

LIGA DE ENSINO DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO UNIVERSITÁRIO DO RIO GRANDE DO NORTE
ENGENHARIA CIVIL

IGOR VITORINO DA LUZ

**METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA ENTRE O SISTEMA
COMPÓSITO DE POLÍMERO REFORÇADO POR FIBRAS DE CARBONO E O
SUBSTRATO DE CONCRETO – PROPOSTA DE NORMALIZAÇÃO**

NATAL-RN
2019

IGOR VITORINO DA LUZ

**METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA ENTRE O SISTEMA
COMPÓSITO DE POLÍMERO REFORÇADO POR FIBRAS DE CARBONO E O
SUBSTRATO DE CONCRETO – PROPOSTA DE NORMALIZAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil apresentado ao Centro Universitário do Rio Grande do Norte (UNI-RN) como requisito final para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Phd. Fábio Sérgio da Costa Pereira.

NATAL-RN

2019

Catálogo na Publicação – Biblioteca do UNI-RN
Setor de Processos Técnicos

Luz, Igor Vitorino da.

Metodologias para avaliação da aderência entre o sistema compósito de polímero reforçado por fibras de carbono e o substrato de concreto – proposta de normalização / Igor Vitorino da Luz. – Natal, 2019.
80f.

Orientador: Prof^o. PhD. Fábio Sergio da Costa Pereira.

Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário do Rio Grande do Norte.

1. Engenharia civil – Monografia. 2. Reforço estrutural – Monografia. 3. Polímero reforçado – Monografia. 4. Fibras de carbono – Monografia. 5. Compósito – Monografia. 6. Sondagem acústica – Monografia. 7. Pull-off – Monografia. I. Pereira, Fábio Sergio da Costa. II. Título.

RN/UNI-RN/BC

CDU 624

IGOR VITORINO DA LUZ

**METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA ENTRE O SISTEMA
COMPÓSITO DE POLÍMERO REFORÇADO POR FIBRAS DE CARBONO E O
SUBSTRATO DE CONCRETO – PROPOSTA DE NORMALIZAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil apresentado ao Centro Universitário do Rio Grande do Norte (UNI-RN) como requisito final para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Phd. Fábio Sérgio da Costa Pereira

Orientador – UNI-RN

Prof. Msc. Tomás Barros Vasconcelos

Avaliador Interno – UNI-RN

Prof. Dr. Márcio Luiz Varela Nogueira de Moraes

Avaliador Externo – IFRN

AGRADECIMENTOS

Esta conquista que se aproxima é fruto de um caminho trilhado ao lado de pessoas que me fortalecem na busca constante para me tornar uma pessoa melhor. Portanto, gostaria de expressar o meu agradecimento a elas.

A Deus, por agir constantemente e perfeitamente em minha vida, me concedendo meios para a concretização das minhas metas.

À minha mãe, Eliene, por todo o empenho em educar os filhos e por dividir comigo todas as dificuldades pelas quais passei até hoje.

Ao meu pai, Antonio, pela importância do seu incentivo e pelos valiosos ensinamentos.

À minha noiva, Angélica, por ser essa mulher maravilhosa sempre me motivando a ser uma pessoa melhor.

Aos meus irmãos, Eric e Hugo, pelo amor, por serem referências na minha vida e por acreditarem em minha capacidade.

Ao Professor Fábio, pela orientação e pelo comprometimento que teve comigo.

A Matheus, bolsista do UNI-RN, pela atenção e suporte que me foram dados durante as atividades realizadas em laboratório.

Igor Vitorino da Luz

“Não existe controle sem padronização”.

J. M. Juran

RESUMO

O concreto armado, assim como todo material, é passível de sofrer perdas em sua capacidade resistente devido às patologias que por ventura o acometam. Para sanar as deficiências causadas por essas patologias faz-se necessário uma intervenção corretiva com o intuito de reforçar o material. Uma técnica de reforço que vêm sendo bastante utilizada é baseada no uso de materiais compósitos de polímeros reforçados por fibras de carbono (PRFC), pois esses compósitos não sofrem corrosão, são materiais muito leves e resistentes, promovem um pequeno acréscimo de espessura no elemento estrutural a ser reforçado e podem assumir formas geométricas complexas. Porém, problemas de deficiência na aderência surgem quando esse tipo de reforço não é executado corretamente e os resultados deste erro podem ser catastróficos, chegando a custar milhões de reais e, até mesmo, ceifar vidas. Pelo fato de não existir norma brasileira para a avaliação executiva do reforço estrutural com PRFC, foi proposta neste trabalho uma metodologia para aferição desse procedimento, com realização dos ensaios em laboratório.

Palavras-chave: Reforço estrutural. Polímero reforçado com fibras de carbono. Compósito. Sondagem acústica. *Pull-off*.

ABSTRACT

Reinforced concrete as well as all material is liable to suffer losses in resistant capacity due to the pathologies that happen to it. To rectify the deficiencies caused by these pathologies, a corrective intervention is necessary in order to reinforce the material. A reinforcement technique that has been widely used is based on the use of composite materials of carbon fiber reinforced polymer (CFRP), because these composite materials doesn't suffer corrosion, they are very light and resistant materials, they promote a small increase of thickness in the structural element and can take on complex geometric shapes. However, adhesion deficiency problems arise when this type of reinforcement isn't correctly executed and the result of this error can be catastrophic, costing millions reais and even reaping lives. Because there is no brazilian technical norm for the executive evaluation of the structural reinforcement with PRFC, a methodology was proposed in this work to gauge this procedure, with the accomplishment of the laboratory tests.

Key words: Structural reinforcement. Carbon fiber reinforced polymer. Composite. Acoustic sounding. *Pull-off*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Variação de propriedades de polímeros em função do aumento de massa molar.	21
Figura 2 – Fibras de carbono longas e contínuas enroladas em carretel.	23
Figura 3 – Tecido com fibras de carbono bidirecionais.	23
Figura 4 – Comportamento à tração de vários sistemas PRF e aço.	25
Figura 5 – Estrutura molecular do homopolímero de PAN.	27
Figura 6 – Ilustração do sistema de fiação a seco para produção de fibras de PAN.	28
Figura 7 – Ilustração do sistema de fiação úmida para produção de fibras de PAN.	29
Figura 8 – Representação esquemática da obtenção de fibras de carbono a partir da poliacrilonitrila (PAN).	30
Figura 9 – Modelo estrutural para as fibras de carbono durante a grafitação.	31
Figura 10 – Polimerização da resina epóxi.	32
Figura 11 – Cadeia estruturada de resina epóxi.	33
Figura 12 – Fluxo de uma exotermia.	34
Figura 13 – Adição de cargas inertes diminui a exotermia.	35
Figura 14 – Técnica EBR. Laminados de PRFC colados na região tracionada das vigas.	37
Figura 15 – Técnica NSM: (a) entalhes realizados no cobrimento de concreto da região tracionada da viga; (b) laminados de PRFC inseridos e colados nos entalhes realizados.	38
Figura 16 – Imprimação da superfície de uma laje em reforço estrutural executado pela empresa Engecal.	39

Figura 17 – Aplicação do regularizador de superfície em uma viga numa das etapas do reforço estrutural executado pela empresa Engecal.	40
Figura 18 – Aplicação de epóxi estruturante em laje. Reforço estrutural à flexão executado pela empresa Engecal.	41
Figura 19 – Aplicação da lâmina da fibra em um reforço estrutural executado pela empresa Engecal.	41
Figura 20 – Reforço estrutural à flexão em laje concluído com utilização manta de fibra de carbono.	42
Figura 21 – Equipamento de para ensaio de tração direta via <i>pull-off</i>	43
Figura 22 – Ensaio de sondagem acústica.....	45
Figura 23 – Superfície de uma das placas de concreto após sua manufatura.	49
Figura 24 – Superfície de uma das placas após a etapa de lixamento.	49
Figura 25 – Pesagem para preparação do primer epóxi: (a) resina base (componente A); (b) endurecedor (componente B); (c) mistura dos componentes.	50
Figura 26 – Detalhe da placa após a aplicação do primer epóxi.	51
Figura 27 – Outras vistas mostrando os detalhes das placas após a aplicação do primer epóxi.....	51
Figura 28 – Sistema compósito aplicado e curado.....	52
Figura 29 – Equipamento de <i>pull-off</i>	53
Figura 30 – (a) Epóxi (adesivo + endurecedor); (b) pastilhas metálicas do equipamento de <i>pull-off</i> ; (c) diâmetro da pastilha (50 mm).	54
Figura 31 – Pastilhas metálicas circulares devidamente aderidas sobre os compósitos.	54
Figura 32 – Haste com rosca fuso do equipamento de <i>pull-off</i>	55

