

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
COORDENADORIA DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL



RAFAEL BEZERRA SOUSA

**ESTUDO COMPARATIVO DA UTILIZAÇÃO DE FIBRA DE VIDRO COMO
REFORÇO ESTRUTURAL EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

SÃO LUÍS-MA
2019

RAFAEL BEZERRA SOUSA

**ESTUDO COMPARATIVO DA UTILIZAÇÃO DE FIBRA DE VIDRO COMO
REFORÇO ESTRUTURAL EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação,
submetido à Universidade Federal do Maranhão
como requisito parcial para a obtenção do título de
Bacharel do Curso Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar de Oliveira
Queiroz

SÃO LUÍS-MA
2019

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Bezerra Sousa, Rafael.

Estudo comparativo da utilização de fibra de vidro como reforço estrutural em vigas de concreto armado / Rafael Bezerra Sousa. - 2019.

54 f.

Orientador(a): Paulo Cesar de Oliveira Queiroz.

Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Maranhão, Paulo Freire- UFMA, 2019.

1. Concreto Armado. 2. Fibra de Vidro. 3. Reforço estrutural. I. Cesar de Oliveira Queiroz, Paulo. II. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, que são a razão de eu não desistir e sonhar, buscando dias melhores e a todos os meus grandes mestres nessa jornada que perdurou por longos cinco anos onde houveram muitas trocas, trocas estas que me acresceram não somente como profissional que já estou me tornando, mas, como pessoa, sendo mais humano, mais cauteloso com a vida do próximo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me auxilia continuamente em situações diversas me guiando sabiamente nos bons caminhos, pelo dom da vida, por me fazer compreender que eu posso tudo quando ele está ao meu lado e luto pelo que é correto.

Aos meus pais por estarem ao meu lado me dando forças continuamente e por me fazer acreditar que posso ser uma pessoa melhor a cada dia.

À família que acreditou que eu seria capaz.

Ao professor orientador por suas contribuições.

Aos amigos e amigas, parceiros e parceiras da caminhada e aos demais colegas de classe, por dividirmos aprendizados, compartilharmos situações diversas, (risos, anseios, tristezas), sempre na certeza de que chegaríamos a esse momento

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo estudar, através da comparação, a fibra de vidro como reforço estrutural em vigas de concreto armado, utilizando de uma ampla revisão bibliográfica. Diante da necessidade de recuperação e reforço, a construção civil se encontra na obrigação de realizar estudos que venham a sanar este problema com maior praticidade, e a solução veio através dos estudos utilizando fibras reforçadas com polímero (CFRP). Dentre estas a que vem apresentando resultados satisfatórios é a fibra de vidro, verificando a eficiência, resistência e rigidez de vigas reforçadas. Concluiu-se que a grande resistência do CFRP e a praticidade de execução são razões para a substituição dos métodos tradicionais de reforços.

Palavras chave: Fibra de Vidro; Reforço estrutural; Concreto armado.

ABSTRACT

This work aims to study, by comparison, the glass fiber as structural reinforcement in reinforced concrete beams, using a broad literature review. Faced with the need for recovery and reinforcement, civil construction is obliged to carry out studies that will solve this problem with greater practicality, and the solution came through studies using polymer reinforced fibers (CFRP). Among those that have been presenting satisfactory results is the fiberglass, verifying the efficiency, strength and stiffness of reinforced beams. It was concluded that the high strength of the CFRP and the practicality of execution are reasons for the replacement of the traditional reinforcement methods.

Keywords: Fiberglass; Structural reinforcement; Reinforced concrete.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CFRP	Compósitos de Fibras Reforçados com Polímero

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de Reforço com Concreto Armado em uma Viga.	15
Figura 2: Configuração básica de um compósito	17
Figura 3: Configurações de compósitos de matriz polimérica.	18
Figura 4: Fibra de vidro em filamentos.....	21
Figura 5: À esquerda, pequenos filamentos de fibra de vidro. À direita, filamentos de fibra de vidro misturados ao concreto.	22
Figura 6: Hipóteses para aplicação de reforços em estruturas danificadas de concreto armado.	26
Figura 7: Diagramas de momento e cortante.	28
Figura 8: Aplicações práticas do polímero reforçado com fibras de vidro.....	29
Figura 9-a) Seção Plana Antes da Deformação; (b) Seção Plana Após Deformação.....	33
Figura 10: Diagrama Retangular Simplificado de Tensões de Compressão no Concreto (f_{cd}) e Diagrama Linear de Deformações ao Longo da Seção Transversal.	34
Figura 11-Diagrama de Deformações ao Longo da Altura de uma Viga.....	34
Figura 12: Diagrama de Deformações dos Domínios 2, 3 e 4.	35
Figura 13: Deformações e Forças Resultantes nos Elementos de uma Viga.	38
Figura 14: À esquerda, organização experimental com esquema da viga biapoiada; à direita, maquinário utilizado para ensaios à tração.	43
Figura 15 - Ruptura CDP 01 a 04.....	44
Figura 16-Os modos de ruptura	45
Figura 17-CDPs 09 a 12 rompidos.....	46

LISTA DE GRÁFICO

Gráfico 1-Tensão x Deformação Concreto.....	32
Gráfico 2-Diagrama Tensão x Deformação Aço Classe A.	33
Gráfico 3-Carga na Ruptura (N)	48
Gráfico 4-Resistencia a tração na flexão [N/mm ²]	48
Gráfico 5-Tensão Máxima [N/mm ²].....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Corpos de prova.....	41
Tabela 2: Corpos de prova.....	41
Tabela 3-Tensões máxima de cálculo e de ensaio vigas sem reforço.	44
Tabela 4- Análise descritiva vigas sem reforço	45
Tabela 5: Tensões Máxima de Cálculo e de Ensaio Vigas com Reforço	46
Tabela 6- Análise descritiva vigas com reforço CFRP	47

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA	15
1.2 OBJETIVO.....	16
1.1.1 OBJETIVO GERAL	16
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1 MATERIAL COMPÓSITO.....	17
2.1.1 Definição.....	17
2.1.2 Vantagem dos compósitos	18
2.1.3 Classificação dos compósitos	19
2.1.4 Características dos compósitos	20
2.2 FIBRAS DE VIDRO	21
2.2.1 Definição	21
2.2.2 Propriedades das fibras de vidro.....	23
2.2.3 Tipos de fibras de vidro	25
2.3 REFORÇO ESTRUTURAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO.....	26
2.3.1 Definição	26
2.3.2 Reforço de vigas de concreto armado com fibras de vidro	28
2.3.3 Polímero reforçado com fibras de vidro	30
2.4 DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS DE CONCRETO ARMADO	32
2.5 DIMENSIONAMENTO DO COMPÓSITO POLIMÉRICO ESTRUTURAL	36
3. METODOLOGIA	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
4.1 VIGAS DE CONCRETO ARMADO SEM O REFORÇO CRFV	43
4.2 VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM O REFORÇO CRFV.....	46
4.3 VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM REFORÇO DE FIBRAS DE VIDRO	47
5. CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS.....	53

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, pode-se perceber uma maior preocupação com a durabilidade das edificações em geral, isso se deve às exigências quanto a seu desempenho, e seu conforto quando utilizado, e o custo para reparo em situações de falhas. No entanto, faz-se necessário a reparação das estruturas, pois as mesmas podem ser causadas por diferentes fatores, como a modificação de seu uso, necessidade de ampliação por motivos diversos, ou a impossibilidade de demolição.

Isto tem incentivado o progresso de métodos e técnicas de reforço e de materiais com um maior nível de tecnologia e que, por sua vez, garantem maior efetividade de reparo e superação em seu desempenho. Apesar de uma crescente demanda aos reforços estruturais, os profissionais da área utilizam técnicas fundamentadas em experiências de outros construtores, pois estas envolvem um trabalho específico para cada ocorrência manifestada nas estruturas, e mesmo que vários reparos tenham sido realizados com sucesso, ainda são bastante recentes, e necessitam de mais tempo para correta coleta de dados.

A partir disso, percebe-se que a durabilidade, as manifestações patológicas e as técnicas de reforço estrutural são conteúdos que inquietam a comunidade acadêmica e profissional. Em alguns casos, o profissional se encontra em situações e condições difícil para a escolher de forma mais adequada da técnica de reforço e do material que deverá ser utilizado, pois os edifícios estão expostos a diferentes agentes agressivos do ambiente em que estão localizados.

Apresenta-se também o desafio de se compatibilizar materiais, a necessidade de controle do excesso de peso e a dificuldade em vencer grandes vãos. Assim, devem ser previstos os materiais que apresentam as características necessárias para conferir à estrutura um bom desempenho frente às características que a estrutura desempenhará, garantindo economia com manutenção e longevidade do reparo.

Em muitas situações, o método construtivo tradicional em concreto armado se mostra inadequado, estimulando os engenheiros em busca de métodos alternativos

para solucionar os problemas que se apresentam em suas construções, como mostra a figura 1:

Figura 1: Exemplo de Reforço com Concreto Armado em uma Viga.



Fonte: https://fotos.habitissimo.com.br/foto/reforco-estrutural-de-viga_1229921.
Acesso:11/04/2018

1.1 JUSTIFICATIVA

A necessidade de recuperação e reforço em estruturas de concreto armado, seja durante sua execução para tratar falhas executivas, de projeto ou durante sua vida útil em decorrência de manutenção ou patologias, exigiu da construção civil uma procura por métodos mais eficientes que pudessem cumprir esse papel. Com este objetivo vários estudos estão sendo realizados utilizando fibras reforçadas com polímeros (CFRP). Dentre estas fibras, as que vêm apresentando melhores resultados econômicos como reforço para peças estruturais em concreto armado são as fibras de vidro.

