAL.....	70

LISTA DE SÍMBOLOS

h	Altura nominal da seção transversal retangular.
bw	Largura nominal da seção transversal retangular.
LN	Linha neutra.
x	Distância que localiza a LN em relação à fibra mais comprimida do concreto
CG	Centro de gravidade da armadura.
d	Altura “útil”, distância do centro de gravidade da armadura à fibra mais comprimida do concreto.
A^c	Área comprimida da seção transversal correspondente a distância „x”.
A_s	Área da armadura longitudinal.
Mk	Momento fletor característico (real).
Md	Momento fletor de cálculo (majorado), oriundo dos carregamentos da peça. Age na seção transversal.
Rcc	Resultante de compressão de cálculo na região comprimida da seção transversal do concreto.
Rst	Resultante de tração de cálculo oriunda do efeito do momento fletor de cálculo M.
ϵ_{cd}	Deformação de compressão de cálculo atuante no concreto.
ϵ_{sd}	Deformação de tração de cálculo atuante na armadura.
y	Altura do diagrama retangular simplificado permitido pela norma, correspondente a $0,8 \cdot x$.
Zcc	Braço de alavanca que corresponde à distância entre Rcc e Rst.
f_{ycd}	Tensão de compressão resistente de cálculo do concreto.
f_{yd}	Tensão de escoamento de cálculo da armadura.
σ_s	Tensão de tração de cálculo na armadura.
σ_{cd}	Tensão de compressão de cálculo no concreto.
fck	Resistencia característica à compressão do concreto.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	133
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	155
2.1 PATOLOGIAS EM ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO.....	155
2.2 RECUPERAÇÕES DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	199
2.3 REFORÇOS ESTRUTURAIS CONVENCIONAIS EM CONCRETO ARMADO	21
2.3.1 Aumento da seção de concreto armado	21
2.3.2 Reforços com perfis metálicos	22
2.3.3 Reforços com chapas de aço coladas.....	222
2.4 REFORÇOS UTILIZANDO POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS.....	233
2.4.1 Tipos de fibras utilizadas nos reforços	233
2.4.2 Tecidos utilizados na fabricação de PRF	277
2.4.3 Tipos de reforços de estruturas com compósitos de PRF	299
3 MATERIAIS E MÉTODOS	344
3.1 INTRODUÇÃO.....	344
3.2 MATERIAIS	344
3.2.1 Concreto	344
3.2.2 Armadura em aço.....	366
3.2.3 Produção do polímero reforçado com fibras de vidro	377
3.2.4 Inspeção do material compósito por ultrassom	422
3.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA CONCRETADOS	433
3.3.1 Preparação da interface adesiva entre concreto e PRF	444
3.4 DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS DE CONCRETO ARMADO.....	477
3.5 DIMENSIONAMENTO DO COMPÓSITO POLIMÉRICO ESTRUTURAL	522
3.6 MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA ENSAIOS DE FLEXÃO	544
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	577
4.1 COMPÓSITO POLIMÉRICO REFORÇADO COM FIBRAS	577
4.2 CONCRETO ARMADO SEM PRF	599
4.3 CONCRETO ARMADO REFORÇADO COM PRF	655
5 CONCLUSÕES	722
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	744

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Com a descoberta da agricultura e da pecuária, a humanidade passou a não mais ter hábitos nômades e começou a se fixar em lugares onde essas atividades eram possíveis de ser realizadas. A partir daí as edificações se iniciaram, e conseqüentemente deram início às estruturas e sua engenharia, iniciando na pré-história com, por exemplo, a *Stonehenge*, criada simplesmente com blocos de arenito e rochas chamadas de *bluestones*, apoiadas entre si como pilares e vigas, passando pelas pirâmides egípcias construídas com blocos de rocha, e revestidas com calcário e granito. Chegando até o concreto da Roma antiga, feito com argamassa de cinza vulcânica misturada com cal e unidos a pedaços de pedras. Após isso, a utilização do ferro fundido em construções de pontes, até finalmente chegarmos ao concreto armado e ao concreto protendido. A utilização de estruturas de concreto em combinação com o aço foi largamente aumentada após *Hardy Cross* introduzir o método da distribuição de momentos, o que permitiu que os engenheiros pudessem ter uma base matemática para analisar as estruturas e não somente bases empíricas (LEET, UANG e GILBERT, 2009).

A constante evolução de materiais e métodos construtivos, incentiva à engenharia a sempre pesquisar novos conhecimentos, inovar e trazer novas soluções tecnológicas, aprimorando a qualidade dos serviços realizados, conjuntamente com o desenvolvimento contínuo da mão de obra. A deterioração das estruturas, é um quesito constante, seja por motivos de erros de projeto, de execução de obra, ou também devido a vida útil da construção. Esses fatores criam a necessidade de reparos e reforços em tais estruturas, uma vez que as últimas ficam sujeitas a cargas superiores àquelas previstas durante o dimensionamento. Porém, na maioria das vezes se torna inviável a reconstrução das estruturas, pelo envolvimento de demolições nesse processo, que segundo Souza & Ripper (1998) ocorrem em casos mais graves. Por isso o grande desafio está em buscar métodos de reforços estruturais em concreto armado, que apresentem praticidade de execução, com custos acessíveis, que gerem aumento da vida útil da obra juntamente com o aumento da capacidade de carga das estruturas, além de ser economicamente viáveis.

Um dos setores industriais que vem em contínua expansão e apresenta soluções para o exposto acima, refere-se ao setor de produção e aplicação de reforços utilizando compósitos estruturais. Compósitos em fibra de vidro apresentam propriedades mecânicas interessantes e podem fornecer resultados favoráveis se aplicados nas estruturas. Por ser um método de fácil aplicação, durante reparos *in situ*, pelo fato do material poder ser somente colado nas

estruturas, além de não gerar grandes aumentos de massa e dimensões dessas, ele se torna interessante e escopo de pesquisa na engenharia civil.

Este trabalho tem como objetivo principal analisar o ganho de capacidade estrutural em flexão de vigas de concreto armado reforçadas com placas de compósitos de tecido *plain weave* 1x1 de fibra de vidro e resina epóxi (FV/epóxi), comparando os resultados na ruptura da viga de concreto armado, com as vigas de concreto armado reforçadas com laminados de material compósito, validando os ganhos estruturais empíricos e a metodologia de cálculo aplicada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PATOLOGIAS EM ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO

É necessário entender que toda e qualquer estrutura sofre alteração com o passar do tempo e que todas apresentam uma vida útil limitada. Portanto todo e qualquer elemento estrutural irá se deteriorar ao longo dos anos de trabalho seja por motivos internos ou externos ao mesmo (FERREIRA, 2005). Segundo o mesmo autor a patologia na engenharia civil trata-se da perda de desempenho das estruturas por processos de deterioração dos materiais ou da própria estrutura.

Uma estrutura apresenta de uma forma geral quatro fases:

- Concepção: Definição da função da estrutura, cargas atuantes e escolha dos materiais a serem utilizados;
- Projeto: Execução dos cálculos, dimensionamento dos elementos e especificação clara dos materiais;
- Execução: Realização de toda obra, baseado nos projetos elaborados na etapa anterior;
- Utilização: Fase na qual a estrutura está sendo de fato utilizada, juntamente com os devidos cuidados com manutenção.

Segundo Aguiar (2011) as patologias podem aparecer em qualquer uma das fases descritas acima. Podem ser por problemas de execução do projeto, nesse caso devido ao mal detalhamento do projeto e possibilidade de interpretação dúbia ou até mesmo por erro de especificação; ou por compra de materiais fora do requisitado em projeto. Podem ocorrer também erros de execução dos serviços por mão de obra desqualificada, que não irão realizar os procedimentos conforme técnicas exigidas. E um fator de certa forma menos percebido, porém muito comum: a falta de fiscalização, ou inexistência da mesma, a qual é de obrigação de um engenheiro responsável em toda boa obra, o que pode gerar, por exemplo, a realização de estruturas com falta de cobrimento das armaduras, sendo esta uma falha muito frequente na execução das estruturas e uma das grandes geradoras da deterioração nas estruturas. Segundo Ferreira (2005) devido a falta de cobrimento das armaduras é que as estruturas ficam sujeitas à carbonatação e à despassivação (sendo o primeiro relacionado à alteração do pH do meio e o segundo relacionado ao processo de corrosão do aço). A tabela 1 mostra as

principais manifestações patológicas, e suas possíveis causas, segundo Souza & Ripper (1998):

Tabela 1 - Manifestações patológicas e suas possíveis causas

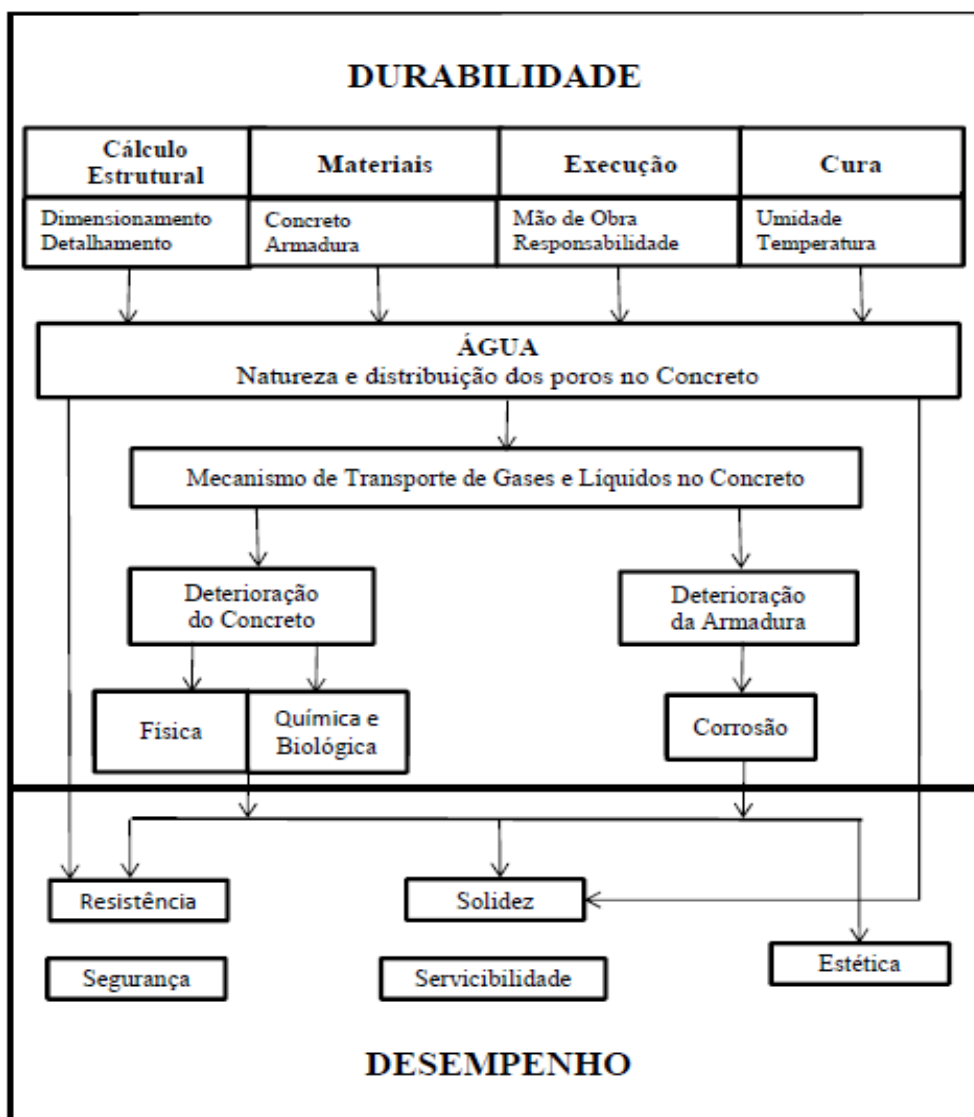
Manifestação patológica	Causas
Fissuração	Contração plástica Assentamento do concreto/perda de aderência Movimentação do cimbramento e/ou formas Retração Deficiência de projeto e falhas na execução Reações expansivas Corrosão das armaduras Recalques diferenciais Variações de temperatura Cargas não previstas
Desagregação do concreto	Fissuração Movimento das formas Corrosão do concreto Calcinação Ataque biológico
Carbonatação	Porosidade do concreto Ataque biológico Atmosfera agressiva
Perda de aderência	Agregado inadequado Contaminação por material pulverulento Armadura com superfície de contato inadequada
Desgaste do concreto	Agregado inadequado Contaminação por material pulverulento Contaminação por grãos friáveis Reatividade dos agregados Fator A/C com altos valores

Fonte: Adaptado de Souza & Ripper, 1998.

Estudos realizados pela engenharia em relação às patologias, suas origens, e suas consequências visam um objetivo em comum: a garantia do desempenho satisfatório das estruturas, que segundo Souza & Ripper (1998), é o comportamento em serviço de cada

produto, resultado de cada uma das etapas dos projetos e segundo especificado. Portanto, o cuidado, atenção e as corretas adoções técnicas e normativas desde a concepção do projeto, até a execução e manutenção desses garante a durabilidade e o bom desempenho de qualquer estrutura que venha a ser realizada. A figura 1 mostra relações entre durabilidade e desempenho, por meio de acontecimentos ou fatores, sejam eles durante o projeto fora do campo de execução, ou dentro da própria obra, e suas consequências.

Figura 1 - Fluxograma de relações entre durabilidade e desempenho.



Fonte: Adaptado de Souza & Ripper, 1998.

Com o diagrama acima, é possível ter uma visão geral das patologias nas estruturas de concreto armado e em quais pontos elas afetarão na durabilidade e no desempenho das obras.

Ambos os aspectos, durabilidade e desempenho, são chave para todo e qualquer empreendimento a ser construído.

Um conceito importante, ainda no entendimento geral das patologias, é que uma falha cometida no processo de criação da estrutura torna a solução para o problema muito mais complexa. Pois um erro na concepção do projeto, claramente é muito mais complexo de ser solucionado futuramente, se comparado àqueles que tiveram uma execução errônea ou uma falha na manutenção da estrutura, uma vez que o primeiro gera erros de forma integral na estrutura, e o segundo gera patologias localizadas (FERREIRA, 2005). Logo, um erro no levantamento das cargas na estrutura gera erros nas dimensões e detalhamentos dos elementos estruturais, que por consequência acarretam em execuções de estruturas com desempenho insuficiente ao que verdadeiramente deveria ser. Por outro lado, um erro executivo, como por exemplo, um erro no instante da concretagem de um único pilar (Figura 2) exige apenas a recuperação daquele elemento específico, com certeza uma solução mais simples que a primeira hipótese citada acima.

Figura 2 - Manifestação patológica em pilar de concreto armado.



Fonte: Andrade (1992).

2.2 RECUPERAÇÕES DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Após o surgimento de uma patologia na estrutura, surge conseqüentemente a necessidade da recuperação da mesma. Segundo Ferreira (2005) as recuperações nas estruturas acontecem na intervenção de um processo dinâmico em atividade, tais intervenções têm como objetivo corrigir uma insuficiência na capacidade de carga, ou fornecer um novo tipo de uso para a estrutura. Por outro lado, segundo Reis (1998) recuperação está ligada somente ao restabelecimento das propriedades iniciais de projeto da estrutura, enquanto que o reforço é o responsável pelo incremento da capacidade de carga da estrutura.

Intervenção técnica pode ser vista como uma série de atos com a finalidade de estabilizar um processo de degradação estrutural, de reverter esse processo e ainda de modificar o desempenho do elemento em questão. Segundo Souza e Ripper (1998) para que uma recuperação tenha sucesso e seja de qualidade, ela deve ser antecipada por uma análise acertada das reais causas que fazem a intervenção necessária e das conseqüências que essas causas trouxeram.

Alguns procedimentos e técnicas são indicados na literatura para realização prévia à recuperação das estruturas de concreto armado. Deve-se ter cuidado em relação ao preparo da superfície a ser recuperada, sejam por ações mais superficiais e simples, ou por ações mais profundas nos membros estruturais. Abaixo estão listadas algumas dessas técnicas, de acordo com Souza & Ripper (1998):

- **Lavagem com água:** podendo ser com água fria a baixa pressão para remoção de impurezas solúveis bem superficiais; água fria a alta pressão para remoção de materiais já desagregados do concreto; ou água quente a alta pressão para remoção de gorduras da superfície, que atrapalham a aderência do substrato com as próximas camadas; não indicada para procedimentos que exigem substrato seco para etapas posteriores.
- **Lavagem a vapor:** técnica adequada para grandes áreas a serem recuperadas, as quais foram contaminadas por graxas, óleos e sais. Também não indicada para aplicações e procedimentos que exijam substrato seco para etapas posteriores a essa.
- **Jatos de ar:** jateamento de ar com pressão realizam remoção de partículas e materiais desagregados da superfície a ser recuperada, sem encharcá-la. Sendo necessário o

cuidado de utilizar filtros de ar e óleo no compressor, para a garantia de que o ar não saia sujo ou contaminado com óleo do próprio equipamento e impregne a superfície.

- **Lixamento:** pode ser executado manualmente ou com lixadeiras rotativas, com a finalidade de remover incrustações, eflorescências, impurezas e corrosões nas armações expostas.
- **Escovamento:** procedimento semelhante ao lixamento, porém mais intenso quando escovas de aço são utilizadas. Tem a finalidade de remover impurezas e incrustações com maior aderência à peça ou mais espessas. Realizada tanto manualmente quanto mecanicamente com equipamentos contendo escovas rotativas.
- **Corte de pequena profundidade:** realizados com lixadeiras e equipamentos específicos utilizando discos de corte, para execução de desbastes rasos nas estruturas ou também no processo de abertura de fissuras para realização de tratamentos posteriores. É necessário cuidado para que a armadura já existente não sofra danos.
- **Demolição parcial:** aplicável em várias situações para recuperação de peças e execução de reforços, deve ser realizado com controle total da situação, a fim de não comprometer a estrutura como um todo, durante o processo de demolição parcial. Podem ser utilizadas marretas e ponteiras, ou marteletes.

O reparo em elementos estruturais acontece devido a degradações do concreto ou do aço das armaduras. Segundo Souza & Ripper (1998) existem 3 classificações segundo a profundidade dos danos e conseqüentemente dos reparos, sendo rasos ou superficiais, semiprofundos e profundos.

Reparos rasos ou superficiais são aqueles nos quais a profundidade é inferior a 2,0 cm e com superfícies de até 15 cm².

Reparos semiprofundos, quando a profundidade se encontra entre 2,0 cm e 5,0 cm, e em sua grande maioria atingindo as armaduras.