Figura 33 – Equipamento de <i>pull-off</i>	55
Figura 34 – Presença de bolhas de ar na lâmina L1 da placa de concreto 01.	56
Figura 35 – Gráfico das tensões de arrancamento das lâminas de PRFC para placa de concreto 01.....	58
Figura 36 – Força de tração necessária para o arrancamento da lâmina L1 da placa de concreto 01.....	59
Figura 37 – Aspectos da superfície lâmina L1 e do substrato da placa de concreto 01 pós-ensaio.....	59
Figura 38 – Aspectos da superfície da lâmina L1 da placa de concreto 01 pós-ensaio.	60
Figura 39 – Aspectos da superfície da lâmina L2 e do substrato da placa de concreto 01 pós ensaio.....	60
Figura 40 – Volume de concreto aderido na lâmina L2 da placa de concreto 01 pós-ensaio.....	61
Figura 41 – Haste com rosca fuso do equipamento de <i>pull-off</i> devidamente colocada para o ensaio da lâmina L3 da placa de concreto 01.	61
Figura 42 – Preparação para o ensaio da lâmina L3 da placa de concreto 01.....	62
Figura 43 – Força de tração necessária para o arrancamento da lâmina L3 da placa de concreto 01.....	62
Figura 44 – Força de tração necessária para o arrancamento da lâmina L4 da placa de concreto 01.....	63
Figura 45 – Gráfico das tensões de arrancamento das lâminas de PRFC para placa de concreto 02.....	64
Figura 46 – Arrancamento por aderência da lâmina L1 da placa de concreto 02.	64
Figura 47 – Volume de concreto aderido na lâmina L1 da placa de concreto 02 pós-ensaio.....	65

Figura 48 – Gráfico das tensões de arrancamento das lâminas de PRFC para placa de concreto 03.....	66
Figura 49 – Preparação para o ensaio da lâmina L3 da placa de concreto 03.....	66
Figura 50 – Volume de concreto aderido na lâmina L3 da placa de concreto 03 pós-ensaio.....	67
Figura 51 – Placa de concreto 04, detalhe para o local onde ficou aderida a lâmina de fibra de carbono L3.	68
Figura 52 – Gráfico das tensões de arrancamento das lâminas de PRFC para placa de concreto 04.....	69
Figura 53 – Força de tração necessária para o arrancamento da lâmina L1 da placa de concreto 04.....	69
Figura 54 - Aspectos da superfície da lâmina L1 e do substrato da placa de concreto 04 pós-ensaio.....	70
Figura 55 – Superfícies: (a) do sistema PRFC; (b) substrato de concreto e PRFC; (c) volume de concreto aderido na lâmina L1 da placa de concreto 04 no pós-ensaio. .	70
Figura 56 - Força de tração necessária para o arrancamento da lâmina L2 da placa de concreto 04.....	71
Figura 57 – Aspectos da superfície da lâmina L2 e do substrato da placa de concreto 04 pós-ensaio.....	71
Figura 58 – Força de tração necessária para o arrancamento da lâmina L4 da placa de concreto 04.....	72
Figura 59 – Aspectos da superfície da lâmina L4 e do substrato da placa de concreto 04 pós-ensaio.....	72
Figura 60 – Placa de concreto 04 pós-ensaio.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Densidades e propriedades mecânicas de diferentes tipos de fibras.....	25
Tabela 2 – Classificação dos tipos de fibras de carbono.	26
Tabela 3 – Comportamento mecânico de compósitos de epóxi com diferentes fibras.	34
Tabela 4 – Percentual de contração das resinas epóxi.....	35
Tabela 5 – Classificação do reforço pelo ensaio de aderência <i>Pull-off</i>	44
Tabela 6 – Características das fibras de carbono utilizadas no trabalho.	46
Tabela 7 – Características dos componentes A e B do epóxi para impregnação.	47
Tabela 8 – Propriedades do sistema.....	47
Tabela 9 – Características dos componentes A e B epóxi para laminação.....	48
Tabela 10 – Propriedades do sistema.....	48
Tabela 11 – Quantidade de demãos de resina de laminação sobre o sistema.	52
Tabela 12 – Resultados da placa de concreto 01.	58
Tabela 13 – Resultados da placa de concreto 02.	63
Tabela 14 – Resultados da placa de concreto 03.	65
Tabela 15 – Resultados da placa de concreto 04.	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ACI	American Concrete Institute.
AFRP	Aramid Fiber Reinforced Polymer.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
CP	Corpo de prova.
CFRP	Carbon fiber reinforced polymer.
DMF	Dimetilformamida.
EN	European Normalización.
GFRP	Glass fibers reinforced polymer.
JSCE	Japan Society of Civil Engineers.
L1	Lâmina de fibras de carbono número 1.
L2	Lâmina de fibras de carbono número 2.
L3	Lâmina de fibras de carbono número 3.
L4	Lâmina de fibras de carbono número 4.
NBR	Norma brasileira.
PAN	Poliacrilonitrila.
PL1	Placa de concreto número 1.
PL2	Placa de concreto número 2.
PL3	Placa de concreto número 3.
PL4	Placa de concreto número 4.
PRFC	Polímero reforçado com fibras de carbono.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA	17
1.2 JUSTIFICATIVA	17
1.3 OBJETIVOS	18
1.3.1 Geral	18
1.3.2 Específico	18
1.4 METODOLOGIA.....	18
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	20
2.2 COMPÓSITOS DE POLÍMERO REFORÇADO POR FIBRAS (PRF)	22
2.2.1 Fibras de Carbono.....	24
2.2.1.1 Tipos de fibras de carbono	26
2.2.1.2 Fibras de carbono obtidas a partir da poliacrilonitrila (PAN).....	26
2.2.2 Resinas Epóxi.....	31
2.2.2.1 Imprimadores primários, regularizadores de superfície e resinas de saturação.....	36
2.2.3 Reforço Estrutural com Compósitos de Fibras de Carbono (CFC)	37
2.2.3.1 Sequência de aplicação do reforço	39
2.3 ENSAIOS	42
2.3.1 Aderência por Tração Direta <i>Pull-off</i>	42
2.3.2 Sondagem Acústica	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1 FIBRAS DE CARBONO	46
3.2 RESINAS EPÓXI.....	47

3.3 APLICAÇÃO DO SISTEMA COMPÓSITO	48
3.4 ENSAIOS DE ADERÊNCIA POR TRAÇÃO DIRETA <i>PULL-OFF</i>	53
3.5 ENSAIO DE SONDAÇÃO ACÚSTICA.....	56
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ADERÊNCIA POR TRAÇÃO DIRETA <i>PULL-OFF</i>	57
4.1.1 Resultados do Ensaio de <i>Pull-Off</i> da Placa 01 (PL1)	57
4.1.2 Resultados do Ensaio de <i>Pull-Off</i> da Placa 02 (PL2)	63
4.1.3 Resultados do Ensaio de <i>Pull-Off</i> da Placa 03 (PL3)	65
4.1.4 Resultados do Ensaio de <i>Pull-Off</i> da Placa 04 (PL4)	67
4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SONDAÇÃO ACÚSTICA	73
5 CONCLUSÕES	74
REFERÊNCIAS.....	75

1 INTRODUÇÃO

Apesar das estruturas de concreto armado serem idealizadas para terem um período de vida útil longo, muitas delas acabam tendo uma redução significativa em sua capacidade resistente causada por patologias que surgem por diversos motivos (principalmente por erros de projeto e de execução). Além disso, mesmo quando projetadas e executadas corretamente, uma estrutura poderá, num futuro próximo, ter que suportar maiores cargas ou, até mesmo, subscrever novas exigências normativas. Existem ainda as situações em que as estruturas têm de ser reparadas devido a acidentes. Se alguma destas circunstâncias ocorrer, caberá ao engenheiro avaliar e selecionar a melhor opção entre as técnicas existentes para o reforço estrutural.

O processo de reforço de estruturas de concreto armado objetivo deste trabalho recorre à técnica de colagem externa de sistemas compósitos de PRFC, designada por EBR (“Externally Bonded Reinforcement”), curado “in situ”. Esta técnica é bastante satisfatória, haja vista as propriedades e características físicas desse material, como a sua baixa massa específica, imunidade à corrosão e elevada resistência mecânica à tração. De acordo com Arquez (2010), o peso desse material equivale a 25% do peso do aço, com resistência aproximadamente nove vezes superior para um mesmo módulo de elasticidade, considerando espessuras iguais.

