



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Leandro Alves Ramos

REFORÇO ESTRUTURAL COM UTILIZAÇÃO FRP EM
ESTRUTURAS EXISTENTES DE CONCRETO ARMADO

Dissertação de Mestrado em Reabilitação de Edifícios, no Ramo de
Reabilitação Estrutural, orientada pelo Professor Doutor Paulo Manuel
Mendes Pinheiro da Providência e Costa, apresentada ao Departamento de
Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de
Coimbra.

Março de 2023

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Leandro Alves Ramos

REFORÇO ESTRUTURAL COM UTILIZAÇÃO FRP EM ESTRUTURAS EXISTENTES DE CONCRETO ARMADO

STRUCTURAL REINFORCEMENT USING FRP IN EXISTING REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Dissertação de Mestrado de Reabilitação de Edifícios, com Especialização em Reabilitação Estrutural de Edifícios,
orientada pelo Professor Doutor Paulo Manuel Mendes Pinheiro da Providência e Costa.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Março de 2023



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer à Deus por todas as oportunidades, a São José o qual sou devoto e principalmente à Cristina Ramos minha querida e amada esposa, a minha maior incentivadora, que sempre me apoiou nos meus maiores sonhos e crescimento profissional que venho me aperfeiçoando a cada dia.

Gostaria de agradecer aos meus pais Hamilton e Marlene, ao meu sogro Gilson Cruz (In memoria) e a minha sogra Maria Gorete, eles, juntamente com minha esposa foram também um dos meus grandes incentivadores.

Infelizmente neste período atípico para todos nós, em virtude de uma pandemia mundial, acabamos perdendo meu sogro por complicações em decorrência da COVID-19, porém isso não interrompeu o meu sonho de estudar mais e de me qualificar para finalizar esse mestrado, precisei apenas adiar um pouco a sua conclusão.

Registro aqui um agradecimento especial à minha avó materna, Sra Maria Bardini, que faleceu em novembro de 2020 e que mesmo com seus 91 anos torcia e me incentiva a sempre buscar o melhor.

Ao meu orientador Professor Dr. Paulo Providência, que sempre me incentivou e me apoiou em diversos assuntos, desde o meu primeiro dia de aula.

Coincidência ou não, em nossa primeira aula, ele estava apresentando uma revista técnica de engenharia “Metálica nº 54 de junho de 2019” e rapidamente identifiquei se tratar de uma obra, que fiz parte da equipe técnica de execução. Obra essa, que foi de um grandioso projeto no Brasil. Neste dia, fiquei muito feliz pela “coincidência” e sai de lá com a certeza de que estava no local certo para aprimorar os meus conhecimentos técnicos em Engenharia.

Agradecer o Professor Dr. Hugo Rodrigues, com quem também troquei muitas ideias no decorrer das disciplinas que lecionava, tendo a oportunidade inclusive de fazer alguns ensaios in-loco para algumas medições sísmicas.

Gostaria também de agradecer todos aos meus novos amigos que fiz nesta Universidade e que vieram de diferentes países. Levarei comigo muitas boas lembranças das conversas que tínhamos no intervalo das aulas em frente à máquina de café e os almoços aos sábados que sempre foram muito divertidos. Também não poderia de deixar de lembrar dos meus amigos do fino, nos encontros às sextas-feiras após as aulas, mesmo em dias muito frios para jogar conversas fora e planejar o que queríamos fazer após a conclusão do curso. Hoje estamos longe fisicamente, mas unidos ao mesmo tempo, onde cada vem traçando a sua trajetória profissional no Brasil e em outros países.

À Empresa Módulo Engenharia, representado pelo Eng. Luís Carlos Montenegro que me incentivou desde o início quando apresentei o projeto a qual iria estudar e defender na minha dissertação do mestrado.

Finalizo o agradecimento à Universidade de Coimbra pela oportunidade em cursar meu mestrado nesta instituição de referência mundial. Sou extremamente grato e tenho muito orgulho em fazer parte como aluno.

Resumo

As estruturas de concreto armado ao passar dos anos apresentaram algum tipo de degradação ao longo da sua vida útil, que podem apresentar algumas falhas em decorrência: da má execução ou vícios construtivos, falta de manutenção, mudança de carregamentos e as inúmeras deficiências no desenvolvimento dos projetos. Onde se faz necessário um reforço na estrutura existente. Nos dias atuais temos vários tipos de reforços que podemos aplicar, todos com a finalidade de reabilitar a estrutura. No presente estudo de caso, vamos estudar a aplicação da Fibra de Carbono em uma estrutura de concreto armado, sistema FPR.

No caso do sistema FRP é um compósito que possui alta resistência e de rápida execução. No estudo de caso será apresentado por uma descrição dos locais onde receberam os reforços e dos materiais envolvidos no processo de execução. É uma técnica acessível e eficaz para uma estrutura de concreto armado, caso seja executado dentro do procedimento orientado por um especialista e respeitando todas as recomendações técnicas dos produtos a serem utilizados.

O estudo de caso será feito em uma edificação onde por muitos anos funcionava uma loja de departamentos, conhecida como loja de Comércio Varejista de Tecidos Esplanada Aldeota, localizada na cidade de Fortaleza – Ceará – Brasil. Após logor anos de funcionamento a mesma foi vendida e passou a se chamar espaço de treinamento de profissionais filiados ao Senac.

Nesta edificação foi acrescido na estrutura de concreto armado existente mais dois pavimentos para atender a nova demanda da edificação. Com a insuficiência de espaço físico para o desenvolver das novas atividades, houve a necessidade do aumento da área de trabalho. Como a capacidade de carga da estrutura existente de concreto armado não suportava as novas cargas adicionais, houve a necessidade de execução de reforço estrutural nas fundações, vigas, pilares e lajes.

O estudo de caso terá seu foco no reforço das vigas existentes na edificação antiga, com aplicação do sistema FRP.

Com a técnica de reforço estrutural e com a aplicação de fibra de carbono (FRP), colados nas extremidades das peças de concreto armado apresenta vantagens como a rápida execução que somada a características do sistema apresentando um alto modulo de elasticidade fazem o largo o seu uso.

Palavras-chaves: Reforço FRP. Vigas de concreto armado.

ABSTRACT

Reinforced concrete structures over the years have presented some type of degradation throughout their useful life, which may have some failures as a result of: poor execution or constructive defects, lack of maintenance, changes in loads and the numerous deficiencies in the development of projects. Where reinforcement of the existing structure is necessary. Nowadays we have several types of reinforcements that we can apply, all with the purpose of rehabilitating the structure. In this case study, we are going to study the application of Carbon Fiber in a reinforced concrete structure, FRP system.

In the case of the FRP system, it is a composite that has high resistance and fast execution. The case study will be presented by a description of the places where reinforcements were received and the materials involved in the execution process. It is an accessible and effective technique for a reinforced concrete structure, if it is carried out within the procedure guided by a specialist and respecting all the technical recommendations of the products to be used.

The case study will be done in a building where a department store operated for many years, known as the Esplanada Aldeota Fabric Retail Store, located in the city of Fortaleza - Ceará - Brazil. After several years of operation, it was sold and was renamed a training space for professionals affiliated with Senac.

In this building, two floors were added to the existing reinforced concrete structure to meet the new demand of the building. With the lack of physical space to develop the new activities, there was a need to increase the work area. As the load capacity of the existing reinforced concrete structure did not support the new additional loads, there was a need to carry out structural reinforcement in the foundations, beams, pillars and slabs.

The case study will focus on the reinforcement of existing beams in the old building, with the application of the FRP system.

With the technique of structural reinforcement and with the application of carbon fiber (FRP), glued to the ends of the pieces of reinforced concrete, it presents advantages such as the fast execution that, added to the characteristics of the system, presenting a high modulus of elasticity, make its use wide.

Keywords: FRP reinforcement. Reinforced concrete beams.

Índice

1. Introdução.....	15
1.2 Enquadramento.....	18
1.2.1. Histórico da Fibra de Carbono.....	18
1.2.2. Fabricação.....	19
1.2.3. Compósitos da Fibra de Carbono.....	23
1.2.4. Início da utilização Fibra da Carbono.....	24
1.2.5. Características da Fibra de Carbono.....	27
1.2.6. Vantagens da utilização da fibra de carbono.....	27
1.2.7. Desvantagens da utilização da fibra de carbono.....	28
1.2.8. Aplicação da fibra de carbono.....	30
1.3 Objetivos da pesquisa.....	33
1.3.1. Objetivo Geral.....	36
1.3.2. Objetivo Específico	36
1.4 Metodologia.....	35
1.4.1. Apresentação da dissertação.....	35
2 Revisão bibliográficas.....	37
2.1. Elemento do sistema FRP.....	38
2.2. Formas de comercialização FRP.....	39
2.3. Sistema Pré-fabricados laminados.....	41
2.4. Sistema curado in-loco.....	42
3 Histórico da reabilitação da edificação.....	43
3.1. Bloco de fundação.....	43
3.2. Concreto projetado.....	44
3.3. Reforço com a utilização de perfil metálico.....	45
3.4. Reforço com compósito em fibra de carbono.....	45
3.5 Descrição do processo de execução.....	46

3.5.1. Sequência do processo de execução do reforço com compósito em fibra de carbono FRP.....	47
3.6. Processo de aplicação do Viapol Carbon CFW 300BR.....	50
3.1. Restrições ao uso.....	50
3.2. Consumo de material.....	51
3.3. Embalagem comercial.....	51
3.4. Locais de aplicação.....	51
3.7 Projetos.....	52
3.1. Reforço das vigas do primeiro pavimento.....	52
3.2. Reforço das vigas do segundo pavimento.....	53
3.3. Reforço das vigas do terceiro pavimento.....	54
3.8 Ensaio.....	56
3.8.1. Procedimento do ensaio de arrancamento.....	56
3.9 Normas.....	59
4 Custo de execução.....	61
4.1. Áreas a serem recuperadas.....	61
4.2. Consumo de material.....	61
4.3. Dimensionamento de equipes de trabalho.....	62
4.4. Valor do investimento final.....	62
5 Conclusão e sugestões para trabalhos posteriores.....	63
5.1 Referência bibliográficas.....	65

Índice de figuras

Figura 1- Edificação anterior a reabilitação.....	15
Figura 2- Edificação após a reabilitação.....	16
Figura 3 – Localização da Edificação.....	16
Figura 4 – Imagem interna da edificação após a reabilitação.....	17
Figura 5 – Principais etapas do processo de obtenção da fibra de carbono.....	20
Figura 6a – Estrutura da Fibra de Carbono.....	22
Figura 6b– Uma das formas como a fibra pode ser trançada.....	22
Figura 7– Relação entre tensão e a deformação de diferentes componentes.....	23
Figura 8a– Imagem do viaduto de Santa Teresa.....	25
Figura 8b– Imagem do viaduto de Santa Teresa.....	25
Figura 9– Reforço Estrutural do Viaduto Santa Teresa com fibra de carbono.....	26
Figura 10– Reforço Estrutural do Viaduto Santo Amaro.....	26
Figura 11– Propriedades Mecânicas dos produtos de FRP.....	29
Figura 12– Materiais empregados na fabricação de uma aeronave.....	30

Figura 13– Representação Esquemática na coluna reforçada com fibra de carbono.....	30
Figura 14– Exemplo de pilar reforçado com fibra de carbono.....	31
Figura 15– Aplicações das mantas de compostos de epóxi com fibra de carbono.....	31
Figura 16– Exemplo de viga reforçada com fibra de carbono por esforço cortante.....	32
Figura 17– Reforço de laje a flexão.....	37
Figura 18– Emenda por transpasse e justa posição lateral.....	33
Figura 19– Materiais compósitos em fibra de carbono.....	38
Figura 20– Manta unidirecional.....	40
Figura 21– Manta bidirecional.....	40
Figura 22– Manta multidirecional.....	40
Figura 23– Laminas pré-fabricadas.....	41
Figura 24– Componentes do sistema pré-fabricado.....	41
Figura 25– Compósito de fibra de carbono.....	42
Figura 26– Componentes do sistema in loco.....	42
Figura 27– Estaca raiz.....	43
Figura 28– Arrasamento de estacas e nivelamento do fundo do bloco.....	44
Figura 29– Montagem da forma e armadura do bloco.....	44
Figura 30– Concreto projetado em vigas.....	44
Figura 31– Reforço da Laje com perfil metálico.....	45

Figura 32– Colagem da fibra de carbono.....	45
Figura 33– Regularização da superfície.....	46
Figura 34– Regularização da superfície.....	47
Figura 35– Preparação da estrutura (lixamento).....	47
Figura 36– Marcação dos locais onde serão aplicados os reforços.....	48
Figura 37– Corte da fibra de Carbono.....	48
Figura 38– Aplicação da primeira camada de saturante.....	48
Figura 39– Aplicação da fibra de carbono.....	49
Figura 40– Retirada de bolhas que possam existir sobre a camada da fibra.....	49
Figura 41– Aplicação da segunda camada de saturante.....	49
Figura 42– Característica técnica do fabricante.....	50
Figura 43– Restrições ao uso.....	51
Figura 44– Consumo	51
Figura 45– Embalagem.....	51
Figura 46– Equipamento	56
Figura 47– Corpos de prova.....	57
Figura 48– Corte dos corpos de prova.....	57
Figura 49– Máquina Zerada.....	57
Figura 50– Corpos de prova.....	58
Figura 51– Execução do ensaio.....	58

Figura 52– Resultado apurado.....	58
Figura 53– Quantidade de material utilizado.....	61
Figura 54– Consumo do material.....	61
Figura 55– Dimensionamento da equipe.....	62

1. Introdução

Com o crescimento do mercado imobiliário, houve a necessidade dos serviços de recuperação e de reforço em estrutura de concreto armado já existentes. O referente estudo, ocorrerá em uma edificação comercial construída na década de 1980. Inicialmente, a edificação funcionou com uma loja de Comércio Varejista de Tecidos, conhecida como Esplanada Aldeota, com sua razão social Abraão Otoch & Cia Ltda, onde operou por um período de 26 anos. Após este período, o edifício foi colocado à venda, sendo adquirido pelo SENAC – Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial. O SENAC é referência no Brasil em educação profissional.