Reparos profundos quando atingirem profundidades superiores a 5,0 cm. Nesse caso deve haver muito cuidado no preparo das cavidades, deve-se remover todo o concreto já danificado até atingir o concreto intacto, para que assim a superfície seja preparada para a aderência de substratos e posteriores técnicas.

Esses reparos, de uma forma geral, podem ser feitos tanto com argamassa, *grout* ou com concreto. Existem vários procedimentos de reparo de estruturas, a seguir são apresentadas algumas das técnicas e materiais empregados.

2.3 REFORÇOS ESTRUTURAIS CONVENCIONAIS EM CONCRETO ARMADO

2.3.1 Aumento da seção de concreto armado

Essa possivelmente é uma das técnicas de reparo estrutural mais executada atualmente, a qual consiste no acréscimo de uma nova camada de concreto na peça a ser reforçada (REIS, 2001).

Sua execução se torna relativamente simples, em se tratando de uma nova concretagem na peça, utilizando formas maiores que as estipuladas no projeto inicial da estrutura. Apresenta vantagens econômicas por simplesmente haver uma nova concretagem, sem adição de novos materiais e técnicas mais sofisticadas (REIS, 2001). O método exige uma ótima aderência entre o substrato antigo com o novo, sendo recomendado o apicoamento da superfície antiga e a aplicação de uma resina. Araldi (2013) recomenda para esse processo a utilização de adesivos epóxis.

Entretanto, existem algumas desvantagens nesse método. Inicialmente a arquitetura da obra é alterada, peças de dimensões maiores que as originais são realizadas e eventualmente o reforço é executado em partes isoladas da estrutura, comprometendo realmente a harmonia da mesma.

Além disso, o peso próprio da estrutura é claramente modificado, devido à inclusão de material e maiores seções. Isso pode acarretar em acréscimo considerável na carga sobre as fundações e comprometer a subestrutura da obra, tornando o reforço ineficiente, uma vez que há o reparo da superestrutura, porém com comprometimento da subestrutura.

Por fim uma terceira desvantagem ainda existe. A não execução cuidadosa e correta dessa classe de reparo pode comprometer a aderência entre o concreto novo e o antigo, podendo gerar interfaces propensas ao aparecimento de novas patologias na peça, principalmente devido à retração e fissuração entre concreto antigo e novo (CARNEIRO, 1998).

2.3.2 Reforços com perfis metálicos

Segundo Reis (2001) este é um métodos tradicional de reforço e geralmente é utilizado em situações de emergência, que necessitam de intervenção rápida.

É uma técnica baseada no chumbamento de perfis metálicos nas estruturas, utilizando buchas expansivas e preenchimento com resinas injetáveis.

Reis (2001) ainda ressalta que a seção de concreto, após o reforço, deve receber cargas menores que as cargas originais da estrutura de concreto. Moraes (2009) cita como vantagens desse método, a versatilidade devido a capacidade de compatibilização entre os diversos perfis metálicos com outros elementos da estrutura, além da organização e limpeza do canteiro de obras.

2.3.3 Reforços com chapas de aço coladas

Essa técnica consiste na colagem de chapas metálicas nas superfícies de concreto por meio de resinas poliméricas (figura 3). Para Romero (2007) a aplicação de placas coladas na região tracionada da viga, aumenta sua resistência e rigidez a flexão. Se a colagem for realizada nas faces laterais da viga há melhoras do desempenho da viga em relação aos esforços cortante e à flexão, gerando alívio de tensões nas armaduras originais da viga.

Figura 3 - Reforço por adição de chapas metálicas.



Fonte: Stap (2017)

Para Souto Filho (2002) existe também a vantagem arquitetônica, as chapas são de pequena espessura e não geram grandes alterações na geometria das peças. Esse fato permite que exista o reforço estrutural da peça, sem trazer danos consideráveis para a arquitetura da obra.

O método apresenta algumas vantagens e desvantagens. Romero (2007) afirma que a facilidade no processo executivo e a facilidade de adquirir o material são pontos positivos do método. Em contrapartida apresenta desvantagens, como por exemplo, a dificuldade de visualização das fissuras sob as chapas, impossibilidade de acompanhamento da corrosão da parte interna da chapa, necessidade de proteção das chapas contra os processos corrosivos e o possível descolamento da chapa. Descolamento esse principalmente devido às distintas matrizes dos materiais empregados no reparo, interface entre material metálico aço carbono, resina polimérica e concreto (SILVEIRA, 2016).

2.4 REFORÇOS UTILIZANDO POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS

Atualmente os polímeros reforçados com fibras (PRF) são utilizados em inúmeras aplicações ligadas às tecnologias de ponta. Como por exemplo, satélites, aeronaves, helicópteros, implantes ortopédicos e odontológicos, veículos de competição, além de instrumentos musicais e outras aplicações em diversos setores. Os compósitos de uma forma geral são combinações de dois ou mais materiais, agregando ao novo material características superiores ao das partes que o constituem; os compósitos poliméricos reforçados com fibras são, geralmente, constituídos por fibras de reforço em meio a uma matriz polimérica, sendo o primeiro elemento responsável pela resistência estrutural, enquanto o segundo é responsável pela transferência das cargas para o reforço (REZENDE, COSTA E BOTELHO, 2011).

2.4.1 Tipos de fibras utilizadas nos reforços

No setor da construção civil, os compósitos estruturais mais utilizados são originários de fibras de carbono, fibras de vidro e fibras de aramida, que segundo Neto & Pardini (2006) são fibras que conferem alta rigidez e resistência mecânica aos elementos que a utilizam.

Essas fibras são leves se comparadas aos materiais utilizados nas estruturas de concreto armado e nos processos convencionais de reforços estruturais, apresentando assim elevada resistência específica (SILVEIRA, 2016). Suas aplicações vêm então sendo estudadas em larga escala também na engenharia civil. Atualmente as fibras de carbono são as mais

utilizadas pela construção civil e se apresentam como alternativa estrutural mais atrativa, em comparação as outras fibras (MENEGHETTI, 2007). Ainda segundo Meneghetti (2007), se comparada ao aço as fibras de carbono podem chegar a ser cinco vezes mais leves e dez vezes mais resistentes à tração. Apresentam também resistência a álcalis, grande inimigo das estruturas de concreto armado, principalmente em regiões marítimas. Meier (2005) diz que para reforços em pontes as fibras de carbono são as mais recomendáveis. Por outro lado, o mesmo autor diz que a questão de qual fibra é a mais adequada é ainda assunto de longa discussão.

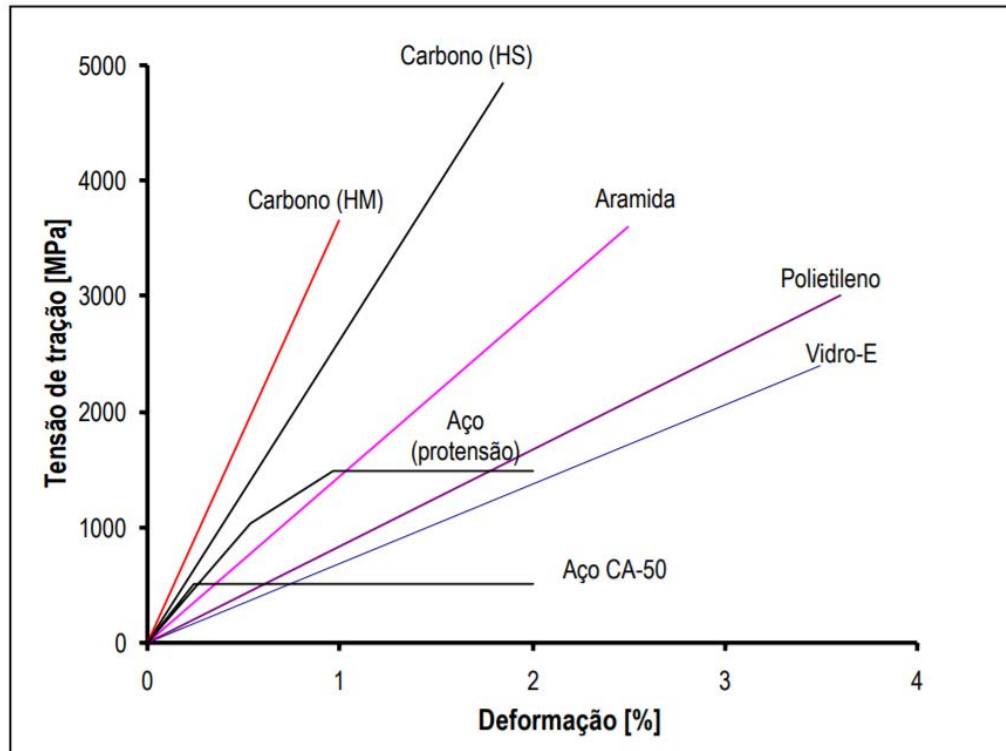
Reis (2001) comenta que o uso dos PRF é uma solução para evitar a deterioração do concreto quando a armadura está sob corrosão, visto que esses materiais não sofrem em excesso esses ataques eletroquímicos.

Outros dois estudos relatam algumas características dos PRF. Micali (2010) atribui como características gerais dos PRF, a elevada resistência específica, resistência à corrosão e rigidez. Dolan (1999) insere ainda como características vantajosas as altas resistências à tração, módulos de elasticidade elevados e baixa fluência. A possibilidade de interação ou não com ondas eletromagnéticas também é uma propriedade interessante, a qual favorece a inserção desses materiais em outros campos de atuação, como por exemplo, hospitais, presídios, estações de telecomunicação e radares, aeroportos, setores civil e militar (SILVEIRA, 2017).

Pontos positivos além desses são encontrados durante a execução dos reparos: realizados manualmente, sem a utilização de maquinário pesado, de forma rápida e sem a necessidade de interdição da estrutura que está sendo recuperada.

Uma comparação qualitativa interessante pode ser vista na Figura 4, para a utilização das fibras como armaduras ou barras de protensão.

Figura 4 - Tensão de tração x deformação para alguns materiais.



Fonte: Beber (2003)

Micali (2010) faz uma caracterização mais detalhada entre as fibras de aramida, carbono e vidro, as três fibras mais utilizadas nos PRF. Essas informações estão organizadas nas tabelas 2, 3 e 4.

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens fibra de carbono.

FIBRA DE CARBONO	
Vantagens	Desvantagens
As mais elevadas características mecânicas (menos impacto)	Geram diferença de potencial em contato com metais
Alto módulo de elasticidade	Baixa resistência aos impactos
Baixo coeficiente de dilatação térmica	Elevado custo
Elevada resistência à corrosão	-
Elevada resistência a solventes e reagentes químicos	-
Pouco higroscópicas	-

Fonte: Adaptado de Micali, 2010.

Quadro 2 - Vantagens e desvantagens fibra de aramida.

FIBRA DE ARAMIDA (KEVLAR)	
Vantagens	Desvantagens
Podem ter baixos ou altos módulos de elasticidade	Baixa resistência à compressão
Baixa densidade	Possuem dificuldade pra serem moldadas
Alta resistência à tração	Susceptíveis a altas temperaturas e raios ultravioletas
Alta resistência ao impacto (colete a prova de balas)	-

Fonte: Adaptado de Micali, 2010.

Quadro 3 - Vantagens e desvantagens fibra de vidro.

FIBRA DE VIDRO	
Vantagens	Desvantagens
Resistência química aos microorganismos	Muita sensibilidade em meios alcalinos
Boa resistência ao impacto	Resistências inferiores quando submetidas a ações de fadiga
Permite formar materiais translúcidos	-
Alta resistência à tração	-
Moderada resistência mecânica	-
Incombustibilidade	-
Baixa higroscopia	-
Baixo coeficiente de dilatação térmica	-

Fonte: Adaptado de Micali, 2010.

A Tabela 5 mostra de forma mais visível propriedades importantes das três fibras descritas acima e mais utilizadas na construção civil:

Tabela 2 - Propriedades fibras de carbono, aramida e vidro.

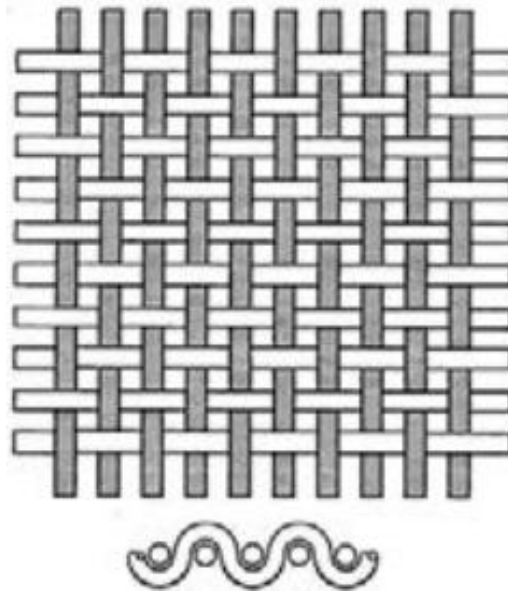
	FIBRA DE CARBONO				FIBRA DE ARAMIDA		FIBRA DE VIDRO	
	Carbono Poliacrílico		Carbono Pitch		Kevlar 49 Twaron	Technora	Vidro E	Vidro Álcali resistente
	Alta Resistência	Alto Módulo de Young	Comum	Alto Módulo de Young				
Resistência a Tração (MPa)	3430	2450 a 3920	764 a 980	2940 a 3430	2744	3430	3430 a 3528	1764 a 3430
Módulo de Young (GPa)	196 a 235	343 a 637	37 a 39	392 a 784	127	72,5	72,5 a 73,5	68,6 a 70
Alongamento (%)	1,3 a 1,8	0,4 a 0,8	2,1 a 2,5	0,4 a 1,5	2,3	4,6	4,8	4 a 5 2 a 3
Densidade (g/cm ³)	1,7 a 1,8	1,8 a 2,0	1,6 a 1,7	1,9 a 2,1	1,45	1,39	2,6	2,27
Diâmetro (µm)	5 a 8		9 a 18		12		8 a 12	

Fonte: Adaptado de Uomoto, T. *et al.* (2002).

2.4.2 Tecidos utilizados na fabricação de PRF

Segundo Neto & Pardini (2006) existem basicamente três tipos de tecidos que são utilizados na fabricação dos compósitos: tipo plano, tipo cetim e diagonal. Sendo os tecidos constituídos por cabos de fibras que se entrelaçam segundo um padrão. Os tecidos planos ou *plain* são os mais convencionais e aplicados para a realização de reforços estruturais. A Figura 5 mostra a maneira do entrelaçamento entre o urdume (fibras a 0°) e a trama (fibras a 90°) no tecido plano.

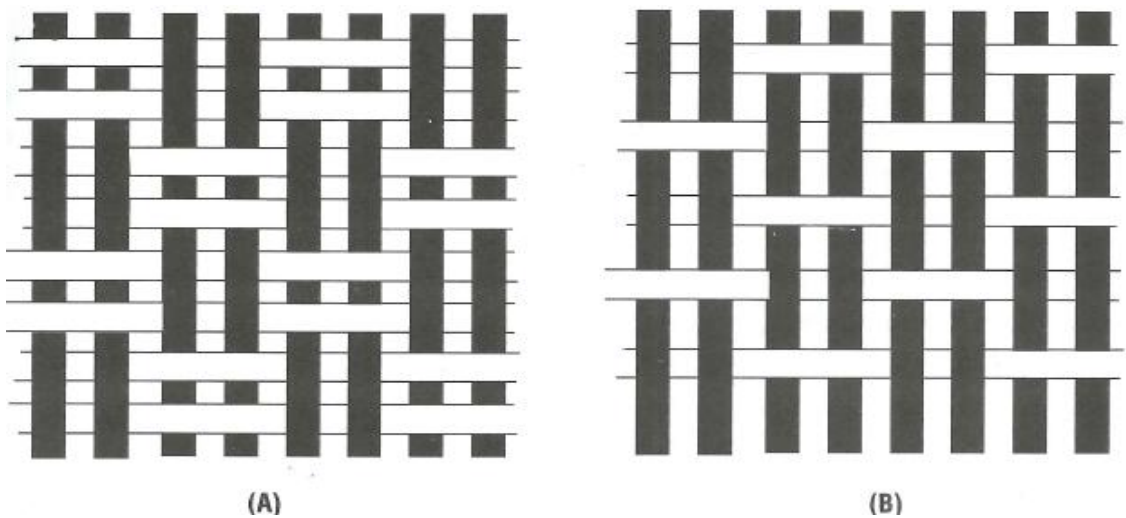
Figura 5 - Tecido tipo plano 1x1.



Fonte: Chung (2014) apud Santos (2015).

A partir da Figura 5 é possível ver que uma primeira trama a 90° que se inicia por baixo de um primeiro e consecutivo urdume a 0° , passa por cima do próximo, por baixo do terceiro e assim sucessivamente. Os tecidos planos podem apresentar também variações, como por exemplo os tecidos chamados *basket* e os chamados *oxford*, representados na Figura 6 (NETO & PARDINI, 2006).

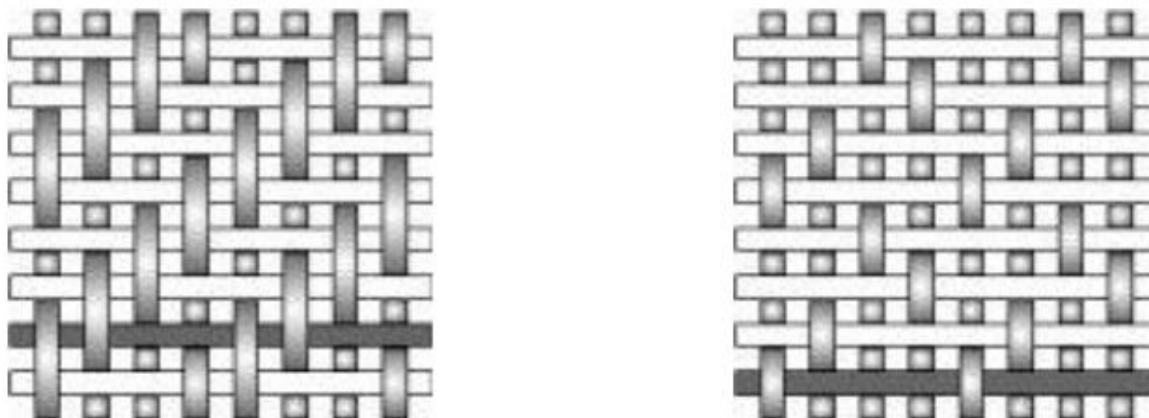
Figura 6 - Variações de tecidos planos: (A) basket (B) oxford.



Fonte: (NETO & PARDINI, 2006).