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

O tema “aderência do reforço de estrutural com materiais compósitos” é de grande relevância, pois é uma área nova que está crescendo na engenharia civil; da ocorrência de patologias, manifestadas pela falta de aderência entre o sistema, causadas pela má execução de reforços com compósitos de PRFC e pela falta de uma Norma brasileira que aborde esse tema.

1.2 JUSTIFICATIVA

Grandes problemas são gerados quando esse tipo de reforço não é executado corretamente, principalmente em relação à deficiência na aderência. Se o adesivo estrutural não estiver bem aderido ao substrato de concreto, poderá ocorrer o

descolamento prematuro, antes que se atinja o estado limite último da estrutura. Os resultados deste erro podem ser catastróficos, chegando a custar milhões de reais e, até mesmo, ceifar vidas. Porém, o desenvolvimento de metodologias para avaliação da eficácia na realização dessa técnica de reforço e, além disso, a elaboração de uma norma nacional para padronizar sua execução são formas de sanar os problemas de deficiência na aderência do sistema.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Geral

Diante do contexto já apresentado, esse trabalho visa avaliar e classificar com auxílio de ensaios mecânicos a aderência de sistemas compósitos de PRFC em substratos de concreto e, de posse dos resultados encontrados pelos ensaios, propor à ABNT a elaboração de uma Norma que aborde o tema para, então, padronizar a execução desse sistema de reforço estrutural.

1.3.2 Específico

- Desenvolver uma pesquisa voltada para avaliação da execução de reforços, de estruturas de concreto, com sistemas de PRFC;
- A partir de metodologias de ensaios realizadas em laboratório, classificar a execução do reforço com sistemas compósitos de PRFC;
- Contribuir, com os resultados encontrados, para a elaboração de uma Norma nacional que padronize a execução eficaz dessa técnica de reforço.

1.4 METODOLOGIA

A metodologia para o desenvolvimento dessa monografia foi fundamentada em pesquisas bibliográficas, na aplicação de sistemas compósitos de PRFC sobre substratos de concreto e na execução de ensaios laboratoriais.

Tomando como base normas estrangeiras já existentes, bem como em metodologias nacionais que vêm apresentando bons resultados, sendo efetuados os

seguintes ensaios: sondagem acústica via choque mecânico e ensaio de aderência por tração direta *Pull-off*.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta monografia encontra-se dividida em 5 capítulos.

O capítulo 2 se refere à revisão bibliográfica. Na primeira parte são abordados conceitos iniciais sobre materiais e em seguida o tema vai se aprofundando nos compósitos reforçados por fibras. Outros assuntos abordados nesse capítulo são as rotas de fabricação e tipos de fibras de carbono e resinas epóxi. Em seguida discorre-se sobre o reforço em estruturas de concreto com materiais compósitos de PRFC e os ensaios. O capítulo 3 traz a descrição dos materiais e equipamentos utilizados no estudo de caso, bem como os detalhes a metodologia. No capítulo 4, os resultados dos ensaios são apresentados esquematicamente. O capítulo 5 trata da conclusão, ele destina-se à interpretação e análise crítica dos resultados apresentados e comparações dos diferentes resultados produzidos nos testes aos quais foram submetidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Tanto o empirismo quanto os métodos científicos têm mostrado que é de fundamental importância para todo engenheiro o conhecimento das características, propriedades e comportamento dos materiais que lhe estão disponíveis para, dessa forma, aplicá-los no desenvolvimento de produtos e realização de serviços aliando eficácia e baixo custo.

Ao fazer a escolha de materiais para execução de um projeto, o engenheiro deve levar em conta propriedades tais como resistência mecânica, condutividade elétrica e/ou térmica, densidade etc. (HALL; VLACK, 2000).

Os materiais de engenharia apresentam diversas propriedades físicas (densidade, coeficiente de expansão térmica, condutividade elétrica etc.). Além destas, eles também exibem propriedades mecânicas como tenacidade, ductibilidade, tensão de escoamento e resistência mecânica. É justamente essa última que nos vêm à mente ao pensarmos em grandes estruturas como pontes e edifícios, pois a resistência mecânica é a propriedade mais importante para os materiais estruturais.

A tenacidade por sua vez é definida por Hall e Vlack (2000) como a medida da energia necessária para romper o material. Ela pode ser traduzida como a área total abaixo da curva do gráfico tensão x deformação desde o momento onde começou a ser aplicada a tensão até a ruptura do material.

Já a ductilidade pode ser entendida como a deformação plástica total que o material apresenta até o seu ponto de ruptura (CALLISTER, 2008). Materiais que se rompem com pouquíssima deformação são considerados frágeis.

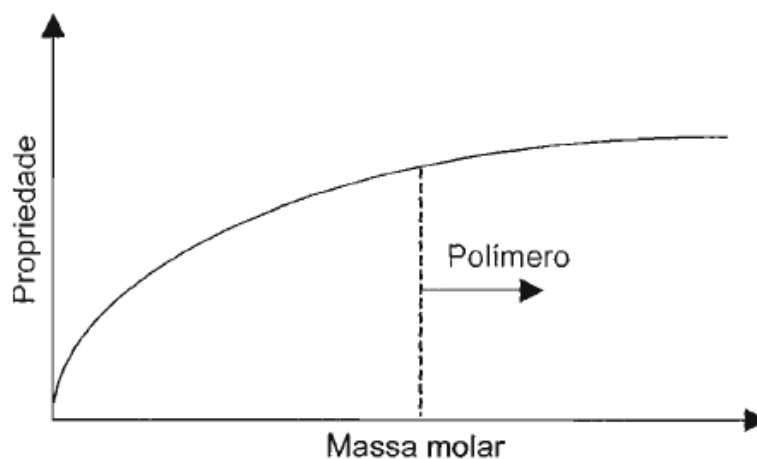
As propriedades físicas e químicas dos materiais de engenharia são advindas de como se dão as ligações entre seus átomos. Do ponto de vista de ligações químicas, Padilha (2000), afirma que as cerâmicas podem ser desde predominantemente iônicas até quase totalmente covalentes. Elas são, em geral, tipicamente isolantes térmicos e elétricos, além de serem mais resistentes à ambientes corrosivos que os metais e os polímeros. Shackelford (2008), cita que elas apresentam resistência à altas temperaturas, elevada dureza e baixa ductilidade.

Os metais apresentam grande número de elétrons livres, isto é, elétrons que não estão presos a um único átomo. Muitas de suas propriedades são atribuídas a

estes elétrons. Por exemplo, os metais são excelentes condutores de calor e eletricidade, graças a mobilidade dos elétrons livres. Eles apresentam boa resistência mecânica, porém, são deformáveis (PADILHA, 2000).

Os polímeros são constituídos de macromoléculas orgânicas, sintéticas. A palavra polímero origina-se do grego poli (muitos) e mero (unidade de repetição). Assim, um polímero é uma macromolécula composta por muitas (dezenas de milhares) de unidades de repetição denominadas meros, ligadas por ligação covalente. A matéria prima para a produção de um polímero é o monômero, isto é, uma molécula com uma (mono) unidade de repetição. Muitas propriedades físicas dos materiais poliméricos são diretamente proporcionais aos comprimentos de suas moléculas, isto é, da massa molar. Porém, observando a Figura 1, é possível perceber que suas propriedades variam de forma caracteristicamente assintótica com o aumento da massa molar (SEBASTIÃO; CANEVAROLO, 2006). Sendo assim, apesar das propriedades crescerem com o aumento dos tamanhos das cadeias, existe um determinado valor de massa molar (para cada tipo de polímero) que praticamente não ocorre mais variação em suas propriedades.

Figura 1 – Variação de propriedades de polímeros em função do aumento de massa molar.



Fonte: Sebastião; Canevarolo (2006).

A ligação química entre átomos da cadeia polimérica (intramolecular) é covalente, enquanto a ligação intercadeias (intermolecular) é fraca, secundária, geralmente dipolar. Os materiais poliméricos são leves, isolantes elétricos e térmicos, flexíveis e apresentam boa resistência à corrosão e baixa resistência ao calor

(PADILHA, 2000). Esses materiais podem ser classificados quanto à sua reação às altas temperaturas em termoplásticos e termofixos, sendo este último o tipo de polímero utilizado na fase matriz do sistema compósito utilizado neste trabalho.