Figuras 1. Edificação anterior a reabilitação - <https://www.google.com>

Anteriormente à revitalização, a edificação possuía apenas três pavimentos com cerca de 2640m². Após uma grande reabilitação em todas as áreas, desde a sua fundação, passando por diversos pilares, vigas e laje, a nova edificação recebeu um acréscimo de área de 1760m², totalizando agora uma área total de 4.400m².

Seus mais de 4000m², foram distribuídos em cinco pavimentos com mais de 30 ambientes pedagógicos que hoje formam modernos laboratórios de educação profissional e duas empresas-escola e uma cafeteria.



Figura 2. Edificação após a reabilitação - <https://www.revistaambientesc.com.br/2020/01/29/senac-reference>

A figura acima, demonstra a edificação a ser estudada e encontra-se localizada entre a Rua Desembargador Leite Albuquerque e a Avenida Desembargador Moreira 1301, na cidade de Fortaleza – CE, Brasil, conforme elucida o mapa abaixo.

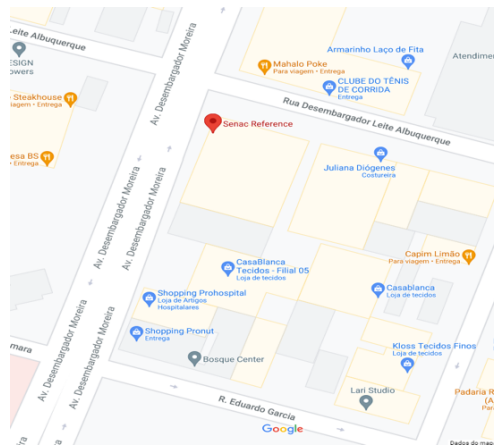


Figura 3. Localização da edificação - <https://www.google.com.br/maps>

Com a aquisição da edificação pelo Senac, foram contratados dois grandes escritórios, sendo um de Arquitetura, que ficou responsável por realizar todos os estudos e levantamentos para desenvolver os ambientes internos e externos, incluindo a nova fachada em pele de vidro, atendendo a necessidade do novo proprietário.

O segundo escritório contratado foi o de Engenharia, que realizou todas as avaliações do local, passando por um período de análise/estudo, para posteriormente elaborar os novos projetos necessários para a reabilitação.



Figuras 4. Imagem interna da edificação após a reabilitação - <https://www.revistaambientescce.com.br/2020/01/29/senac-referencia-voce-ainda-mais-referencia-no-que-faz/>

A avaliação da estrutura existente, foi baseada na consulta do projeto original, numa inspeção preliminar e num número reduzido de ensaios destrutivos e não destrutivos em toda a edificação.

A avaliação iniciou pela fundação e finalizou na laje de cobertura. Com base em todas as informações recolhidas, procedeu-se à verificação da segurança estrutural e concluiu-se ser necessário o reforço estrutural, tendo-se considerado diversas alternativas para o mesmo.

Com o estudo em mãos, foram consideradas as seguintes opções de reforço: encamisamento de pilares e vigas (concreto projetado) e reforço à flexão das vigas com chapas de aço ou com compósitos em fibra de carbono (FRP) colados na face inferior com resinas a base de epóxi.

No estudo de caso só se considerará o reforço à flexão das vigas por aplicação de compósitos em fibra de carbono (FRP), não modificando a altura das vigas, garantindo assim a segurança estrutural global, conforme projeto apresentado pelos engenheiros projetistas.

Devido a necessidade de utilização da edificação em um curto espaço de tempo, um dos principais fatores para tomada de decisão para utilização do sistema FRP, que acabou por ser determinante, foi a variável tempo de execução.

1.2 Enquadramento

1.2.1 Histórico da Fibra de Carbono

O surgimento intencionalmente de filamentos de fibra de carbono, ocorreu em 1878, com o norte americano Thomas Edison que assou fios de algodão e bambu em altas temperaturas, os carbonizou e os transformou em um fio de fibra de carbono.

Os fios de fibra de carbono, foram inicialmente utilizados para filamentos de lâmpadas incandescentes. Depois de mais de 80 anos da sua descoberta, com um excelente desempenho de suas propriedades mecânicas que foram demonstradas pelo crescimento de whiskers de grafite com uma resistência à tração de 2,0GPa e o seu módulo de rigidez de 800GPa (Lubin,1969),

Uma outra variação da fibra contínua comercial foi produzida nos anos de 1950, pela carbonização de rayon sintético para aplicações em mísseis em temperaturas elevadas. Entretanto, a conversão do rayon em fibra de carbono não se mostrou eficiente por causa do baixo rendimento de carbono, além de resultar em fibras com baixas propriedades mecânicas.

A expressão “fibra de carbono” geralmente se refere a uma variedade de produtos filamentosos compostos por mais de 90% de carbono e filamentos de 5 a 15 μm de diâmetro, produzidos pela pirólise da poliacrilonitrila (PAN), piche ou rayon (Lubin,1969) Também são normalmente mencionadas Fibras de carbono ou fibras de grafite, com elevado módulo de elasticidade com estrutura uma estrutura tridimensional podendo ser denominadas propriamente fibras de grafite.

Devido as fibras de carbono possuírem elevados valores de resistência à tração, módulo de elasticidade extremamente elevado e baixa massa específica, comparadas com outros materiais de engenharia, são utilizadas predominantemente em aplicações críticas envolvendo redução de massa. As fibras de carbono comercialmente disponíveis podem duplicar seus valores de módulo de elasticidade em relação às demais fibras existentes no mercado para utilização em reforços estruturais. Além da resistência e rigidez, as fibras de carbono possuem excelente resistência à fadiga, características de amortecimento de vibrações, resistência térmica e estabilidade dimensional. As fibras de

carbono possuem também boa resistência elétrica e térmica e são quimicamente inertes, exceto quanto à oxidação (Callister, 1997).

Em meados da década de 1960, no Japão e na Inglaterra foi desenvolvido um processo mais eficiente para a produção de fibras de carbono, utilizando-se poliácridonitrila (PAN). Desde então, o mesmo processo de fabricação vem sendo utilizado até os dias atuais, sendo mais de 90% da produção atual, de fibras de carbono comercial.

Como a poliácridonitrila possui uma cadeia linear e é um termoplástico, esta é fusível. Para reverter este problema, é necessário um tratamento de estabilização oxidativa, sendo realizado a temperaturas entre 200 e 300°C, variando de 1 a 24 h de tratamento (BUCKLEY, 1998). O produto estabilizado é denominado de PANOX (poliácridonitrila oxidada) (JENKINS, KAWAMURA, 1976).

1.2.2. Fabricação

A produção ocorre com poliácridonitrilo (PAN), um composto utilizado na indústria têxtil, substância semelhante ao alcatrão, produzida a partir do petróleo.

O processo de transformação em fibra de carbono, ocorre por aquecimento forte para remover outros elementos como: hidrogênio, oxigênio e nitrogênio. Esse processo é conhecido como pirólise, que é o alongamento das fibras e este procedimento ajuda a remover as irregularidades que podem enfraquecer o produto final.

O aquecimento ocorre em temperaturas de 1.000 °C com a ausência de oxigênio, em uma etapa conhecida como carbonização. Quando são necessárias fibras de alta resistência e de alta qualidade, adiciona-se uma etapa adicional, conhecida como grafitação.

Neste processo de grafitação, o material é aquecido entre 1.500 a 3.000 °C, para converter a formação dos átomos de carbono em uma estrutura semelhante à grafite. Isso também remove a maioria dos átomos de carbono não-residuais. O termo “fibra de carbono” é utilizado para material com um teor de carbono de pelo menos 90%,

onde o teor de carbono é superior a 99%. Esse material, às vezes, é chamado de fibra de grafite.

Após a etapa de estabilização, a fibra está preparada para suportar as temperaturas de carbonização (1000 - 1400°C), obtendo-se, assim, uma fibra de alta resistência. No momento em que ocorre a pirólise, começam a surgir subprodutos, devido a sua decomposição gasosa. A contração do material passa a ocorrer, aumentando assim, sua rigidez mecânica. Em alguns tipos de fibras de carbono são liberados nitrogênio, dióxido de carbono, vapor d'água, cianureto de hidrogênio e amônia. Para a obtenção de fibras com alto módulo, há a necessidade de um posterior tratamento térmico com temperaturas acima de 1800°C (grafitização), onde ocorre uma orientação mais acentuada das cadeias carbônicas (NOHARA, 1988; GUPTA, HARRISON, 1997). Um esquema de como o processo ocorre é mostrado na Figura 6.

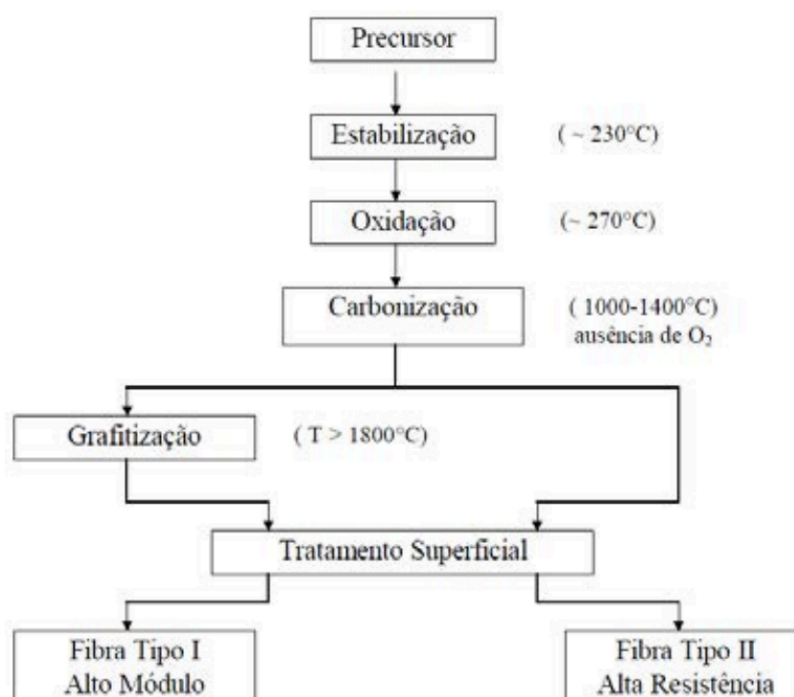


Figura 5. Principais etapas do processo de obtenção da fibra de carbono - THOMAS,1993; SAVAGE 1993

O processo de fabricação, vem se aprimorando ao decorrer das últimas décadas, melhorando cada vez mais a sua eficiência para aumentar a resistência das fibras, o seu módulo de elasticidade e aumentando a resistência à manipulação, diminuindo assim as futuras deformações e falhas (Wiebeck, 2005).

Durante a década de 1970, os reforços visavam à redução do custo na fabricação das fibras com a utilização do piche. As deficiências na resistência à compressão de fibras e o alto custo na purificação do líquido cristalino do piche precursor (Lubin, 1969) têm limitado a aceitação e o crescimento de uso das fibras de carbono de alto módulo. Pesquisas mais recentes na área, para desenvolverem as fibras de carbono de baixo custo, incluem o crescimento dos filamentos de carbono pela deposição de carbono de gases, tais como monóxido de carbono, metano, ou benzeno sobre um metal catalisador.

O material estudado neste trabalho é o compósito em fibra de carbono (FRP), um material com grande potencial de aplicações modernas, utilizado principalmente na constituição de materiais compósitos destinados à indústria aeronáutica. É um material composto por átomos de carbono, apresentando partes cristalinas e amorfas (Figuras 7A) e o tecido de FC como mostra a Figura 7B, no qual cada cabo de fibra possui milhares de monofilamentos. Esta fibra, possui elevadas resistências à tração e à compressão, elevada resistência à temperatura em atmosfera inerte, baixa molhabilidade (YUAN et al., 2012). Esta última característica é pouco interessante na produção de materiais compósitos, uma vez que, para tal emprego é necessário uma boa aderência entre fibra e matriz (CALLISTER, 2008).