1.2 OBJETIVO

1.1.1 OBJETIVO GERAL

- a) Através de levantamentos bibliográficos comparar e estudar o comportamento estrutural de vigas de concreto armado que usam fibras de vidro como reforço estrutural;

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

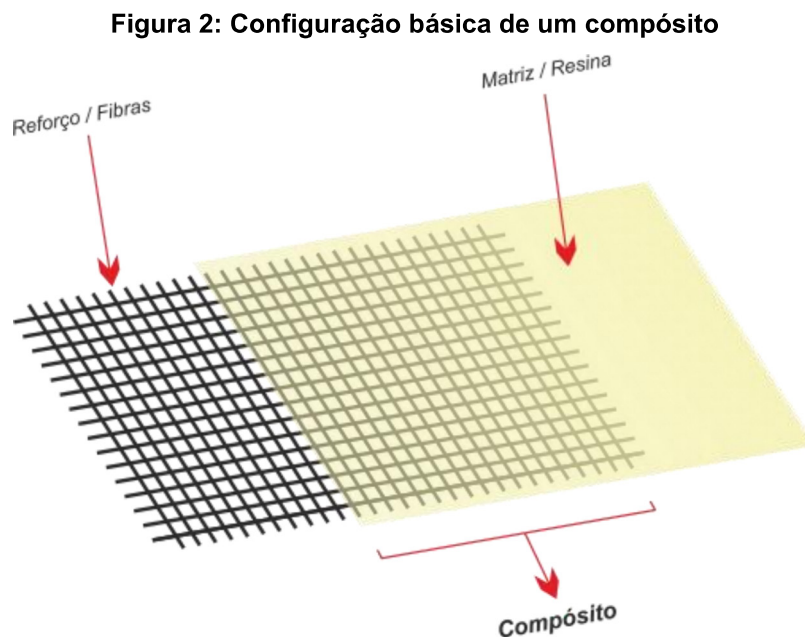
- a) Estudar a fibra de vidro como reforço estrutural em vigas de concreto armado;
- b) A necessidade de recuperar e reforçar as estruturas de concreto armado;

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MATERIAL COMPÓSITO

2.1.1 Definição

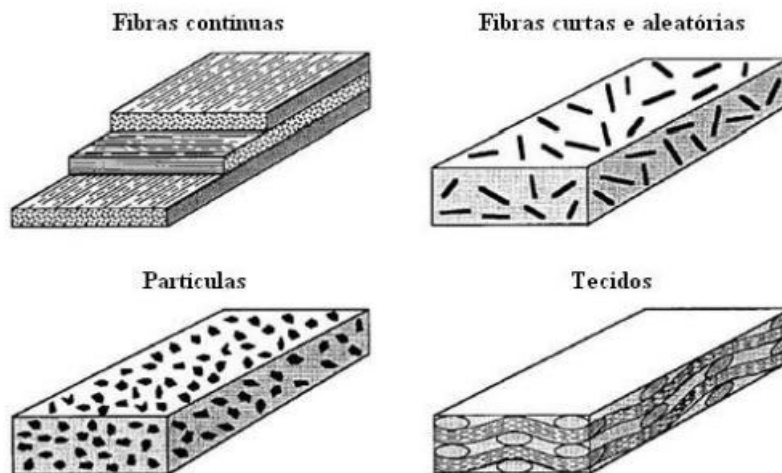
De acordo com Pardini & Neto (2006), o material compósito é produzido combinando dois ou mais materiais - geralmente aqueles que têm propriedades diferentes, sendo que os dois materiais trabalham juntos para fornecer propriedades únicas ao composto. No entanto, dentro do compósito, pode-se distinguir facilmente os diferentes materiais, pois estes não se dissolvem ou se misturam (Figura 2).



Fonte: KUTZ (2006)

A madeira, por exemplo, é um compósito feito a partir de fibras de celulose - polímero - mantidas unidas em uma substância muito mais fraca chamada lignina. A celulose também pode ser encontrada no algodão, mas sem a lignina para uni-lo, sendo assim muito mais fraca. As duas substâncias isoladamente - lignina e celulose - são fracas isoladamente, mas juntas formam uma muito mais forte (LEVY NETO e PARDINI, 2006). No caso de compósitos focados em resistência mecânica, por exemplo, este pode ser concebido como a relação entre duas os mais películas distintas que atuarão no sentido matricial do reforço (Figura 3).

Figura 3: Configurações de compósitos de matriz polimérica.



Fonte: KUTZ (2006)

2.1.2 Vantagem dos compósitos

Segundo Alves (2011), a maior vantagem dos materiais compósitos produzidos artificialmente é que estes são leves e fortes. Os diversos materiais componentes e os diferentes processos usados tornam os compósitos extremamente versáteis e eficientes. Geralmente, eles resultam em soluções mais leves, mais fortes e mais duráveis, em comparação com os materiais tradicionais. Pela escolha da combinação apropriada de matriz e material de reforço, um novo material pode ser feito para que atenda exatamente aos requisitos de uma aplicação específica. Os compósitos também fornecem flexibilidade e diversas possibilidades de manejo, já que muitos deles podem ser moldados em formas complexas. A desvantagem é, frequentemente, o custo mais alto do que o convencional. Embora o produto resultante seja mais eficiente, as matérias-primas são, frequentemente, mais caras.

A principal razão pela qual os materiais compósitos são escolhidos para os componentes é a economia de peso devido à sua rigidez e resistência. Por exemplo, o compósito reforçado com fibra de carbono pode ser cinco vezes mais forte que o aço 1020, tendo apenas um quinto do peso. Já, o alumínio de grau 6061 é muito mais próximo do peso do compósito de fibra de carbono, embora ainda seja um pouco mais pesado. Em compensação, compósito pode ter o dobro do módulo e até sete vezes a resistência (ALVES, 2011).

2.1.3 Classificação dos compósitos

Os materiais compósitos podem ser classificados em três tipos de acordo com sua geometria, sendo eles:

- i. Fibrosos;
- ii. Laminados;
- iii. Particulados.

Segundo Callister Jr. (2000), os materiais fibrosos são compostos por fibras contínuas ou descontínuas, as quais são colocadas em uma matriz. Como exemplo, pode-se citar polímeros reforçados com fibra de vidro, madeiras e ossos. Os laminados são camadas alternadas de materiais diferentes, podemos citar, como exemplo, metais, vidros, tecidos ou papéis. E os compósitos particulados são os materiais equiaxiais, podem ter forma esférica e são compostos com uma matriz metálica ou polimérica. Pelos estudos de Callister Jr. (2000) interpreta-se que partículas são componentes dispersos e que apresentem dimensões próximas na totalidade das direções, e as fibras têm uma grande relação entre comprimento e seu diâmetro.

Como em todos os materiais de engenharia, os compósitos têm pontos fortes e fracos específicos, que devem ser considerados no estágio de especificação. Os compósitos não são, de forma alguma, o material adequado para todas as situações. No entanto, uma das principais forças motrizes por trás do desenvolvimento de compósitos foi que a combinação do reforço e da matriz pode ser alterada para atender às propriedades finais necessárias de um componente. Por exemplo, se o componente final precisa ser resistente ao fogo, uma matriz retardadora de fogo poderá ser usada no estágio de desenvolvimento para que ela tenha essa propriedade (BEVITORI, 2014).

2.1.4 Características dos compósitos

Segundo Bevitori (2014), dentre os principais aspectos dos materiais compósitos, pode-se citar os seguintes:

- I. Redução de peso: A principal razão pela qual os compósitos são escolhidos é a resistência / rigidez específica aprimorada (resistência / rigidez específica por unidade de peso). Isso ajuda a reduzir o uso de combustível ou aumentar a aceleração ou o alcance no transporte. Permite uma instalação mais fácil e rápida ou um movimento mais rápido dos braços do robô e reduz as estruturas ou fundações de suporte. Melhora a estabilidade de superfície em embarcações e estruturas offshore e flutuabilidade para aplicações em alto mar.
- II. Durabilidade e manutenção: Os compósitos não enferrujam, o que é crucial, especialmente em ambientes marinhos e químicos. A necessidade de manutenção e pintura é reduzida ou eliminada. Os rolamentos compostos para motores e pontes marítimas não precisam de lubrificação e não corroem. Combine a excelente resistência à fadiga e os compósitos podem aumentar a vida útil do produto várias vezes em muitas aplicações.
- III. Funcionalidade adicionada: Os compósitos são isoladores térmicos, bons para proteção contra incêndio e explosões. O isolamento elétrico é útil para estruturas na linha ferroviária e transparência do radar. Uma malha ou revestimento condutor pode ser integrado, se necessário, para refletir o radar ou desviar o raio. Sensores, eletrônicos e cabos podem ser incorporados.
- IV. Liberdade de design: A versatilidade dos compósitos permite a liberdade de forma arquitetônica. Muitas peças podem ser consolidadas em uma, e reforçadores, insertos e afins podem ser integrados no molde. Os compósitos podem ser adaptados para se adequar à aplicação, escolhendo os materiais constituintes e incorporando funcionalidades extras.

Conforme estudos de Bevitori (2014), a indústria de compósitos se encontra em constante dinamismo, já que novos materiais, processos e aplicações estão sendo desenvolvidos o tempo todo. O mercado global de materiais compósitos está crescendo cerca de 5% ao ano, com a demanda de fibra de carbono, por exemplo, crescendo 12% ao ano.

2.2 FIBRAS DE VIDRO

2.2.1 Definição

Conforme estudos de Jaigobind *et al.* (2007), as fibras de vidro estão entre os mais versáteis materiais industriais conhecidos atualmente. Eles são facilmente produzidos a partir de matérias-primas, que são disponíveis em suprimento praticamente ilimitado. As fibras de vidro, via de regra, são derivadas de composições contendo sílica. Elas exibem propriedades úteis, como dureza, transparência, resistência ao ataque químico, estabilidade e inércia, bem como desejáveis propriedades como resistência, flexibilidade e rigidez. As fibras de vidro são utilizadas na fabricação de compósitos estruturais, circuitos impressos placas e uma ampla gama de produtos para fins especiais, como mostram a figura 4 e 5.

Figura 4: Fibra de vidro em filamentos.



Fonte: KUTZ (2006)

Figura 5: À esquerda, pequenos filamentos de fibra de vidro. À direita, filamentos de fibra de vidro misturados ao concreto.



Fonte: KUTZ (2006)

De acordo com Pereira (2012), o processo de formação das fibras de vidro é composto pelo derretimento do vidro, sendo estes fundidos por co-fusão da sílica com minerais, os quais possuem os óxidos necessários para formar dada composição. A massa derretida é rapidamente arrefecida para evitar a cristalização e formar as fibras de vidro por um processo também conhecido pela formação das fibras.

Ainda segundo Pereira (2012), quase todas as fibras de vidro contínuas são feitas por um processo direto e formado por extrusão do vidro fundido através da liga de platina que pode conter vários milhares de orifícios individuais, cada um com diâmetro variando de 0,793 a 3,175 mm. Enquanto ainda altamente viscosas, as fibras resultantes são rapidamente puxadas para um diâmetro fino e solidificam. Os diâmetros típicos de fibra variam de 3 a 20 μm e os filamentos individuais são combinados em fios multifilamentos, que são puxados por bobinadeiras mecânicas a velocidades de até 60 m/s e enrolados em tubos.

Pereira (2012) também afirma que os filamentos de vidro são altamente abrasivos entre si e os ligantes são, portanto, aplicados e recolhidos para minimizar a degradação do filamento e manter a resistência que poderia ser afetada por abrasão de filamento a filamento. Os aglutinantes fornecem lubrificação, proteção e/ou acoplamento, sendo que estes podem ser temporários, como na forma de um óleo de amido em emulsão que é, subsequentemente, removida por aquecimento e substituída por um acoplamento de vidro com resina agente de acabamento. Por outro lado, pode haver um tratamento compatível que executa diversas funções

necessárias durante a operação de formação subsequente e que, durante a impregnação, atua como um agente de acoplamento à resina sendo reforçado.