Os termofixos (ou termorrígidos ou termoendurecidos) são plásticos que amolecem uma vez com o aquecimento, sofre o processo de cura no qual se tem uma transformação química irreversível, com a formação de ligações cruzadas, tornando-se rígido. Posteriores aquecimentos não mais alteram seu estado físico, ou seja, não amolece mais, tornando infusível e insolúvel. Exemplos: baquelite, resina epóxi (SEBASTIÃO; CANEVAROLO, 2006).

2.2 COMPÓSITOS DE POLÍMERO REFORÇADO POR FIBRAS (PRF)

Muitos projetos avançados em engenharia dependem do desenvolvimento de materiais completamente novos (HALL; VLACK, 2000). Dentre esses novos materiais se encontram os materiais compósitos que, segundo Shackelford (2008), são materiais projetados de modo a conjugar características desejáveis de dois ou mais materiais. No caso de compósitos de PRF, geralmente eles são constituídos por duas fases: a matriz e o reforço.

A fase matriz é composta pela resina de saturação que, de acordo com Juvandes (2011), tem a função de impregnar o conjunto de fibras desenvolvendo propriedades de aderência na ligação entre o PRF e o substrato do material a ser reforçado.

Ao se considerar que a distribuição de esforços ou tensões em uma matriz polimérica é uniforme em todos os seus pontos, a presença de uma segunda fase dispersa nesta matriz também “sentirá” a solicitação aplicada no conjunto. Se o módulo de elasticidade desta segunda fase for mais alto que o da matriz, o resultado será um aumento nas propriedades mecânicas do material composto. Este efeito é conhecido como “reforçamento por adição de fibras” (SEBASTIÃO; CANEVAROLO, 2006).

As fibras constituem um meio efetivo de reforço porque apresentam menor número de defeitos que em sua forma mássica. A explicação para isso advém do fato de que a medida que os materiais se tornam mais finos tendem a apresentar um menor número de defeitos que possam induzir a falhas e, dessa forma, a sua resistência tende a se aproximar da resistência teórica do material, representada pela

resistência coesiva das camadas adjacentes de átomos (PARDINI; NETO, 2006). Elas podem ser produzidas e comercializadas em diferentes configurações, por exemplo como Fibras longas enroladas em carretel (Figura 2) ou na forma de tecidos com fibras bidirecionais (Figura 3). Cada configuração resulta em um compósito de propriedades diferentes.

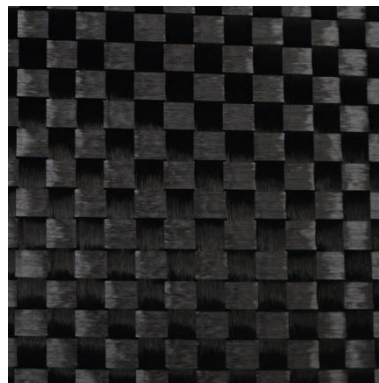
Figura 2 – Fibras de carbono longas e contínuas enroladas em carretel.



Fonte: Galli (2016).

O que determinará o comportamento final de um compósito de PRF são os materiais que o constituem, a interação entre esses materiais (ou seja, a adesão ou ligação entre as fibras e a matriz) e a maneira que se dá a execução do processo de fabricação do componente final (JUVANDES 2002).

Figura 3 – Tecido com fibras de carbono bidirecionais.



Fonte: E-composites (2018).

Fibras orientadas em uma única direção apresentam maiores valores de resistência mecânica e rigidez na direção longitudinal, em relação a tecidos bidirecionais, onde os resultados de resistência mecânica e rigidez apresentariam valores intermediários. Entretanto, tal fato só se verifica para esforços mecânicos longitudinais. Se os esforços forem aplicados transversalmente, o melhor desempenho ocorreria para o caso de tecidos bidirecionais. (NETO; PARDINI, 2006).

Um típico exemplo de compósito PRF é a fibra de carbono em matriz polimérica (PRFC). A fibra de carbono confere elevada resistência mecânica, enquanto a matriz polimérica, na maioria dos casos constituída de resina epoxídica, é responsável pela distribuição do carregamento, ductilidade e diminuição da densidade do compósito (PADILHA, 2000), obtendo-se um material leve de elevada resistência e pequena espessura.

Arquez (2010) confirma que dentre as diversas fibras sintéticas possíveis de serem utilizadas para reforçar estruturas de concreto, o sistema que se destaca é o de polímero reforçado por fibras de carbono (PRFC). Isso é devido à grande força de ligação entre os átomos de carbono (ligações covalentes), associada à baixa densidade das fibras e do polímero. Dessa forma, esse material encontra indicação para reforçar elementos estruturais em que, no projeto, é exigido acréscimo insignificante de carga permanente na estrutura e/ou espessura mínima aliado a elevada resistência mecânica à tração.

2.2.1 Fibras de Carbono

Atualmente existem diversas fibras naturais (algodão, juta, sisal, coco, linho etc.) e sintéticas (vidro, poliamida aromática, carbono etc.) disponíveis no mercado. Porém, as fibras de carbono são as que se destacam em aplicações de reforço de estruturas de concreto, isso porque elas apresentam características que melhor se ajustam às exigências desse tipo de aplicação.

Juvandes (1999) cita que essa conclusão é partilhada por vários autores com artigos publicados em conferências internacionais. É possível confirmar esse fato ao confrontarmos as fibras de carbono com outras fibras (Tabela 1). Fazendo isso podemos verificar fatores decisivos como maiores resistências à tração, o valor do módulo de elasticidade longitudinal bem próximo ao do aço (Figura 4) e o seu bom

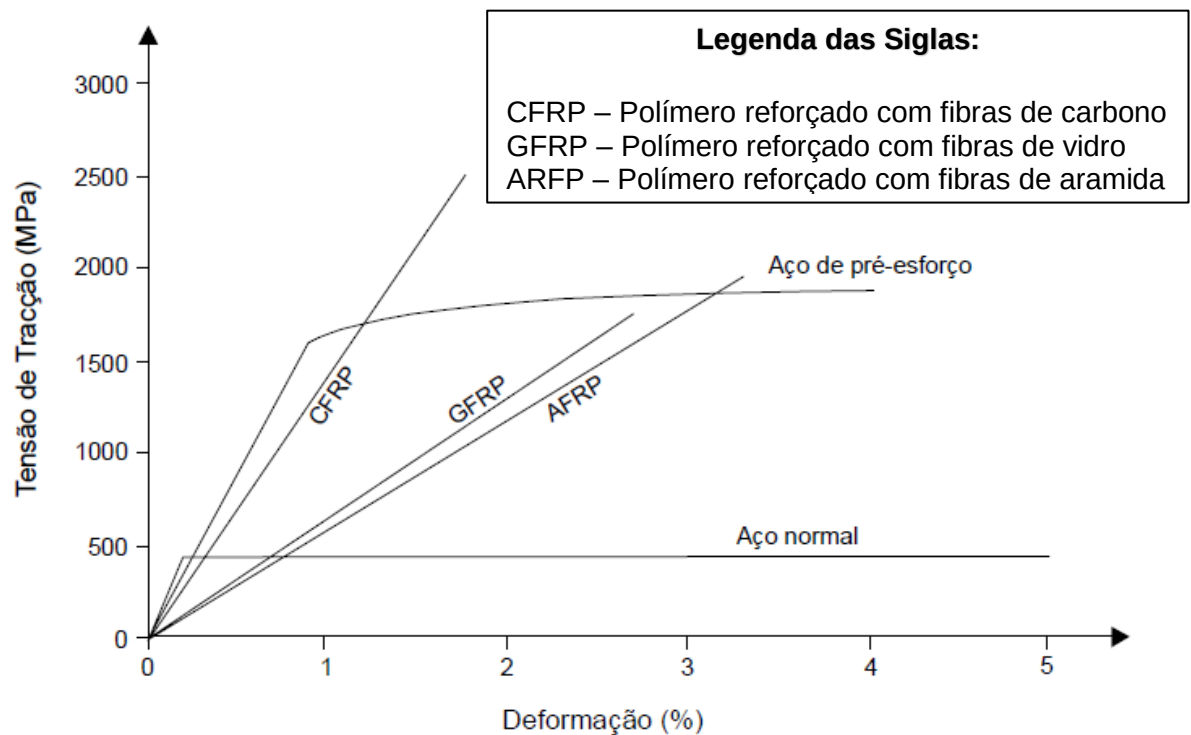
comportamento à fadiga, além da boa resistência à ambientes alcalinos (JUVANDES, 1999).