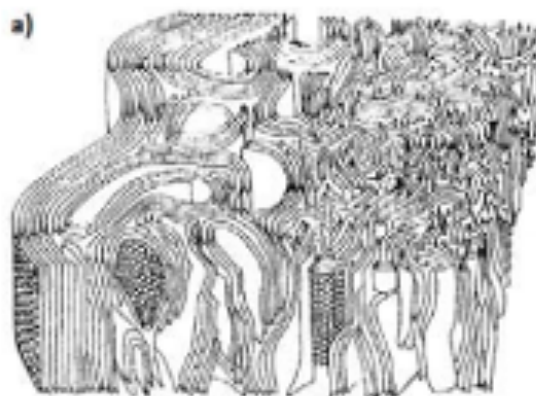


Figura 6. (A) Estrutura da fibra de carbono - CHUNG,2014

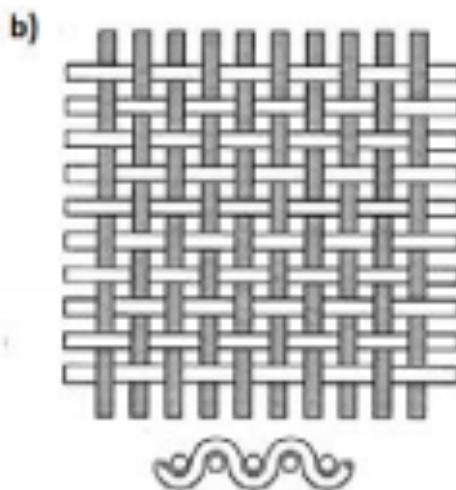


Figura 6. (B) Uma das formas de como a fibra pode ser trançada - CHUNG,2014

As fibras de carbono, são adequadas para a fabricação dos mais diversos materiais, tais como: tecidos, telas, micro-telas para a filtragem de líquidos e gases de grande propriedade corrosiva. As fibras são resistentes a altas temperaturas e servem especialmente como catalisadores utilizados em processos químicos (NETO, PARDINI, 2006).

A produção de fibras de carbono envolve a pirólise, ou seja, a decomposição pelo calor de algum material rico em átomos de carbono. Um exemplo deste material (precursor polimérico) é a poliacrilonitrila conhecida pela sigla "PAN". Para se produzir uma fibra carbônica de boa qualidade a partir de uma fibra precursora, é necessário um processo de tratamento térmico e condições controladas de tensão, atmosfera, tempo e, principalmente a temperatura.

As fibras de carbono sozinhas não são apropriadas para uso, porém, ao serem combinadas com matrizes poliméricas, estas resultam em um material com propriedades mecânicas excelentes. Este novo material é chamado de material compósito, também designado como materiais plásticos reforçados por fibra de carbono e estão, neste momento, em enfoque por parte das indústrias aeroespacial, automobilística e marítima (NETO, PARDINI, 2006).

1.2.3. Compósitos de Fibra de Carbono

São constituídos de uma matriz termoplástica ou matriz com cura térmica (termofixos) e fibras contínuas dispostas aleatoriamente ou em direções definidas. A resistência da matriz é menor que a das fibras, sendo que essas devem resistir às cargas para que se obtenha um maior ganho na resistência do compósito como um todo. A função da matriz é colar as fibras e transmitir as ações externas para as mesmas por meio de tensões tangenciais. (MACHADO, 2010).

Os compósitos de fibra mais utilizados atualmente são: os de vidro, aramida e de carbono. As propriedades físicas e mecânicas variam consideravelmente entre os diferentes tipos de compósitos e podem variar até mesmo para os mesmos materiais, dependendo do modo como foram concebidas (BEBER, 2003). A figura 7 mostra a relação entre tensão de tração e deformação e entre os diferentes compósitos de fibra mais comumente utilizados. A interpretação do gráfico, permite observar que a fibra de carbono apresenta a melhor relação entre tensão e deformação entre os compósitos comparados, justificando sua ampla utilização em diferentes aplicações.

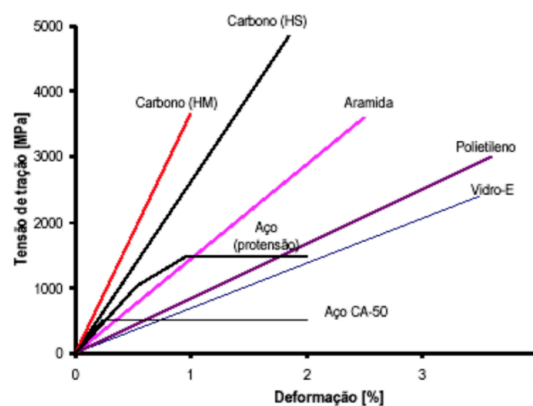


Figura 7. Relação entre tensão de tração e deformação de diferentes compósitos - Beber,2003

A fibra de carbono é um material baseado na força das ligações carbono-carbono, grafite e na leveza do átomo de carbono. As fibras de carbono acabam podendo ser caracterizada por uma combinação de baixo peso, alta resistência e grande rigidez.

Seu alto módulo de elasticidade e alta resistência dependem do grau de orientação das fibras, ou seja, do quanto os seus eixos são paralelos. As fibras têm diâmetros entre 0,07 e 0,10 milímetros, podendo ser longas quando contínuas ou curtas quando fios cortados. A relação entre comprimento e diâmetro médio das fibras curtas é chamada de fator de tamanho. As propriedades de um compósito com fibras curtas são muito dependentes dessa relação, sendo a resistência mecânica do compósito maior para maiores fatores de tamanho.

1.2.4. Início da Utilização da Fibra de Carbono

A fibra de carbono começou a ser utilizada na engenharia civil pelos japoneses, buscando alternativas estruturais para minimizar os prejuízos e mortes causados pelos desastres naturais, que afetam constantemente o continente asiático. Sua utilização teve início no distrito de Kobe, Japão, em 1995, após um grande abalo sísmico demandar uma rápida execução de reforços estruturais em construções da região (SOUZA & RIPPER, 2009).

Segundo Machado (2002), no Brasil, a primeira obra com a utilização de polímero reforçado com fibra (FRP) foi o viaduto de Santa Teresa, localizado em Belo Horizonte – MG, no ano de 1998. O viaduto tombado pelo Patrimônio Histórico e Cultural do Estado de Minas Gerais tem uma extensão de 400 m e com largura de 12,5 m e foi construído em 1928 e precisou passar por um reforço para atender as novas demandas de carga (classe 45 tf), mas não poderia ter suas dimensões alteradas.

Com o crescimento da cidade e para atender a nova demanda de tráfego diário de carros e caminhões, foi utilizada a norma Brasileira NBR 7188, que é responsável pelo dimensionamento de pontes, viadutos e passarelas que recebem o nome de trens-tipo que são definidas por três classes de pontes em função do peso dos caminhões que por elas trafegam: Classe 45 (450 kN - 45 tf), Classe 30 (300 kN - 30 tf) e a Classe 12 (120 kN - 12 tf) de peso total.

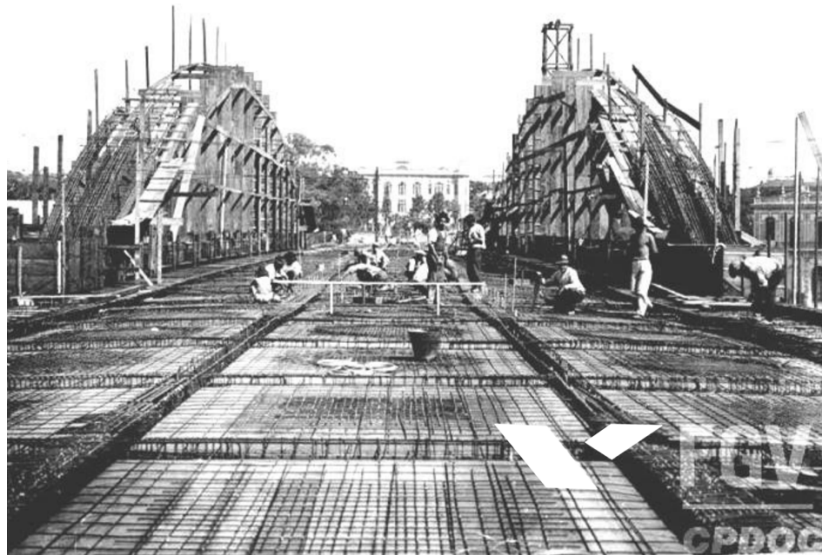


Figura 8A. Imagem da construção do viaduto Santa Teresa - FGV

1928 - VIADUTO SANTA TERESA – BELO HORIZONTE

sobre a E.F. Central do Brasil

LOCALIZAÇÃO = 19 55 10.35 S 43 56 1.50 W

GAZETA DE NOTÍCIAS - 15 SETEMBRO 1928

Uma das primeiras pontes calculadas e detalhadas por Emilio Baumgart

O maior viaducto de cimento armado



Viaducto de Belo Horizonte, executado de comum acordo entre a Central e a Prefeitura daquela capital

Ligação do bairro da Floresta à capital mineira - Vão de 56 metros = 17 x 3,3m

Figura 8B. Imagem da construção do viaduto Santa Teresa - FGV

Em virtude de todas as limitações existente na edificação, a melhor solução e mais adequada para receber as novas cargas foi a utilização de compósitos em fibra de carbono (FRP), que garantiu o aumento da capacidade de carga sem praticamente alterar suas dimensões e características estéticas originais. Com utilização de 3850 m² de fibra

de carbono em sua atual estrutura, teve o aumento na sua capacidade de carga de 18tf para 45 tf. (Construção, obras & Infraestrutura, 2003)



Figura 9. Reforço estrutural do viaduto Santa Tereza com utilização de compósitos em fibra de carbono - Machado (2007,p.80)

O viaduto Santo Amaro, localizado na zona Sul de São Paulo, foi construído em 1969, com cerca de 280 m de extensão e com 11 m de largura. Devido ao aumento no tamanho dos veículos, o seu espaço passou a não ser suficiente para caminhões e ônibus que passavam e que acabavam raspando o teto constantemente na construção. Os impactos provocaram problemas como infiltração e corrosão nas estruturas metálicas, criando assim, a necessidade de reforço.



Figura 10. Reforço estrutural do viaduto Santo Amaro com utilização de compósitos em fibra de carbono - Planoengenharia

Devido ao grande fluxo de veículos no local e necessidade de serviços de recuperação e de reforços nas estruturas de concreto armado já existentes, foram estudadas algumas técnicas de recuperação estrutural e a solução estrutural mais viável encontrada e de rápida execução, além de financeiramente viável, foi a utilização de compósitos em fibra de carbono (FRP).

1.2.5. Características da Fibra de Carbono

Os polímeros reforçados com fibras, chamados de Fiber Reinforced Polymers ou sistema FRP, são materiais constituídos por uma matriz polimérica reforçada e por fibras longas de alta resistência. Este sistema oferece aos engenheiros, realizarem reforços estruturais de forma mais assertiva, pois possui baixo peso, imunidade à corrosão, possibilidade de utilização em grandes vãos e uma excelente resistência mecânica e rigidez.

Sua aplicação ocorre em zonas tracionadas com a aplicação de adesivos com base epóxi. O adesivo, tem como objetivo prover as transferências de esforços entre a superfície de concreto e o material compósito.

As principais funções da utilização do adesivo com base epóxi é unir as fibras, distribuição das cargas, proteger as fibras da abrasão, umidade, oxidação e de agentes agressivos. (Triantafilou, 1998)

1.2.6. Vantagens da Utilização da Fibra de Carbono

Uma das principais vantagens para a utilização da fibra de carbono, é que estas proporcionam o aumento da capacidade de resistência à flexão e da força cortante em lajes e vigas. De acordo com Callister Júnior (2008) e Batista *et al.* (2017), as principais vantagens em se utilizar fibras de carbono são:

- Possui uma alta resistência mecânica e alta rigidez: A fibra de carbono por si só já é um material de alta resistência devido a suas propriedades poliméricas, isto proporciona segurança e durabilidade nas construções na qual o material é aplicado (REFORÇO, 2020).
- Adequado comportamento à fadiga;
- Elevada resistência a diversos tipos de agentes químicos;
- Por se tratar de um produto inerte, não são afetados pela corrosão;

- Estabilidade térmica e reológica;
- Extrema leveza devido ao baixo peso específico do sistema (da ordem de $1,6\text{g/cm}^3$ a $1,9\text{g/cm}^3$, cerca de 5 vezes menor do que o do aço estrutural) e por ser tão leve, pode chegar até ao ponto de não se considerar o seu peso próprio nos reforços.

Na contramão do reforço tradicional que faz utilização tradicional de chapas de aço, para Cunha *et al.* (2015), as vantagens da técnica de reforço com fibras de carbono, destaca-se a alta resistência e a alta rigidez do material, o que possibilita a utilização de reforço com baixa espessura e baixo peso. Portanto, gera um pequeno acréscimo de carga permanente.

Os autores supramencionados salientam que a adaptabilidade das mantas de fibras de carbono se dá pela sua alta flexibilidade, que influencia também no processo de execução, requerendo pouca mão de obra. Além disto, os autores ressaltam que esse tipo de manta precisa de pouca manutenção, pois possui alta resistência à fenômenos externos, além de excelente durabilidade.

A redução do tempo de obra é uma outra vantagem que o reforço com fibras de carbono oferece, desta forma, o tempo requerido para finalizar o processo de reforço estrutural é reduzido em comparação aos demais procedimentos convencionais. (REFORÇO, 2020).

1.2.7. Desvantagens da Utilização da Fibra de Carbono

Como a utilização do uso da fibra de carbono como reforço estrutural, apresenta baixa resistência ao fogo extremo, há necessidade de revestimento com materiais antichamas. Estes materiais possuem um custo elevado, uma vez que os mesmos em sua maioria, são importados.