Os tecidos tipo cetim ou HS (*Harness satin*) tiveram seu uso inicial na indústria têxtil com uma finalidade decorativa por atribuírem brilho aos produtos, porém também são utilizados com a finalidade estrutural. Já os tecidos diagonais são caracterizados pelas linhas diagonais que se formam em suas superfícies, apresentam características como: resistência, durabilidade e flexibilidade. A figura 7 mostra detalhes desses outros dois tipos de tecidos.

Figura 7 - Tecidos tipo HS (à esquerda); diagonal (à direita).



Fonte: França (2014).

2.4.3 Tipos de reforços de estruturas com compósitos de PRF

Compósitos do tipo PRF podem ser aplicados para diferentes finalidades no reforço de estruturas. Abaixo são descritos alguns dos reforços aplicados em estruturas.

- Reforço à Flexão:

Esse tipo de execução de reforço se faz em grande parte colando o material compósito, com um adesivo estrutural, geralmente de base epóxi, com as fibras paralelas à direção principal do esforço solicitante (BAKIS *et al.*, 2002).

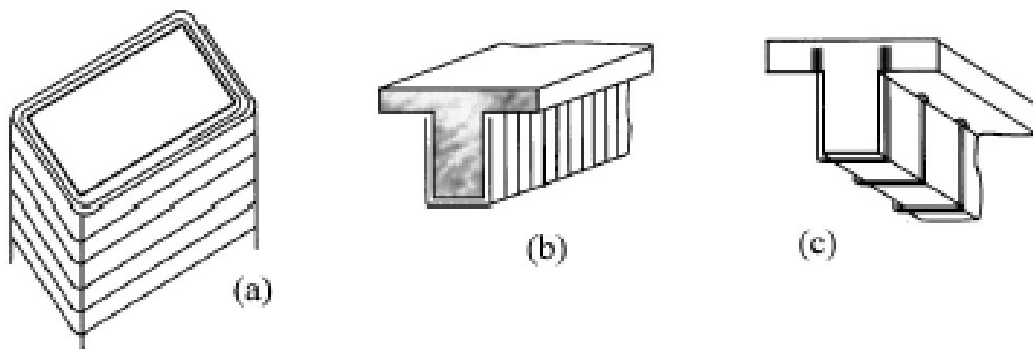
Nesse processo, a interface entre o concreto e reforço é o ponto que exige maior cuidado e atenção. A boa adesão entre substrato e reforço permite a transferência de esforços solicitantes para o reforço (BAKIS *et al.*, 2002). Um ponto central para análise dos reforços à flexão com compósitos poliméricos e fibras é a identificação das possíveis maneiras de ruptura, ou dos possíveis modos de falha. Nesse sentido, segundo Bakis *et al.* (2002) pode ocorrer: (a) escoamento do aço seguido do rompimento do PRF; (b) escoamento do aço seguido pelo esmagamento do concreto, enquanto o PRF fica intacto; (c) esmagamento do

concreto; (d) descolamento da placa compósita em suas terminações longitudinais, devido ao surgimento de tensões cisalhantes em vigas sob flexão, fato também relacionado à falha no concreto por esforço cortante; (e) descolamento da placa de PRF longe das extremidades devido a rachaduras inclinadas no concreto por esforço cortante; (f) descolamento da placa de PRF em suas terminações longitudinais causada por falha no adesivo de interface entre o PRF e concreto; (g) descolamento da placa de PRF devido a irregularidades na superfície de colagem da placa ou por falha na execução do processo de colagem.

- Reforço ao Cisalhamento:

Assim como no processo à flexão, reforços cisalhantes também são executados na maior parte colando os PRF com adesivos estruturais, geralmente a base epóxi, com as fibras mais paralelas possíveis à direção principal das tensões de tração (BAKIS *et al.*, 2002). O reforço pode ser executado com envolvimento total ou parcial dos elementos, como mostrado na figura 8 a seguir:

Figura 8 - Reforço ao cisalhamento: (a) envolvimento total do pilar; (b) envolvimento parcial de vigas e (c) tiras com ancoragem.



Fonte: Bakis *et al.*, (2002).

A eficácia do reforço externo de PRF e sua contribuição para resistência ao cisalhamento nos elementos de concreto também depende da análise do modo de falha, que pode acontecer por descolamento da placa na interface entre PRF e concreto ou pela falha do material compósito, por motivos como concentração de tensões devido as solventes volatilizados e

presos na forma de bolhas e vazios internamente na matriz polimérica, levando a falhas prematuras (BAKIS *et al.*, 2002; SILVEIRA, 2016).

As fraturas vão depender de fatores importantes como: a qualidade da colagem da placa (o principal deles); se a peça foi envolvida da maneira correta para a situação em questão (envolvimento total ou parcial); do comprimento de ancoragem realizado; da rigidez axial do PRF; e também da resistência característica do concreto (BAKIS *et al.*, 2002).

- Reforço por confinamento:

O confinamento de uma peça é realizado pelo envolvimento do material compósito na peça estrutural (figura 9). Segundo Bakis *et al.* (2002) o confinamento de peças com necessidade de reforço estrutural em regiões sismicamente ativas no mundo provou ser uma das aplicações iniciais mais significativas dos materiais PRF, por garantirem maior resistência ao aumento repentino de cargas axiais verticais, além de contribuir para o aumento da ductilidade das peças confinadas. Uma observação interessante é o fato do confinamento ser mais eficiente em pilares com seções circulares se comparado com os pilares de seção retangular, pelo fato de haver concentrações de tensão nos cantos do pilares retangulares.

Figura 9 - Peça reforçada por confinamento e testes sísmicos.



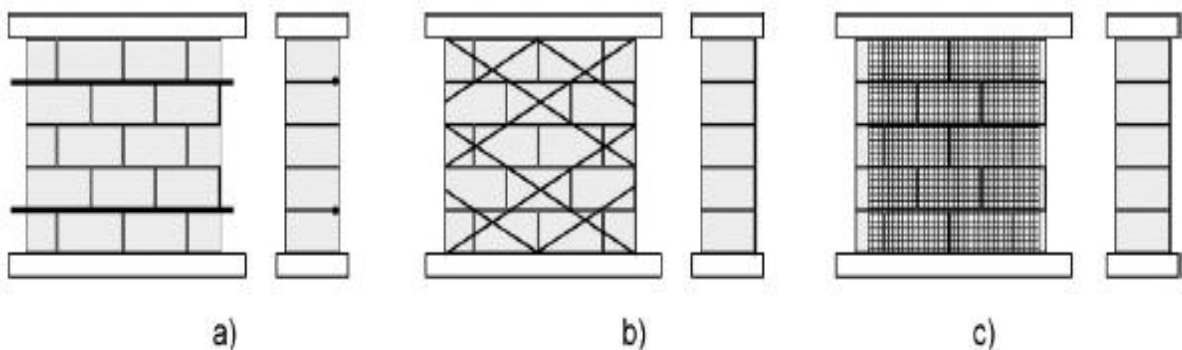
Fonte: Oliveira *et al.*, (2009).

- Reforço em alvenarias estruturais:

Assim como nos casos acima, também em alvenarias estruturais o método da colagem dos compósitos é utilizado, segundo Mohamad (2015). Tais reforços devem seguir um processo de preparação de superfície, que de forma resumida é composta por limpeza e regularização da superfície a receber o reforço e por fim a colagem do compósito.

Esse tipo de reforço pode ser executado aplicando filetes de laminados ou barras de PRF, que devem ser inseridos em entalhes realizados na alvenaria. Sendo que os entalhes também devem seguir um procedimento de execução. Segundo Mohamad (2015) o procedimento consiste na realização dos entalhes na alvenaria, utilizando máquinas de corte via seca; seguido da limpeza desses entalhes por meio de aplicação de jatos de ar, com a finalidade de garantir que não haja pó e nem umidade no local onde o reforço será inserido; limpeza das barras ou filetes de PRF para eliminação de poeiras e gorduras; aplicação da resina no compósito e nos entalhes; e por ultimo posicionamento dos reforços nos entalhes, tomando cuidado com possíveis formações de vazios. A figura 10 ilustra de forma mais clara a execução desse tipo de reforço:

Figura 10 - (a) barras ou filetes inseridos próximos à superfície; (b) laminados formando treliça e (c) colagem de tecido PRF.



Fonte: Adaptado de Stratford et al, 2004 apud Mohamad, 2015.

- Reforço em madeira e metal:

De acordo com Miotto (2009) o que é aplicado no âmbito de reforços em madeiras é a utilização de PRF fazendo parte das placas de Madeira Laminada Colada (MLC). O autor relata que a disponibilidade de madeiras de elevada qualidade vem diminuindo e juntamente a

isso os custos aumentando, isso impede a fabricação de placas de MLC de qualidade. Isso incentiva a utilização de PRF na execução da laminação das placas MLC.

Nesse sentido, Lindyberg (2001) explica que a madeira apresenta baixas resistências a tração, sendo que com a utilização dos PRF na laminação do MLC, há aumento de sua resistência na parte tracionada das vigas, principalmente devido ao fato dos compósitos PRF apresentarem elevadas resistências a tração. Além disso, outras qualidades são agregadas como:

1. Melhoria nas propriedades químicas das peças;
2. Possibilidade de uso de madeiras de qualidade inferior, reduzindo custos;
3. Aumento da ductilidade, garantindo um processo de ruptura mais seguro;
4. Os polímeros se adequam sem nenhum problema ao processo de fabricação dos MLC.

Nas estruturas metálicas essa idéia já é utilizada desde a década de 1980 no Japão e posteriormente na Suíça em 1991. Os compósitos eram ligados a estruturas metálicas, em reparos de pontes, parques de estacionamento, sendo até hoje utilizados em vigas, e colunas (VENTURA, 2009). Para o caso de estruturas metálicas, segundo o mesmo autor, a fibra de carbono vem sendo mais utilizada em combinação aos MLC para prevenção de futuras fraturas em pontes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 INTRODUÇÃO

Tendo como finalidade a avaliação do desempenho do compósito de PRF no reforço a esforços de flexão em vigas de concreto armado, foram preparadas doze vigas para avaliação. Sendo quatro dos corpos de prova (CDP) de concreto armado sem adição de PRF; outros quatro sendo apenas as placas de compósitos, PRF de fibra vidro/resina epóxi sem estarem anexadas como reforço às vigas de concreto armado e, por último, quatro CDP híbridos, sendo vigas de concreto armado reforçadas com o PRF e interface de adesão. As vigas de concreto armado sem reforço compósito foram enumeradas de 01 a 04; as placas de compósito de fibra de vidro/resina epóxi foram enumeradas de 05 a 08; e, por fim, as vigas híbridas foram enumeradas de 09 a 12.

Os corpos de prova 01 a 04 têm seção quadrada de 60 mm de altura x 60 mm de largura x 230 mm de comprimento; as placas de PRF isoladas de 05 a 08 têm seção transversal de 3 mm de altura x 60 mm de largura x 230 mm de comprimento; e por último as vigas de 09 a 12 têm dimensões de aproximadamente 65 mm de altura x 60 mm de largura x 230 mm de comprimento, sendo 65 mm de altura devido a adição dos 3 mm de PRF aderido à peça de concreto armado por meio de camada de adesivo estrutural com certa espessura que será detalhada mais a frente.

Nesse capítulo será feita a descrição dos materiais utilizados, dos processos de preparação do reforço das vigas e dos procedimentos de ensaios.

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Concreto

Para a confecção das vigas de concreto foi utilizado um traço em massa de acordo com o livro Manual de Traços de Concreto de Gildásio R. da Silva, sendo 1 : 2,23 : 2,99 : 0,56 o que quer dizer que para cada 1 kg de cimento foi utilizado 2,23 kg de agregado miúdo e 2,99 kg de agregado graúdo com um fator água cimento de 0,56. E, além disso, foi adicionado ao traço um aditivo plastificante com a finalidade de melhorar o adensamento do concreto e permitir melhor regularidade e menor rugosidade da face inferior da viga (local de aderência do reforço compósito). Esse traço foi estipulado para atingir 27,5 MPa após 28 dias do

processo de cura do concreto, sem a adição do aditivo plastificante. Com o uso do plastificante apesar do ganho na lisura da face inferior do concreto foi obtido um prejuízo na resistência à compressão axial dos corpos de prova, pelo fato de não ter havido diminuição na quantidade de água do traço. O plastificante tem como função reduzir parte da quantidade de água do traço, caso isso não seja feito a resistência final esperada é comprometida. O cimento utilizado foi o CP II-E-32. Segue abaixo na tabela 6 o traço por m³ de concreto.

Tabela 3 – Traço concreto por m³.

Composição por m³	
Cimento	350 kg
Areia	780,5 kg
Pedrisco	1046,5 kg
Água	196 litros
Plastificante	5,25 kg

Fonte: Autor.

Os agregados utilizados foram areia média, ou seja, areia de granulometria média com diâmetro máximo de 2,4 mm; pedrisco, ou também chamada de brita zero de dimensões entre 4,8 e 9,5 mm, material este utilizado por causa do tamanho do corpo de prova e do tamanho do cobrimento de proteção da armadura, para que o material pudesse penetrar em todos os espaços na forma e se obter um corpo de prova de melhor qualidade possível; água utilizada foi da rede de abastecimento da cidade dentro da Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho - campus Guaratinguetá; e o aditivo utilizado foi o *Vedacit Fazgrauth*, na proporção de 1,5 %m/m do cimento. Os materiais utilizados são mostrados na figura 11

Figura 11 - Materiais para concreto.



Fonte: Autor

Com esse traço foram moldadas as 8 vigas de concreto armado mais quatro corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. O concreto pronto utilizado nos corpos de prova está representado na figura 12.

Figura 12 - Concreto utilizado para a concretagem.



Fonte: Autor

3.2.2. Armadura em aço

O aço utilizado para a realização das armaduras das vigas de concreto foi aço CA-60 de 5mm de espessura, tanto na armadura longitudinal, como na armadura transversal. As vigas foram armadas longitudinalmente com uma única barra e armadas com estribos de um único ramo na transversal, devido a limitações nas dimensões das vigas. A figura 13 mostra as armaduras de aço utilizadas nos corpos de prova.

Figura 13 - Armaduras das vigas de aço CA-60.



Fonte: Autor

Como visto acima, os estribos foram soldados, com eletrodo revestido, às armaduras longitudinais, sendo assim estribos de um único ramo. Nesse sentido, atendendo a necessidade de integração da armadura transversal com a longitudinal, para uma boa realização da concretagem e correto posicionamento da armadura na viga armada final, a fim de sua função ser executada da melhor maneira possível.

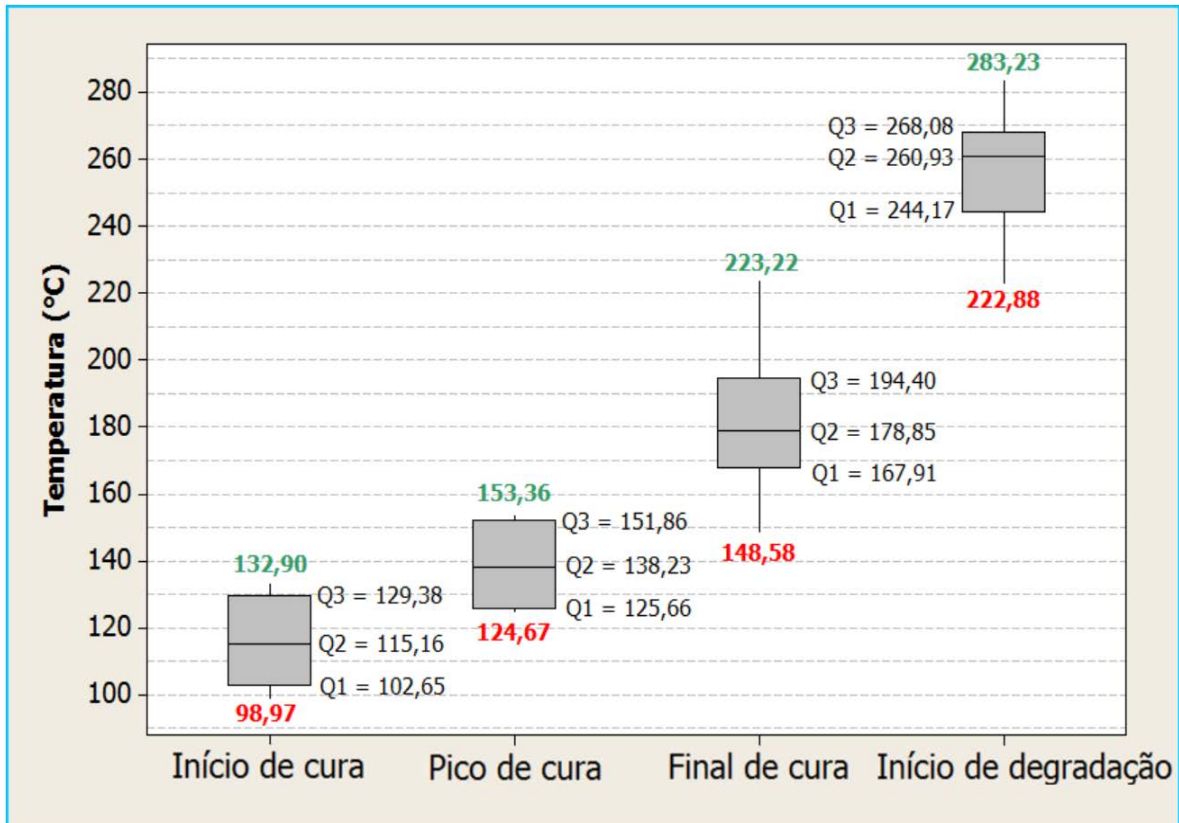
3.2.3 Produção do polímero reforçado com fibras de vidro

O material compósito polimérico com tecido de fibras de vidro foi fabricado por meio da laminação manual de pré-impregnados (prepreg) HexPly® F155 da Hexcel Company de fibras de vidro e resina epóxi. O tecido utilizado foi um *plain weave* 1x1, com designação Hexcel® 120-38"-F155, esquematicamente mostrado na Figura 5. Trata-se de um *prepreg*, material derivado da indústria aeroespacial no qual o tecido vem impregnado com resina epóxi co-curada, o que determina a necessidade de armazenar o material em baixas temperaturas. O resfriamento mantém o processo de cinética de cura com prosseguimento a velocidades reduzidas, conseqüentemente aumentando a longevidade do *prepreg* e garantindo que suas características se mantenham até o momento do processo de cura durante a moldagem por compressão a quente (SILVEIRA, 2016).

Silveira (2016) mostra um procedimento muito bem embasado para a determinação do ciclo de cura mais adequado no processo de moldagem por compressão a quente desse material em específico.