Tabela 1 – Densidades e propriedades mecânicas de diferentes tipos de fibras.

Fibra	Densidade (g/cm ³)	Alongamento (%)	Tensão na ruptura (MPa)	Modulo de Young (GPa)
Algodão	1,5-1,6	7,0-8,0	287-597	5,5-12,6
Juta	1,3	1,5-1,8	393-773	26,5
Rami	-	3,6-3,8	400-938	61,4-128
Linho	1,5	2,7-3,2	345-1035	27,6
Sisal	1,5	2,0-2,5	5511-635	9,4-22
Fibra de côco	1,2	3,0	175	4,0-6,0
Vidro-E	2,5	2,5	2000-3500	70,0
Vidro-S	2,5	2,8	4750	86,0
Aramida (normal)	1,4	3,3-3,7	3000-3150	63,0-67,0
Carbono (padrão)	1,4	1,4-1,8	4000	230,0-240,0
Curauá	1,4	4,2	890-4.200	50,4

Fonte: Marinelli et al. (2008).

Figura 4 – Comportamento à tração de vários sistemas PRF e aço.



Fonte: Abdelrahman et al. (1997, apud JUVANDES, 1999).

2.2.1.1 Tipos de fibras de carbono

A classificação das fibras de carbono pode se dar baseada no tipo de precursor, no seu módulo de elasticidade, resistência mecânica e na temperatura de tratamento térmico final (SOUTO et al., 2015), como pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação dos tipos de fibras de carbono.

Baseado nas propriedades da fibra	TIPOS	VALORES
	Módulo ultra-alto	> 450 GPa
	Módulo alto	350 - 450 GPa
	Módulo intermediário	200 - 350 GPa
	Baixo módulo e alta tensão	módulo < 100 GPa / resistência a tensão > 3 GPa
	Super alta tensão	resistência a tensão > 4,5 GPa
Baseado nos precursores	TIPOS	SUBTIPOS
	Fibra de PAN	
	Fibra de piche	mesofásico / isotrópico
	Fibras de rayon	
	Fibras com crescimento em fase vapor	
Baseado na temperatura de tratamento térmico	TIPOS	Temperatura/classificação
	Tratamento de alto aquecimento	> 2000°C / alto módulo
	Tratamento de aquecimento intermediário	em torno de 1500°C / alta força
	Tratamento de baixo aquecimento	em torno de 1000°C / baixo módulo e baixa força

Fonte: HEGDE (2004, apud SOUTO, 2015).

Analisando as classificações, percebe-se que diversos tipos de fibras de carbono podem ser fabricados alterando parâmetros como, por exemplo, a temperatura (Tabela 2) e, essas diferentes fibras de carbono são atualmente encontradas no mercado para diversas aplicações (GUIMARÃES, 2018).

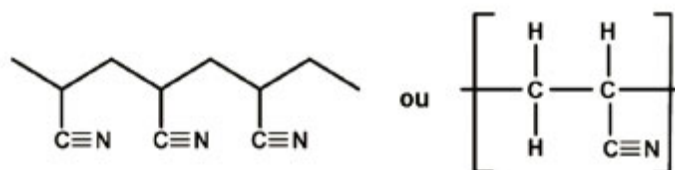
2.2.1.2 Fibras de carbono obtidas a partir da poliacrilonitrila (PAN)

As fibras de carbono tiveram seu uso expandido nas últimas décadas devido à diminuição do custo em seu processo de fabricação, com isso os materiais compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras de carbono estão passando a

serem utilizados cada vez mais na construção civil (GALLI, 2016). Elas são fabricadas pela pirólise controlada de precursores orgânicos em forma de fibras, onde é realizado um tratamento térmico do precursor que remove oxigênio, nitrogênio e hidrogênio dando origem às fibras de carbono (PARDINI; NETO, 2006). Os precursores mais empregados para obtenção de fibra de carbono são a poliacrilonitrila (PAN), o piche (mesofásico e isotrópico) e o rayon. Desses, o precursor mais importante e mais utilizado para aplicações estruturais devido ao seu alto percentual de carbono e que vem sendo largamente utilizado em produção comercial, é a poliacrilonitrila (SOUTO, et al., 2015). O custo aproximado das fibras de PAN destinadas à fabricação de fibras de carbono é de US\$ 5,00/kg (PARDINI; NETO, 2006).

Na Figura 5 é possível ver a estrutura molecular de um homopolímero de poliacrilonitrila.

Figura 5 – Estrutura molecular do homopolímero de PAN.



Fonte: Brito Júnior et al. (2013).

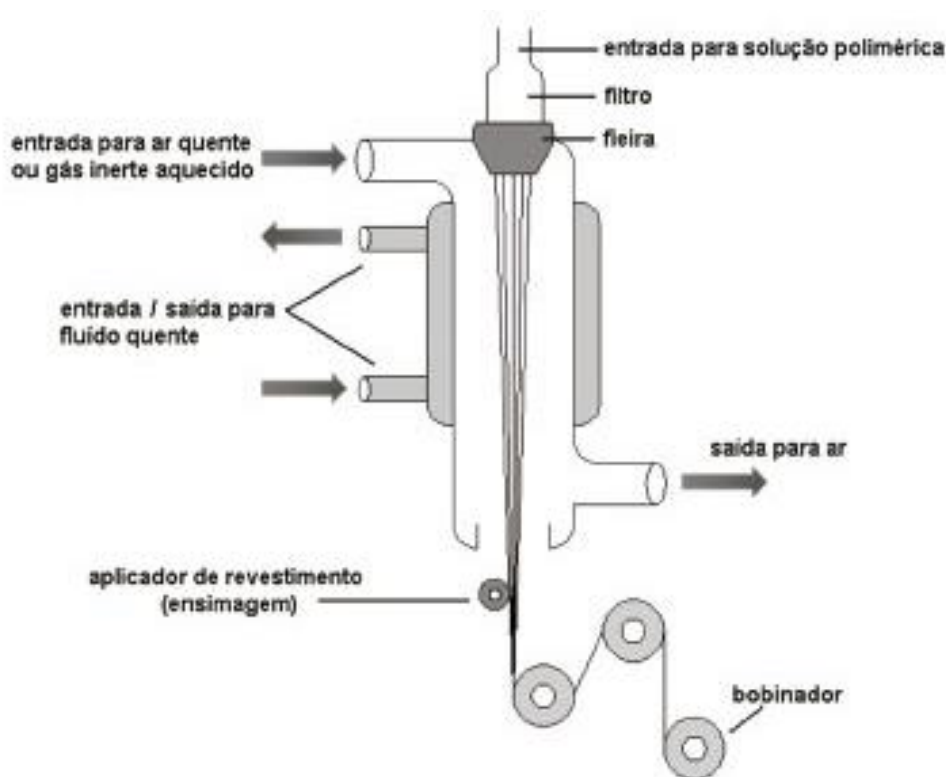
Antes da fabricação das fibras de carbono é necessário obter as fibras de PAN. Os processos mais utilizados para obtenção das fibras de poliacrilonitrila são a fiação a seco e a fiação a úmido (PARDINI; NETO, 2006).

A Fiação a seco, como podemos ver na Figura 6, é um processo relativamente simples. A PAN é fundida e extrudada através de uma fieira que contém um determinado número de pequenos capilares (PARDINI; NETO, 2006). As fieiras são manufaturadas em liga de aço inox e costumam apresentar cerca de 2800 orifícios com 0,1 a 0,3 mm de diâmetro para cada capilar (BRITO JÚNIOR et al., 2013).

O solvente presente nessas fibras é evaporado por um gás quente e inerte ou ar quente assim que sai da fieira dentro de uma célula de fiação. Essa célula pode apresentar um diâmetro entre 250 a 450 mm e comprimento de 6 até 10 metros. A fim de assegurar a rápida evaporação do solvente, a temperatura do gás usado para este propósito encontra-se geralmente acima do ponto de ebulição do solvente (acima de 200°C). Dentre os possíveis solventes da PAN o DMF (dimetilformamida) apresenta

menor ponto de ebulição (153°C). O solvente evaporado é removido do sistema com o gás sendo este recuperado por destilação. As fibras solidificam-se no momento em que o solvente é removido dentro da célula vertical de fiação. Este processo não garante total remoção do solvente das fibras de PAN. Há sempre um teor de 5 a 25% de solvente residual nos filamentos. Isso pode provocar uma inibição na orientação molecular da PAN interferindo nas propriedades finais da fibra como, por exemplo, a tenacidade (BRITO JÚNIOR et al., 2013).