Devemos tomar todos os cuidados para que essa desvantagem seja reduzida. “A curva comportamental desses compósitos até a ruptura é linear, chegando a

tensões últimas de 3500 MPa e deformações da ordem de 1,5%”. (SOUZA; RIPPER, 1998 apud ADORNO; DIAS; SILVEIRA, 2015).

Analisando todas as vantagens e desvantagens, nos deparamos com mais propriedades dos compósitos de fibra de carbono, que não podemos deixar de citar. (CHUNG, 2014):

- Baixa massa específica (40% menor do que a do alumínio);
- Alta resistência (tão alto quanto a dos aços de alta resistência);
- Elevada rigidez (mais elevado do que a do titânio, mesmo com menor densidade);
- Boa resistência à fadiga (uma vida praticamente ilimitada sob a carga de fadiga);
- Baixo coeficiente de fricção e boa resistência ao desgaste;
- Tenaz e tolerante a danos;
- Alta resistência química (resistência química controlada pela matriz);
- Resistente à corrosão;
- Boa estabilidade dimensional;
- Capacidade de amortecimento de vibrações (excelente amortecimento estrutural quando comparado com metais);
- Baixa resistividade elétrica;
- Elevada interferência eletromagnética (blindagem);
- Elevada condutibilidade térmica;
- Baixa resistência ao cisalhamento interlaminar.

Fibra	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação específica última na tração (%)
Carbono:			
Alta resistência	215-235	3500 - 4800	1.4 - 2.0
Ultra alta resistência	215-235	3500 - 6000	1.5 - 2.3
Alto módulo	350-500	2500 - 3100	0.5 - 0.9
Ultra alto módulo	500-700	2100 - 2400	0.2 - 0.4

Figura 11. Propriedades mecânicas dos produtos de FRP - Fib Bulletin 14, (2001)

Na indústria da construção civil, a fibra de carbono utilizada tem uma resistência superior a 4000 MPa, sendo assim dez vezes maior do que o aço CA-60 (de acordo com a NBR brasileira), utilizado como reforço estrutural e duas vezes mais resistente do que o aço utilizado na protensão. (Nanni, 1999)

1.2.8. Aplicação da Fibra de Carbono

Na indústria aeroespacial, a fibra de carbono já vem sendo utilizada há mais de 25 anos, onde as exigências são ter pouco peso e elevada resistência a tração, além de propriedades anticorrosivas.

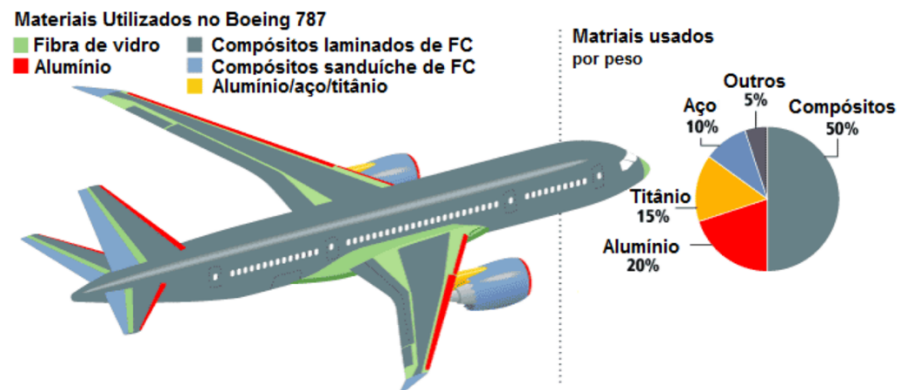


Figura 12. Materiais empregados na fabricação de uma aeronave - Hale, 2006

Na construção civil, o compósito em fibra de carbono (FPR) vem sendo utilizado para a reforços estruturais em estrutura já existente.

PILARES: Quando temos a necessidade de se reforçar pilares de concreto, é possível utilizar tecidos de fibra de carbono e matriz epóxi para envolver os pilares restringindo sua expansão lateral, mantendo assim, sua integridade, minimizando a formação de fissuras, elevando a ductilidade e sua resistência. (LAU & ZHOU, 2001 e SUDANO, 2005 apud THOMÉ, 2017)

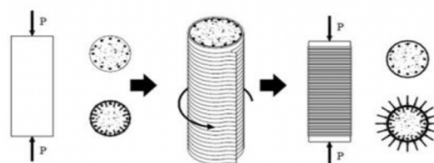


Figura 13. Representação esquemática de coluna reforçada com fibra de carbono - Adaptado de Viapol por Thomé (2017)

O confinamento de pilar deve estar orientado transversalmente ao eixo longitudinal do elemento, de modo que as fibras atuem como estribos (Figura 15), assim as jaquetas de composto de carbono permanecerão sem tensão até que haja dilatação e fendilhamento. (MACHADO, 2015 apud THOMÉ, 2017)

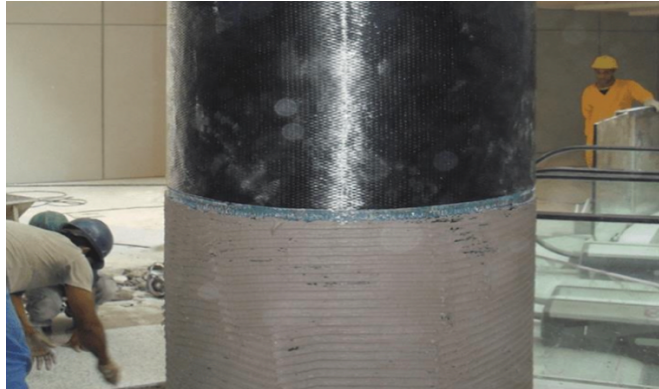


Figura 14. Exemplo de coluna reforçada com fibra de carbono - Leal e Fagundes (2020)

VIGAS: Este tipo de reforço pode ser visto como o mais simples de se calcular, porém não se deve descuidar de sua aplicação. Neste, as fibras são dispostas transversalmente ao eixo da viga atuando como novos estribos, elevando assim a resistência aos esforços cortantes atuantes (THOMÉ, 2017).

Temos três configurações de reforço abaixo e como demonstra a figura (A) é extremamente complicado de se executar, já que seria necessário romper parte da laje, gerando um grande prejuízo. Na situação (C), a manta somente deverá ser aplicada caso não seja possível outra configuração, devido à impossibilidade de acesso às faces da viga. A configuração ideal será a (B), pois envolverá a viga de forma eficiente, não acarretando prejuízos. (SILVA, CRUZ e AREDES, 2019)

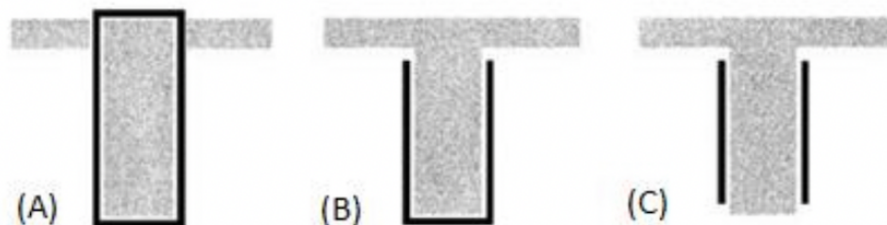


Figura 15. Aplicações das mantas compósitos de epóxi com fibra de carbono como reforço ao esforço - ACI 440 2R-08 (2008) por Thomé (2017)

Usualmente, costuma-se em projeto, definir o espaçamento entre as fibras (Figura 17), de modo a economizar tempo com detalhamento na hora da instalação do sistema FRP. (THOMÉ, 2017).

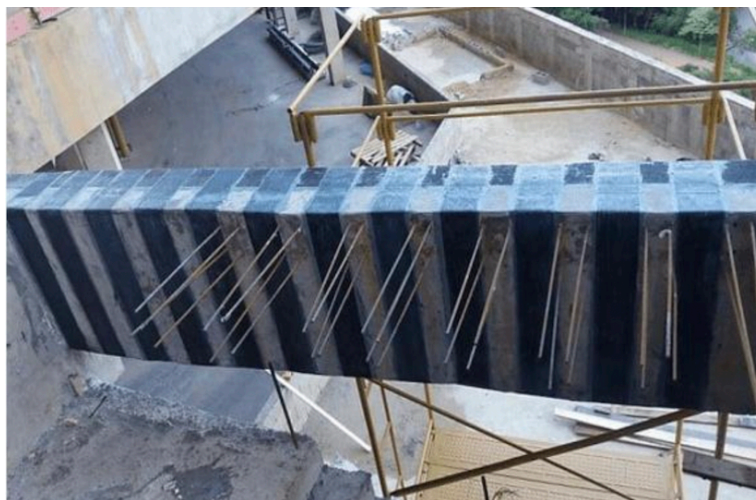


Figura 16. Exemplo de viga reforçada com fibra de carbono por esforço cortante - Leal e Fagundes (2020)

LAJES: Como mencionado por Oliveira et al. (2014), os reforços com compósitos de fibra de carbono também podem ser aplicados em lajes para elevar a resistência perante os esforços de flexão gerados pelos carregamentos na estrutura.

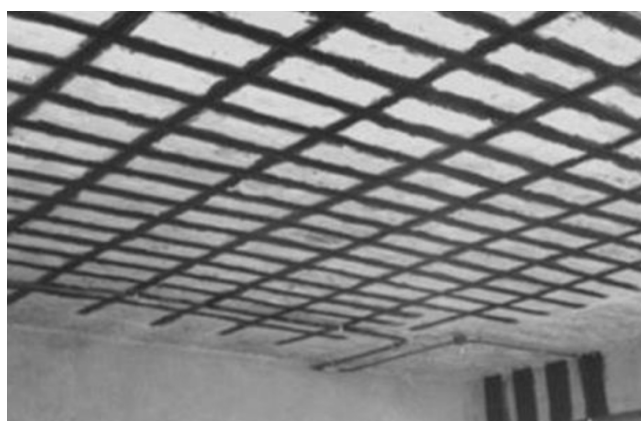


Figura 17. Reforço de laje a flexão - Adaptado de Machado (2013) por Oliveira et al. (2014)

Com relação às emendas de lâminas de compósitos de fibra de carbono, muitas vezes são necessárias a depender da dimensão e geometria das peças para então facilitar aplicação na estrutura. O indicado, é que a lâmina a ser sobreposta, transpasse um comprimento mínimo de 50mm longitudinalmente, porém a experiência dos profissionais da área tem

demonstrado que um valor maior é indicado para que se evitem erros de posicionamento e para compensar a ondulação da superfície do concreto onde será aplicado (VIAPOL apud THOMÉ, 2017)



Figura 18. Emenda por transpasse (A) e justaposição lateral (B) - Thomé (2017)

1.3. Objetivos da Pesquisa

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo de caso, foi analisar a mudança na funcionabilidade da estrutura atual da edificação ora estudada. A mudança se fez necessária, pois havia insuficiência de espaço físico, falta de capacidade da estrutura de concreto armado existente para suportar as novas cargas adicionais, a necessidade do acréscimo de mais dois pavimentos e por fim a necessidade de execução de reforços estruturais nas fundações, vigas, pilares e lajes já existentes.

A pesquisa foi realizada analisando as informações existentes referentes a edificação, em alguns projetos existentes da época de sua construção. Além do estudo dos projetos, houve uma fase preliminar onde foram feitas uma vistoria no local para verificar o estado atual da estrutura existente. Nesta etapa, foram realizados alguns ensaios, não destrutivos e destrutivos com a extração de corpos de prova.

1.3.2 Objetivo Específico

O objetivo da presente pesquisa é analisar a solução do reforço estrutural com a utilização de compósitos em fibra de carbono (sistema FRP) de uma estrutura em concreto armado e construída na década de 1980.

A análise da estrutura preexistente, inclui um componente numérico, bem como a consulta dos resultados dos ensaios executados “in loco”. A análise destes resultados e a verificação do comportamento estrutural do concreto armado existente à flexão e a consideração dos custos envolvidos no processo, levaram os projetistas junto ao proprietário da obra, optar por três tipos de recuperação estrutural:

1. Concreto projetado;
2. Reforço em laje com perfis metálicos;
3. Utilização de compósitos em fibra de carbono “sistema FRP”.

O foco de estudo neste trabalho, será o reforço com compósitos em fibra de carbono FRP, que foi aplicado na atual estrutura para receber as novas cargas.

Com o aumento da capacidade de carga atual, o processo exigiu muito cuidado no desenvolvimento dos detalhes que foram adotados para a utilização do sistema de amarração do compósito, com a utilização do sistema FPR. (Ripper e Souza, 1998).

Desta forma, será estudada a eficácia da utilização do sistema em fibra de carbono em vigas à flexão de concreto armado, incluindo a transferência de tensões entre o laminado e o concreto em seções interiores e na zona de ancoragem, analisando assim, comportamento das vigas e lajes reforçadas submetidas as novas cargas projetadas.

1.4. Metodologia

A metodologia aplicada neste estudo de caso, foi a de coleta dos dados in-loco da estrutura atual, o acompanhamento de testes e materiais disponíveis da referida edificação e busca por conceitos associados ao tema da pesquisa, baseando-se também em referências bibliográficas disponíveis.

Foram realizados levantamentos bibliográficos referentes às técnicas de utilização dos compósitos em fibra de carbono FRP, reforço estrutural de peças de concreto armado tanto em artigos científicos como em trabalhos acadêmicos e livros, possibilitando um desenvolvimento teórico do trabalho.