2.2.2 Propriedades das fibras de vidro

Zattera et al. (2000) afirmam que as propriedades das fibras de vidro são capazes de aprimorar o desempenho dos materiais aos quais se encontram atrelados. Além disso, a fibra de vidro possui custo efetivo reduzido, ao se analisar as possibilidades oferecidas pelo material, em comparação com outros materiais sintéticos e naturais. Como propriedades principais das fibras de vidro, pode-se citar as seguintes:

- I. Resistência química: A fibra de vidro possui maior resistência à maioria dos ácidos, com exceção do ácido fluorídrico e do ácido fosfórico. Quando comparado a elementos naturais, pode-se notar que a fibra de vidro reage de melhor forma às situações adversas, como condições de umidade excessiva, insalubridade e afins.
- II. Estabilidade dimensional: A fibra de vidro sofre menores variações mediante o aquecimento ou arrefecimento. Via de regra, a ruptura de alongamento nominal é de 3-4%. O coeficiente de dilatação térmica linear média da fibra de vidro "E" é de 5,4 por 10,6 cm / cm / ° C. Assim, pode-se afirmar que a fibra de vidro é pouco sensível às variações de temperatura e de higrometria, além de possuir baixo coeficiente de expansão linear.
- III. Propriedades térmicas adequadas: A fibra de vidro tem baixo coeficiente de expansão térmica e condutividade térmica relativamente alta. Os tecidos de fibra de vidro, por exemplo, dissipam o calor mais rapidamente do que o amianto ou as fibras orgânicas.
- IV. Incombustibilidade: Como material mineral, a fibra de vidro é naturalmente incombustível e não se propaga, nem auxilia o desencadeamento de uma chama. Quando exposto ao calor, não emite fumaça e componentes tóxicos.
- V. Resistência mecânica: Os filamentos da fibra de vidro possuem uma alta relação resistência à tração / massa volumétrica, sendo que o fio da fibra de vidro é duas vezes mais forte que o fio de aço. Essa característica é a

principal razão do uso do fio de vidro na produção de compósitos de alto desempenho.

- VI. Alta resistência térmica: A fibra de vidro não pode queimar e não é afetada pela temperatura comumente utilizada no processamento industrial. A fibra de vidro retém, aproximadamente, 50% de força a 371°C até 25% a 537 °C.
- VII. Isolamento elétrico: A alta resistência dielétrica e constantes dielétricas relativamente baixas tornam a fibra de vidro excelentes para fins de isolamento elétrico. A fibra de vidro é um excelente isolador elétrico, mesmo em baixa espessura, combinado com sua resistência mecânica e comportamento adequado em diferentes temperaturas.
- VIII. Compatibilidade com matrizes orgânicas: A capacidade da fibra de vidro de combinar-se com diferentes tamanhos e tipos de matrizes, possibilita a ligação entre o vidro e a matriz secundária e permite que a fibra seja combinada com muitas resinas sintéticas, além de certas matrizes minerais, como gesso e cimento.
- IX. Versatilidade do produto: A ampla variedade de filamentos, fios de fibra de vidro, tamanhos de fios, tipos de tecidos e acabamentos disponibiliza diversas configurações da fibra de vidro oferecendo, como consequência, ampla variedade de usos finais industriais.
- X. Integração de funções: Uma das principais vantagens dos compósitos de fibra de vidro é que uma peça com várias funções pode ser feita em uma única etapa. Ao combinar complexidade de formas, leveza, precisão dimensional, altas propriedades termomecânicas e confiabilidade, os compósitos de fibra de vidro atendem às novas necessidades funcionais existentes no mercado.
- XI. Melhoria do acabamento de superfície: Os reforços de fibra de vidro, quando adicionados ou moldados com outros materiais, ajudam a melhorar o aspecto da superfície, pois permitem a impregnação uniforme de resinas, por exemplo, e estão menos sujeitos a rachaduras, quebras ou fendas.
- XII. Reciclabilidade: Devido a diferentes métodos técnicos, a reciclagem de fios de vidro é possível, atualmente, assim como a reciclagem de peças reforçadas com vidro termoplástico ou termofixo

2.2.3 Tipos de fibras de vidro

Segundo Vidales (2011), as fibras de vidro se enquadram em duas categorias: as fibras de uso geral e fibras de uso especial, sendo que mais de 90% de todas as fibras de vidro são de uso geral e estão sujeitos às especificações do *American Society for Testing and Materials* (ASTM). O restante das fibras de vidro são produtos especiais e possuem designações de letras implicando propriedades especiais como, por exemplo, o vidro eletrônico. Alguns têm nomes comerciais, mas nem todos estão sujeitos às especificações do ASTM.

O primeiro tipo de fibras de vidro é aquela de uso geral (*E-glass*). Essas fibras e tecidos de vidro são usados em variedades cada vez maior para uma ampla gama de aplicações. Há uma organização dos dados relativos a todas as fibras de vidro e há alta disponibilidade desses no mercado, sejam elas empregadas para reforço, filtragem, isolamento ou outras aplicações. Há também as fibras de vidro para fins especiais, como por exemplo: *S-glass*, *D-glass*, *A-glass*, *ECR-glass*, fibras de sílica ultra puras, fibras ocas e fibras trilobal (VIDALES, 2011).

De acordo com Dumont (2007), há dois tipos genéricos de *E-glass* são conhecidos no mercado hoje, sendo que o titular contém de 5 a 6% em peso de óxido de boro. Os regulamentos ambientais rigorosos exigem a adição de sistemas dispendiosos para a redução de emissões do boro dos efluentes gasosos das fundições que contêm boro. Como alternativa, pode-se citar o uso de vidro *E-glass* ecológico, cujo derretimento não contém e, portanto, não emite, boro no meio ambiente durante o processamento.

Ainda conforme Dumont (2007), as fibras para fins especiais, que possuem significativa presença no mercado atual, incluem fibras de vidro com alta resistência à corrosão (*ECR-glass*), alta resistência mecânica (*S-glass* e *A-glass*), baixas constantes dielétricas (*D-glass*), fibras de alta resistência e fibras de sílica ou quartzo puras, que podem ser usadas em temperaturas ultra altas. Outras fibras para fins especiais incluem fibras ocas, fibras bicomponentes e fibras trilobal.

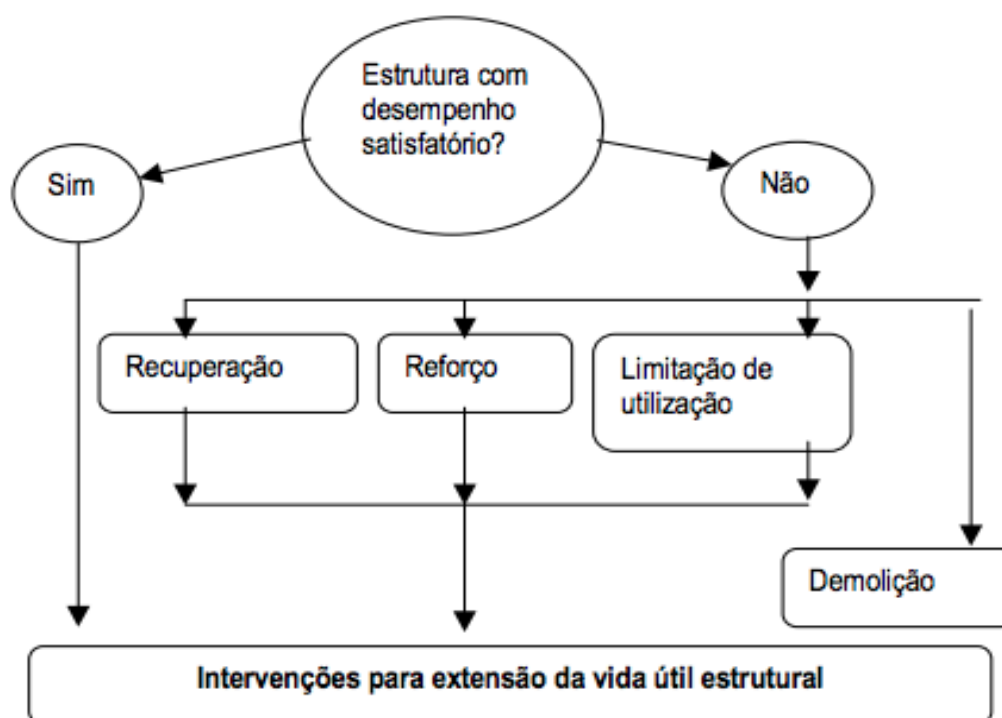
2.3 REFORÇO ESTRUTURAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

2.3.1 Definição

Para que haja o retorno do desempenho das vigas de concreto armado para sua configuração original é necessário que sejam averiguados diversos aspectos de caráter técnico, a princípio, econômico e ambiental. A Figura 6 abaixo lista quais os pontos a serem seguidos para que haja a melhor escolha entre as opções disponíveis para estruturas degradadas de concreto armado e madeira. Sabe-se que é comum a ocorrência de degradações pontuais e de baixa importância que não irão comprometer a estrutura como um todo.

Enquanto há outros defeitos de alta gravidade que irão exigir reparos muitas vezes imediatos e, para isso, se faz necessário a compreensão completa da edificação em suas condições atual e de seu projeto estrutural.

Figura 6: Hipóteses para aplicação de reforços em estruturas danificadas de concreto armado.



Fonte: SOUZA & RIPPER (1998)

Há diversas formas de reforços utilizadas atualmente nas vigas de concreto armado, como uso de peças de concreto, perfis e chapas metálicas, polímeros de fibras reforçados e protensão externa. A escolha dentre as técnicas listadas variam de acordo com o projeto original, a demanda atual e o balanceamento entre custo e efeitos na aparência estética e na funcionalidade da edificação. Independente da técnica a ser empregada devem ser observados os seguintes aspectos:

- i. Recomendações básicas acerca do dimensionamento;
- ii. Passo a passo para execução do reforço;
- iii. Controle da qualidade do procedimento de execução;
- iv. Inclusão do monitoramento das estruturas pós-execução do serviço;
- v. Condições de máximo e mínimo reforços;
- vi. Condições de reforços averiguando globalmente a capacidade de resistência da estrutura.

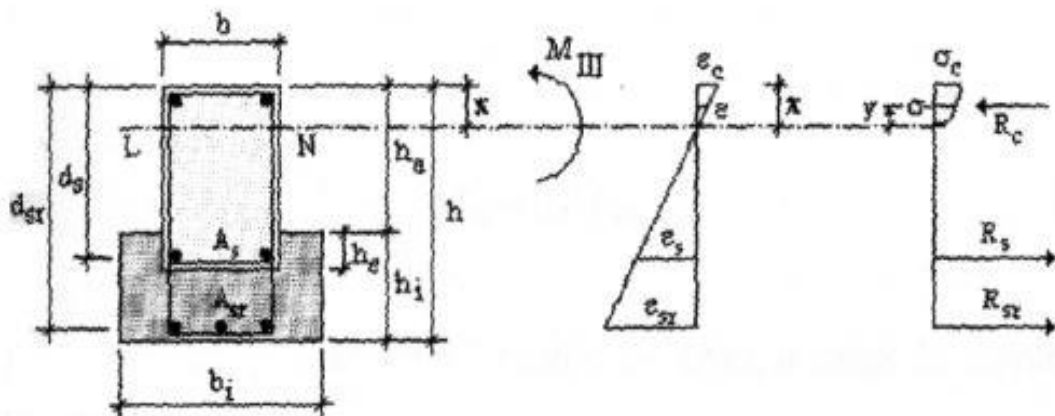
De acordo com Juvandes & Figueiras (2000), "recomendações para que o reforço das estruturas existentes não exceda 50% de sua resistência inicial e que, no caso da ruptura acidental do reforço, o sistema remanescente tenha segurança residual superior a 1,0, para evitar o colapso geral."