Figura 6 – Ilustração do sistema de fiação a seco para produção de fibras de PAN.



Fonte: Brito Júnior et al. (2013).

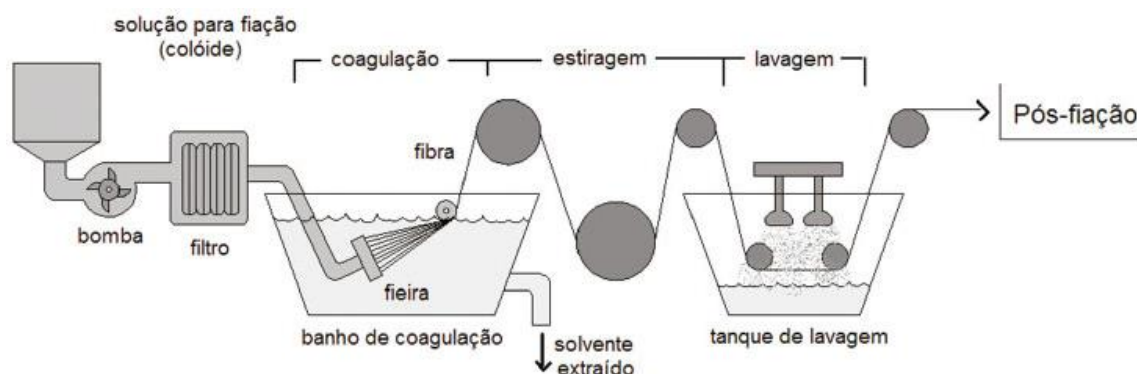
No processo de fiação a úmido (Figura 7), uma solução concentrada do precursor é dissolvida em um solvente apropriado (geralmente DMF), que forma uma solução com viscosidade adequada ao processo de fiação, é extrudado através de uma fieira em um banho de coagulação (PARDINI; NETO, 2006).

Enquanto ocorre a coagulação das fibras, a DMF (ou outro solvente) é removido das fibras de PAN e recuperado em uma planta de destilação para, então, ser reaproveitado no processo (BRITO JÚNIOR, et al., 2013). Como o solvente é mais solúvel na solução de coagulação que o precursor, a solução do polímero que emerge

dos capilares coagula na forma de fibras (PARDINI; NETO, 2006).

Durante todo o processo as fibras são tensionadas por cilindros com a finalidade de aumentar a orientação molecular do polímero que contribui para o aumento de suas propriedades mecânicas. (BRITO JÚNIOR, et al., 2013).

Figura 7 – Ilustração do sistema de fiação úmida para produção de fibras de PAN.



Fonte: Brito Júnior et al. (2013).

Finalmente, após a obtenção das fibras de poliacrilonitrila (seja pelo processo de fiação a seco ou de fiação a úmido) é possível seguir para a fabricação das fibras de carbono. Pardini e Neto (2006) explicam a rota de obtenção de fibras de carbono a partir da poliacrilonitrila (Figura 8) da seguinte maneira:

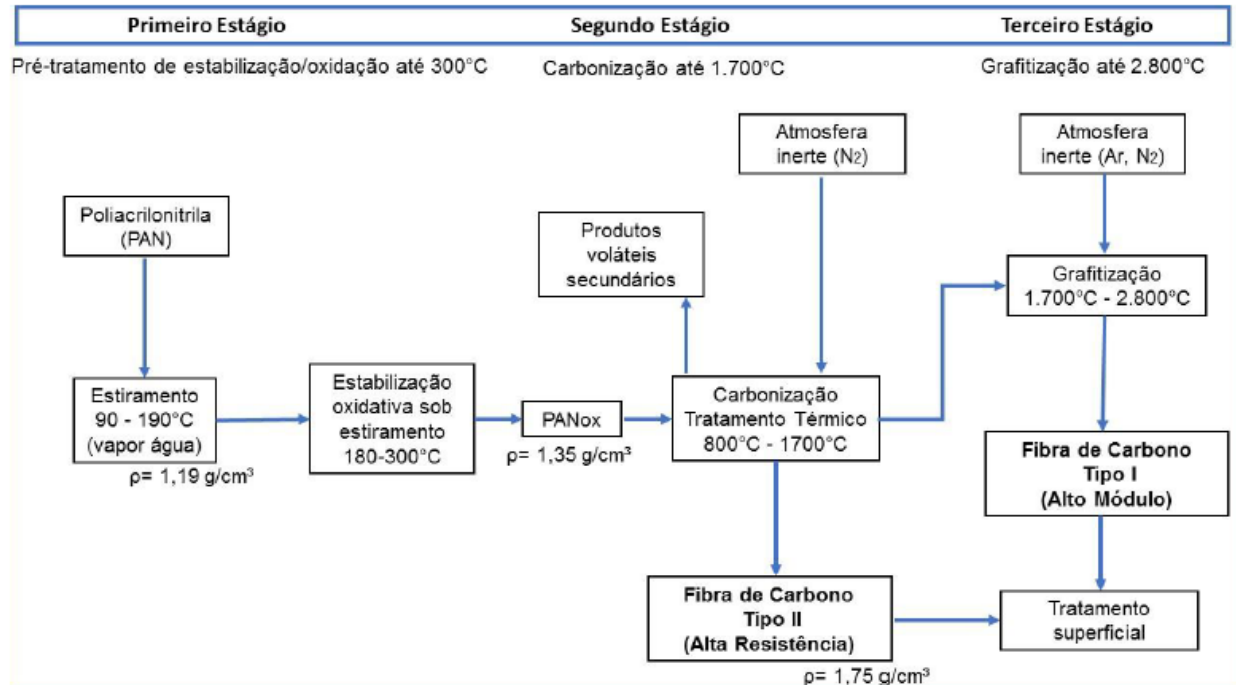
No primeiro estágio da rota ocorre o pré-tratamento de estabilização/oxidação onde se atinge temperaturas de até 300°C.

O segundo estágio é a carbonização e a temperatura de pico é de 1700°C. A perda de massa nessa etapa quando o precursor utilizado é a PAN está em 55 a 60% (SOUTO et al., 2015).

A grafitização ocorre no terceiro estágio onde se atinge a temperatura de até 2800°C.

A conversão da fibra de poliacrilonitrila em fibra de carbono apresenta um crescimento monotônico da massa específica a partir de 1,19 g/cm³ (PAN) até 1,78 g/cm³ (fibra de carbono) a 1000°C. Nesse intervalo de temperatura a fibra apresenta um encolhimento linear final de aproximadamente 10% (NETO; PARDINI, 2006). Os inconvenientes de se utilizar o precursor poliacrilonitrila são o seu custo (cerca de 50% do custo da fibra de carbono), o rendimento, a toxicidade do solvente e a grafitização lenta (SOUTO et al., 2015).

Figura 8 – Representação esquemática da obtenção de fibras de carbono a partir da poliacrilonitrila (PAN).



Fonte: Donnet (1998, apud GUIMARÃES, 2018).

Com base no conteúdo de carbono elementar ou na temperatura na qual as fibras tenham sido aquecidas, elas podem ser classificadas como “carbonizadas” ou “grafitizadas” (Figura 12) (SINGER, 1977, apud JULIÃO 2002).

As fibras com conteúdo de carbono elementar de até 90% em peso são classificadas como “parcialmente carbonizadas”. Já as que têm um conteúdo de carbono elementar entre 91 a 98% em peso são classificadas como “carbonizadas”, e as que têm um conteúdo de carbono elementar maior que 98% em peso são classificadas como grafite (SCHIMIDT & JONES, 1962 apud JULIÃO, 2002).