Após uma fundamentação teórica com base nessas pesquisas, foram realizados um estudo de caso para a análise prática do problema em questão. Sendo assim, foram realizados os estudos com base em análise de projetos, custos e prazo de execução, comparativos de técnicas, além de outros impactos na obra associados a utilização do sistema FRP.

1.4.1 Apresentação da Dissertação

Este trabalho está dividido em 5 capítulos, descrevendo a preparação do local que recebeu o reforço com FRP, o desenvolvimento e os resultados obtidos após a aplicação do sistema.

No Capítulo 1, será apresentado introdução, enquadramento, objetivos da pesquisa e metodologia;

No Capítulo 2, Revisão bibliográfica

No Capítulo 3, Histórico da reabilitação da edificação

No Capítulo 4, Descrição do processo de execução, projetos, ensaios, normas e custo de execução;

No Capítulo 5: Conclusão e sugestões para trabalhos posteriores: se apresenta as principais conclusões da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros e as referências bibliográficas

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O concreto desde a sua descoberta como um simples aglomerante e hoje um produto de grande produção mundial, tornar-se um material estrutural e fundamental em todos as construções mundo a fora.

Três razões básicas tornaram o concreto armado uma solução viável, durável e de enorme confiabilidade: a aderência entre o concreto e o aço que assegura o trabalho em conjunto, os coeficientes de dilatação térmica praticamente iguais dos dois materiais e a proteção de oxidação do aço da armadura fornecida pelo concreto que garante a durabilidade da estrutura. (Sussekind, 1987).

A vida útil, é o período de tempo em que um edifício e seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos considerando a periodicidade e correta execução dos processos de manutenção especificados no respectivo Manual de Uso, Operação e Manutenção. (NBR 15575-ABNT, 2013).

A fundamental importância é que uma estrutura cumpra de forma adequada a função para qual foi projetada, durante o tempo que seus projetistas definiram como vida útil. (Reyes, 2003)

O sistema com reforço em compósitos em fibra de carbono FRP e disponíveis atualmente no mercado, incluindo resinas, imprimadores, regularizadores de superfície, saturantes, adesivos e fibras vêm sendo desenvolvido por membros da área de reforço estrutural de concreto baseado em ensaios de materiais e estruturas. (ACI 440.2R – 2008)

Uma das principais características da fibra (FRP) é seu baixo peso, além, claro, como já citado, ser um material não corrosivo, possuir uma alta resistência à tração, ter a possibilidade de ser moldado conforme a geometria da estrutura e possuir a facilidade de ser aplicado em áreas de difícil acesso para as técnicas convencionais, tornando crescente o interesse por esse tipo de material em reforço estrutural. (ACI 440.2R – 2002)

Os compósitos de polímeros reforçados com fibras, Fiber Reinforced Polymers (FRP), consistem em um grande número de fibras pequenas, contínuas, direcionadas, não metálicas e com características avançadas, agrupadas em uma matriz de resina. (Bulletin 14 FIB – 2001)

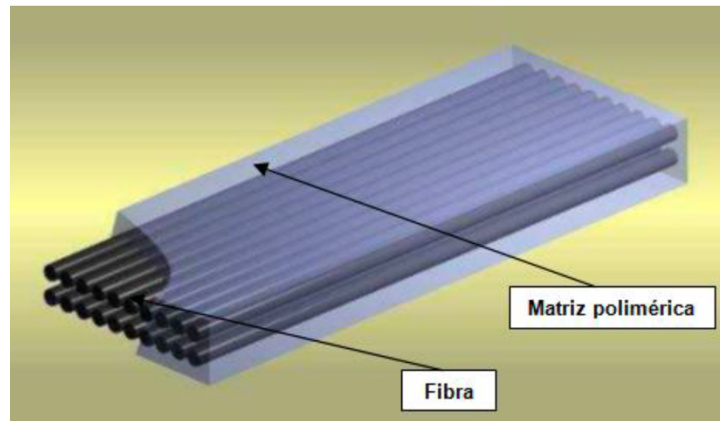


Figura 19. Materiais compósitos em fibras de carbono - Curty (2009)

Os compósitos poliméricos por serem muito resistentes, são rígidos e leves. Geralmente, as fibras representam cerca de 50% a 70% da porcentagem de volume do FRP. Isso justifica a importância que têm as propriedades das fibras na determinação das propriedades mecânicas de um FRP. (Bulletin 14 FIB – 2007)

2.1. Elementos do Sistema FRP

A efetiva ação do compósito estruturado no aumento da capacidade de carga da estrutura existente, se faz necessária para garantir a transferência de solicitações de carga entre o concreto e o reforço. Desta forma, requer uma atenção especial na preparação da superfície do substrato de modo a proporcionar a sua melhor aderência. (Rodrigues 2009).

As principais características que a resina utilizada no sistema FRP devem possuir são:

- Compatibilidade com a adesão ao substrato de concreto;
- Adesão ao compósito FRP;

- Resistência aos efeitos ambientais (Umidade, água salgada, temperaturas extremas, etc);
- Capacidade de preenchimento, trabalhabilidade e tempo de utilização.

Tudo isso consiste com a aplicação no desenvolvimento das propriedades mecânicas apropriadas para o sistema FRP. (ACI 440.2R – 2002)

Resinas utilizadas no sistema FRP segundo ACI 440.2R – 2008

- Primer: É uma resina que tem como função penetrar na superfície do concreto, melhorando a sua capacidade de aderência da resina saturante ou adesivo;
- Resina de regularização: É bastante utilizada para o preenchimento de vazios ou correção de imperfeições superficiais do substrato proporcionando uma superfície lisa para a melhor colagem do reforço;
- Adesivos: Utilizados basicamente para colar laminados pré-fabricados de FRP ou sistemas de inserção de laminados no substrato de concreto, estabelecendo um meio de transferência de tensões entre o concreto e o compósito.
- Revestimentos protetores: Tem como sua principal função proteger a superfície do compósito contra os efeitos danosos produzidos pelo meio ambiente onde a estrutura se encontra.

2.2. Formas de comercialização FRP

A comercialização do sistema FRP segue alguns parâmetros com sua base de configuração geométrica espacial e a disposição das fibras no produto, e se classificam em três grandes grupos:

- Unidirecional (1D)



Figura 20. Manta Unidirecional - Google

- Bidirecional (2D)

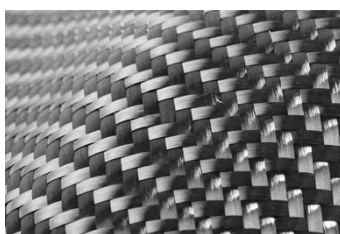


Figura 21. Manta Bidirecional - Google

- Multidirecional (3D)

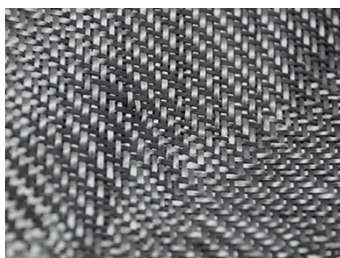


Figura 22. Manta Multidirecional - Google

As características mecânicas do FRP deste sistema baseiam-se na área da seção transversal das fibras secas, que é o controle de qualidade de fibras aplicadas no processo de construção desse produto. A seção transversal do sistema FRP obtém-se pelo produto da área de fibras da manta/tecido em seco (espessura equivalente a sua largura) garantida pelo fabricante, vezes o número de camadas de manta/tecido utilizadas. O módulo de elasticidade e a resistência à tração axial são as propriedades correspondentes às fibras utilizadas.

Serão apresentadas abaixo duas formas de utilização do compósito em fibra de carbono:

- Sistema Pré-Fabricados Laminados
- Sistema curados in-loco

2.3. Sistema Pré-Fabricados Laminados.

Resultam da impregnação de um conjunto de camadas de fibras contínuas por uma resina termorrígida, consolidadas por um processo de pultrusão com controle da espessura e largura do compósito. Sua orientação unidirecional das fibras ao laminado a maximização resistência e rigidez na direção longitudinal (Juvandes 1999).



Figura 23. Lâminas pré-fabricadas – Clever solutinos

O compósito pronto para aplicação à uma estrutura de concreto deve ser aderido por meio de um adesivo compatível com a matriz polimérica do compósito. Os laminados pré-fabricados por serem rígidos são mais empregados em superfícies planas. (Garcez 2007).



Figura 24. Componentes do sistema Pré-Fabricado – Juvandes (2009)

2.4. Sistema curado in-loco

Este modelo pode ser executado em in-loco por meio chamado como via seca, onde a manta de fibra de carbono é intercalada com a camada de resina diretamente na superfície do concreto e por meio úmido onde a manta é pré-impregnada com uma camada de resina e posteriormente sem a cura completa do compósito é colada na superfície a ser reforçada.

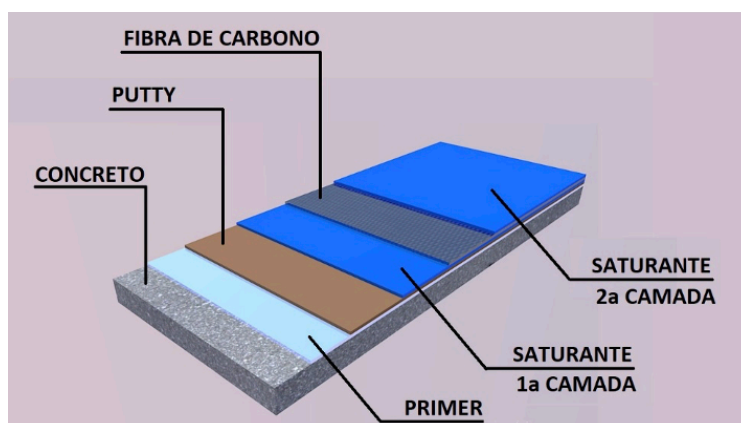


Figura 25. Compósito de fibra de carbono - Viapol

De acordo com as condições da superfície a ser reforçada, a necessidade da utilização dos primers e das resinas de regularização de modo a garantir a boa aderência do sistema de reforço ao substrato. (Beber 2003)

As mantas de fibra utilizadas no sistema FRP quanto ao critério de orientação e agrupamento no plano, segundo Juvantes (1999).

Designação	Descrição	Orientação das fibras	Estado
MANTAS (sheets)	Disposição de faixas contínuas e paralelas de fibras sobre uma rede de proteção (200 - 300 g/m ²)	unidirecionais	secas
			pré-impregnadas [i]
TECIDOS	<i>Woven roving</i> [ii]	bidirecionais	secos
	<i>Mat</i> [ii]	multidirecional	pré-impregnados [i]
	<i>Cloth</i> [ii]	uni, bi ou multidirecional	

Figura 26. Componentes do sistema curado in-loco - Juvantes

3. Histórico da Reabilitação da Edificação

Com a compra da edificação e uma excelente localização, uma das solicitações do novo proprietário para atender a sua necessidade, foi o acréscimo de mais dois pavimentos na edificação já existente. Com o projeto de arquitetura aprovado, iniciou-se os novos projetos complementares. Nesta edificação foram empregadas três formas de recuperação estrutural: Reforço com perfil metálico, concreto projetado nos pilares e vigas e o foco deste trabalho que é o reforço com compósitos em fibra de carbono (FRP).

3.1. Bloco de Fundação

Iniciamos o reforço da estrutura pelos blocos de fundação já existente, com a execução de algumas estacas raiz para aumentar o tamanho do bloco já existente e receber as novas cargas que foram dimensionadas pelo novo projeto de estrutura.



Figura 27. Estaca Raiz - Modulo Engenharia – Reabilitação Senac.

Após a finalização da execução das estacas, foram feitos os arrasamentos das mesmas e o nivelamento do fundo do bloco, para receber as novas armaduras do novo bloco de fundação.



Figura 28. Arrasamento das estacas e nivelamento do fundo do bloco - Modulo Engenharia

Com as novas cargas estabelecidas com o novo projeto de fundação, o bloco de fundação recebeu o um novo formado para receber as novas cargas para a nova edificação.



Figura 29. Montagem da forma e armadura do bloco - Modulo Engenharia

3.2. Concreto Projetado

Com o novo projeto da estrutura, houve a necessidade do aumento de seção de vigas e pilares já existentes e a melhor alternativa para esta edificação foi o concreto projetado. Primeiramente, foi feita a limpeza e o apicoamento dos locais necessários para receber a nova armadura e posteriormente a projeção do concreto de 35MPa.



Figura 30. Concreto projetado em vigas - Modulo Engenharia

3.3 Reforço com a utilização de perfil metálico

Com o novo projeto de arquitetura e com os layouts internos dos novos ambientes e principalmente para atender a legislação atual, a solução encontrada para atender as novas cargas da edificação em alguns locais, foi a utilização de reforços utilizando perfil metálico, atendendo assim todos os requisitos atuais necessários.

A capacidade de carga da laje, passou de 250kgf/m² para 350kgf/m² e sua fixação ocorreu com parafuso chumbador “conhecidos como Parabolt” em quatro pontos em cada extremidade, além da utilização de resina epóxi em suas extremidades unindo as estruturas.



Figura 31. Reforço da laje com perfil metálico - Modulo Engenharia

3.4. Reforço com Compósito em Fibra de Carbono (FRP)

As estruturas podem ser reforçadas através da técnica de colagem de compósitos de FRP (Fibre Reinforced Plastics). Geralmente, esta técnica pode ser executada por colagem exterior. A escolha da técnica de reforço a aplicar depende dos objetivos que se pretendem atingir, estando relacionadas em particular com os tipos de reforços que se pretende executar, podendo ser a flexão, ao corte ou ainda por confinamento.