Da mesma forma, o comportamento geral da estrutura deve resistir ao incremento das sobrecargas pontuais e individuais existentes. Importante ressaltar que, para os reforços com baixa resistência ao fogo, como os perfis e chapas metálicas e os polímeros de fibras reforçados, deve-se fazer uso de restrições limitadas pela temperatura e tempo de tolerância dos materiais.

Na pesquisa empírica e técnica realizada por Piancasteli & Calixto (1997), realizou-se a análise do dimensionamento do reforço para vigas de concreto armado em sua situação de flexão.

A seção de concreto e aço, nesse caso, foi aumentada na área em que a viga recebe a tração de uma carga de duração rápida. Com os resultados obtidos e a análise das deformações e deslocamentos ocorridos após o reforço, houve a seguinte conclusão: as vigas com reforço responderam de acordo com as solicitações presentes na ABNT NBR 6118(2014), conforme a figura 7 do diagrama.

Figura 7: Diagramas de momento e cortante.



Fonte: Piancastelli & Calixto (1997)

2.3.2 Reforço de vigas de concreto armado com fibras de vidro

De acordo com Wambua (2003), este método de reforço faz uso de polímeros com reforços de fibras, sendo estes compósitos compostos com fibras de carbono, aramida e fibras de vidro, os quais são concatenados com resina de polímero. Esse material é capaz de incrementar a durabilidade, a capacidade de flexão, a resistência ao cisalhamento e a resistência da peça que receberá este tratamento. O compósito de polímero de fibra reforçado é constituído de três componentes:

- i. Duas camadas de resinas para a preparação da base com uso de concreto primário;
- ii. Uma camada de adesivo de ligação.

Há aplicação do polímero em armaduras (barras), protensões (cabos), mantas, superfícies flexíveis e vigas. Encontra-se no mercado a comercialização deste material com fabricação prévia ou fabricação in loco com o preparo anterior e a cura no momento de fixação.

De acordo com Souza e Piancastelli (1998), "os laminados pré-fabricados pela Carbodur Sika e S&P Laminates CFK, os tecidos bidirecionais fabricados pela TFC Freyssinet e Tyfo S. Fibrwrap e as folhas flexíveis unidirecionais pré-impregnadas fabricadas."

Esta técnica, segundo Ota (2004), tem sido cada vez mais utilizada devido a característica como a alta resistência à corrosão e à tração, o peso bastante baixo, aplicação fácil e rápida e custo baixo, quando comparado com outros métodos. Neste método há a colagem do material sobre o concreto já tracionado na região danificada. Assim, sabendo-se que a região já possui algum problema, deve-se atentar para a preparação prévia do material, como com o fechamentos das fissuras, tratamento de armaduras corroídas ou de concreto deteriorado. Recomenda-se que a face danificada seja tratada com cimento de desempenho alto para este ser, além de reparação, a base para a aplicação do material de reforço conforme a figura 8 mostra a aplicação.

Figura 8: Aplicações práticas do polímero reforçado com fibras de vidro.



Fonte: retirado do site engenharia-construcao.cotanet.com.br

Deve-se atentar a execução dos serviços de reforços, sendo que a flexibilidade presentes nos tecidos e nas mantas de polímero de fibras reforçadas devem incrementar a resistência das estrutura a ser tratada de forma que o confinamento da peça resulte também no aumento da ductilidade do concreto (OTA, 2004).

2.3.3 Polímero reforçado com fibras de vidro

Conforme Santos (2006), o polímero reforçado com fibra (CRFV), também chamado de plástico reforçado com fibra, é um material compósito feito de uma matriz polimérica reforçada com fibras. As fibras são geralmente de vidro, carbono ou aramida, embora outras fibras, como papel, madeira ou amianto, tenham sido usadas algumas vezes. O polímero é geralmente um plástico termoendurecível de epóxi, éster de vinil ou poliéster, e ainda estão em uso resinas de fenol formaldeído. Os CRFVs são comumente usados nas indústrias aeroespacial, automotiva, marítima e de construção civil (SANTOS, 2006).

Como já citado, os materiais compósitos são materiais artificiais ou de ocorrência natural, feitos de dois ou mais materiais constituintes com propriedades físicas ou químicas significativamente diferentes que permanecem separadas e distintas dentro da estrutura acabada. A maioria dos compósitos possui fibras fortes e rígidas em uma matriz mais fraca e menos rígida. O objetivo geralmente é criar um componente forte e rígido, geralmente com baixa densidade. O material comercial geralmente possui fibras de vidro ou carbono em matrizes baseadas em polímeros termoendurecíveis, como resinas epóxi ou poliéster (REGIANI, 2000).

Ainda de acordo com Regiani (2000), muitas vezes, polímeros termoplásticos podem ser preteridos, uma vez que são moldáveis após a produção inicial. Existem outras classes de compósitos nos quais a matriz é um metal ou uma cerâmica. Na maioria das vezes, eles ainda estão em um estágio de desenvolvimento, com problemas de altos custos de fabricação ainda a serem superados. Além disso, nesses compósitos, as razões para adicionar fibras (ou, em alguns casos, partículas) são frequentemente bastante complexas; por exemplo, melhorias podem ser buscadas em fluência, desgaste, resistência à fratura, estabilidade térmica, etc.

Conforme Monteiro *et al.* (2006), os polímeros reforçados com fibras (CRFV) são compostos usados em quase todos os tipos de estruturas de engenharia avançadas, com uso variando de aeronaves, helicópteros e naves espaciais até barcos, navios e plataformas offshore e automóveis, artigos esportivos, equipamentos de processamento químico e infraestrutura civil, como em pontes e edifícios. O uso de compósitos de CRFV continua a crescer a um ritmo acelerado, à medida que esses materiais são mais utilizados em seus mercados existentes e se

estabelecem em mercados relativamente novos, como dispositivos biomédicos e estruturas civis. Um fator-chave que impulsiona o aumento das aplicações de compósitos nos últimos anos é o desenvolvimento de novas formas avançadas de materiais de CRFV. Isso inclui desenvolvimentos em sistemas de resina de alto desempenho e novos estilos de reforço, como nanotubos de carbono e nanopartículas.

Os CRFVs estão sendo cada vez mais considerados como um aprimoramento e/ ou substituto de componentes ou sistemas de infraestrutura construídos com materiais tradicionais de engenharia civil, como concreto e aço. Os compósitos CRFVs são leves, não corrosivos, exibem alta resistência específica e rigidez específica, são facilmente construídos e podem ser adaptados para atender aos requisitos de desempenho. Devido a essas características vantajosas, os compósitos de CRFVs foram incluídos na nova construção e reabilitação de estruturas através do seu uso como reforço em estruturas de concreto armado e estruturas de madeiras.

De acordo com Monteiro et al. (2006), a aplicabilidade dos reforços de CRFV a estruturas de concreto armado como substituto de barras de aço ou protensões tem sido estudada ativamente em vários laboratórios de pesquisa e organizações profissionais em todo o mundo.

Os reforços de CRFV oferecem várias vantagens, como resistência à corrosão, alta resistência à tração, leveza e facilidade de manuseio. No entanto, eles geralmente têm uma resposta elástica linear em tensão até o momento da ruptura, processo chamado também de ruptura quebradiça, além de uma resistência transversal ao cisalhamento relativamente baixa. Eles também têm baixa resistência ao fogo quando expostos a altas temperaturas e perdem força significativa ao dobrar e são sensíveis aos efeitos de ruptura por estresse.

Além disso, seu custo, seja considerado por peso unitário ou com base na capacidade de carga de força, é alto em comparação com as barras de reforço de aço convencionais ou os ligamentos de pré-esforço. Do ponto de vista da engenharia estrutural, os problemas mais sérios com os reforços de CRFV são a falta de comportamento plástico e a resistência ao cisalhamento muito baixa na direção transversal. Tais características podem levar à ruptura prematura do ligamento,

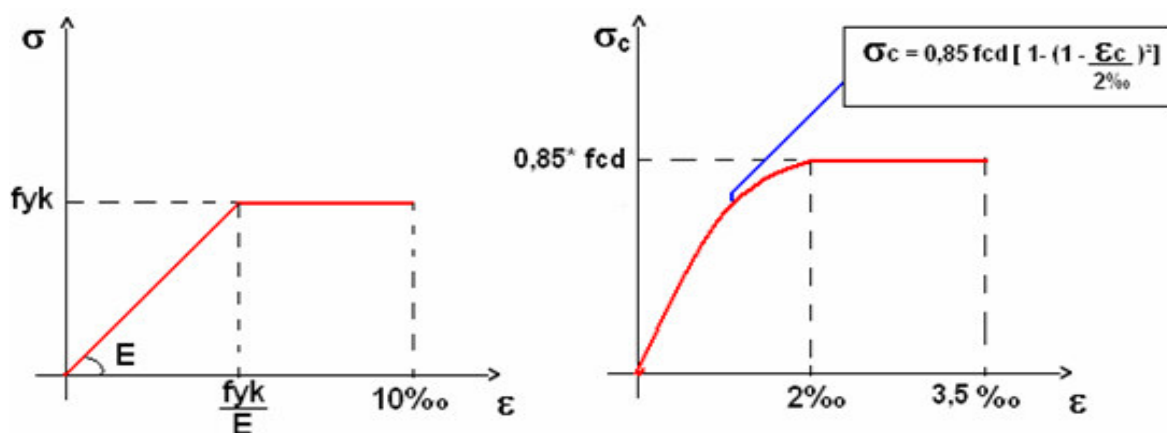
particularmente quando efeitos combinados estão presentes, como em vigas de concreto armado onde existe ação da cavilha. Soluções e limitações de uso foram oferecidas e melhorias contínuas são esperadas no futuro (Monteiro et al., 2006).

2.4 DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS DE CONCRETO ARMADO

O dimensionamento das vigas de concreto armado é baseado nas NBR 6118 (ABNT,2014), para o dimensionamento têm-se a 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 concreto possui um diagrama tensão x deformação de cálculo mostrado no gráfico 1:

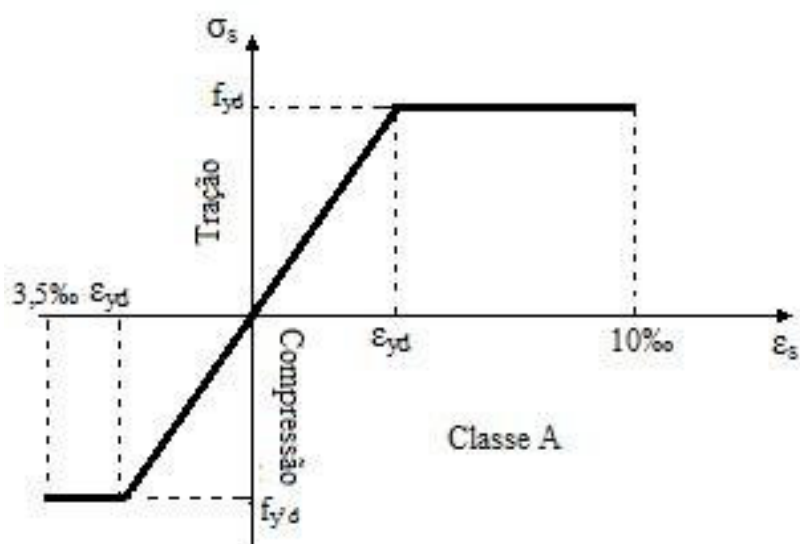
Gráfico 1-Tensão x Deformação Concreto.