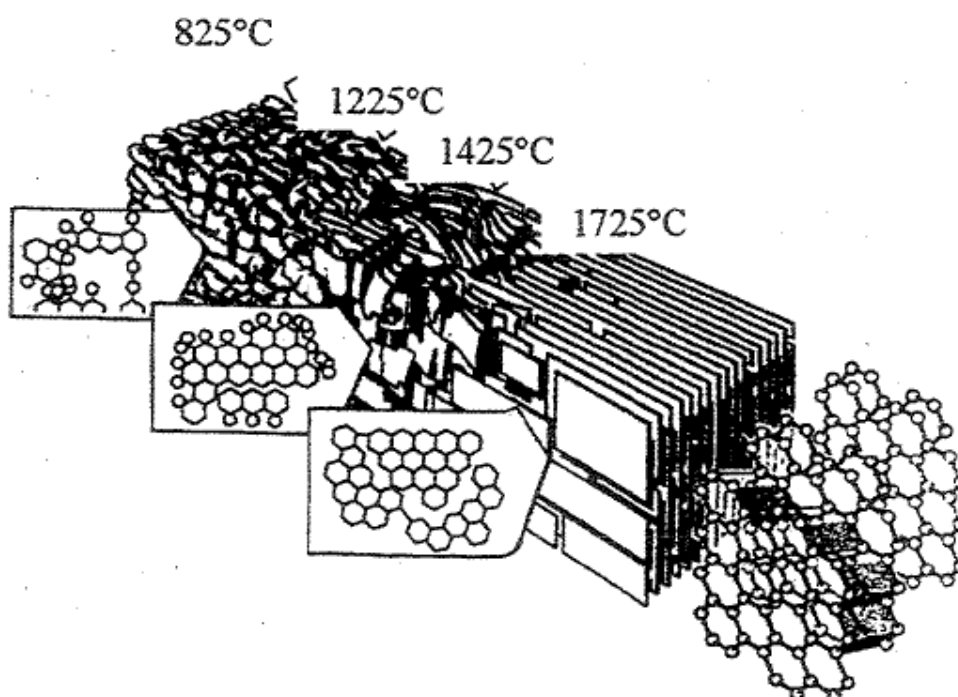
Continuando com as classificações, para Schmidt & Jones (1962) fibras preparadas a temperaturas entre 705°C e 930°C são definidas como parcialmente carbonizadas ou totalmente carbonizadas, enquanto as tratadas desde 2.705°C até 2.985°C são classificadas como grafite (SINGER, 1977 apud, JULIÃO, 2002).

O processo de grafitação, conforme mostra esquematicamente a Figura 9, leva ao desenvolvimento de ordenamento cristalográfico em materiais de carbono, aproximando-se da estrutura ideal do cristal de grafite (PARDINI; GONÇALVES, 2009).

É necessário atentar para o fato de que a resistência máxima à tração é obtida a 1500°C. Acima dessa temperatura, há aumento do módulo de elasticidade e redução da resistência. Além disso, uma taxa de carbonização rápida provoca defeitos estruturais à fibra, enquanto taxas lentas causam uma perda muito grande de heteroátomos, devido a gaseificação na carbonização, gerando consequentemente uma fibra com muitos poros e propriedades mecânicas baixas (SOUTO et al., 2015).

Para se melhorar as propriedades das fibras de carbono é necessário promover um aumento de sua cristalinidade, orientação e redução de seus defeitos. Isso é obtido a partir de um precursor altamente orientado e é necessário manter essa alta orientação inicial durante o processo de estabilização e carbonização sob estiramento (PARDINI; NETO, 2006).

Figura 9 – Modelo estrutural para as fibras de carbono durante a grafitização.



Fonte: Bunsell (1998, apud JULIÃO, 2002).

2.2.2 Resinas Epóxi

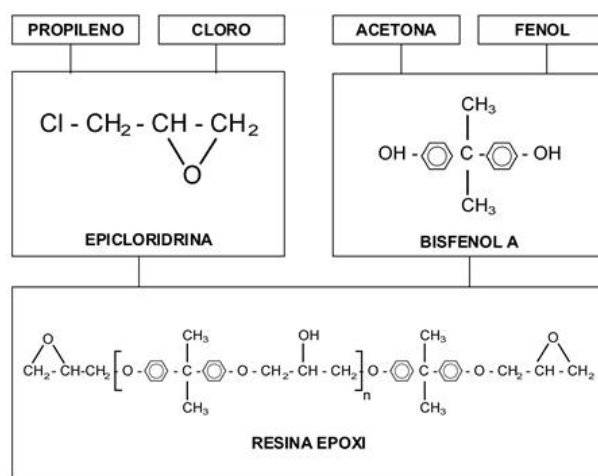
As resinas epóxi são materiais poliméricos termofixos que possuem alta densidade de ligações cruzadas. Esse alto teor de ligações cruzadas é o que permite à essas resinas elevadas propriedades mecânicas, alta temperatura de transição

vítrea (T_g), resistência ao envelhecimento, elevada resistência química etc. O seu processo de cura pode ser realizado com aplicação de calor ou não (MARINUCCI, 2011).

Tão importante quanto à fibra já referida, a resina termorrígida (fase matriz) tem como funções transmitir os esforços para à fase reforço, protegê-la da agressividade ambiental e de possível danos mecânicos e, ainda, ser um eficiente/eficaz adesivo de impregnação das fibras e do próprio sistema compósito no substrado de concreto (JUVANDES, 1999).

Além das funções já citadas, a matriz polimérica também representa suporte físico contra a instabilidade das fibras sob solicitações de compressão e, por esse motivo, a seleção da matriz deve ser criteriosa, o que justifica, geralmente, a opção pelas resinas termofixas do tipo epóxi, no caso dos sistemas PRFC mais utilizados na técnica de reforço por colagem (ACI 440R-96, 1996 apud JUVANDES, 1999).

Figura 10 – Polimerização da resina epóxi.



Fonte: HEGDE (2004, apud SOUTO, 2015).

A polimerização do epóxi é traduzida pela reação química entre o oxigênio da resina e o hidrogênio das aminas contidas no endurecedor. Para se obter um produto epóxi com boas características, a etapa da mistura dos componentes deve ser adequada de modo que qualquer molécula do endurecedor estabeleça ligação com as moléculas da resina epóxi. A densidade destas ligações e, conseqüente, o grau de endurecimento do adesivo são funções da estrutura química da resina ainda líquida, do agente de endurecimento e das condições de reação, como o tempo, a temperatura

e a umidade (JUVANDES, 1999).

As resinas epóxi formadas a base de bisfenol-A (Figura 10) são as mais utilizadas por serem versáteis e de baixo custo. Provem da reação de policondensação de epícloridrina e bisfenol A, podendo ser líquidas, semi-sólidas ou sólidas dependendo do seu peso molecular. O grau de polimerização (n) dessa resina pode variar de 1 a 12 vezes.

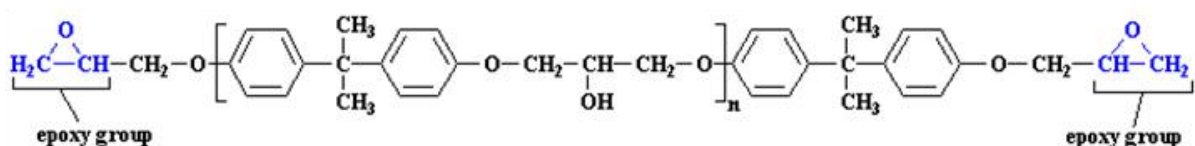
- Para $n = 0$, o peso molecular é de 340
- Para $n = 1$, o peso molecular é de 624
- Para $n = 2$, o peso molecular é de 908, etc.

Dessa forma, as resinas com peso molecular maior que 908 são sólidas e abaixo disso são líquidas ou semi-sólidas. As comercializadas são misturas de resinas de diferentes pesos moleculares.

O principal motivo do uso dessas matérias primas, é que a epícloridrina reage com quase todas as moléculas que têm hidrogênio ativo, além da fácil obtenção na petroquímica. O bisfenol-A é relativamente barato, assim como os produtos de partidas para sua reação, acetona ou fenol.

Na figura 11 é possível ver uma cadeia estruturada de resina epóxi.

Figura 11 – Cadeia estruturada de resina epóxi.



Fonte: HEGDE (2004, apud SOUTO, 2015).

O aumento do número de ligações no polímero leva a um incremento do módulo de elasticidade, da temperatura de transição vítrea (T_g), da estabilidade térmica e da resistência química. Após um processo de cura à temperatura ambiente, as propriedades do adesivo podem ser implementadas com uma pós-cura a quente (JUVANDES et al., 1998-a e 1998-e apud JUVANDES 1999).

As resinas epóxi encontram interessantes aplicações quando associadas com diversos tipos de fibras, haja vista a integração de propriedades que são obtidas com os dois materiais. A Tabela 3 mostra o comportamento de compósitos de epóxi de alto desempenho com vários tipos de fibras (SEBASTIÃO; CANEVAROLO, 2006).

Tabela 3 – Comportamento mecânico de compósitos de epóxi com diferentes fibras.