Figura 32. Colagem da fibra - Modulo Engenharia

3.5. Descrição do Processo de Execução

Para a aplicação do sistema FRP se faz necessária, a recuperação e o preparo do substrato de concreto. Sua aplicação tem pequenas diferenças de fixação, de acordo com o tipo de produto a ser empregado, que pode ele ser uma manta ou lâmina.



Figura 33. Regularização da superfície (Argamassa polimérica para reparo estrutural) - Modulo Engenharia

A preparação do substrato deve garantir que a superfície disponha de uma resistência mecânica suficiente para que sejam feitas as transferências de esforços que ocorrem na interface entre o concreto e a fibra de carbono. A limpeza do local é executada visando a remoção de poeira, substâncias oleosas, graxas, partículas sólidas ou revestimentos. Já para as pequenas irregularidades podem ser admitidas, dependendo do compósito reforçado com fibra que será empregado no local.

Após regularização do substrato, é aplicado um primer sobre a superfície para impregnação dos poros do concreto, assim garantindo uma boa ponte de aderência entre os elementos.



Figura 34. Regularização da superfície (Argamassa polimérica para reparo estrutural) - Modulo Engenharia

Passadas duas horas após a aplicação da camada de primer, inicia-se a aplicação da resina epóxi. Nesta etapa, a saturação da fibra pode ser feita sobre uma bancada antes da sua aplicação ou até mesmo diretamente na peça em concreto onde ocorrerá reforço. A colocação da fibra é feita imediatamente após a saturação, pois o tempo de aplicação da resina é curto, cerca de 25 minutos no máximo. Quando utilizada em camadas, o procedimento é o mesmo. O tempo de cura é informado pelo fabricante, mas em geral é de sete dias. Finalizado o processo de aplicação, podem ser usados alguns tipos de acabamento para fins estéticos ou para proteção contra fogo e radiação ultravioleta. Entre as opções, estão o concreto projetado ou pintura.

3.5.1. Sequência do processo de execução do reforço com compósito em fibra de carbono FRP

Os procedimentos para a instalação do sistema podem variar dependendo do fabricante, que geralmente diferem entre eles. Desta maneira, os procedimentos de instalação podem variar em um mesmo sistema, dependendo do tipo e condição da estrutura.



Figura 35. Preparação da estrutura (Lixamento) - Modulo Engenharia



Figura 36. Marcação dos locais onde serão aplicadas o reforço - Modulo Engenharia



Figura 37. Marcação dos locais onde serão aplicadas o reforço - Modulo Engenharia



Figura 38. Aplicação da primeira camada de saturante - Modulo Engenharia



Figura 39. Aplicação da fibra de carbono - Modulo Engenharia



Figura 40. Retirada de bolhas que possam existir sob a camada de fibra - Modulo Engenharia

O adesivo deve ser aplicado por camadas para a aderência do laminado ao substrato e por medida de segurança e orientação do fabricante, aplicar uma película de acabamento de proteção ao sistema que será reforçado.



Figura 41. Aplicação da segunda camada de saturante - Modulo Engenharia

3.6. Processo de Aplicação do Viapol Carbon CFW 300BR

Viapol Carbon CFW 300BR é um tecido de fibra de carbono unidirecional para reforço estrutural com colagem através de resina epóxi especial. Esse material foi utilizado em todo o reforço necessário na edificação e as peças reforçadas foram as vigas de todos os pavimentos.

ENSAIOS	RESULTADOS
Peso próprio	300 g/m ²
Espessura do tecido	0,166 mm
Estado	Sólido
Cor	Preto
Largura	500 mm
Orientação da fibra	0° - unidirecional
RESISTÊNCIAS	
Resistência máxima de tração	4900 MPa
Módulo de elasticidade	230 GPa
Alongamento de ruptura	2,1%

Figura 42. Características técnicas do fabricante - Viapol – Ficha técnica

3.6.1. Restrições de uso

1. O produto deve ser aplicado apenas por profissionais experientes;
2. Os componentes do sistema não devem ser alterados;
3. Os componentes do Viapol Caron Saturante BR não devem ser fracionados;
4. Após a aplicação do sistema de reforço o mesmo deverá ser protegido da chuva por pelo menos 24 horas;
5. Garanta que a aplicação do sistema seja feita dentro do tempo em aberto do Viapol Saturante BR
6. O número de camadas adicionais de tecido aplicados deve ser controlada para evitar descolamento e deslocamento durante a cura.

TEMPERATURA	TEMPO DE TRABALHABILIDADE
10°C	60 minutos
35°C	30 minutos

Figura 43. Restrições de uso - Viapol – Ficha técnica

3.6.2. Consumo do material

PRODUTO - Viapol Carbon CFW 300 BR	CONSUMO - Viapol Carbon Saturante BR
1 m ²	0,7 a 1,3 kg/m ²

Figura 44 – Consumo - Viapol – Ficha técnica

3.6.3. Embalagem comercial

EMBALAGEM	EMPILHAMENTO
Rolo com 0,50m x 100m (50m ²)	2 caixas

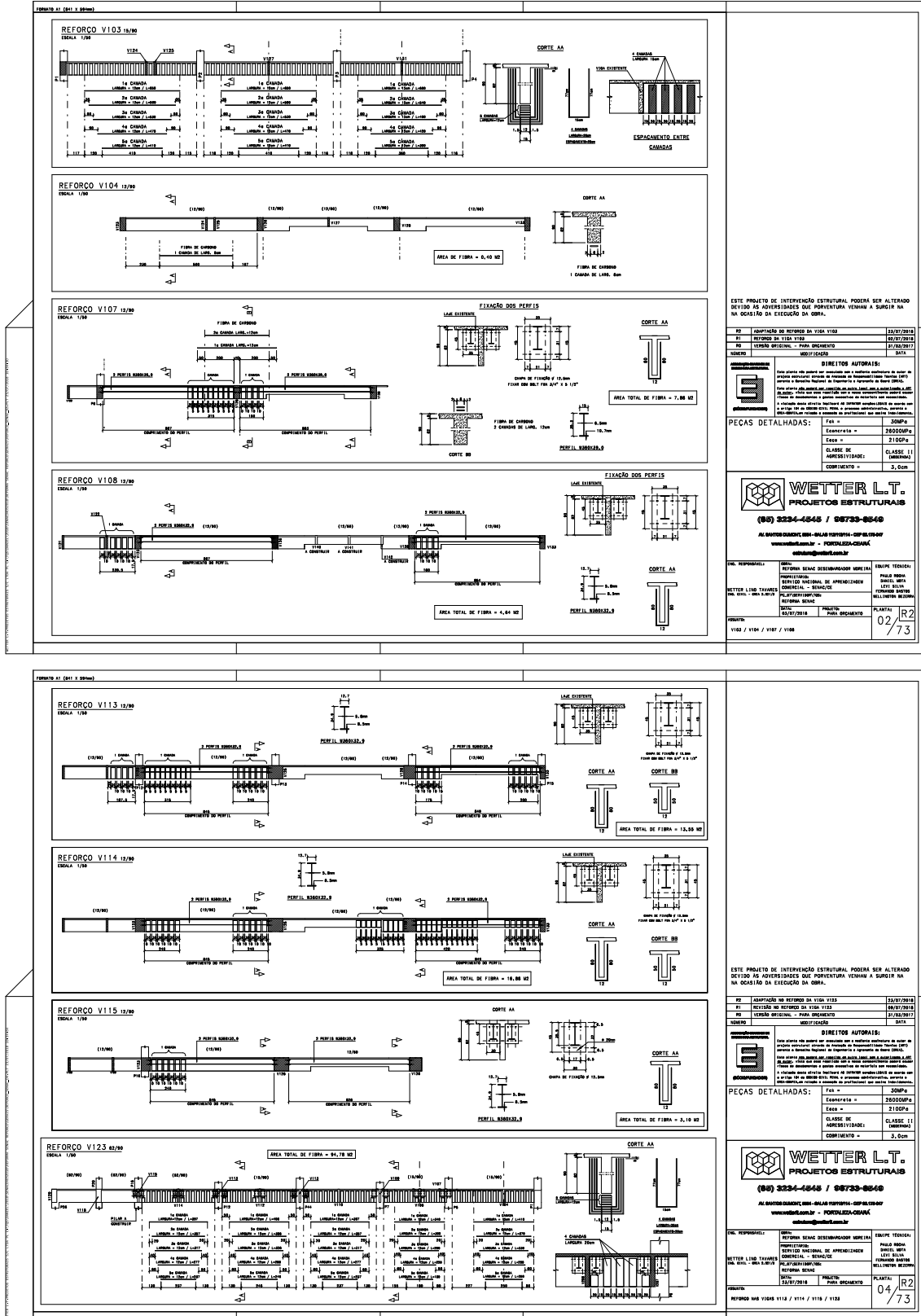
Figura 45 – Embalagem - Viapol – Ficha técnica

3.6.4. Locais de Aplicação

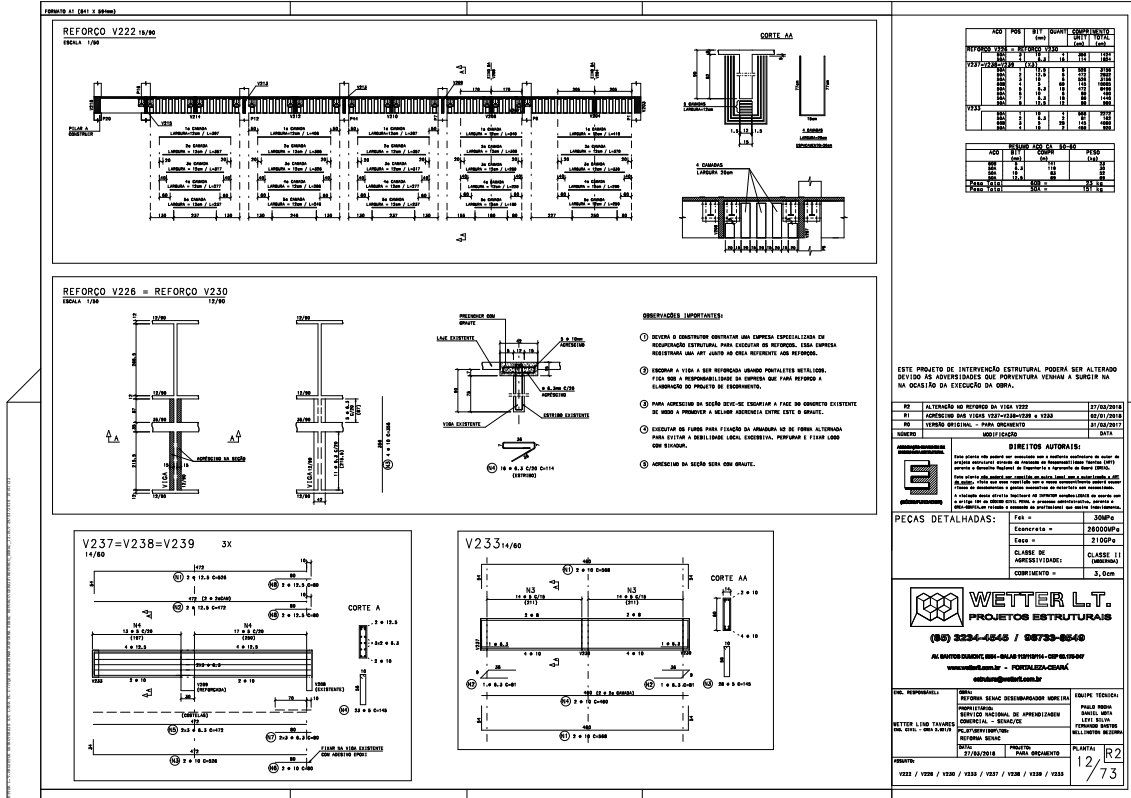
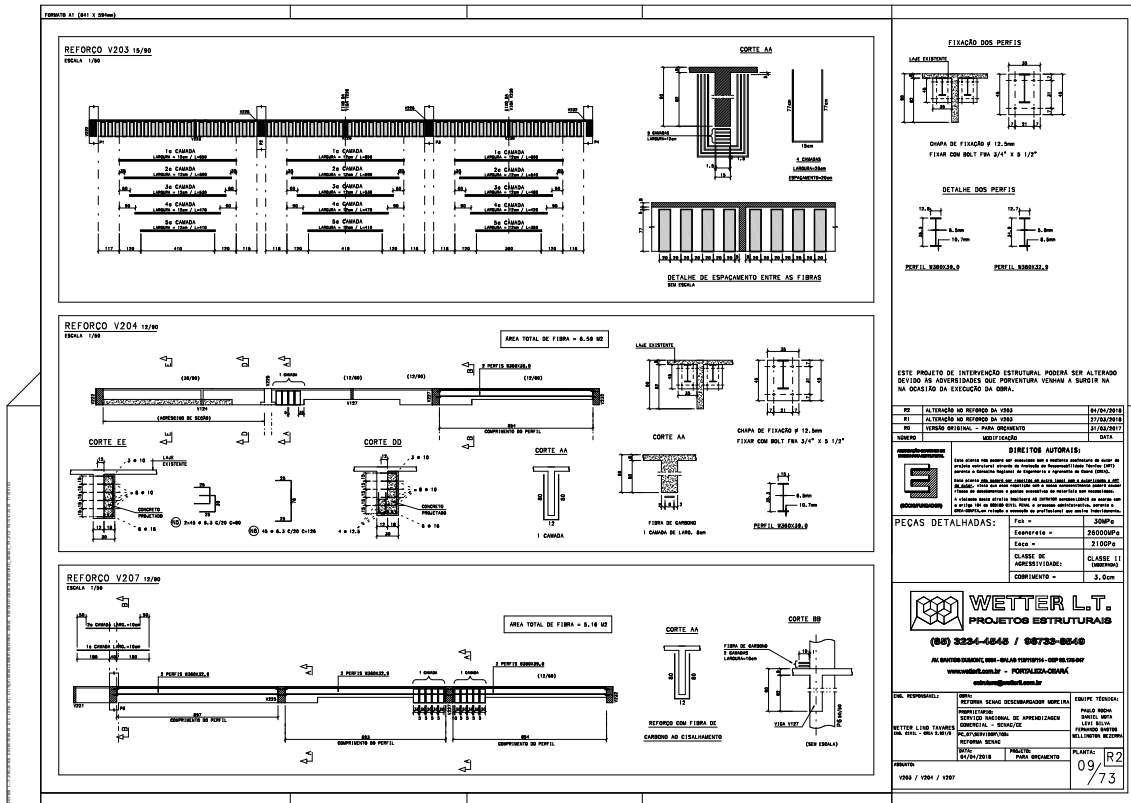
Será aplicado o reforço com compósitos em fibra de carbono FRP, nas vigas com a utilização de tecido de fibra de carbono (considerando a orientação e número de camadas), cortado previamente, conforme orientação do projeto. Para este trabalho, será utilizada uma tesoura apropriada para não danificar os fios da fibra. Para este projeto o sistema escolhido a ser utilizado foi o sistema unidirecional do fornecedor Viapol.