Fonte: <https://www.researchgate.net/figure>

O aço da armadura de flexão possui um diagrama tensão x deformação de cálculo mostrado no gráfico 2.

Gráfico 2-Diagrama Tensão x Deformação Aço Classe A.

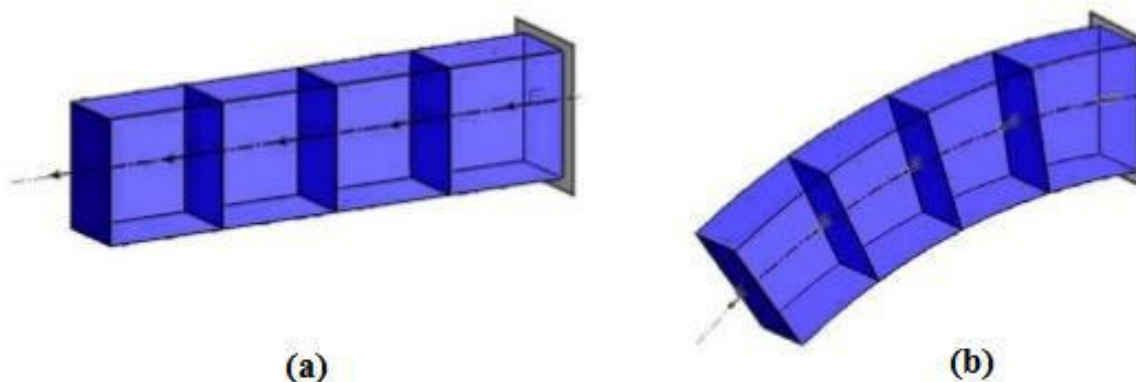


Fonte: <http://www.set.eesc.usp.br/mdidatico/concreto/Textos/03%20Acos.pdf>

Obs.: A resistência à tração do concreto é desprezada;

Assume-se a hipótese de *Navier Bernoulli* que diz “a seção plana antes da deformação permanece plana após a deformação”. A figura 9 ilustra de maneira clara essa situação.

Figura 9-a) Seção Plana Antes da Deformação; (b) Seção Plana Após Deformação.

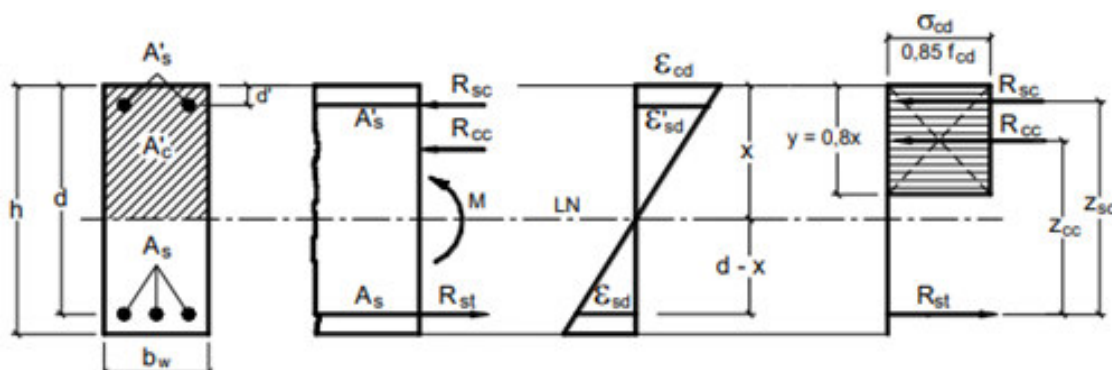


Fonte: Guarida

E ainda, a norma brasileira permite que seja utilizado o diagrama de tensões retangular simplificado, ao invés do diagrama real parábola-retângulo

mostrado na figura 10. Como consequência o diagrama de deformações ao longo da seção é linear.

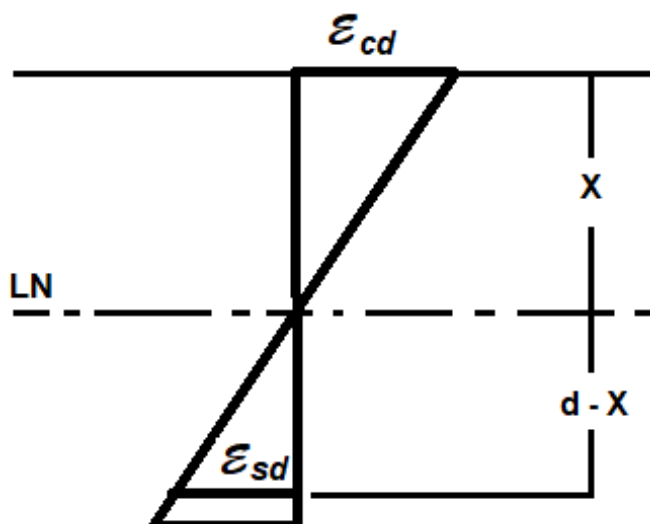
Figura 10: Diagrama Retangular Simplificado de Tensões de Compressão no Concreto (f_{cd}) e Diagrama Linear de Deformações ao Longo da Seção Transversal.



Fonte: <http://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/FlexaoSimples.pdf>

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 observado na figura, ponto no qual se considera a atuação da resultante de tração de cálculo da armadura.

Figura 11-Diagrama de Deformações ao Longo da Altura de uma Viga



Fonte: <http://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/FlexaoSimples.pdf>, adaptado.

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 operações matemáticas e chegamos à relação final para Kx , conforme (Eq.1):

$$Kx = \frac{1}{\left(1 + \frac{\epsilon_{sd}}{\epsilon_{cd}}\right)} \quad (\text{Eq.1}).$$

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 conforme (Eq.2):

$$Kx = \frac{1}{\left(1 + \frac{\epsilon_{yd}}{\epsilon_{cd}}\right)} \quad (\text{Eq.2}).$$

Com $\epsilon_{yd} = 2,07\text{‰}$ para o aço CA-50 e $2,48\text{‰}$

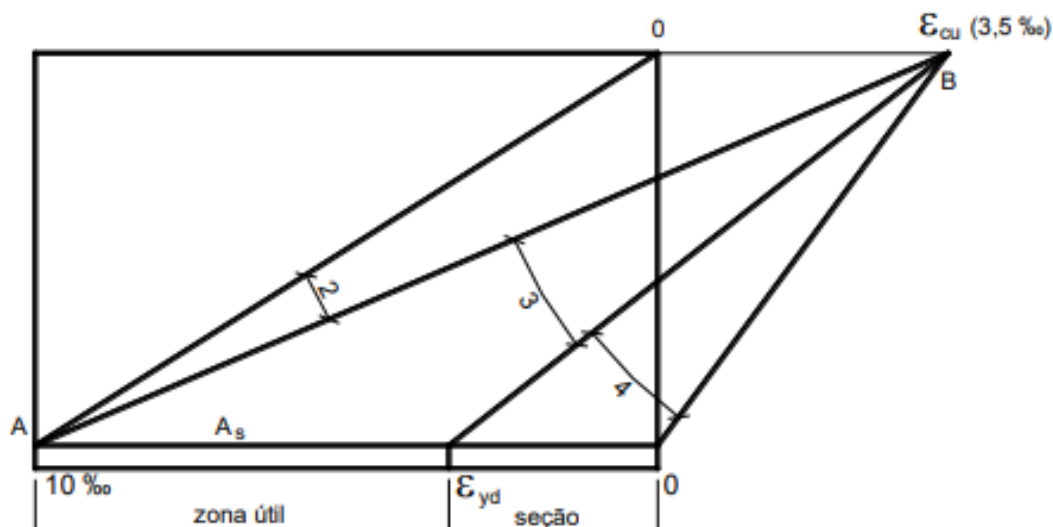
Para CA-50 temos $Kx_{limite} = 0,63$.

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

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

Sub-armadas: São aquelas nas quais o aço já escoou. Dentro da classificação de sub-armadas, temos os domínios 2 e 3, que são vistos a figura 12:

Figura 12: Diagrama de Deformações dos Domínios 2, 3 e 4.



Fonte: <http://wwwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/FlexaoSimples.pdf>

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

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

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

$$K_{x\text{limite } 2 - 3} = 0,26.$$

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

O domínio 4 também é mostrado no diagrama anterior, e é caracterizado quando $\varepsilon_{sd} < \varepsilon_{yd}$ e $\varepsilon_{cd} = 3,5\text{‰}$, 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 $K_{x\text{limite}} > 0,63$.

Para CA-60 temos $K_{x\text{limite}} > 0,59$.

O dimensionamento foi baseado nos coeficientes “K”, esse método, utiliza dos coeficientes K_c , K_x e K_s , para ao final disso determinar a seção de aço (A_{sl}) necessária para suportar os momentos fletores submetidos nas peças de concreto.

Neste caso o processo realizado foi o inverso. A armadura foi estipulada anteriormente, 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 na (Eq.3):

$$K_c = \frac{M}{Bw * d^2 * f_{ycd}}, K_x = 1,25 * \sqrt{(1,5625 - 3,6765 * K_c)} \text{ e } K_s = \frac{1}{(1 - 0,4 * K_x)} \quad (\text{Eq.3}).$$

2.5 DIMENSIONAMENTO DO COMPÓSITO POLIMÉRICO ESTRUTURAL

O estudo analítico das vigas de concreto reforçado com compósito de fibra de vidro é 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 CRFV 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:

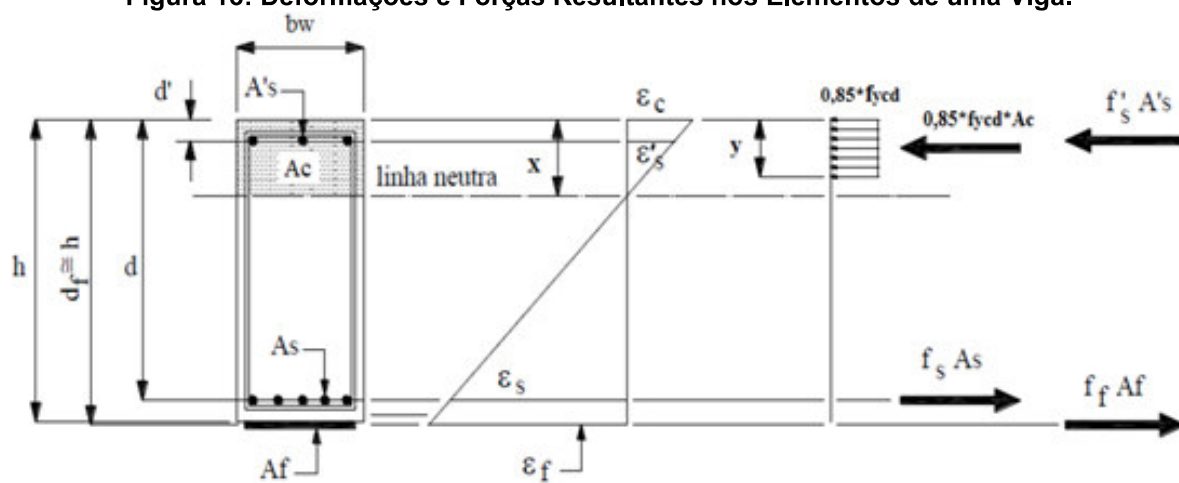
- I. Tanto a hipótese de *Navier Bernoulli*, quanto o desprezo da resistência à tração do concreto, são bases também para o dimensionamento;
- II. A aderência do substrato concreto com o sistema compósito de reforço é considerada como perfeita;
- III. As deformações são lineares até o instante da ruptura do sistema CRFV.