Ainda segundo Silveira (2016), o material pré-impregnado foi submetido a análises térmicas por calorimetria exploratória diferencial (DSC) e análises termogravimétricas (TGA). Em seu trabalho Silveira (2016) realizou 24 varreduras de DSC em modo dinâmico, conforme matriz de planejamento experimental com design 2^3 *full factorial*, permitindo a obtenção de 96 temperaturas, distribuídas ente os fenômenos de cura e degradação térmica do material. O gráfico boxplot da figura 14 mostra a variação máxima, mínima e avanço térmico durante as análises de DSC do material em questão.

Figura 14 - Temperaturas de cura e degradação do pré-impregnado.

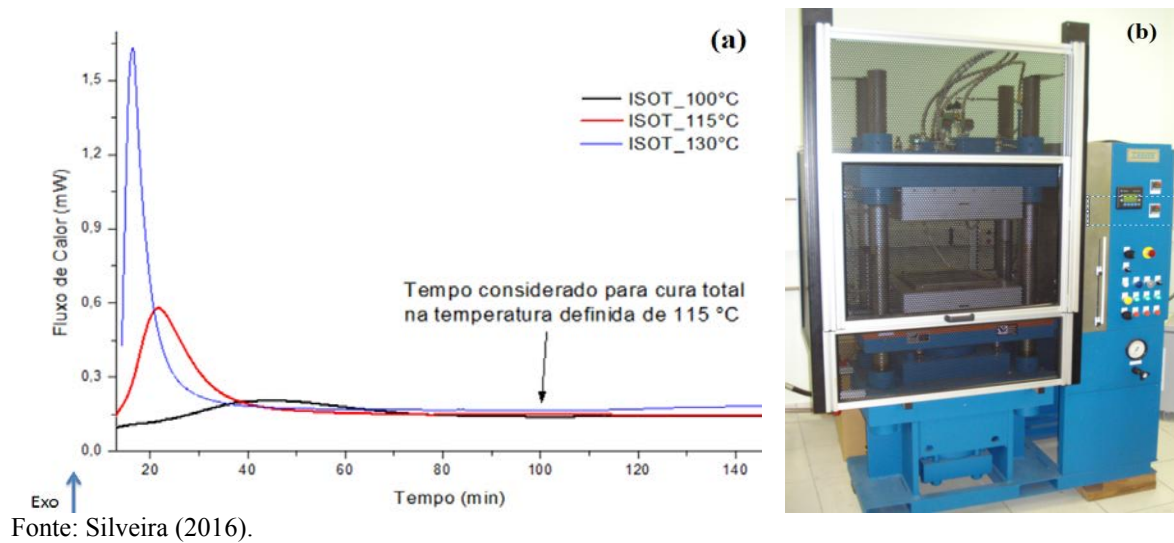


Fonte: Silveira (2016).

Com base nas varreduras de DSC em modo dinâmico, o material foi submetido por Silveira (2016) a avaliações DSC em modo isotérmico, para determinação do tempo de cura necessário durante a isoterma no ciclo da moldagem por compressão a quente.

Com base no exposto acima o ciclo de cura do material pré-impregnado foi definido, também por Silveira (2016). O ciclo consiste em rampa de aquecimento a uma taxa de 7,6 °C/min até a temperatura máxima de 115 °C, com um patamar de permanência de 100 minutos na última temperatura. A Figura 15a apresenta as curvas de DSC em modo isotérmico. A Figura 15b apresenta a prensa de moldagem por compressão a quente utilizada para produção dos compósitos poliméricos reforçados, CDPs 05 a 08.

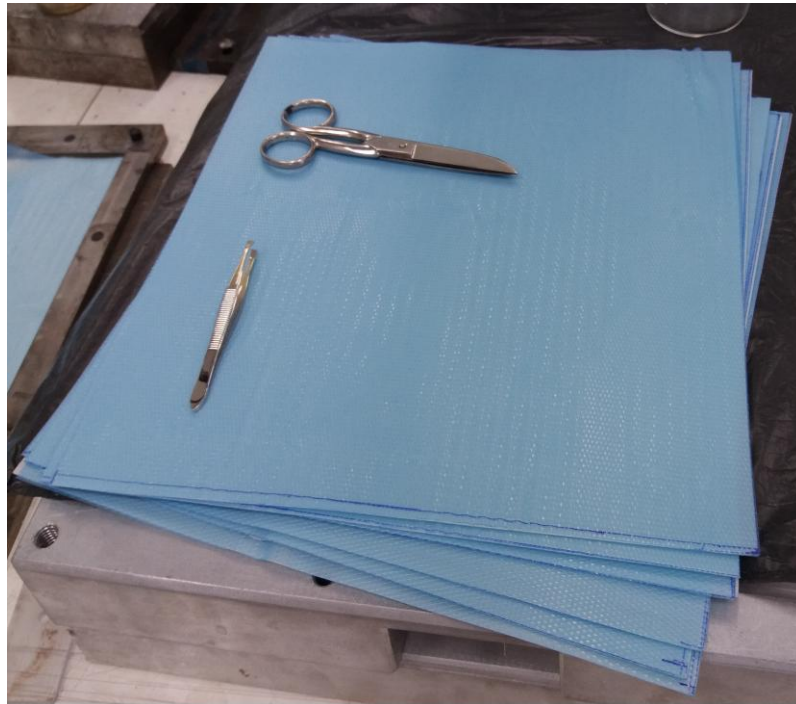
Figura 15 - (a) Curvas DSC isotérmico e tempo de cura do pré-impregnado; (b) prensa CARVER de moldagem por compressão a quente.



O material pré-impregnado foi cortado em camadas com dimensões de 30 cm x 30 cm, conforme medidas do molde disponível no Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT) da Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho” – Campus Guaratinguetá. Mesmo local onde se encontra disponível a prensa CARVER utilizada no processo de moldagem por compressão a quente.

Após a realização dos cortes das camadas de *prepreg*, respeitando a mesma orientação do tecido de fibras de vidro no corte de cada camada, foram laminadas manualmente 15 camadas de *prepreg* para cada prensagem. A laminação manual também foi realizada respeitando o alinhamento de fibras dentro do molde, para máxima resistência do compósito final. A laminação foi feita em molde com superfície preparada por meio de limpeza com solvente propanona (acetona) e aplicação de desmoldante *Polidesmo 55*. O desmoldante foi aplicado em todas as faces do molde que entrariam em contato com o material pré-impregnado, para facilitar a retirada do compósito final, sem causar danos ao mesmo. A Figura 16 apresenta as lâminas de material pré-impregnado cortadas.

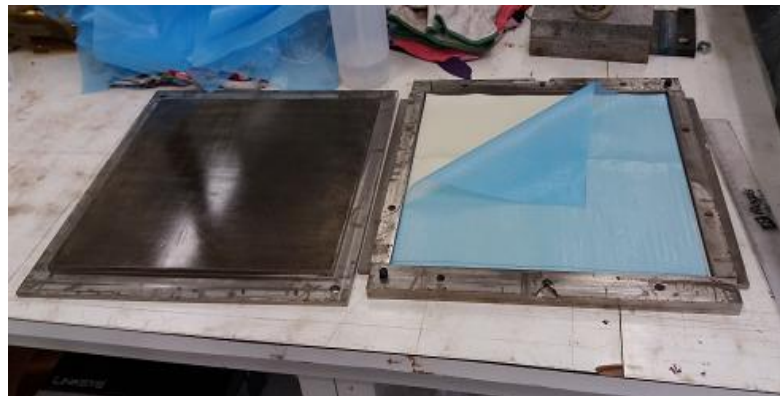
Figura 16 – Lâminas de pré-impregnado cortadas com 30 cm x 30 cm e com proteção polimérica azul.



Fonte: Autor

O material *prepreg* em questão é fornecido com película azul protetora para evitar a sua contaminação durante o manuseio, gerando regiões de pouco adesão e depreciando a resistência mecânica, sendo que também foram utilizadas luvas látex para manuseio do material. A Figura 17 apresenta as duas partes integrantes do molde, a esquerda detalhe da superfície preparada com desmoldante e a direita o material pré-impregnado laminado dentro da cavidade do molde.

Figura 17 – Prepreg no molde e retirada da película protetora.



Fonte: Autor.

Na sequência o molde foi fechado e colocado dentro da prensa CARVER para o ciclo de cura descrito acima, com pressão aplicada de 0,64 MPa, também conforme Silveira (2016). A Figura 18 apresenta a placa compósita de 30 cm x 30 cm produzida nesse estudo, sendo a espessura final igual a 3 mm.

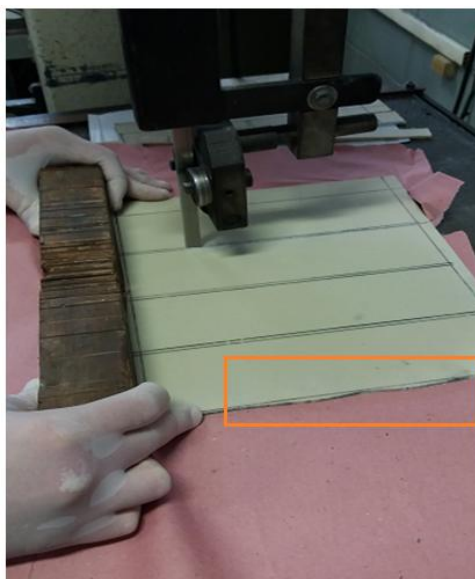
Figura 18 – Compósito de tecido de fibra de vidro e resina epóxi.



Fonte: Autor.

Para a produção das vigas de PRF, utilizadas nos CDPs 05 a 12, a placa compósita da Figura 18 foi marcada e passou por processo de corte utilizando uma serra de fita, presente no DMT da UNESP, campus de Guaratinguetá. O processo de corte pode ser visualizado na Figura 19.

Figura 19 – Processo de corte em serra de fita.



Fonte: Autor.

Como pode ser observada no detalhe da Figura 19 a serra de fita origina cortes com ondulações e irregularidades, o que gera pontos concentradores de tensão. Para reduzir tais imperfeições e evitar a depreciação do desempenho estrutural, as placas passaram por processo de fresamento (figura 20) a seco em fresa DMU 50 ECO, também disponível no DMT/UNESP.

Figura 20 – Processo de fresamento na fresa DMU 50.



Fonte: Autor.

3.2.4 Inspeção do material compósito por ultrassom

O equipamento utilizado para inspeção por ultrassom é produzido pela MATEC Instruments (figura 21), modelo PSS-600, disponível no Laboratório de Fadiga II do DMT da UNESP, campus Guaratinguetá. A inspeção por ultrassom foi realizada no modo pulso-eco pelos métodos A-Scan e C-scan, com água como meio de propagação das ondas mecânicas e transdutor de frequência de 2,25 MHz.

Figura 21 - Equipamento utilizado para inspeção por ultrassom do compósito polimérico.



Fonte: Autor.

3.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA CONCRETADOS

Para a fabricação das vigas de concreto armado, sendo essas os CDPs de 01 a 04 e também utilizadas nos CDPs de 09 a 12 (vigas híbridas), foram preparadas formas de madeira compensada. Nas formas foram inseridas as armaduras e para segurar as armaduras na posição correta no momento da concretagem foram utilizados *tieraps*, presilhas plásticas popularmente chamadas de “enforca gato”. A Figura 22 apresenta a preparação das formas e a Figura 23 apresenta as formas após a concretagem.

Figura 22- Formas para concretagem.



Fonte: Autor.

Figura 23 – Formas após concretagem.



Fonte: Autor.

Junto com as vigas foram feitos 4 corpos de prova cilíndricos com dimensão 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, para testes de compressão e determinação da resistência característica do concreto (f_{ck}). Após três dias nas formas os CDPs foram, incluindo os cilíndricos, desformados e deixados em processo de cura em tanque com água durante 23 dias em temperatura ambiente.

3.3.1 Preparação da interface adesiva entre concreto e PRF

A preparação da interface adesiva entre viga de concreto armado e PRF é um ponto crítico para que a viga híbrida final apresente as características estruturais desejadas, deve-se sempre buscar ótima aderência entre o compósito e o substrato concreto.

O procedimento de preparação e execução da interface foi realizado com base em Araújo (2002), com algumas adequações e inovações, a seguir são expostas as etapas executadas para a preparação da interface desse trabalho:

- Lixamento da superfície de concreto na qual o reforço compósito será colado, seguido de limpeza com escova e jato de ar para remoção de material pulverulento. Tal procedimento tem como objetivo a regularização da superfície que irá receber os materiais necessários para a construção da superfície adesiva e o PRF. Lembrando que o concreto sofreu adição de plastificante para melhor acabamento da superfície da viga de concreto armado.

- Aplicação de *primer* (*Viapol Carbon Primer*), um produto que penetra, por capilaridade, nos interstícios do concreto e melhora a capacidade adesiva da face que irá receber o adesivo estrutural (figura 24).

Figura 24 - Vigas com *Viapol Carbon Primer*.



Fonte: Autor.

- Aplicação de uma camada de 1,5 a 2,5 mm do adesivo estrutural *Sikadur 31*. A aplicação do *Sikadur* deve ser realizada quando o *primer*, previamente aplicado, apresenta textura adesiva (*tack*), o que ocorre por volta de 2 horas após aplicação em temperatura ambiente. É importante salientar que o adesivo estrutural é de alta viscosidade (tixotrópico) e com material base similar ao PRF, ambos base epóxi. A figura 25 mostra as vigas com o adesivo *Sikadur 31* aplicado

Figura 25 - Vigas com adesivo estrutural *Sikadur 31*.



Fonte: Autor.

- Colocação da placa compósita de reforço sobre o adesivo aplicado anteriormente, mantendo certa pressão para uma colagem o mais homogênea possível, buscando manter a mesma espessura de adesivo estrutural ao longo da viga.

Figura 26 - Vigas com compósito já colado.



Fonte: Autor.

As vigas híbridas mostradas na figura 26 preparadas conforme procedimentos acima foram mantidas em processo de cura, em temperatura ambiente, durante 5 dias e na sequência foram submetidas aos ensaios de flexão.

3.4 DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS DE CONCRETO ARMADO

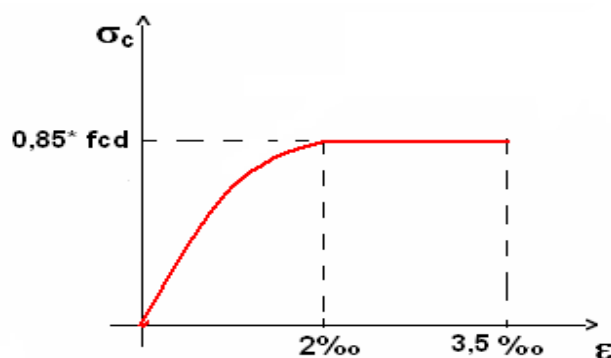
O dimensionamento das vigas de concreto armado desse trabalho foi baseado nas notas de aula da matéria Estruturas 1, lecionada pelo Professor Dr. Antonio Wanderley Terni.

Para o dimensionamento toma-se como hipótese uma viga de seção retangular, sujeita a um momento fletor de cálculo (M_d), com o objetivo de determinar a seção de aço que irá combater as tensões de tração originárias do momento fletor.

O procedimento é baseado em algumas considerações normativas da NBR 6118 – 2014:

- O concreto utilizado possui um diagrama tensão x deformação de cálculo mostrado na figura 27:

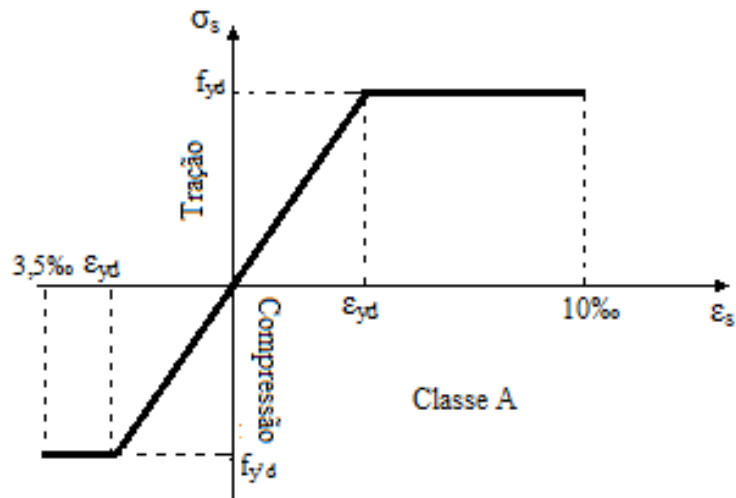
Figura 27 - Gráfico tensão x deformação concreto.



Fonte: Autor.

- O aço utilizado na armadura de flexão possui um diagrama tensão x deformação de cálculo mostrado na figura 28:

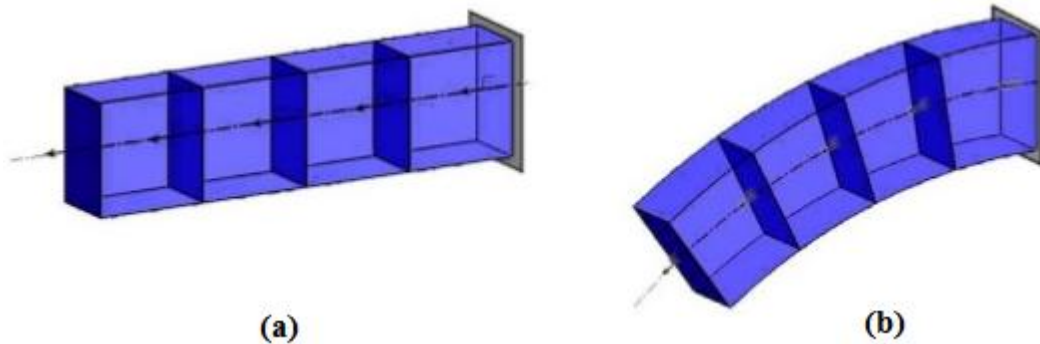
Figura 28 - Diagrama tensão x deformação aço classe A.



Fonte: Autor.

- A resistência à tração do concreto é desprezada;
- Assume-se a hipótese de *Navier Bernoulli* na qual a seção plana antes da deformação permanece plana após a deformação. A figura 29 ilustra de maneira clara essa situação.