3.7. Projetos

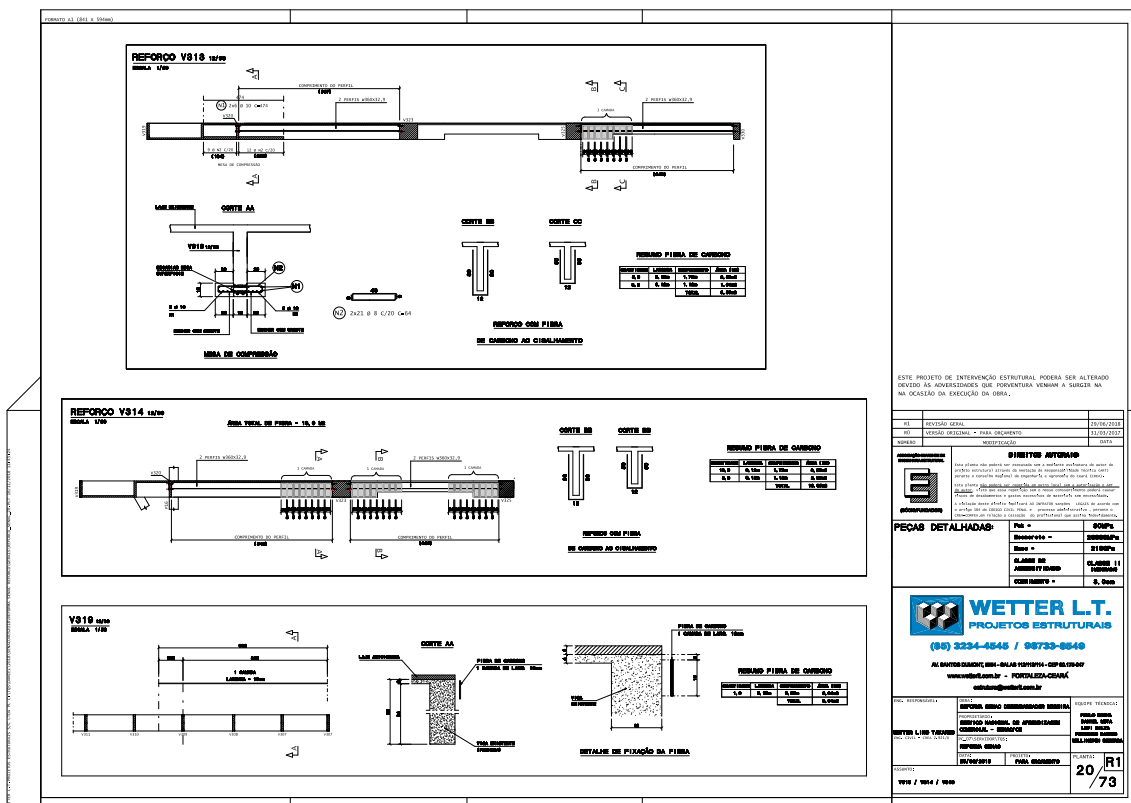
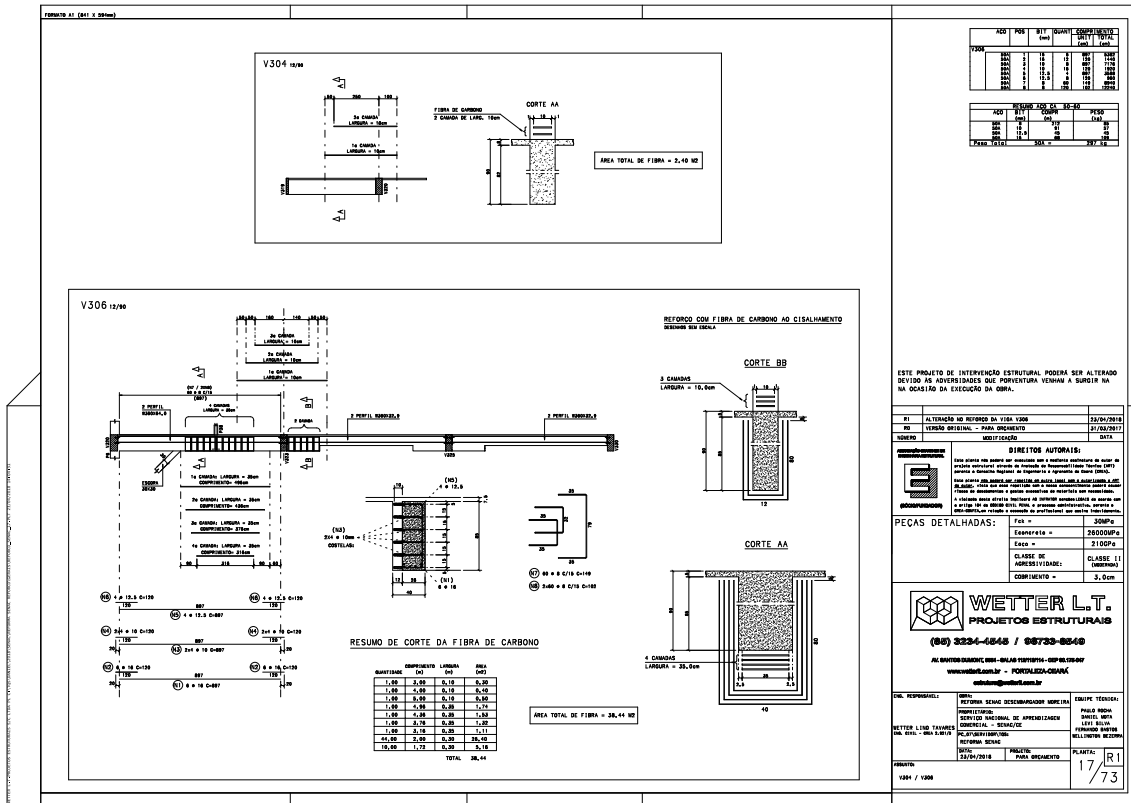
3.7.1. Reforço das vigas do primeiro pavimento



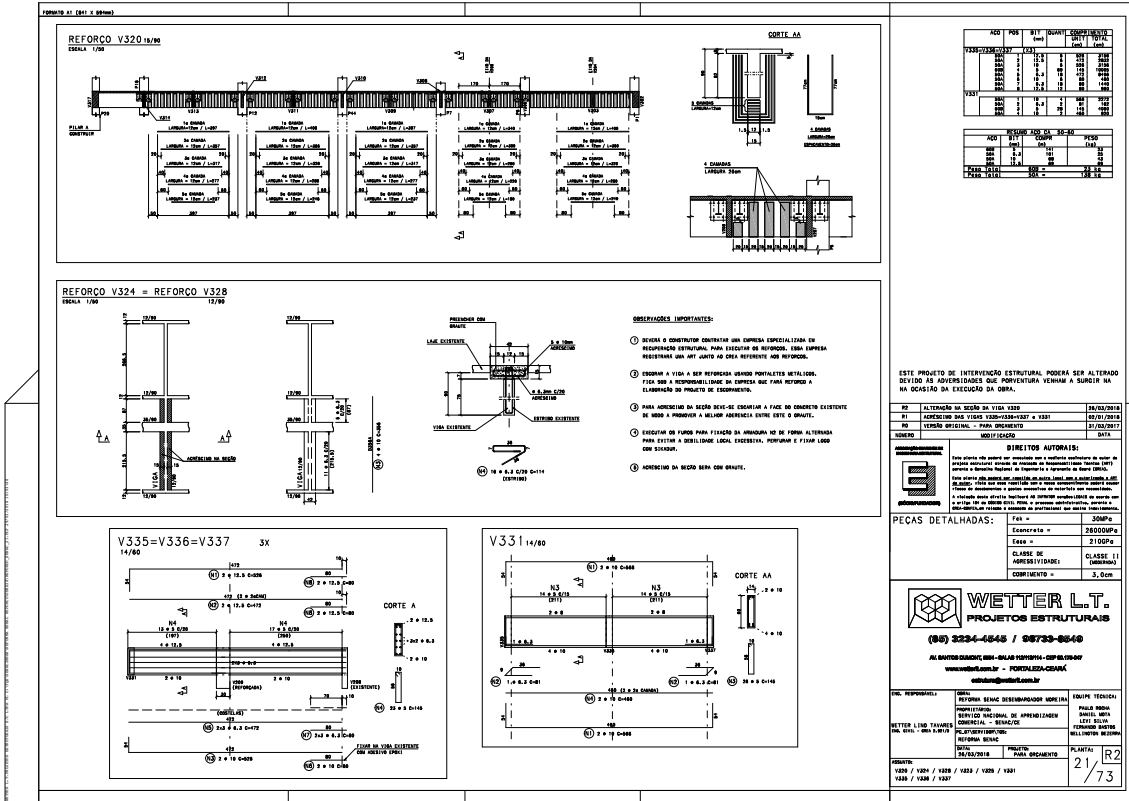
3.7.2. Reforço das vigas do segundo pavimento



3.7.3. Reforço das vigas do terceiro pavimento



REFORÇO ESTRUTURAL COM UTILIZAÇÃO DE FRP EM ESTRUTURAS EXISTENTES DE CONCRETO ARMADO



3.8. Ensaio

O ensaio utilizado para medir a resistência do compósito em fibra de carbono FRP foi o ensaio de arrancamento, que consiste em submeter o corpo de prova a um esforço crescente na direção axial e alongá-lo, levando assim ao seu rompimento.

3.8.1. Ensaio de arrancamento

1. Preparação da máquina de ensaio de arrancamento



Figura 46 – Equipamento - Modulo Engenharia

2. Inspeção e medição das dimensões do corpo de prova

Em uma viga de concreto armado, foram coladas uma camada de fibra de carbono com tamanho de 20 x20cm e as pastilhas metálicas sobre a fibra de carbono com um tamanho de 10 x10cm.



Figura 47. Corpos de prova - Modulo Engenharia

3. Marcação do comprimento inicial do corpo de prova
Corte da fibra para execução do ensaio de arrancamento



Figura 48 - Corte nos corpos de prova - Modulo Engenharia

4. Zerar a máquina de teste



Figura 49 - Máquina zerada - Modulo Engenharia

5. Posicionamento do corpo de prova



Figura 50. Corpos de prova - Modulo Engenharia

6. Execução

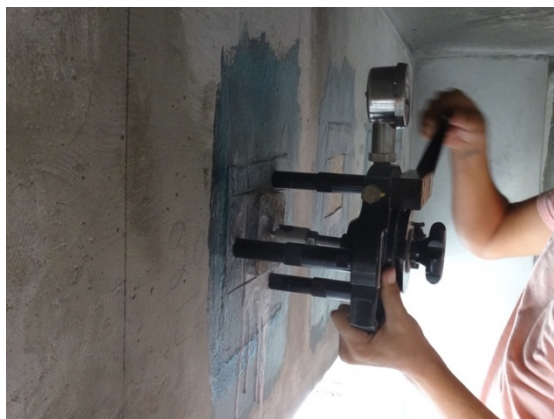


Figura 51 - Execução do ensaio - Modulo Engenharia

7. Resultado: O resultado apurado neste ensaio foi de 1186 kgf.



Figura 52 - Resultado apurado - Modulo Engenharia

3.9. Normas

No Brasil, os compósitos reforçados com fibras de carbono FRP, empregados nas construções existentes são regulamentados pela ABNT NBR 6118/2014, Projeto de estruturas de concreto. O Procedimento, especifica a necessidade de uma armadura mínima. Para obras que ainda serão executadas, existem barras de fibra de carbono, mas este material apresenta custo elevado quando comparado ao valor do concreto armado. “Não seria economicamente viável em estruturas novas”.