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;

- I. Determinam-se as deformações dos materiais constituintes de toda a peça reforçada;
- II. Com as deformações, as tensões podem ser calculadas, conforme figura 13;
- III. A partir das tensões as forças atuantes em cada material da peça, e através do equilíbrio de esforços calcula-se o momento fletor resistente da viga;
- IV. 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;
- V. Com o valor do momento fletor resistente obtido, determina-se a força do reforço e sua área necessária.

Figura 13: Deformações e Forças Resultantes nos Elementos de uma Viga.



Fonte: Adaptado Manual de Fibra de Carbono da Viapol.

Assim como no dimensionamento do item 4 as deformações no concreto, fibra e armadura podem ser obtidas da mesma maneira. As tensões são calculadas a partir das deformações e dos módulos de elasticidade de cada um dos materiais conforme (Eq.4):

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (\text{Eq.4}).$$

A força resultante em cada elemento pode ser calculada conforme C

$$F = \sigma * A \quad (\text{Eq.5}).$$

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 e por equilíbrio das forças calcula-se o momento resistente da viga reforçada (Eq.6). Para equação o equilíbrio foi aplicado no ponto onde a força resultante de compressão está aplicada, que é em metade do valor de y.

$$Md = A_s \cdot \sigma_s \cdot \left(d - \frac{Y}{2}\right) + A_f \cdot \sigma_f \left(df - \frac{Y}{2}\right) \quad (\text{Eq.6}).$$

A parcela referente à armadura negativa (armadura superior da viga referente à A'_s) não é uma parcela da (Eq.6) de momento acima, pois a viga em estudo não apresenta esse tipo de armadura.

3. METODOLOGIA

A linha de estudo basear-se-á no método do “Estudo de Caso”, que é uma pesquisa empírica que busca melhor compreender um fenômeno contemporâneo, normalmente complexo, no seu contexto real (DRESTCH et al, 2015). Primeiramente serão apresentados os fundamentos teóricos necessários para os desenvolvimentos seguintes, com especial atenção para os modelos constitutivos dos materiais e a caracterização da região coesiva (cola de união entre o compósito (CRFV) e o concreto armado). Uma visão geral da técnica de execução dos reforços de fibra de Vidro também é apresentada.

Classifica-se como pesquisa bibliográfica, pois recorrerá ao uso de material acessível ao público em geral, como livros, artigos em revista e Internet. A pesquisa também será considerada documental, porque será feito o uso de relatórios, ferramentas e planilhas disponíveis para consultas públicas. Pode também ser considerada como um Estudo de Caso por ser circunscrito a uma análise de casos de aplicação da fibra de vidro às vigas de concreto armado no intuito de comparar o desempenho desta nova circunstância àquelas convencionais.

São verificados primeiramente os resultados obtidos com o modelo constitutivo para o concreto armado, avaliando problemas simples, tendo-se conhecimento então das suas vantagens e limitações. Uma vez analisados os problemas intermediários, realiza-se a comparação do problema proposto, ou seja, a avaliação de um conjunto de vigas de concreto armado e outro conjunto com compósito reforçado com fibra de Vidro, comparando-se os resultados obtidos com os disponíveis na literatura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O relato do experimento feito no presente trabalho tem como base avaliação do desempenho do compósito de CRFV no reforço a esforços de flexão em vigas de concreto armado, realizado por Andrade (2017). Nesse trabalho há a descrição de todo o procedimento, bem como a caracterização dos materiais utilizados. O intuito deste experimento é avaliar o desempenho dos compósitos feitos de CRFV para reforçar as vigas de concreto armado nos esforços submetidos à flexão. Para tal fim, foram utilizados doze corpos de prova como mostra a tabela 1, dos quais:

Tabela 1: Corpos de prova.

CORPOS DE PROVA	
Conjunto 1	<i>Quatro corpos de prova de concreto armado sem adição de CRFV</i>
Conjunto 2	<i>Quatro corpos de prova apenas com as placas de compósitos</i>
Conjunto 3	<i>Quatro corpos de prova com CRFV de fibra vidro/resina epóxi sem estarem anexadas como reforço às vigas de concreto armado</i>
Conjunto 4	<i>Quatro corpos de prova híbridos sendo vigas de concreto armado reforçadas com o CRFV e interface de adesão</i>

Fonte: elaborado pelo autor com base em Andrade (2017)

Os elementos principais utilizados no experimento possuem as seguintes características descritas na Tabela 2, sendo que os corpos de prova foram enumerados de 1 a 4, as placas de CRFV de 5 a 8 e as vigas de 9 a 12.

Tabela 2: Corpos de prova.

ELEMENTOS DO EXPERIMENTO	
Corpos de prova	Seção de 60mm de altura x 60mm de largura x 230mm de comprimento
Placas de CRFV isoladas	Seção transversal de 3mm de altura x 60mm de largura x 230mm de comprimento
Vigas	Com dimensões de aproximadamente 65mm de altura x 60mm de largura x 230mm de comprimento, sendo 65mm de altura devido a adição dos 3mm de CRFV

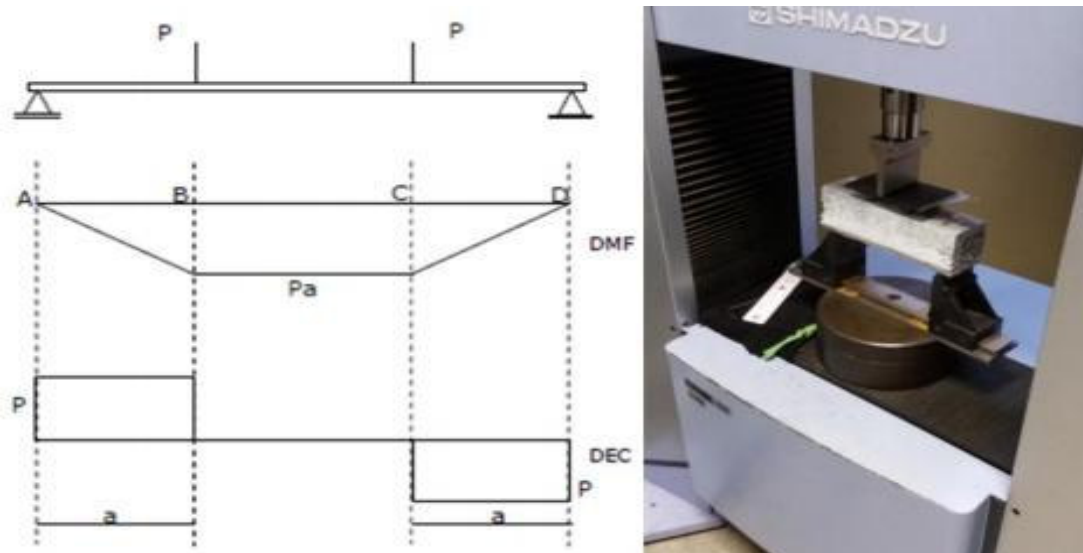
Fonte: elaborado pelo autor com base em Andrade (2017)

Quanto aos materiais componentes dos elementos principais, fez-se uso do concreto, armadura em aço e polímero reforçado com fibras de vidro. O concreto apresenta traço de 1: 2,23: 2,99: 0,56, sendo 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, além do acréscimo de aditivo plastificante. Quanto ao aço, fez-se o uso daqueles utilizados para armaduras de vigas para concreto CA-60 com 5 mm de espessura para o sentido transversal e longitudinal. E, por fim, quanto ao processo produtivo do polímero reforçado com fibras de vidro, este foi realizado por meio da laminação manual de fibras de vidro e resina epóxi, onde o material que sofreu impregnação passou por corte em camadas de dimensões de 0,30m por 0,30m.

Os principais procedimentos que ocorreram ao longo do experimento correspondem à: 1) fabricação dos corpos de prova de concreto, sendo que para estes foram utilizadas fôrmas de concreto compensadas, onde nestas foram inseridas armaduras com o aço descrito e 2) preparação da interface adesiva entre o concreto a CRFV, sendo este um ponto crucial do procedimento, já que a plena aderência entre os elementos é um fator crucial. Para a realização destes, foram realizados o dimensionamento das vigas de concreto armado e do compósito polimérico estrutural.

O processo de montagem do experimento para a realização do ensaio, foi feito com base na NBR 12142 - Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos em que se tem como princípio a viga retangular com dois apoios e duas cargas colocadas de forma simétrica e concentrada de acordo com a Figura 1. Nesta também é possível observar os diagramas de esforços cortantes e de momento fletor. A Figura 14 mostra o equipamento localizado no Laboratório de Ensaio Mecânicos do Departamento de Materiais e Tecnologia da Universidade do Estado de São Paulo (UNESP), campus Guaratinguetá, utilizado para a realização dos ensaios.

Figura 14: À esquerda, organização experimental com esquema da viga biapoiada; à direita, maquinário utilizado para ensaios à tração.



Fonte: Andrade (2017)

A parcela experimental desta pesquisa, foi dividida em duas partes. A primeira consistiu na busca por estudos já realizados acerca deste tema e que apresente dados e características dos materiais com resultados satisfatórios dos processos realizados. As normas que nortearam a caracterização do desempenho das vigas são aquelas relativas ao uso do concreto armado e madeira, já que a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) não possui norma específica atinente ao tema.

A segunda parte englobou a captação, separação e a caracterização mineralógica e visual dos materiais. Nessa etapa, foram realizados ensaios específicos, com objetivo de constatar possíveis alterações na argamassa utilizando concentrações diferentes de produtos. Os procedimentos pertinentes foram realizados seguindo os parâmetros encontrados na bibliografia consultada.

4.1 VIGAS DE CONCRETO ARMADO SEM O REFORÇO CRFV

De acordo com os dados da Tabela 3, pode-se concluir que tensões de cálculo ficaram próximos dos resultados obtidos experimentalmente, ficando muito próximo da carga de ruptura das vigas.