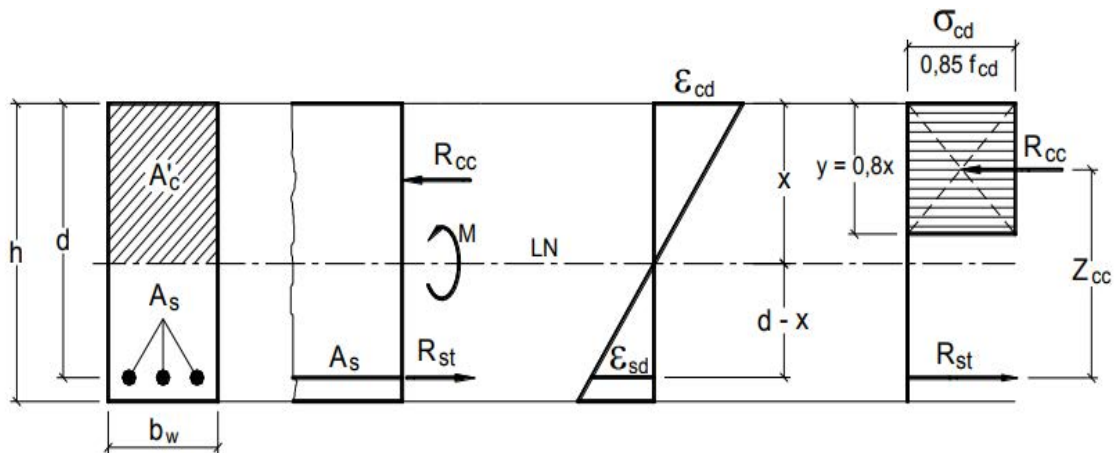
Figura 29 - (a) seção plana antes da deformação; (b) seção plana após deformação.



Fonte: Gyufrida

- E ainda, a norma brasileira permite que seja utilizado o diagrama de tensões retangular simplificado, ao invés do diagrama real parábola-retângulo (figura 30). Como consequência o diagrama de deformações ao longo da seção é linear.

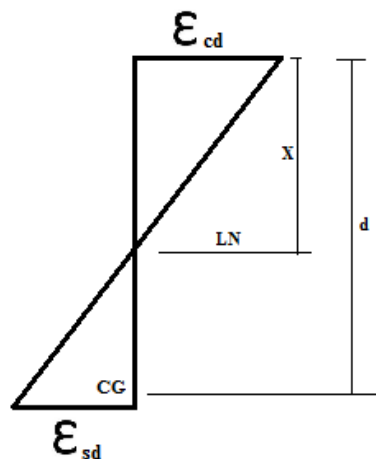
Figura 30 – Diagrama retangular simplificado de tensões de compressão no concreto (σ_{cd}) e diagrama linear de deformações ao longo da seção transversal.



Fonte: Notas de aula de Estruturas de Concreto I - Prof. Dr. Paulo Sérgio dos Santos Bastos.

Então, define-se o coeficiente Kx como a relação $Kx = x / d$, sendo „ x “ a distância da fibra do concreto mais comprimida da seção até a linha neutra e „ d “ a chamada altura útil, que consiste na distância da fibra do concreto mais comprimida ao centro de gravidade da armadura (figura 31), ponto no qual se considera a atuação da resultante de tração de cálculo da armadura.

Figura 31 - Diagrama de deformações ao longo da altura de uma viga.



Fonte: Autor.

Por semelhança de triângulos podemos fazer a seguinte relação $\epsilon_{cd} / \epsilon_{sd} = x / (d-x)$, e utilizando a definição de $Kx = x / d$, são feitas algumas manipulações matemáticas e chegamos à relação final para Kx :

$$Kx = \frac{1}{\left(1 + \frac{\varepsilon_{sd}}{\varepsilon_{cd}}\right)} \quad (1)$$

Sendo ε_{cd} a deformação do concreto e ε_{sd} a do aço.

Dependendo então das deformações no concreto e no aço, as seções podem ser classificadas em: normalmente armadas, sub-armadas e super-armadas, cada qual apresentando valor de Kx_{limite} característico.

- Normalmente armadas: o aço está no início do escoamento e o concreto atingiu a deformação de cálculo limite, ou seja, $\varepsilon_{cd} = 3,5\%$.

$$Kx_{Limite} = \frac{1}{\left(1 + \frac{\varepsilon_{yd}}{\varepsilon_{cd}}\right)} \quad (2)$$

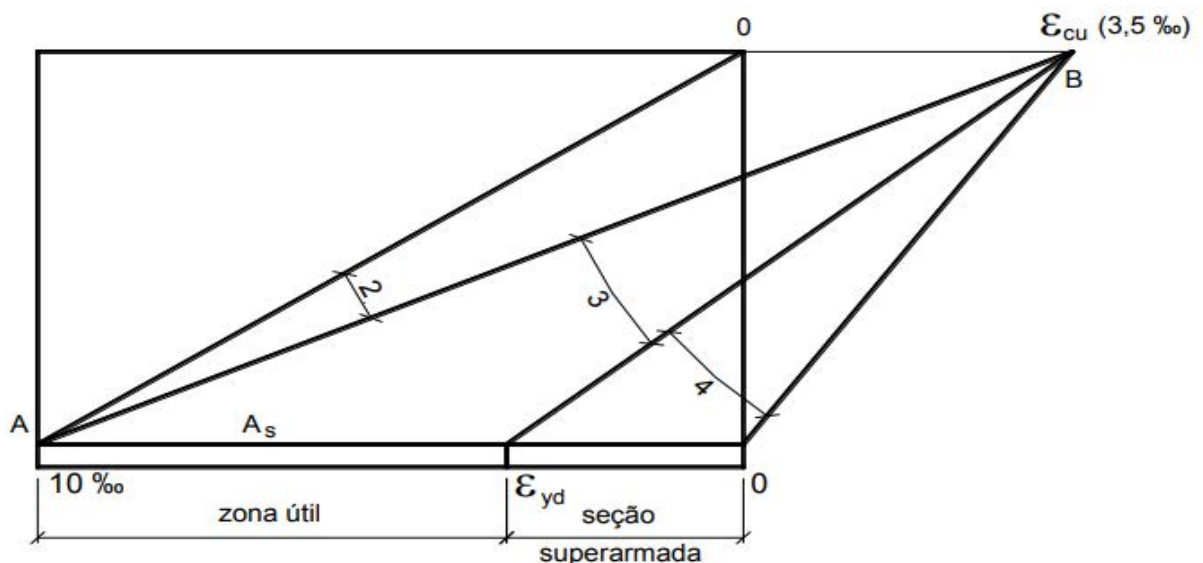
Com $\varepsilon_{yd} = 2,07\%$ para aço CA-50 e $2,48\%$ para aço CA-60.

Para CA-50 temos $Kx_{limite} = 0,63$.

Para CA-60 temos $Kx_{limite} = 0,59$.

- Sub-armadas: São aquelas nas quais o aço já escoou. Dentro da classificação de sub-armada, temos os domínios 2 e 3, que são vistos a figura 32:

Figura 32 - Diagrama de deformações dos domínios 2, 3 e 4.



Fonte: Notas de aula de Estruturas de Concreto I - Prof. Dr. Paulo Sérgio dos Santos Bastos.

Domínio 2 é caracterizado para quando $\varepsilon_{sd} = 10\%$ e $0 < \varepsilon_{cd} \leq 3,5\%$.

Domínio 3 é caracterizado para quando $\varepsilon_{yd} < \varepsilon_{sd} < 10\%$ e $\varepsilon_{cd} = 3,5\%$.

Pode-se identificar o Kx_{limite} que separa os domínios 2 e 3, com valor de $\varepsilon_{sd} = 10\%$ e o valor de $\varepsilon_{cd} = 3,5\%$, obtendo assim um:

$$Kx_{limite\ 2-3} = 0,26.$$

- Super-armadas: São aquelas nas quais o concreto atingiu a deformação máxima de 3,5‰ e o aço ainda não escoou.

O domínio 4 também é mostrado no diagrama anterior, e é caracterizado quando $\varepsilon_{sd} < \varepsilon_{yd}$ e $\varepsilon_{cd} = 3,5\%$, portanto nesse caso o aço não atingiu nem sua tensão inicial de escoamento, enquanto o concreto se encontra no seu estado comprimido mais crítico permitido pela norma.

Para CA-50 temos $Kx_{limite} > 0,63$.

Para CA-60 temos $Kx_{limite} > 0,59$.

O dimensionamento foi baseado nos coeficientes “K”, estudados e demonstrados em sala de aula pelo Professor Dr. Antônio Wanderley Terni, na matéria Estruturas I, do curso de Engenharia Civil, na Faculdade Estadual Julio de Mesquita Filho – Campus Guaratinguetá.

Esse método, utiliza dos coeficientes K_c , K_x e K_s , para ao final disso determinar a seção de aço (A_s) necessária para suportar os momentos fletores submetidos nas peças de concreto.

Nesse caso o processo realizado foi o inverso. A armadura foi estipulada anteriormente, e utilizando de uma planilha realizada no Excel, realizou-se um função chamada “Atingir Meta” para fazer o processo inverso, e assim determinar qual era o momento fletor resistido pelos corpos de prova de concreto armado, com a armadura pré determinada.

Baseado na teoria descrita acima se determina os coeficientes K_c , K_x e K_s , com respectivas fórmulas apresentados abaixo:

$$Kc = \frac{M}{Bw * d^2 * fy cd} \quad (3)$$

$$Kx = 1,25 * \sqrt{1,5625 - 3,6765 * Kc} \quad (4)$$

$$Ks = \frac{1}{(1 - 0,4 * Kx)} \quad (5)$$

3.5 DIMENSIONAMENTO DO COMPÓSITO POLIMÉRICO ESTRUTURAL.

O estudo analítico das vigas de concreto reforçado com compósito de fibra de vidro foi baseado no equacionamento do Manual de Fibra de Carbono da Viapol, o qual se baseia nas considerações normativas da ACI 440.2R-02 e ACI 318-99.

Para o dimensionamento do PRF à flexão a literatura citada acima se baseia nas dimensões da seção transversal, na quantidade de aço presente e nas propriedades mecânicas características dos materiais. Além disso:

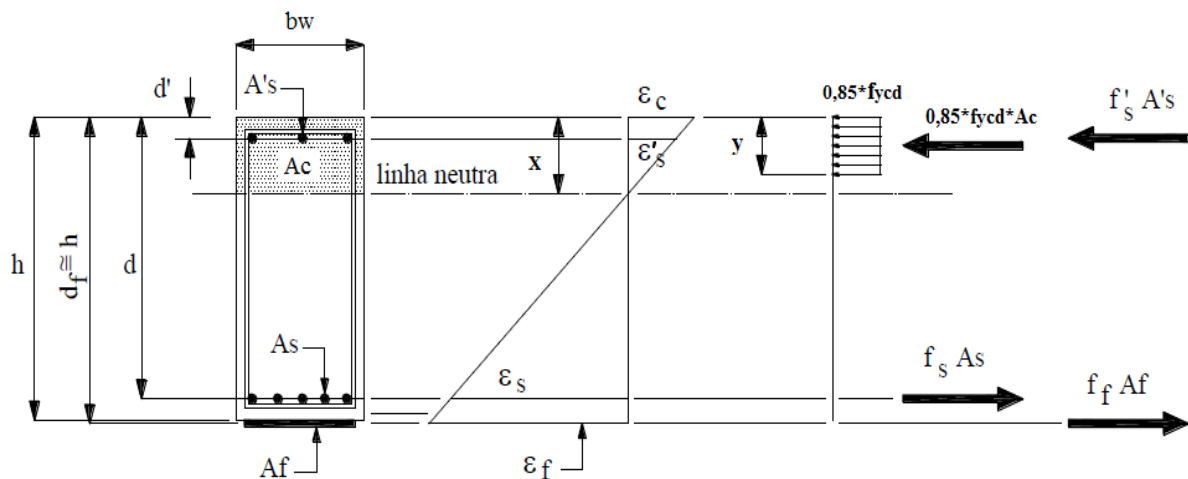
- Tanto a hipótese de *Navier Bernoulli*, quanto o desprezo da resistência à tração do concreto citadas no item 3.4, são bases também para o dimensionamento;
- A aderência do substrato concreto com o sistema compósito de reforço é considerada como perfeita;
- As deformações são lineares até o instante da ruptura do sistema PRF.

O processo para o dimensionamento na sua essência é iterativo, tendo a seguinte sequência de passos para a resolução, conforme Machado (2002) apud Pivatto (2014):

- Estipula-se certa profundidade até a linha neutra, baseado no modo de ruptura;
- Determinam-se as deformações dos materiais constituintes de toda a peça reforçada, conforme indicadas na Figura 33;
- Com as deformações, as tensões podem ser calculadas, através da Equação 6;

- A partir das tensões as forças atuantes em cada material da peça são obtidas por meio da Equação 7, e através do equilíbrio de esforços calcula-se o momento fletor resistente da viga;
- Caso o momento fletor resistente seja maior ou igual ao momento fletor solicitado na peça o processo de cálculo se encerra, diferente disso retorna-se para o primeiro passo e estipula-se uma nova profundidade da linha neutra, até que a condição acima seja satisfeita;
- Com o valor do momento fletor resistente obtido, determina-se a força do reforço e sua área necessária.

Figura 33 - Deformações e forças resultantes nos elementos de uma viga.



Fonte: Adaptado Manual de Fibra de Carbono da Viapol.

Assim como no dimensionamento do item 3.4 as deformações no concreto, fibra e armadura podem ser obtidas da mesma maneira (figura 33). As tensões são calculadas a partir das deformações e dos módulos de elasticidade de cada um dos materiais:

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (6)$$

A força resultante em cada elemento pode ser calculada conforme Equação 6.

$$F = \sigma * A \quad (7)$$

Antes de proceder ao cálculo efetivamente do momento, deve-se verificar se as forças de tração na parte inferior da seção transversal da viga estão em equilíbrio com as forças de compressão na parte superior da seção transversal da viga, para que exista o binário de forças que gere o momento na peça. Como descrito nesse próprio item, caso esse binário não tenha sido gerado, varia-se a profundidade da linha neutra, até que a condição acima, binário de forças, seja atingida.

Então, com cada uma das forças calculadas temos a configuração mostrada na figura 33 e por equilíbrio das forças calcula-se o momento resistente da viga reforçada, conforme Equação 8. Para essa equação o equilíbrio foi aplicado no ponto onde a força resultante de compressão está aplicada, que é em metade do valor de y .

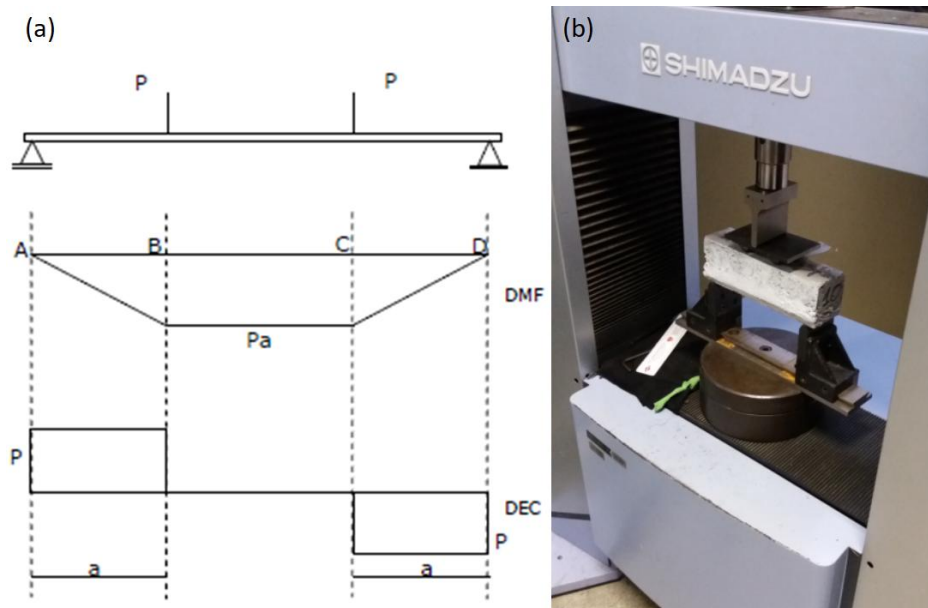
$$Md = A_s \cdot \sigma_s \left(d - \frac{y}{2} \right) + A_f \cdot \sigma_f \left(df - \frac{y}{2} \right) \quad (8)$$

A parcela referente à armadura negativa (armadura superior da viga referente à A's) não é uma parcela da equação de momento acima, pois a viga em estudo não apresenta esse tipo de armadura.

3.6 MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA ENSAIOS DE FLEXÃO

A montagem do ensaio foi baseada na NBR 12.142, que consiste numa viga retangular biapoiada com duas cargas concentradas e simétricas aos apoios conforme o esquema apresentado na Figura 34a. Na mesma figura são apresentados os respectivos diagramas de momento fletor (DMF) e esforço cortante (DEC). A Figura 34b apresenta a máquina de ensaios universal utilizada nesse trabalho, marca Shimadzu, modelo AG-X, disponível no Laboratório de Ensaio Mecânicos do DMT da UNESP, campus Guaratinguetá. Os ensaios foram realizados com célula de carga de 50 kN e o ponto de parada dos ensaios foi a ruptura das vigas, imediatamente acusada pelo *software* agregado à Shimadzu. As velocidades de ensaios foram 0,5 mm/min para os corpos de prova de concreto (01 a 04) e vigas híbridas de concreto e PRF (09 a 12), e velocidade de ensaio de 5 mm/min para os corpos de prova de PRF (05 a 08).

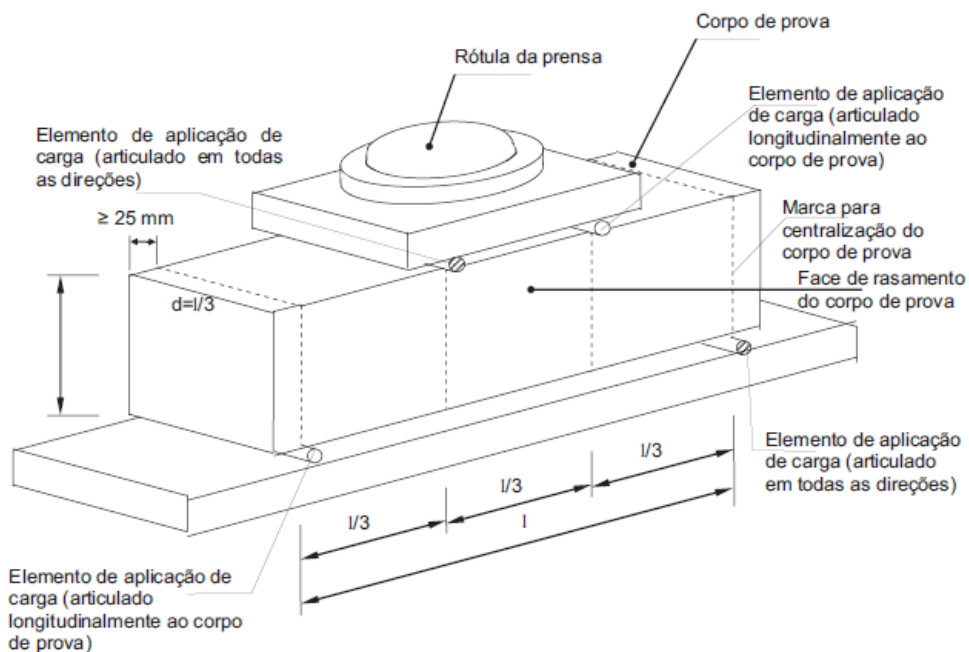
Figura 34 – (a) montagem experimental e diagramas DMF e DEC; (b) máquina universal de ensaios.