Entre outras informações necessárias para especificar corretamente uma solução, devemos verificar as tensões de tração atuantes nas armaduras existentes e no reforço estrutural, além das tensões de compressão atuantes no concreto e na armadura de compressão, caso haja. É preciso analisar todas as deformações existentes na estrutura, tanto com a carga no momento da aplicação do reforço estrutural quanto com a atuação da carga total.

Uma das principais normas técnicas específicas para o uso da fibra de carbono como reforço estrutural é internacional. Um exemplo é a ACI-440, Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement – do American Concrete Institute.

Vida útil da estrutura segundo a NBR 15575 (ABNT, 2021) é período de tempo em que um edifício e/ou seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos, com atendimento dos níveis de desempenho previstos nesta Norma, considerando a periodicidade e a correta execução dos processos de manutenção especificados no respectivo manual de uso, operação e manutenção (a vida útil não pode ser confundida com prazo de garantia legal ou contratual) .

O correto uso e operação da edificação e de suas partes, a constância e efetividade das operações de limpeza e manutenção, alterações climáticas, níveis de poluição no local da obra e mudanças no entorno da obra ao longo do tempo (trânsito de veículos, obras de infraestrutura, expansão urbana etc.), interferem na vida útil de projeto nas características dos materiais e na qualidade da construção como um todo. O valor real de tempo de vida útil será uma composição do valor teórico de vida útil de projeto

devidamente influenciado pelas ações da manutenção, da utilização, da natureza e da sua vizinhança. As negligências no atendimento integral dos programas definidos no manual de uso, operação e manutenção da edificação, bem como ações anormais do meio ambiente, irão reduzir o tempo de vida útil, podendo este ficar menor que o prazo teórico calculado como vida útil de projeto.

Vida útil de projeto (VUP) é um período estimado de tempo para o qual um sistema é projetado, a fim de atender aos requisitos de desempenho estabelecidos na Norma, considerando o atendimento aos requisitos das normas aplicáveis, o estágio do conhecimento no momento do projeto e supondo o atendimento da periodicidade e correta execução dos processos de manutenção especificados no respectivo manual de uso, operação e manutenção (a VUP não pode ser confundida com o tempo de vida útil, durabilidade, e prazo de garantia legal ou contratual) .

4. Custo de execução

Neste capítulo vamos falar um pouco do custo de execução do compósito em fibra de carbono (FRP) nessa obra, utilizando o material Viapol Carbon CFW 300BR. Material esse, que foi utilizando em todo o reforço estrutural da estrutura de concreto armado que já existia. Para utilização deste material, uma das variáveis fundamentais foi o tempo de execução, fator determinante no sistema a ser executado adotado.

4.1. Áreas a serem recuperadas:

	VIGAS	Coefic.	Tot. (m2)	Vr. Adot. (m2)	Nº de camadas
Área de Concreto a ser tratada (m2)=	362,62	1,05	380,75	381,00	1;2;3;4 e 5
Fibra Carbono (m2)=	616,77	1,05	647,61	650,00	
Comprimento de cote de Fibra =	2116,16	1,05	2221,97	2222,00	

Figura 53– Quantidade de material utilizado - Modulo Engenharia

Observação: O coeficiente utilizado foi fornecido pelo fabricante do produto.

4.2. Consumo de material

Produto	Consumo aproxim./m2	Unidade	Embalagem
FIBRA DE CARBONO CFW-300 - VIAPOL	1,00	m2	Larg./comp.(m) 0,50 100,00
(adequação do pedido)			
Peso do Rolo	0,30	KG / m2	
PRIMER			Kit=(3,33kg+1,67kg)
Marca: Vialpol	0,16	kg	5,00
(adequação do pedido)		-	-
STUC			Kit=(3,16kg+0,84kg)
Marca: Vialpol (parte 1)	0,316	kg	3,16
(adequação do pedido-parte1)		-	-
Marca: Vialpol (parte 2)	0,084	kg	0,84
(adequação do pedido-parte2)			
SATURANTE			Kit = (10kg+5kg)
Marca: VIAPOL	0,7	kg	15,00
(adequação do pedido)			

Figura 54. Consumo de material - Modulo Engenharia

4.3. Dimensionamento equipes de trabalho

Serviços	UNID.	QUANT.	Coef. p/pessoa (horas/m ² ou m)	Quant. operários	Dias
Comprimento de corte da fibra	M	2222,00	----	----	----
Técnico em edificações	H	122,21	0,11	1,0	15,28
Profissional	H	122,21	0,11	1,0	15,28
Aplicação de primer	M2	381,00	----	----	----
Técnico em edificações	H	16,00	0,21	1,0	2,00
Encarregado geral	H	16,00	0,21	1,0	2,00
Profissional	H	16,00	0,21	1,0	2,00
Servente	H	32,00	0,21	2,0	4,00
Aplicação de stuc	M2	381,00	----	----	----
Técnico em edificações	H	34,29	0,45	1,0	4,29
Encarregado geral	H	34,29	0,45	1,0	4,29
Profissional	H	34,29	0,45	1,0	4,29
Servente	H	68,58	0,45	2,0	8,57
Aplic.de saturant e fibra	M2	650,00	----	----	----
Técnico em edificações	H	260,00	2,00	1,0	32,50
Encarregado geral	H	260,00	2,00	1,0	32,50
Profissional	H	260,00	2,00	1,0	32,50
Servente	H	520,00	2,00	2,0	65,00
Aplic.da manta de fibra	M2	650,00	----	----	----
Técnico em edificações	H	0,00	0,00	1,0	0,00
Encarregado geral	H	0,00	0,00	1,0	0,00
Profissional	H	0,00	0,00	1,0	0,00
Servente	H	0,00	0,00	2,0	0,00
Estimativa de dias trabalhados			-	-	54,06
Superposição de dias					
Dias úteis (5 dias na semana)					75,7
Dias adotados					91,0

Figura 55. dimensionamento da equipe - Modulo Engenharia

4.4. Valor do investimento final

Para a execução da obra, entregue entre o período de 2018 e 2019 foi investido um valor de R\$/m² 703,65, já inclusos todos os impostos e lucros do fornecedor. Atualizando os valores para os dias atuais, com a correção feita com a inflação atual, o novo valor praticado passou a ser de R\$/m² 1.174,23. Convertendo o valor atualizado para o Euro, temos o seguinte valor €/m² 209,64. Por ser tratar de uma excelente localização, o valor gasto para execução deste serviço na atual edificação foi muito favorável ao novo proprietário.

5. Conclusão e Sugestões para trabalhos Posteriores

Na construção civil, nota-se que, com o passar dos tempos, algumas estruturas de concreto armado se degradam, seja por má-execuções ou até mesmo pelo fim de sua vida útil., sendo assim, na maioria das vezes, reforço são extremamente necessários.

A fibra de carbono surge como uma opção atual e de execução ágil, pois um compósito possui alta resistência e facilita inclusive sua aplicação.

Ao longo desse trabalho, conclui-se que a fibra de carbono FRP atuou com excelente desempenho no reforço das vigas de concreto armado. É importante ressaltar que o reforço da fibra de carbono não se aplica em qualquer situação e nesse caso específico, essa opção, mesmo não sendo a de menor custo, ainda assim minimizou problemas operacionais e de tempo, pois a fibra, nesse caso, apresentou-se como a solução mais viável.

A utilização de fibra de carbono nessa estrutura ora estudada, viabilizou a comercialização do prédio de forma mais rápida, pois sua reabilitação se deu em um curto espaço de tempo.

A edificação em questão, que era ocupada por uma loja de departamentos, foi transformada em uma escola profissionalizante com vários laboratórios e tudo isso sem que houvesse o aumento da sessão de viga, permitindo-se inclusive, que se mantivesse a altura do pé-direito em todos os pavimentos.

Trata-se de um projeto que foi bastante desafiador, em virtude da área que apresenta necessidade de reforço, sendo esse responsável pelo título de maior consumo de fibra de carbono em uma obra comercial na cidade de Fortaleza/Ceará-Brasil.

Atualmente, no mercado esse material possui um alto valor agregado no mercado, porém a sua facilidade de manuseio e praticidade, permitiram que os primeiros

pavimentos dessa obra em questão recebessem cinco camadas de compósito de fibra, quase que dobrando suas capacidades de carga.

Conclui-se por fim, que a aplicação da fibra de carbono é uma maneira inovadora de fazer recuperação de estruturas, mesmo em áreas nobres, como da obra em questão, diminuindo assim, transtornos como demolições, evacuação de grandes áreas, sem contar com obras extremamente ágeis, limpas e sustentáveis.

Indica-se o aprofundamento dos estudos a cerca dos referidos materiais para que mais profissionais da construção civil sejam conhecedores e propagadores para a utilização em grande escala em todo o mundo.

5.1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI-440, Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement – do American Concrete Institute.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, Rio de Janeiro, 2014.

CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 7ª ed. LTC- Rio de Janeiro, 2008.

CHUNG, D. D. L. Carbon Fiber Composites, Butterworth-Heinemann, Newton, MA, Estados Unidos da América, 1994.

DE SOUZA, Vicente Custódio Moreira; RIPPER, Thomaz - Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto. São Paulo: Editora Pini Ltda., 1998. 255 p.

FIBRA DE CARBONO - MCs. Guilherme Wolf Lebrão-Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia-2008 - Revista Plástico Sul.

HALE J., Boeing 787 from the Ground Up, Boeing Aeromagazine, p- 17-23, 2006.

LEONI, Renato. SOUZA, João. Reforço com tela de fibra de carbono sob proteção de concreto ou argamassas minerais. Revista Técnica, São Paulo, n. 194, p. 78-80, 2013.

Lubin, G. Handbook of Composites. Nova York: Ed. Van Nostrand Reinhold, 1982.

MACHADO, Ari de Paula. Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono. VIAPOL. São Paulo, 2012

MACHADO, Ari de Paula. Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono: características, dimensionamento e aplicação. PINI. São Paulo, 2002

MACHADO, Marcélia Gomes. Estudo experimental da ductibilidade de vigas em concreto armado reforçadas à flexão utilizando compósitos com tecido de fibras de carbono. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

NAKAMURA, Juliana. Reparo, reforço e recuperação de concreto. Revista Técnica, São Paulo, n. 146, 2009.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C.; Compósitos Estruturais: Ciência E Tecnologia. 1. Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

PINTO, Cristina Travessa Martins Pereira. Reforço à flexão de vigas de concreto armado com fibras de carbono. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Civil – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

PITA, Marina. Viaduto recebe reforço de fibra de carbono para elevação de TB. Revista Infraestrutura Urbana, São Paulo, n. 16, 2011.

YUAN H., ZHANG S., LUA C., HE S., AN F. Improved interfacial adhesion in carbon fiber/polyether sulfone composites through an organic solvent-free polyamic acid sizing, Applied Surface Science, v. 279, p. 279– 284, 2013.

YUAN, H.; WANG, C.; ZHANG, S.; LIN, X. Effect of Surface Modification on Carbon Fiber and its Reinforced Phenolic Matrix Composite. Applied Surface Science, v. 259, p. 288-293, oct. 2012.

Análise crítica do reforço estrutural com polímero reforçado com fibra de carbono em pilares de concreto armado submetidas à compressão: estudo de caso

<https://www.metodista.br/revistas/revistas-izabela/index.php/ptr/article/viewFile/950/771>

Fibra de Carbono

<https://www.portalsaofrancisco.com.br/quimica/fibra-de-carbono#:~:text=A%20fibra%20de%20carbono%20remonta,fio%20de%20fibra%20de%20carbono.&text=Embora%20fossem%20ineficientes%2C%20essas%20fibras,resist%20%C3%A2ncia%20e%20propriedades%20de%20rigidez.>

FIBRA DE CARBONO PARA REFORÇO ESTRUTURAL: QUAIS SÃO OS BENEFÍCIOS

<http://serpolengenharia.com.br/2019/09/16/fibra-carbono-reforco-estrutural/#:~:text=%20%C3%89%20interessante%20destacar%20que%20a,pr%C3%A9dio%20localizados%20em%20diversos%20estados.>

Fibras de carbono: aplicações em eletroanalítica como material eletródico Rosângela M. de Carvalho, Lauro T. Kubota e Jarbas J. Rohwedder
Departamento de Química Analítica - Instituto de Química - UNICAMP - CP 6154 - 13083-970 - Campinas - SP

https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40421999000400018&script=sci_arttext

Fibra de Carbono

<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=laser-infravermelho-fibras--de-carbono&id=010170100406>

<https://www.infoescola.com/quimica/fibra-de-carbono/>

<https://www.infomet.com.br/site/noticias-mobile-ler.php?org=&rs=&cod=12880>

<http://www.planoaengenharia.com.br/2018/12/fibra-de-carbono-na-construcao-civil/>

https://www.google.com/search?q=viaduto+santo+amaro+sp&rlz=1C5CHFA_enBR976BR977&sxsrf=AOaemvK5t3XMGuant1q2WDepunGm5nKoEQ:1639351944338&sour

[ce=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj_9rbytd_0AhVpG7kGHSzhDBEQ_AUoA
noECAEQBA&biw=1200&bih=660&dpr=2](https://www.researchgate.net/publication/321111111)