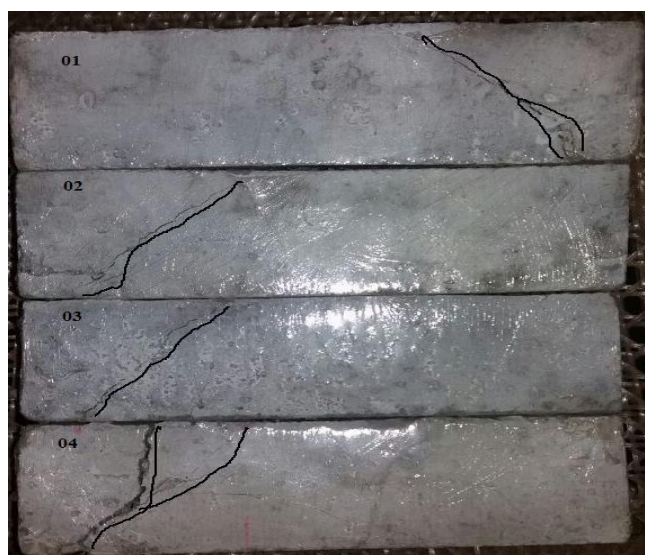
Tabela 3-Tensões máxima de cálculo e de ensaio vigas sem reforço.

Carga na Ruptura (N)	Resistencia a 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 (%)
8854,23	7,38	7,99	7,63
9705,85	8,09	8,76	7,65
10683,70	8,90	9,64	7,68
9585,14	7,99	8,65	7,63

Fonte: (Andrade,2017)

Também houve uma variação percentual média de 7.65 %. O surgimento da fissuração visível nas vigas está muito próximo da ruptura, afirmando o quão perigosos são os esforços de cisalhamento nas vigas de concreto armado. Nesta primeira etapa, todas as vigas apresentaram fissuras de cisalhamento conforme o esperado, a Figura 15 apresenta as vigas fissuradas.

Figura 15 - Ruptura CDP 01 a 04.



Fonte: (Andrade, 2017)

Com base na Figura 15, pode-se verificar que as vigas se comportaram de acordo com o esperado. O rompimento de todas as vigas ocorreu preponderantemente por esforço cortante com uma fissura de cisalhamento inclinada de aproximadamente

45° e a média da resistência à tração na flexão pela NBR foi de [8,09 N/mm²] como mostra a análise estatística descritiva tabela 4.

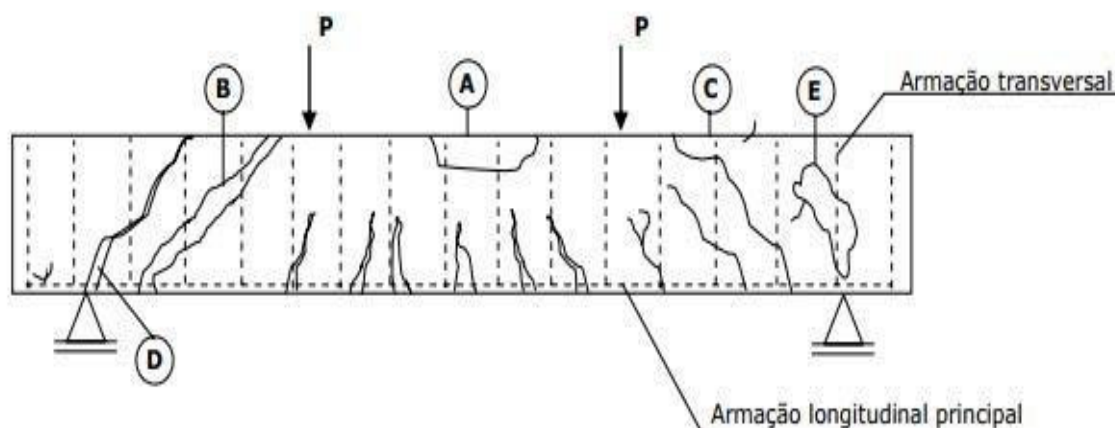
Tabela 4- Análise descritiva de vigas sem reforço

Dados	COLUNA 01	COLUNA 02	COLUNA 03	COLUNA 04
Média	9707,23	8,09	8,76	7,6475
Erro padrão	375,9444256	0,312276587	0,33904277	0,011814539
Mediana	9645,495	8,04	8,705	7,64
Modo	#N/D	#N/D	#N/D	7,63
Desvio padrão	751,8888511	0,624553174	0,67808554	0,023629078
Variância da amostra	565336,8445	0,390066667	0,4598	0,000558333
Curtose	1,50585452	1,5	1,5	0,435731789
Assimetria	0,48397874	0,472133813	0,478126294	1,193823774
Intervalo	1829,47	1,52	1,65	0,05
Mínimo	8854,23	7,38	7,99	7,63
Máximo	10683,7	8,9	9,64	7,68
Soma	38828,92	32,36	35,04	30,59
Contagem	4	4	4	4
Confiança (95,0%)	1196,422948	0,99380347	1,078985411	0,037599136

Fonte: (Autor, 2019)

Quanto forma que as vigas romperam, observa-se que todas as 4 vigas acima têm fissuração iniciando da região inferior da viga, próxima ao apoio 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 16 na sequência.

Figura 16-Os modos de ruptura



Fonte: Rocha et al. (2004) apud Sússekind, (1985)

As rupturas são do tipo B e D neste experimento. Rocha et al. (2004) demonstra que a região B foi ocasionada por ruptura devido à 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.

4.2 VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM O REFORÇO CRFV

De acordo com os dados da Tabela 5, pode-se concluir que tensões de cálculo ficaram próximas das obtidas experimentalmente, ficando muito próxima da carga de ruptura das vigas. Também com uma variação percentual média de 11.63 %.

Tabela 5: Tensões Máxima de Cálculo e de Ensaio Vigas com Reforço

Carga na Ruptura (N)	Resistencia a 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 (%)
17111,70	13,65	15,45	11,65
23424,40	18,69	21,15	11,63
20606,90	16,44	18,60	11,62
22971,80	18,33	20,74	11,62

Fonte: (ANDRADE, 2017)

O surgimento da fissuração visível nas vigas está muito próximo da ruptura, confirmando o quão perigosos são os esforços de cisalhamento nas vigas de concreto armado. Nesta primeira etapa todas as vigas apresentaram fissuras de cisalhamento conforme o esperado, a Figura 17 apresenta as vigas fissuradas.

Figura 17-CDPs 09 a 12 rompidos



Fonte: (Andrade, 2017)

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. É possível concluir que houve um descolamento do CRFV 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 16). 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.

Tabela 6- Análise descritiva de vigas com reforço CRFV

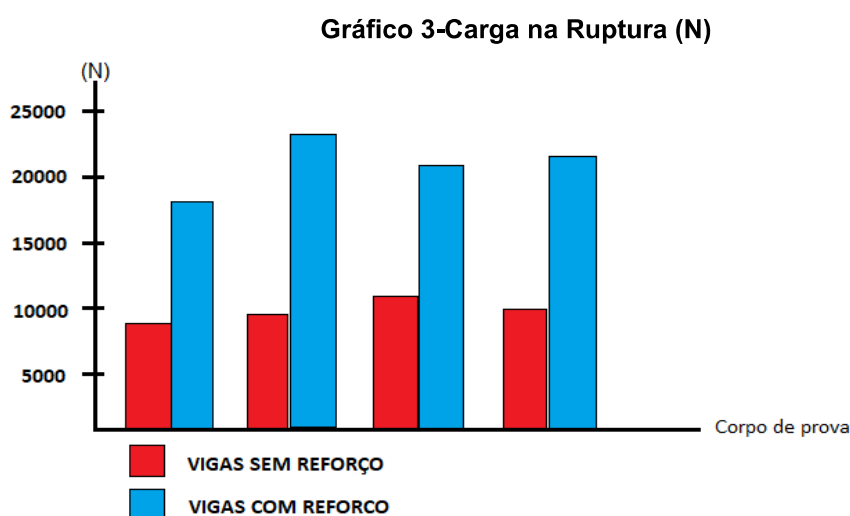
Dados	COLUNA 01	COLUNA 02	COLUNA 03	COLUNA 04
Média	21028,7	16,7775	18,985	11,63
Erro padrão	1444,409347	1,153367353	1,304214323	0,007071068
Mediana	21789,35	17,385	19,67	11,625
Modo	#N/D	#N/D	#N/D	11,62
Desvio padrão	2888,818694	2,306734705	2,608428646	0,014142136
Variância da amostra	8345273,447	5,321025	6,8039	0,0002
Curtose	0,027533832	0,024115791	0,010611275	1,5
Assimetria	-1,080883238	-1,080431211	-1,077258053	1,414213562
Intervalo	6312,7	5,04	5,7	0,03
Mínimo	17111,7	13,65	15,45	11,62
Máximo	23424,4	18,69	21,15	11,65
Soma	84114,8	67,11	75,94	46,52
Contagem	4	4	4	4
Confiança (95,0%)	4596,75519	3,67052967	4,150592053	0,022503294

Fonte: (Autor, 2019)

4.3 VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM REFORÇO DE FIBRAS DE VIDRO

A fissuração do concreto foi identificada em todas as amostras no nível de carga de cerca de 20 kN, sendo que o reforço feito de aço mantém uma tensão quase linear aumenta até ceder. Pode-se notar também que as deformações nas falhas das vigas que apresentam reforços são maiores que a deformação obtida nas barras de reforço de aço da viga experimental. Além disso, é importante ressaltar a

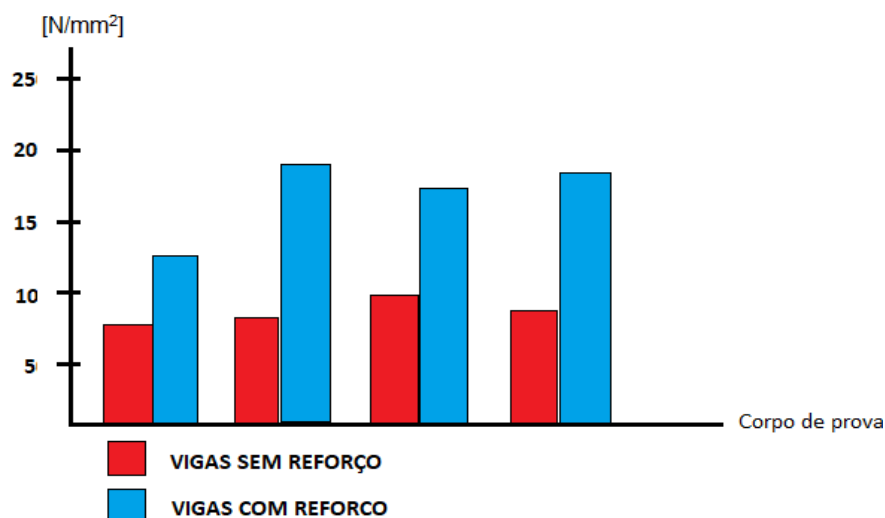
alta capacidade de deformação das vigas com reforços de CRFV vide o gráfico, que atingiram o limite de 10 mm / m de tensão - fornecido pela NBR 6118: 2014 para reforço de aço - antes da ocorrência de deformação por falha, o gráfico 3 mostra a carga de ruptura.



Fonte: (Autor, 2019)

Outro aspecto importante dos resultados dos testes experimentais é o padrão das trincas que aparecem nas vigas de concreto, sendo que naquelas reforçadas com aço há menos trincas do que as desenvolvidas nas vigas reforçadas com CRFV. Além disso, outro ponto a se ressaltar é que o número de barras é definitivamente uma variável a ser tomada em consideração no controle da fissuração do concreto, conforme Gráfico 4.