Fonte: (a) Rocha (2004); (b) Autor.

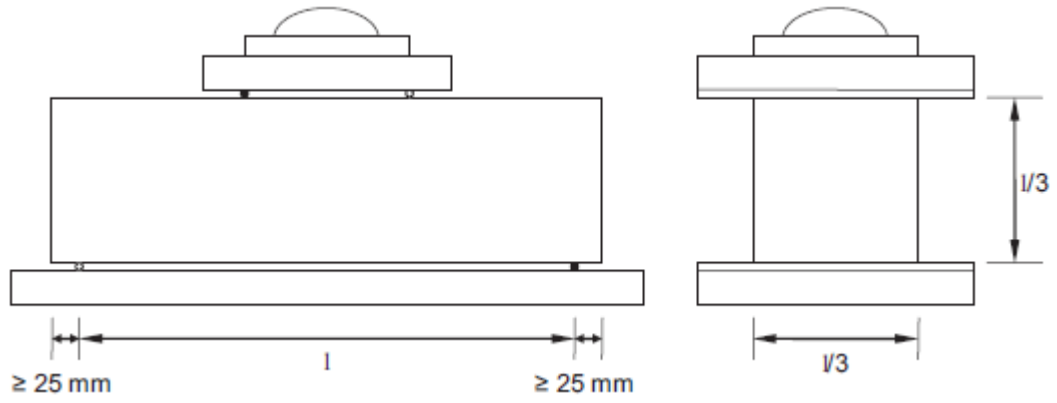
As Figuras 35 e 36 mostram, com base na NBR 12.142, de forma mais detalhada a montagem experimental e respectivas dimensões e posicionamentos. Sendo a distância entre vãos durante o ensaio de 18 cm ($l = 18$ cm).

Figura 35 - Vista em perspectiva.



Fonte: NBR 12142.

Figura 36 - Vista frontal e lateral.



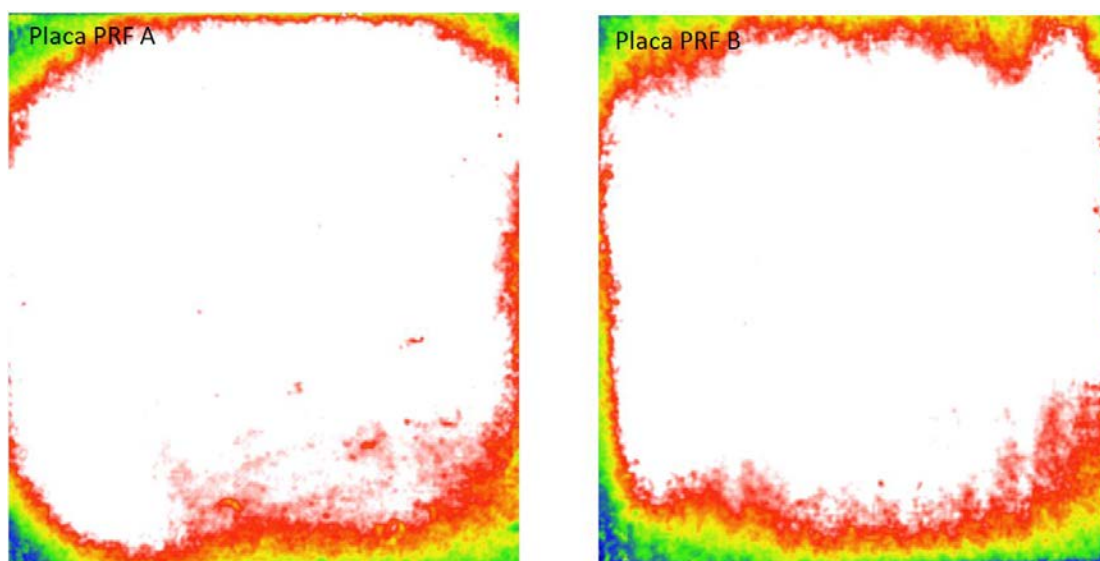
Fonte: NBR 12142.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 COMPÓSITO POLIMÉRICO REFORÇADO COM FIBRAS

Após aplicação do ciclo de cura, as placas de 30 cm x 30 cm de material compósito de fibras de vidro e resina epóxi passaram por inspeção via ultrassom. A Figura 37 apresenta os resultados das inspeções por ultrassom das placas de PRF produzidas nesse trabalho. A partir do ultrassom, quanto mais clara a imagem maior o retorno das ondas mecânicas, sendo assim as regiões de coloração branca representam material polimérico reforçado com fibras com compactação de 100%. Os mesmos resultados indicam homogeneidade e baixa presença de defeitos nas placas. Entretanto, também a partir da Figura 37, verifica-se que as bordas apresentam coloração mais escura, indicando menor compactação nos extremos das placas de PRF, o que reduz o desempenho estrutural.

Figura 37 - Ultrassom dos PRF.

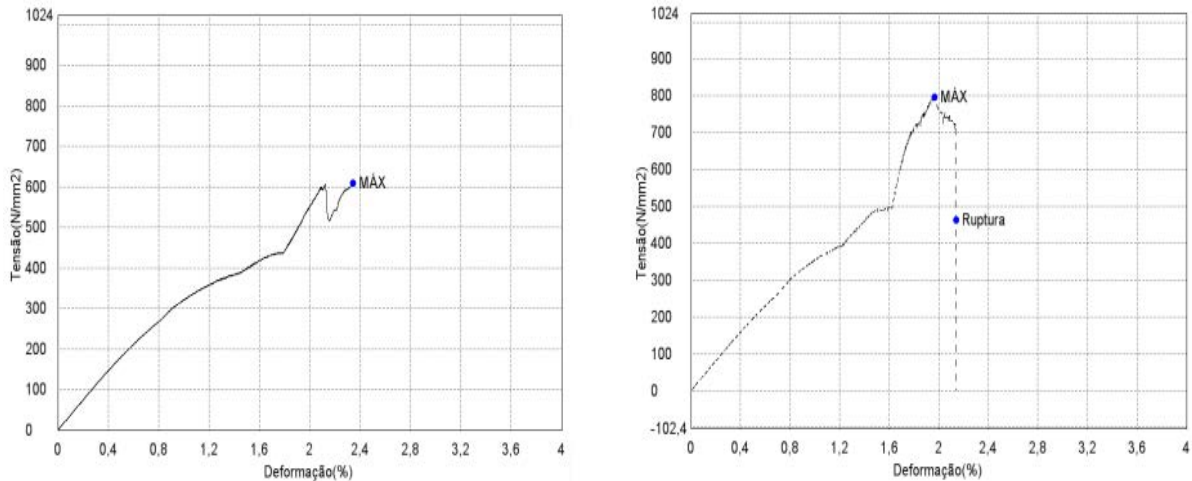


Fonte: Autor

A partir das duas placas de PRF representadas acima via ultrassom (veja também a Figura 18), foram produzidos 08 CDPs de PRF, conforme corte e fresamento apresentados nas Figuras 19 e 20 e dimensões apresentadas no item 3.1 desse trabalho. Para melhor desempenho estrutural foram removidos por meio de corte 2,5 cm de cada uma das arestas das duas placas de compósito de fibra de vidro/resina epóxi, mantendo apenas regiões de maior consolidação do material compósito (brancas).

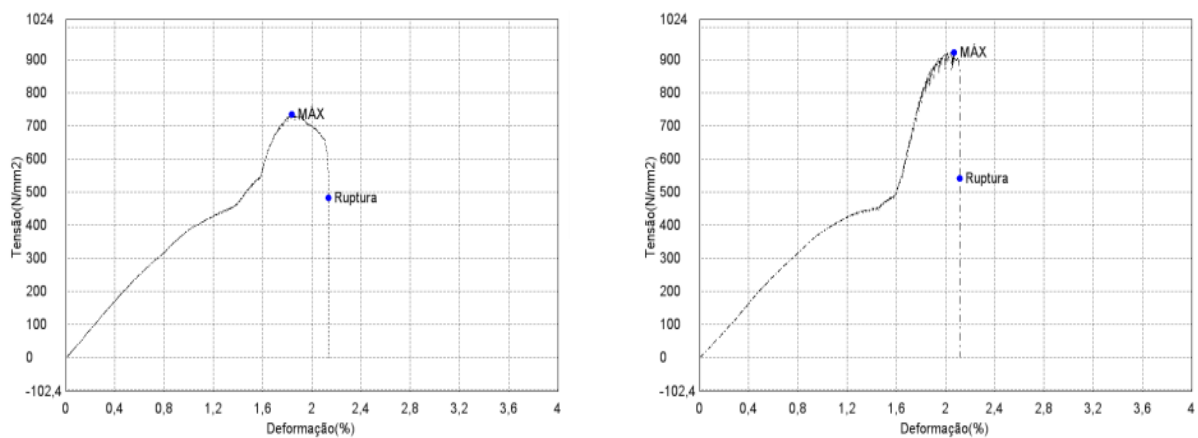
As Figuras 38 e 39 apresentam os diagramas de tensão em função da deformação para as vigas de PRF isolados, correspondentes aos CDPs 05 a 08.

Figura 38 - Diagrama tensão deformação CDP 05 e 06, respectivamente.



Fonte: Autor.

Figura 39 - Diagrama tensão x deformação CDP 07 e 08, respectivamente.



Fonte: Autor.

Uma análise rápida mostra que os valores de tensão x deformação dos gráficos acima são próximos aos apresentados para fibras de vidro na Figura 4. Dos gráficos as vigas de PRF 06 e 08 apresentam, para uma deformação de 2%, respectivamente, 800 N/mm² e 900 N/mm² de tensão máxima. Todos os diagramas acima mostram um caráter próximo ao dúctil para os materiais compósitos de PRF, com um regime elástico indo até aproximadamente 1,6% de deformação específica, e após isso apresentando um regime plástico. É possível perceber leves estabilizações nas tensões e posteriores aumentos das mesmas. Esses ganhos podem ser explicados por uma diminuição da área da seção transversal resistente do compósito a maneira

com que cada lamina se deforma, até o instante em que o laminado rompe de maneira geral. Com uma diminuição da área resistente, o aumento na tensão é imediato.

4.2 - CONCRETO ARMADO SEM PRF

Os resultados obtidos para os corpos de prova de concreto armado sem reforço de PRF, CDPs 01 a 04, a partir dos equacionamentos mostrados no item 3.4 e 3.5 são apresentados na Tabela 3, incluindo o valor de M_d obtido ao final, já com a armadura estipulada (Diâmetro da armadura 0,5 cm). A partir dela algumas conclusões e parâmetros importantes foram definidos e serão discutidos mais a frente.

Tabela 4 - Parâmetros obtidos e adicionados no dimensionamento.

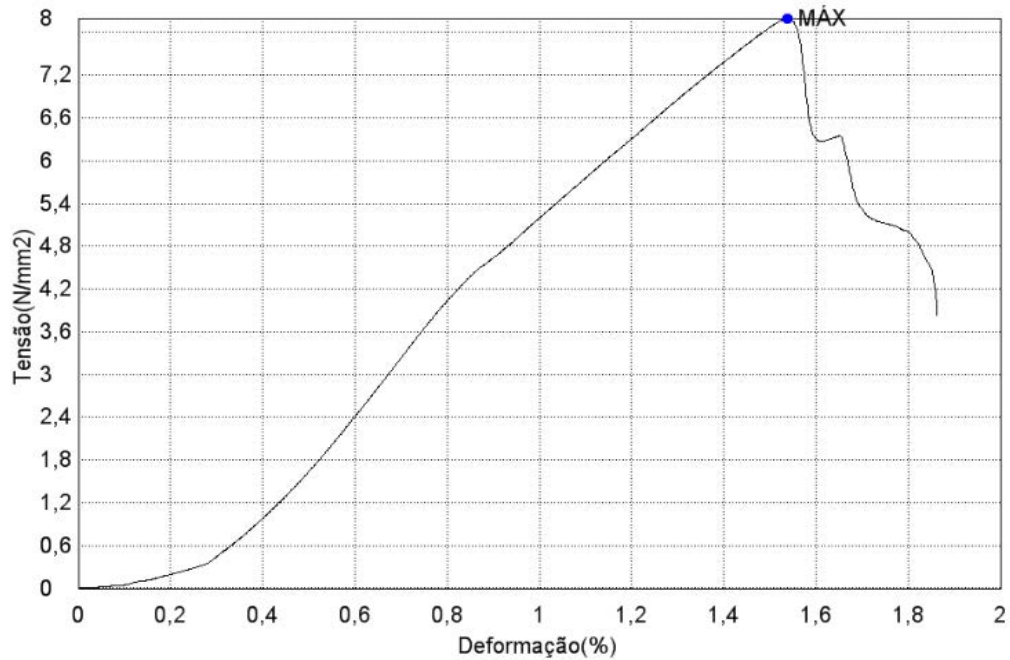
PARÂMETROS DIMENSIONAMENTO	
M_d	41,73 kN.cm
B_w	6 cm
h	6 cm
d	4,9 cm
f_{ck}	1,8 kN/cm ²
f_{cd}	1,214 kN/cm ²
f_{yd}	52,17 kN/cm ²
k_c	0,239
k_x	0,422
k_s	1,203
A_{sl}	0,196 cm ²
Dim	0,500 cm

Fonte: Autor

Foi fixado o último item da tabela 3, pois para a armadura longitudinal foi utilizada uma única barra de 0,5 cm de aço CA-60, como é possível ver na figura do item 3.2.2. O valor M_d igual a 41,73 kN.cm é o momento fletor de cálculo que a viga teoricamente suporta.

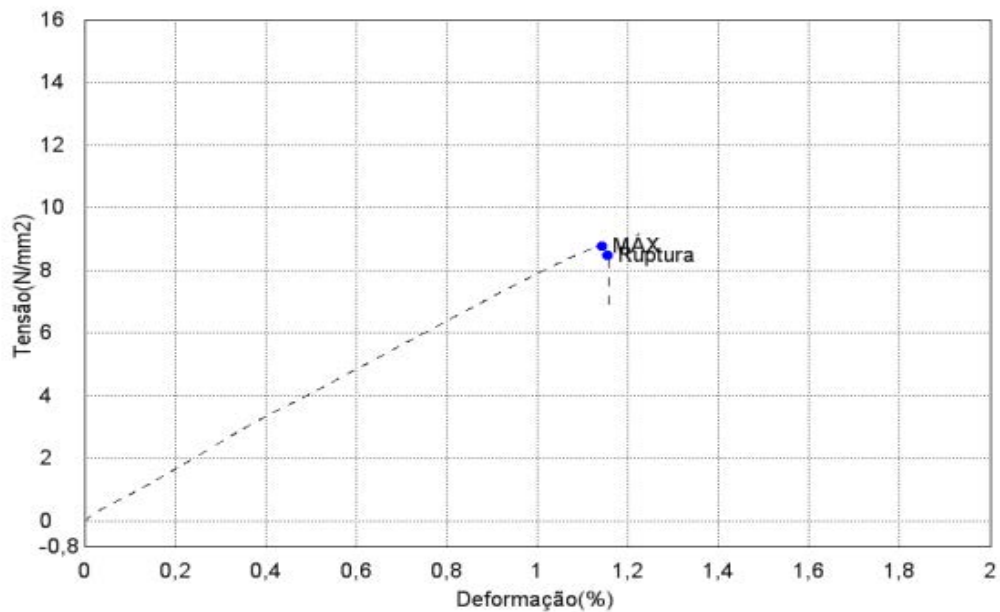
Todos os 12 corpos de prova preparados foram ensaiados segundo o item 3.6. Para cada corpo de prova foi gerado um gráfico tensão $[\text{N}/\text{mm}^2]$ x deformação $[\%]$ e registrada a carga máxima no instante da ruptura. Os gráficos para os corpos de prova de 01 a 04 são mostrados nas figuras 40 a 43.

Figura 40 - Diagrama tensão x deformação (CDP01).



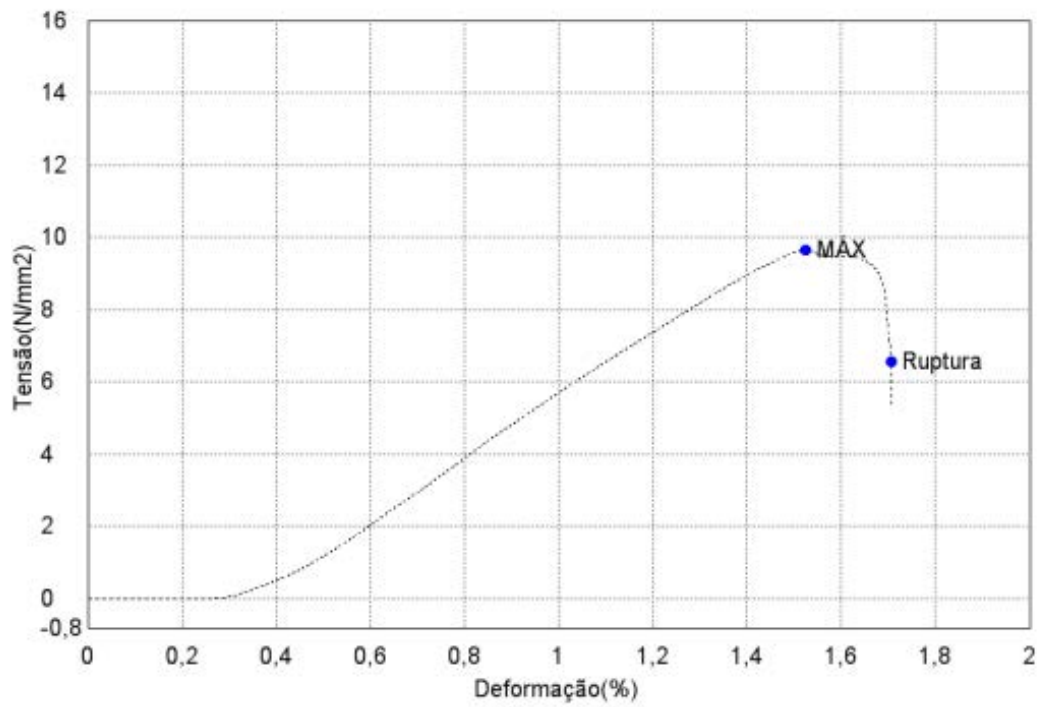
Fonte: Autor

Figura 41 - Diagrama tensão x deformação (CDP02).



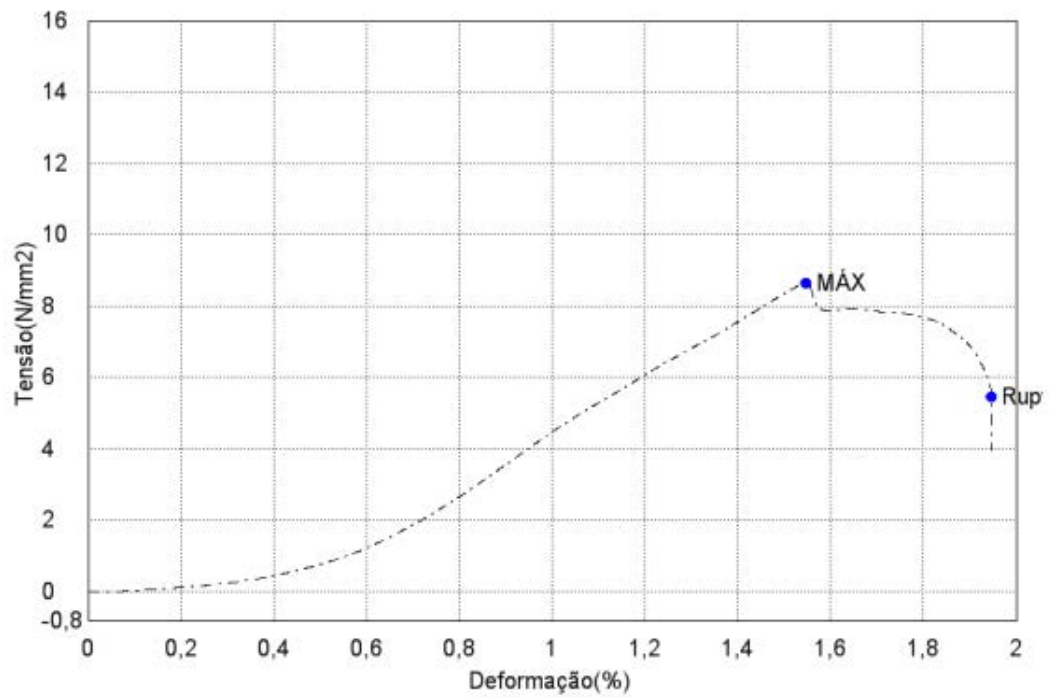
Fonte: Autor

Figura 42 - Diagrama tensão x deformação (CDP03).



Fonte: Autor.

Figura 43 - Diagrama tensão x deformação (CDP04).



Fonte: Autor.

Os gráficos acima fornecem a tensão máxima real suportada pelas vigas de concreto armado sem reforço de PRF. É possível aferir os resultados obtidos com valores calculados conforme recomendações da NBR 12.142, a qual estabelece uma equação para obtenção da resistência à tração da peça na flexão, dada abaixo:

$$F_{ct} = \frac{F * l}{b * d^2} \quad (9)$$

Sendo,

F_{ct} = Resistência à tração na flexão [N/mm²];

F = carga máxima no instante da ruptura [N];

l = dimensão entre os vãos do apoio [mm];

b = largura média da base do corpo de prova [mm];

d = altura média do corpo de prova [mm].

A Tabela 4 reúne os valores da carga máxima „F” na ruptura, com os valores de tensão máxima obtidos a partir dos diagramas tensão x deformação e as resistências à tração na flexão (sendo isso um sinônimo para tensão máxima) obtidas pela equação 9.

Tabela 5 - Tensões máxima de cálculo e de ensaio vigas sem reforço.

Cálculo Tensão de Tração na Flexão				
CDP	Carga na Ruptura (N)	Resistência à tração na flexão [N/mm ²] pelo cálculo NBR	Tensão Máxima [N/mm ²] pelo Gráfico do ensaio de flexão	Diferença percentual entre as tensões (%)
1	8854,23	7,38	7,99	7,63
2	9705,85	8,09	8,76	7,65
3	10683,70	8,90	9,64	7,68
4	9585,14	7,99	8,65	7,63

Fonte: Autor

Analisando os resultados acima é possível perceber que as tensões de cálculo conforme NBR se aproximam das tensões obtidas experimentalmente, tendo uma variação percentual entre tensões (calculada x registrada durante os ensaios) de aproximadamente 7,6%. Nesse sentido mostrando que a norma NBR 12.142 é mais conservadora em relação ao que se obtém na prática, porém ao mesmo tempo são resultados confiáveis como comprovados acima.

Ainda, pode-se avaliar se os resultados de carga na ruptura estão próximos ao esperado com base no dimensionamento de vigas de concreto armado apresentado no item 3.4 e diagramas de momento fletor e esforço cortante expostos na Figura 34. O momento fletor máximo resistido pela peça, teoricamente, foi de 41,73 kN.cm (vide Tabela 7) e pelo diagrama de momento fletor esse mesmo valor é obtido através do produto entre a carga P e a distância entre essa carga e o apoio mais próximo a ela, que foi de um terço da distância l entre os apoios (também baseado na NBR 12.142). Sendo assim:

$$Md = \frac{P * l}{3} \quad (10)$$

Conseqüentemente a carga P é:

$$P = \frac{Md * 3}{l} \quad (11)$$

Sendo $Md = 41,73$ kN.cm, é preciso transformar esse valor para Mk , que será o valor do momento resistente que de fato a peça resiste, uma vez que Md é o momento calculado conforme norma, sendo esse majorado. A relação entre ambos é:

$$Mk = \frac{Md}{1,4} \quad (12)$$

Utilizando a equação 11, obtém-se $Mk = 29,81$ kN.cm. Sendo a distância entre vãos durante o ensaio igual a 18 cm ($l = 18$ cm), obtém-se o valor da carga P igual a 4,97 kN. Como essa carga P é metade da carga presente na célula de carga (vide Figuras 34, 35 e 36), o valor esperado para a carga durante o ensaio é de duas vezes o valor 4,97 kN, resultando em 9,94 kN. A Tabela 4 mostra todos os valores da carga de ruptura registrada pela máquina de ensaio. É possível perceber que todos os quatro valores estão bastante próximos ao esperado, o que comprova a eficiência do método de dimensionamento e um comportamento muito próximo ao esperado.

Pela análise dos diagramas tensão x deformação para as vigas de concreto armado sem PRF, CDPs de 01 a 04, percebe-se comportamento elástico no início dos ensaios. Especificamente para os CDPs 03 e 04 (Figuras 42 e 43, respectivamente) percebe-se um possível patamar de escoamento do aço presente na armadura, após a região elástica, visualização essa mais clara na curva do CDP 04. A Figura 44 mostra as rupturas presentes nos CDP 01 a 04 após realização dos ensaios.

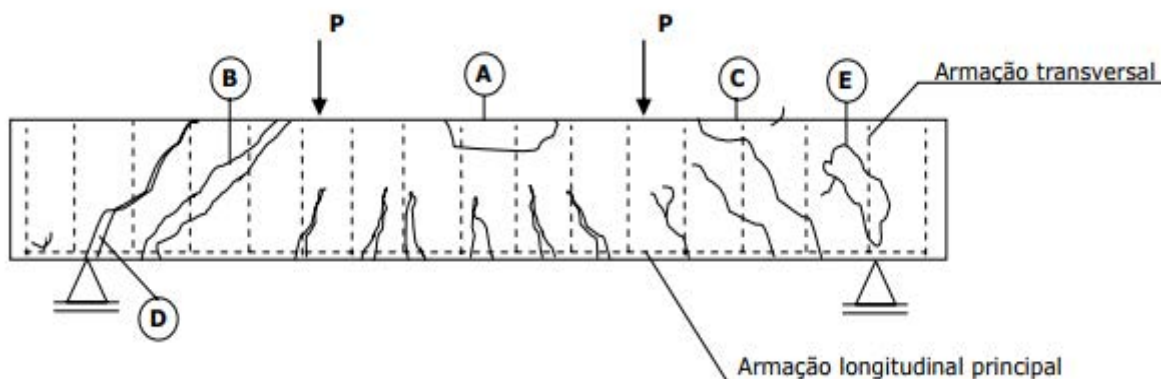
Figura 44 - Ruptura CDP 01 a 04.



Fonte: Autor

Quanto ao modo como as vigas romperam, percebe-se que todas as 4 vigas acima têm fissuração iniciando da região inferior da viga, próxima ao local onde foram apoiadas ou até mesmo bem em cima do ponto de apoio, com propagação da trinca até a parte superior da viga. Os modos de ruptura são estudados por Rocha et al. (2004) e são apresentados na Figura 45 na sequência.

Figura 45 - Modos de ruptura no ensaio de flexão em 4 pontos.



Fonte: Rocha A. C., et al, (2004) apud Süsssekind, (1895)

Especificamente no presente trabalho as rupturas são do tipo B e D. Rocha et al. (2004) mostra que a região B é caracterizada por ruptura devido a falta de armadura transversal suficiente para resistir às tensões de cisalhamento na peça. Por outro lado, a região D é caracterizada por falta de ancoragem suficiente, sendo que nesse caso a peça rompe bruscamente por um deslizamento da armadura longitudinal.

4.3 CONCRETO ARMADO REFORÇADO COM PRF

O estudo analítico desses corpos de prova foi baseado no equacionamento mostrado no item 3.5. Como o método de dimensionamento é iterativo, o cálculo utiliza uma planilha eletrônica para facilitar o processo. Ao final do dimensionamento obtêm-se a área de reforço necessária para que a peça reforçada resista ao momento desejado. Nesse estudo, a área de reforço foi fixada em $1,80 \text{ cm}^2$, com base nas dimensões de $0,3 \text{ cm}$ de altura x $6,0 \text{ cm}$ de largura da viga de PRF. Com isso faz-se o processo inverso, determina-se o momento fletor que a peça deve resistir com a adição dessa área pré-estipulada de PRF.

Utilizando as informações da peça reforçada com o PRF o momento fletor de cálculo (M_d) é de $73,8 \text{ kN.cm}$. Como feito para as peças sem reforço polimérico, é necessário dividir esse valor de M_d por $1,4$ para obter-se o momento resistente real, por meio da equação 12 é possível obter o valor de $M_k = 52,71 \text{ kN.cm}$. A partir disso determina-se a carga esperada na célula de carga através da equação 11, sendo a distância entre vãos durante os ensaios de 18 cm , obtêm-se carga P de $8,79 \text{ kN}$. Como esse valor é metade do fornecido pela célula de carga, uma vez que os ensaios foram realizados em 4 pontos, tem-se que a força esperada na célula de carga é de $17,57 \text{ kN}$. A Tabela 5 apresenta os valores registrados para as cargas máximas na célula de carga durante os ensaios das vigas híbridas de concreto armado e

reforçadas com PRF. É possível observar que o CDP 09 apresenta valor registrado durante ensaio bastante próximo do valor calculado logo acima. Ainda da Tabela 5, para os CDPs 10 a 12 os valores aplicados durante ensaio foram superiores ao calculado, o que mostra que o método de dimensionamento para as vigas híbridas é mais conservador e presa pela segurança.

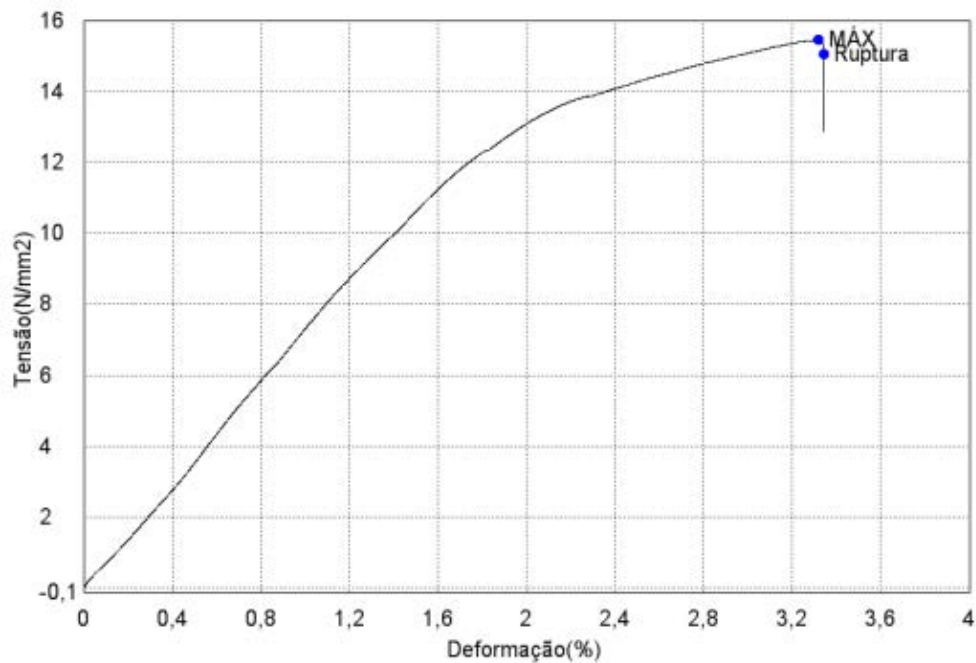
Tabela 6 - Tensões máxima de cálculo e de ensaio vigas com reforço

Cálculo Tensão de Tração na Flexão				
CDP	Carga na Ruptura (N)	Resistência à tração na flexão [N/mm²] pelo cálculo NBR	Tensão Máxima [N/mm²] pelo Gráfico do ensaio de flexão	Diferença percentual entre as tensões (%)
09	17111,70	13,65	15,45	11,65
10	23424,40	18,69	21,15	11,63
11	20606,90	16,44	18,60	11,62
12	22971,80	18,33	20,74	11,62

Fonte: Autor

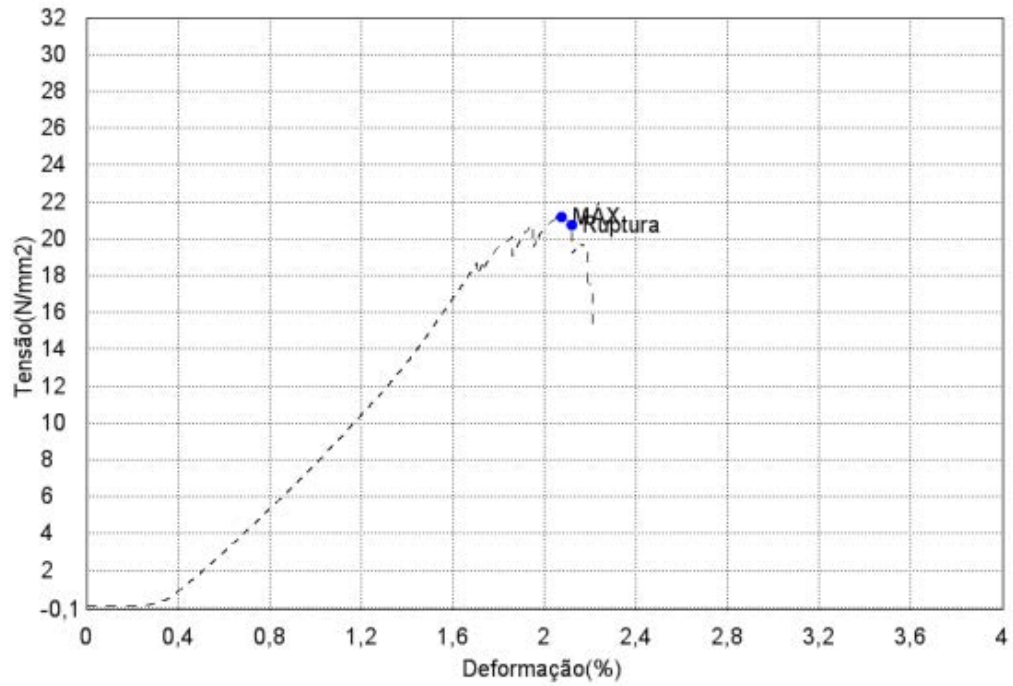
Os diagramas de tensão x deformação dos corpos de prova de 09 a 12, vigas híbridas, são apresentados nas Figuras 46 a 49.

Figura 46 - Diagrama tensão x deformação (CDP09).



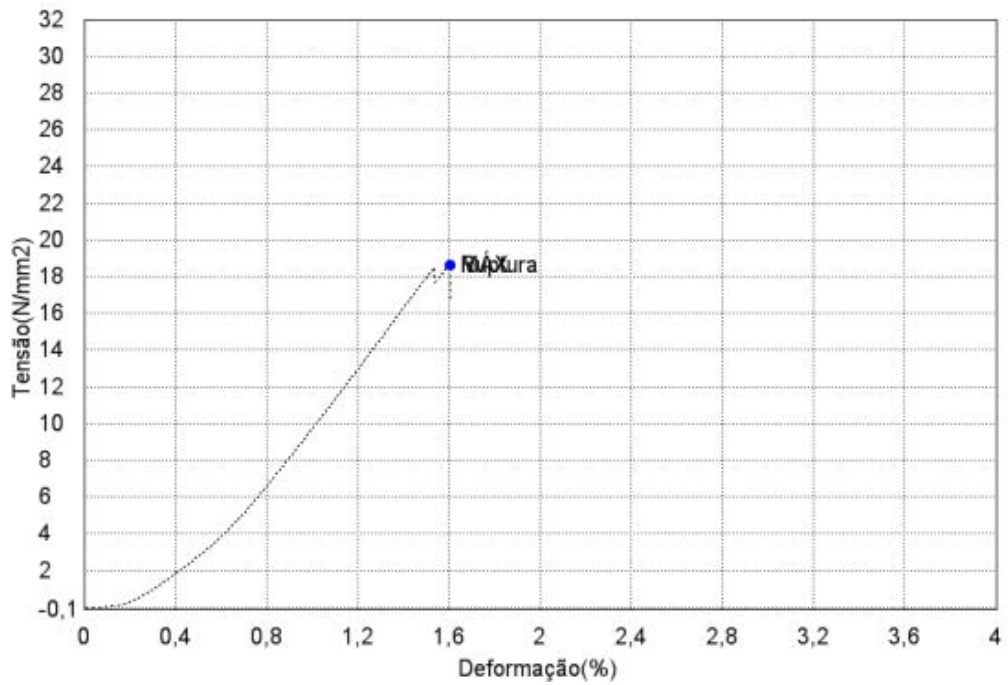
Fonte: Autor.