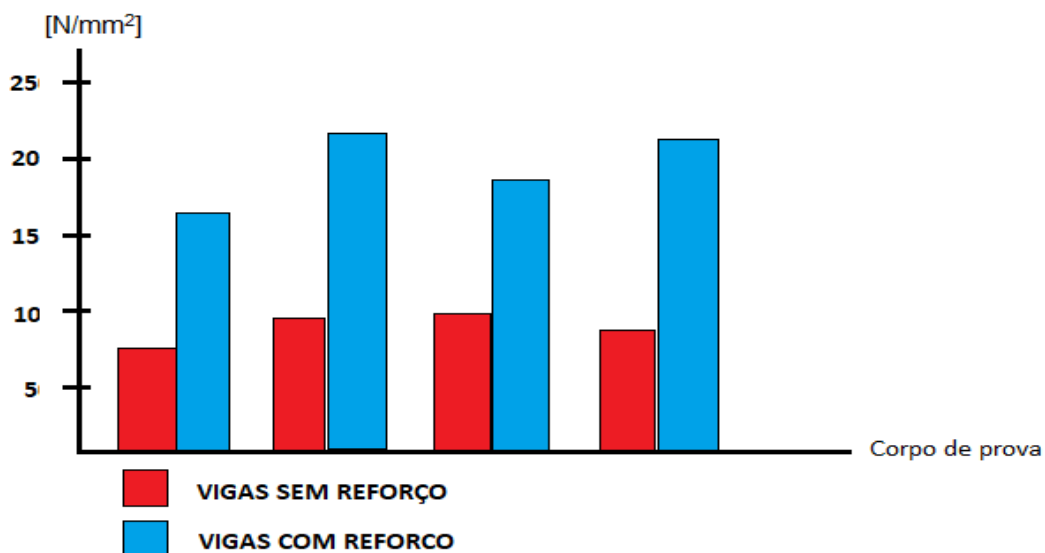
Gráfico 4-Resistencia à tração na flexão [N/mm²]



Fonte: (Autor, 2019)

Embora esteja claro que os procedimentos de projeto usados foram incapazes de garantir uma determinada capacidade de flexão, também é sabido que elementos reforçados com CRFV têm mais probabilidade de serem projetados para estado limite de manutenção em vez do estado limite final conforme Gráfico 5.

Gráfico 5-Tensão Máxima [N/mm²]



Fonte: (Autor, 2019)

Assim, afirma-se que os resultados mostram que o módulo de elasticidade relativamente baixo e a alta tensão de ruptura das vigas com reforços de fibras de vidro, sendo que estas são as principais variáveis que influenciam o comportamento à flexão do concreto reforçado. Além disso, a diferença no comportamento tensão-

deformação do aço elástico-plástico e no CRFV linear-elástico resulta em um comportamento geral diferente das vigas de concreto armado com reforço em comparação com as vigas de concreto armado sem a necessidade de reforço. Pode-se demonstrar que o controle da rigidez do reforço e a força de tensão interna máxima pode produzir uma flexão que altera o comportamento das vigas de concreto armado com CRFV.

5. CONCLUSÃO

O material permite flexibilidade considerável em termos de design. O peso leve do material permite transporte e instalação mais fáceis. Em contraste, o aço geralmente requer equipamentos especiais para erguer e instalar, o que torna o material com fibra de vidro mais viável do ponto de vista de um custo-benefício melhor.

Produtos de fibra de vidro têm um acabamento mais rígido, podendo ser adaptado para proporcionar maior dureza ou maior resiliência. Enquanto os materiais convencionais têm um custo de material inicial menor do que o plástico reforçado com fibra, o mesmo tem um custo de instalação e manutenção mais baixo, permitindo um custo de ciclo de vida menor em geral.

Fibra de vidro não se deformará permanentemente ou quebrará sob impacto como materiais de construção tradicionais, distribuindo a carga de impacto para evitar danos na superfície, mesmo em temperaturas baixas. A fibra de vidro resiste a uma ampla gama de produtos químicos e não é afetado pela umidade ou imersão na água, tornando-o ideal como cobertura protetora para superfícies onde possam ocorrer derrames químicos.

Também resiste a danos causados por insetos. Os demais materiais estão sujeitos a oxidação e corrosão. Eles exigem pintura ou galvanização para muitas aplicações. Até o concreto está sujeito a danos causados pela água. No entanto, a fibra de vidro consegue minimizar esses defeitos, dando a ela uma durabilidade compatível com as aplicações atualmente utilizadas no mercado.

A fibra oferece maior resistência à flexão e é frequentemente mais forte que os materiais convencionais. Existem muitas vantagens para o uso de reforços de fibra de vidro em vigas, a saber:

- I. Maior resistência e rigidez;
- II. Melhor eficiência estrutural e requisitos de tamanho, peso e custos de membros estruturais reduzidos sob certas condições;
- III. Permitir a melhoria de estruturas para cargas mais altas ou para restaurar a resistência original;

- IV. O comportamento de vigas reforçadas é mais uniforme que as não reforçadas; o que leva a melhorias adicionais nas propriedades do projeto.

REFERÊNCIAS

ALVES, R. E. Caracterização de fibras lignocelulósicas pré-tratadas por meio de técnicas espectroscópicas e microscópicas ópticas de alta resolução. 2011. 115p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

ANDRADE, Nathan Pereira de. Utilização de compósito de fibra de vidro/resina epóxi para reforço estrutural de vigas de concreto armado. 2017. 75 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/156777>. Acesso em: 04 out. 2019.

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.

ASTM D 3916, "Standard Test Method for Tensile Properties of Pultruded Glass-Fiber-Reinforced Plastic Rod", Vol. 08.02. ASTM Standards, 1996 Annual Book of ASTM Standards, ASTM, West Coshohocken, PA.

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, Projeto de Estruturas de Concreto (NBR 6118). 2014.

BANTHIA N. Fiber reinforced concrete Vancouver: University of British Columbia, 2009

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.

BEVITORI, A. B., G. Avaliação das propriedades e estrutura de fibras de rami e seus compósitos poliméricos. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro.

CALLISTER JR, W. D. Materials Science and Engineering: an introduction. 4 ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.

CALLISTER, W.D. *Materials Science and Engineering- 2n Introduction*, Jonh Wiley and Sons, Canada P445, 2000.

Catálogo Saint Gabain - Vetrotex. Disponível em: < <https://www.vetrotextextiles.com/> > Acesso em: 12 de maio de 2018.

Concreto flexão simples. Disponível em: <<https://www.feb.unes.br/pbasto/concreto1/FlexãoSimples.pdf>> Acesso em: 14 de dezembro de 2018

Construção e reformas. Disponível em: <<https://fotos.habitissimo.com.br/foto/>

Concreto com fibra de vidro Disponível em: <[https:// engenharia-construcao.cotanet.com.br/foto/](https://engenharia-construcao.cotanet.com.br/foto/)> Acesso em: 17 de dezembro de 2019

DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; ANTUNES JR, José Antônio Valle. *Design Science Research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia*. 1ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

DUMONT, J.M. *Polycarbonates. Techniques de l'ingénieur*, 2007.

GONÇALVES, R. M. Et al. *Segurança nas estruturas: teoria e exemplos*. São Carlos: SET/EESC/USP, 2005. BEBER, A. J. *Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas de doutorado*

HULL, D. *INTRODUCTION TO COMPOSITE MATERIALS*. Cambridge University (1995). 246p.

JAIGOBIND, A. G.; AMARAL, L.; JAISINGH, S. *Dossiê técnico de fabricação de peças em fibras de vidro - compósitos*. Instituto de Tecnologia do Paraná, 2007.

JUVANDES, L.; FIGUEIRAS, J.A. *Conceitos de dimensionamento e seguranças para projetos de reforço com sistemas de compósito de FRF*. In: *Atas do Encontro Nacional sobre Betão Estrutural BE 2000*, FEUP, Porto, 22-24 de novembro, pp. 413-422, 2000.

JUVANDES, Luiz Filipe Pereira; *Materiais Compósitos Reforçados com Fibra, FRP*. Portugal, 2002.

KUTZ, M. *Handbook of materials selection*. [s.l.]: Wiley, 2006.

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

MONTEIRO, S.N.; AQUINO, R.C.M.P.; LOPES, F.P.D.; CARVALHO, E.A.; D'ALMEIDA, J.R.M. *Comportamento mecânico e características estruturais de compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro*. *Revista Matéria*, v. 11, n. 3, p. 197-203, 2006.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia. Ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2006.

OTA, W. N.; Análise de compósitos de polipropileno e fibras de vidro utilizados pela indústria automotiva nacional. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia) - Universidade Federal do Paraná, PR, 2004.

PERUZZI, A. P. Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento Portland modificada com látex e adição de sílica ativa. São Carlos EESC-USP, 2002. Dissertação de mestrado.

PEREIRA, N. C. Caracterização de compósitos de resina poliéster, fibra de vidro e wollastonita moldados pelo processo RTM Light, 2012.

PIANCASTELLI, E.M.; CALIXTO, J.M.F. (1997). Dimensionamento de reforço à flexão, executado sob carga, de vigas de concreto armado: aplicabilidade dos critérios da NBR-6118. In: XXVIII JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, São Carlos, SP, Brasil, setembro 01-05, 1997.

PIVATTO, A. B.; Reforço Estrutural à flexão para vigas biapoiada de concreto Armado por chapas metálicas e Compósitos reforçado com fibras de carbono. 2014.126 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

Reforço-estrutural-de viga_1229921> Acesso em: 11 de maio de 2018.

REGIANI, A. M. Eletrólitos sólidos poliméricos à base de polissacarídeos: síntese e caracterização. Tese (Doutorado em Ciências na área de Físicoquímica) – Instituto de Química de São Carlos, São Paulo, 2000.

RIBEIRO, S. E. C. Análise da confiabilidade de vigas de concreto armado com plástico reforçado por fibras. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, 2009, 139 p.

SANTOS, A. M. Estudo de compósitos híbridos polipropileno / fibras de vidro para aplicações em engenharia. Dissertação de Engenharia Mecânica Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 2006.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. São Paulo: Pini, 1998. 255 p.

SCHWARTZ, M. M. Composite Materials handbook. New York: McGraw-Hill, 1984

SILVA, Gildásio Rodrigues. Manual de traços de concreto. São Paulo, Ed. Nobel, 1975.

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.

SUSSEKIND, José Carlos. Curso de concreto, vol. 2. **Porto Alegre, Editora Globo**, 1985.

VERGARA, Sylvia Constant. Projetos e relatórios de pesquisa em administração. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

VIDALES, L.T. Design para reciclagem: Importância a partir da análise de compósitos baseados em fibras de vidro. Trabalho de diplomação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2011.

WITT C. Fiber reinforced composite Toronto: University of Toronto, 2009 31

WAMBUA, P.; IVENS, J.; VERPOEST, I. *Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?* Elsevier Science, Belgium, 2003.

ZATTERA, A. J.; RISSON, P.; CARVALHO, G.A.; VIEIRA, S.L.; ZENI, M. Reuso de Resíduos de Laminados de Fibra de Vidro na Construção Civil. Departamento de Engenharia Química Centro de Ciências Exatas e Tecnologia – Universidade de Caxias do Sul, RS, 2000.