Figura 47 - Diagrama tensão x deformação (CDP10).



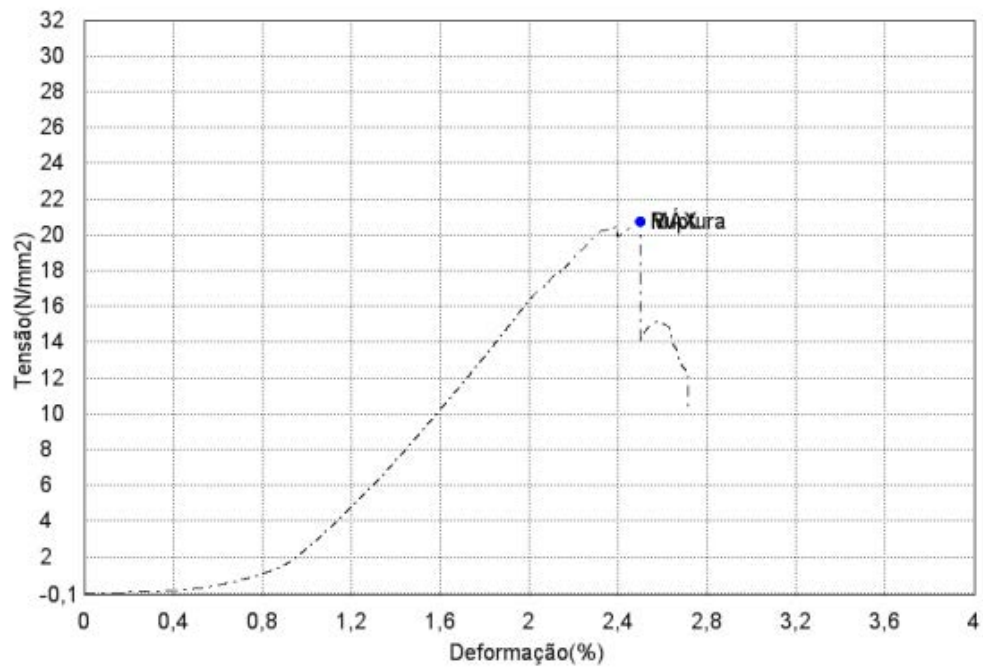
Fonte: Autor.

Figura 48 - Diagrama tensão x deformação (CDP11).



Fonte: Autor.

Figura 49 - Diagrama tensão x deformação (CDP12).

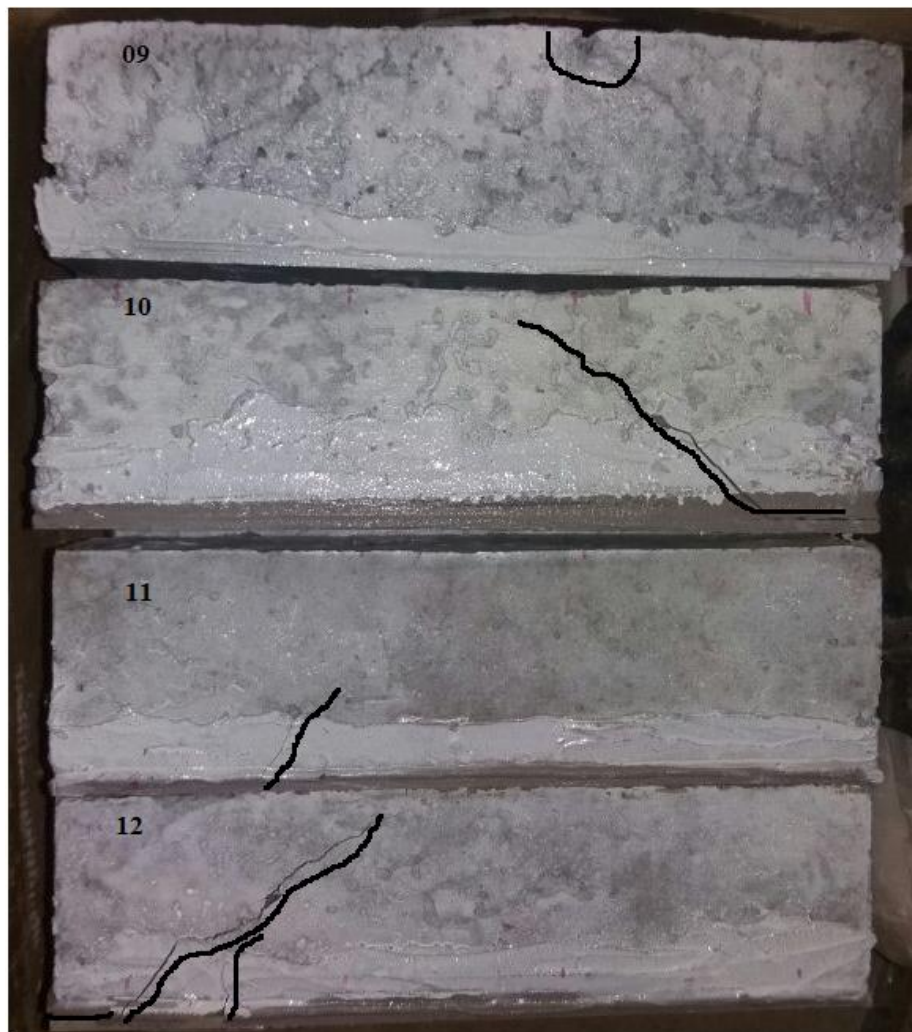


Fonte: Autor .

Assim como com as vigas sem reforço de PRF os resultados foram bem satisfatórios e próximos ao esperado pela análise quantitativa feita conforme norma NBR. Os valores da tensão pelo gráfico foram sempre maiores que o estimado pela norma, com uma variação percentual de aproximadamente 11,6%. Isso continua mostrando um caráter mais conservador da norma para com os valores reais. O aumento da variação percentual para 11,6% está relacionado à inclusão do material compósito à viga de concreto.

A verificação da carga máxima exigida pela peça na célula de carga também pode ser comparada com aquela obtida pelo diagrama de momento fletor, a qual é baseada no momento resistente calculado pela planilha eletrônica, cujo valor é de 73,8 kN.cm. Com o valor de $M_d = 73,8$ kN.cm e a distância entre os apoios de 18 cm tem-se, nesse caso, carga P igual a 12,3 kN, o que resulta valor aplicado pela célula de carga de 24,6 kN. Esse valor calculado se aproximou bastante dos valores reais obtidos durante ensaios para os CDPs 10 e 12. A Figura 50 mostra os CDPs 09 a 12 após a ruptura.

Figura 50 - CDPs 09 a 12 rompidos.



Fonte: Autor

As rupturas dos corpos de prova 10 e 12 são bem visíveis e podem ser classificadas também como rupturas por insuficiência da armadura transversal ou por deslizamento da armadura longitudinal. Porém ao unir essa informação com as do item 2.4.3 desse trabalho é possível concluir que houve um descolamento do PRF devido a falhas por tensões cisalhantes no concreto submetido à flexão.

O corpo de prova número 9 não mostra de maneira clara fissuras, mostra somente uma pequena falha na parte superior da viga, o que indica ruptura por compressão do concreto. E o corpo de prova 11 mostra uma leve fissura mais próxima a região central da peça, caracterizando a ruptura na região A (Figura 45). Rocha et al. (2004) explica que falhas na região A, com fissura na região inferior e próximo ao centro da peça, indicam um escoamento inicial da armadura longitudinal e uma posterior ruptura da peça por compressão do concreto.

A tensão máxima obtida graficamente (referente aos ensaios) pode ser comparada com a tensão calculada pela NBR 12.142. Isso é feito na Tabela 10.

Tabela 7 - médias das cargas de ruptura e variação percentual

CDP	Carga na Ruptura (N)	Média aritmética dos elementos sem reforço	Variação percentual entre as médias (%)
1	8854,23		
2	9705,85	9707,2	
3	10683,70	Sem PRF	
4	9585,14		
<hr/>			53,84
9	17111,70		
10	23424,40	21028,7	
11	20606,90	Com PRF	
12	22971,80		

Fonte: Autor

A Tabela 6 mostra novamente os valores de carga na ruptura para os corpos de prova de concreto armado sem reforço e com reforço de PRF, agora com as médias aritméticas e a variação percentual entre essas médias. É notável o acréscimo na capacidade de carga das vigas reforçadas com sistema de PRF, a inclusão do compósito polimérico de fibras de vidro/resina epóxi aumenta em 53,8% a resistência a flexão das vigas.

Um quesito interessante a ressaltar é que com a inserção do reforço dois dos quatro corpos de prova apresentaram diferença no modo de ruptura se comparado àqueles sem reforço de PRF. Por exemplo, o CDP 11 visualmente apresentou certo escoamento inicial do aço, para depois sofrer a ruptura, se mostrando estar no domínio 2 do dimensionamento mostrado no item 3.4 (Figura 32), no qual o aço já atingiu sua tensão de escoamento e o concreto ainda não chegou à sua deformação máxima de 0,35%. O CDP 09, visualmente não apresentou fissuras, o que indica o colapso de prontidão no concreto, caracterizando o domínio 4 (viga super armada), ou seja o concreto está na sua deformação máxima de 3,5% e o aço não atingiu sua tensão de escoamento. Isso indica um nítido incremento da capacidade das vigas em suportar as tensões de flexão com a adição do reforço de PRF.

Contudo, os CDP 10 e 12 apresentaram a mesma ruptura daqueles sem a aplicação do reforço. Ou seja, as rupturas aconteceram com valores na célula de carga maiores que nos sistemas sem reforços, porém continuaram a romper por cisalhamento, o que pode indicar também que esse sistema de reforço para flexão incrementa a capacidade da viga em suportar

os esforços cisalhantes que nela surgem, fato observado e que não era essencialmente esperado, confirmando a eficiência do sistema de reforço por compósitos de fibra de vidro/resina epóxi curados em moldagem por compressão a quente conforme ciclo definido.

5 CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi abordado o tema reforço estrutural de vigas de concreto armado com material compósito polimérico e fibras de vidro. Foram avaliados os casos que levam ao surgimento e propagação de patologias em elementos estruturais, além de diversos métodos de recuperação e reforço. Sendo que recuperação limita-se a devolver as características originais da estrutura e reforço permite o fornecimento de capacidades de cargas mais elevadas àquelas originalmente estipuladas.

O estudo mostrou uma grande integração entre conceitos da engenharia de materiais e da engenharia civil, podendo nitidamente ser percebido o quanto uma área têm a agregar à outra. Os conceitos de compósitos estruturais poliméricos reforçados com fibra (sejam elas de aramida, carbono ou vidro) unidos às teorias de concreto armado possibilitam novos estudos e pesquisas, atualmente já fornecendo soluções com resultados satisfatórios.

Os resultados obtidos mostram incrementos nas capacidades de carga das estruturas de concreto armado após a utilização do sistema de reforço baseado em PRF. Como mostrado na Tabela 6, a carga média de ruptura dos corpos de prova de 01 a 04 (vigas de concreto armado sem reforço PRF) foi de aproximadamente 9,7 kN, enquanto que a carga média de ruptura dos corpos de prova de 09 a 12 (vigas híbridas com PRF) foi de aproximadamente 21,0 kN. Sendo assim ganho percentual de resistência estrutural à flexão de aproximadamente 54% para o presente trabalho, considerando-se seções planas antes e após as deformações, como mostrado na hipótese de Navier Bernoulli na Figura 29, já que as deformações das vigas foram baixas. O ganho real exigiria medições instantâneas de variação da seção transversal.

Vale salientar a extrema importância que a interface compósito polimérico/concreto armado tem, grande parte do sucesso do sistema de reforço desse trabalho depende do cuidado na execução durante essa etapa, faz-se necessária a maior integração possível entre o substrato de concreto e o reforço compósito polimérico com fibras. Atenção também deve ser dada ao ciclo de cura definido para o processo de moldagem por compressão a quente, para máxima consolidação e melhor desempenho estrutural do compósito polimérico. As estruturas de um modo geral devem ser monolíticas, ou seja, trabalharem de forma conjunta e por isso a preparação da superfície da viga deve ser realizada com muita atenção.

Não somente os resultados empíricos foram satisfatórios, mas também os métodos de cálculo e dimensionamento apresentados. Isso torna o sistema de reforço aplicável na prática, para distintas situações. Sendo necessária uma análise prévia das condições físicas da

estrutura a ser reforçada e das características químicas do meio onde ela se encontra. Além disso, a relação custo benefício deve estar em conjunto em todo esse processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, J. E. de. **Durabilidade, proteção e recuperação das estruturas. Notas de aula - Especialização em Construção Civil (Especialização / Aperfeiçoamento)** Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. 2011. Apresentação de slides de Notas de aula.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras.** São Paulo: Pini, 1992. 104 p.

ARALDI, E. **Reforço de pilares por encamisamento de concreto armado: Eficiência de métodos de cálculo da capacidade resistente comparativamente a resultados experimentais.** 2013. 121 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

ARAÚJO, C. M. **Reforço de vigas de concreto à flexão e ao cisalhamento com tecidos de fibra de carbono.** 2002. 140f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12142: Concreto: determinação da resistência à tração em flexão em corpos-de-prova prismáticos.** Rio de Janeiro, 2010.

BAKIS, C. E. et al. Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction: State of the Art Review. **Journal of Composites for Construction.** [S.l.], v.6, n.2, p.73-87, 2002.

BEBER, A. J. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono.** 2007. 289p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre.

CARNEIRO, L. A. **Reforço à Flexão e ao Cisalhamento De Vigas de Concreto Armado.** 1998. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 1998.

CHUNG, D. D. L. **Carbon fiber composites.** Newton: Editora Butterworth-Heinemann, 1994, 215p.

DOLAN, C. W. FRP prestressing in the USA. **American Concrete Institute**, v. 21, n. 10, p. 21-24, 1999.

FERREIRA, J. B. **Patologias e recuperação de estruturas de concreto armado.** Guaratinguetá: DEC, 2005. Apostila de Notas de Aula, 136 p.

FRANÇA, A. A. **Deteção e localização de danos em materiais compósitos aplicado em aeronaves utilizando redes neurais artificiais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, SP, 2014, 112 p.

GIUFRIDA, W. M. **Flexão em Vigas e Projetos de Vigas**. Maringá – PR: Apostila de Mecânica dos Sólidos II. 46 p.

KARBHARI, V. M.; ZHAO, L. Use of Composites for 21st Century Civil Infrastructure. **Computer Methods Applied Mechanics and Engineering**. n. 185, p. 433-454, 2000.

LEET, K. M.; UANG, C. M.; GILBERT, A. M. Fundamentos da análise estrutural, 3. ed. São Paulo: AMGH Editora Ltda, 2009. 810 p.

LINDYBERG, R. F. The volume effect in FRP-glulams. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON ADVANCED ENGINEERED WOOD COMPOSITES, 2, 2001, Bethel USA. **Proceedings...** Bethel, 2001.

MEIER, U. **Design and rehabilitation of concrete structures using advanced composite materials**. Proc., Pré-Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção, Porto Alegre, 2005.

MACHADO, A. P. Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono. [S.l.] :VIAPOL, 2002.

MENEGHETTI, L. C. **Análise do comportamento à fadiga de vigas de concreto armado reforçadas com PRF de vidro, carbono e aramida**. 2007. 277 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre.

MICALI, R. M. **Análise teórica de vigas pré-moldadas de concreto com armadura de aço e de polímero reforçado com fibra de vidro em meio altamente agressivo**. 2010, 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 2010.

MIOTTO, J. L. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro**. 2009. 325 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MOHAMAD, G. (coord.) **Construções em alvenaria estrutural: materiais, projeto e desempenho**. São Paulo: Edgard Blücher, 2015.

MORAES, C. A. **Intervenções metálicas em construções pré-existentes: estudo de caso de interfaces**. 2009. 170f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2006. 313 p.

OLIVEIRA, D. V. et al. Desenvolvimento de reforço sísmico usando FRP: aplicação a um pilar pré-fabrica de betão. **Mecânica Experimental**, v. 9, p.19-27, 2009.

PIVATTO, A. B.; **Reforço estrutural à flexão para viga biapoiada de concreto armado por chapas metálicas e compósito reforçado com fibras de carbono**. 2014.126 f. Trabalho

de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

REIS, A. P. A. **Reforço de vigas de concreto armado por meio de barras de aço adicionais ou chapas de aço e argamassa de alto desempenho.** 1998. 239p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

REIS, L. S. N. **Sobre a recuperação e reforço de estruturas de concreto armado.** 2001. 114 p. Tese (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

REZENDE, M. C.; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C. **Compósitos estruturais: tecnologia e prática,** 1ª Ed. São Paulo: Artliber Editora, 2011. 396 p.

ROCHA, A. C. et al. Ensaio de Stuttgart – reprodução em laboratório. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46., 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis,: IBRACON, 2004. 14 p.

ROMERO, D. V. S. **Reforço à flexão de vigas de concreto armado por meio de protensão externa.** 2007. 106 p. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SANTOS, A. L. **Estudo da modificação superficial de fibras de carbono por meio de tratamentos a plasma para o aumento da adesão na interface de compósitos fibra de carbono/PPS.** 2015. 155 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

SILVA, G. R. **Manual de Traços de Concreto.** 3. ed. São Paulo: Editora Nobel, 1975. 142 p.

SILVEIRA, D. C. et al. Electromagnetic Properties of Multifunctional Composites Based on Glass Fiber Prepreg and Ni/carbon Fiber Veil. **Journal of Aerospace Technology and Management,** v. 9, n. 2, p. 231-240, 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S2175-91462017000200231&script=sci_arttext>. Acesso em: 16 nov. 2017.

SILVEIRA, D. C. **Obtenção e caracterização de estruturas absorvedoras de micro-ondas baseadas em laminado de fibra de vidro/resina epoxy/véu de C/Ni.** 2016. 172f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica, área de Materiais) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, São Paulo.

SOUTO FILHO, M. V. **Modelagem numérica de reforço estrutural em vigas de concreto armado.** 2002. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Pontífice Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

SOUZA, V. C., RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto.** São Paulo: Editora Pini, 1998. 255 p.

STAP. **Reforço de betão armado com chapas e perfis de aço.** Disponível em: <<http://www.stap.pt/index.php?id=116&det=3>>. Acesso em: 16 nov. 2017

VENTURA, A. M. F. M. Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, Lisboa, v. 21, n. 3-4, 2009.

UOMOTO, T. Use of Fiber Reinforced Polymer Composites as Reinforcing Material for Concrete. **J. Mater. Civ. Eng.**, v. 14, n. 3, p. 191-209, 2002.