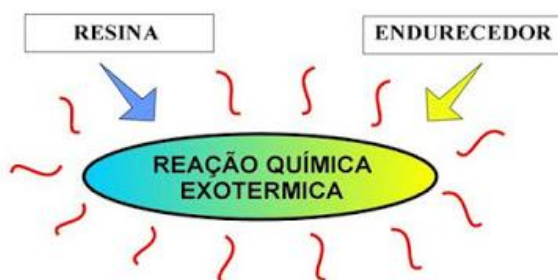
Fibra Compósito *	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência a tração (GPa)	Densidade (g/cm ³)
Resina epóxi	3,5	0,09	1,20
Fibra de vidro tipo E	72,4	2,4	2,54
Compósito de epóxi	45	1,1	2,10
Fibra de vidro tipo S	85,5	4,5	2,49
Compósito de epóxi	55	2,0	2,00
Fibra de boro	400	3,5	2,45
Compósito de epóxi	207	1,6	2,10
Fibra de grafite de alta resistência	253	4,5	1,80
Compósito de epóxi	145	2,3	1,60
Fibra de grafite de alto módulo	520	2,4	1,85
Compósito de epóxi	290	1,0	1,63
Fibra de aramida (Kevlar)	124	3,6	1,44
Compósito de epóxi	80	2,0	1,38

* Compósito com 33,3% de fibra unidirecional

Fonte: Sebastião; Canevarolo (2006).

São importantes as noções do tempo de utilização (pot life) e do tempo de contato (open time).

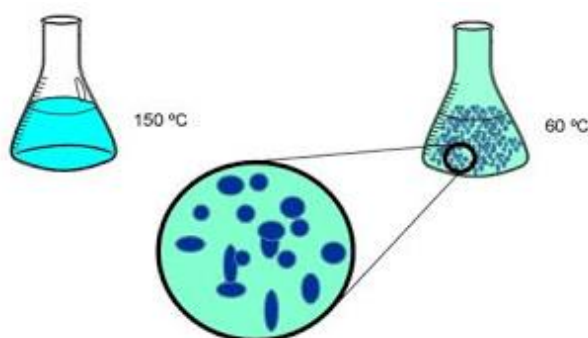
O tempo de utilização (pot life) é o intervalo de tempo, após a mistura da resina base e restantes componentes, durante o qual o material líquido é utilizável sem dificuldade. Ao finalizar o pot life, qualquer formulação do polímero perde as suas características de aderência.

Figura 12 – Fluxo de uma exotermia.

Fonte: Resina Epóxi (2018).

O tempo de utilização diminui com o aumento da temperatura e da quantidade de material a preparar, haja vista que durante a cura há uma reação exotérmica (JUVANDES, 1999). Essa exotermia (Figura 12) é o resultado do aumento da temperatura da mistura devido a energia liberada dos grupos epóxi durante a reação de polimerização.

Figura 13 – Adição de cargas inertes diminui a exotermia.



Fonte: Resina Epóxi (2018).

Se houver presença de cargas inertes durante as reações o tempo de utilização tende a aumentar, pois todo material que não participa da reação, irá absorver a energia desprendida, evitando que a temperatura suba demais. Na Figura 13 podemos constatar esse fenômeno pois, apesar dos dois recipientes terem o mesmo volume, o que tem cargas inertes em seu interior apresenta uma menor temperatura (60°C) do que o outro (150°C) (RESINA EPÓXI, 2018).

Tabela 4 – Percentual de contração das resinas epóxi.

TIPO DE CONTRAÇÃO	SEM CARGA	COM CARGA
Antes do gel	2,82	2,12
Após o gel	2,46	2,10
Curado	1,90	0,63

Fonte: Resina Epóxi (2018).

Além da dissipação térmica, as cargas inertes também atuam reduzindo sensivelmente a contração observada durante a cura da resina (Tabela 4). Durante a contração, forças internas são criadas, podendo haver até rupturas (trincas). Essa

redução no volume ou dimensões lineares é uma das consequências de uma exotermia muito alta (RESINA EPÓXI, 2018).

O tempo de contato (open time) pode ser definido como o intervalo de tempo que decorre entre o momento em que a formulação é aplicada na superfície a colar e o instante em que esta começa a endurecer e deixa de ser possível efetuar a colagem. Sendo assim, a união das peças deve ser realizada neste intervalo de tempo para que a colagem apresente as características desejadas (JUVANDES, 1999).

2.2.2.1 Imprimadores primários, regularizadores de superfície e resinas de saturação

As resinas de saturação são utilizadas para a impregnação das fibras que constituem o reforço estrutural dos compósitos, fixando-as no local e garantindo um meio efetivo para a transferência das tensões (PEREIRA, 2012).

Diferentemente das resinas de saturação, os imprimadores primários (primers) e os regularizadores de superfície não são formulações do tipo adesivo. Porém, esses produtos têm capacidade de completar e melhorar o desempenho da união entre o sistema compósito e o substrato do elemento a ser reforçado.

Os primers penetram no substrato de concreto por capilaridade, de modo a melhorar a propriedade adesiva da superfície, para a recepção da resina de saturação ou do adesivo (JUVANDES, 1999). Dessa forma, os imprimadores primários têm como objetivo colmatar os poros do concreto para que, juntamente com a película aderida à superfície do concreto, estabeleça uma ponte de aderência eficiente (MACHADO, 2002).

Os regularizadores, por sua vez, são usados com o intuito de eliminar pequenas irregularidades na superfície de concreto com o objetivo de evitar a formação de bolhas de ar e, assim, garantir uma superfície lisa para a colagem do sistema PRFC endurecido “in situ” (JUVANDES, 1999). Quanto maior a irregularidade superficial maior será o consumo desse material. Machado (2002) explica ainda que devido à grande flexibilidade dos sistemas compósitos, algumas superfícies não necessitam obrigatoriamente estarem niveladas com a horizontal, admitindo-se alguma ondulação residual sem que ocorra risco de diminuição da eficiência do sistema.

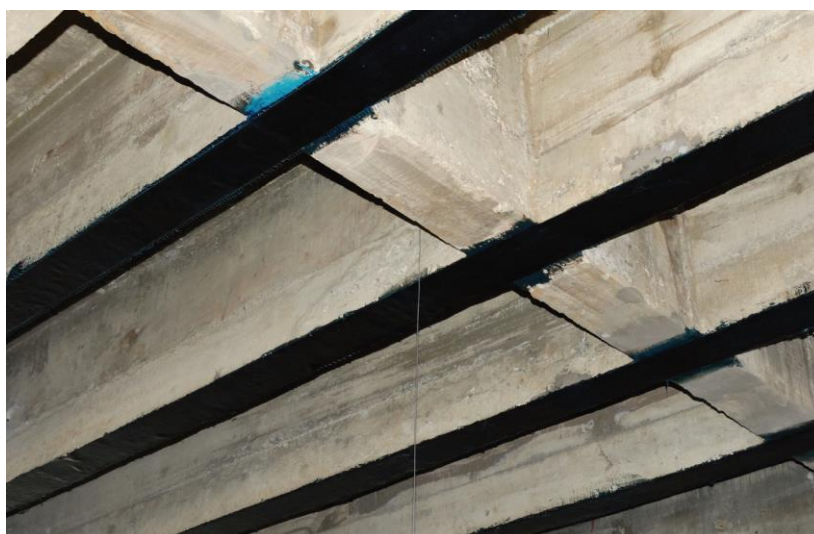
2.2.3 Reforço Estrutural com Compósitos de Fibras de Carbono (CFC)

Apesar dos esforços desenvolvidos por diversos pesquisadores, a técnica de reforço estrutural com compósitos de fibras de carbono (CFC) é uma técnica relativamente nova para uso na construção civil, o que implica que ainda não exista no Brasil documentação específica e devidamente normalizada em relação aos procedimentos para projeto e aplicação deste tipo de reforço.

Esse tipo de reforço estrutural pode ser feito a partir de sistemas pré-fabricados ou por sistemas curados “in situ”. Segundo Juvandes (1999), a técnica de sistemas pré-fabricados é a forma mais comum usada nas aplicações de reforço estrutural na Europa (Suíça e Alemanha). Já o sistema curado “in situ” tem sido bastante promovido pelo Japão e América do Norte (Canadá e EUA), apesar de que também tem sido investido na Europa (em menor escala).

O processo de fabricação do sistema curado “in situ” consiste na aplicação de feixes de fibras contínuas, com a forma de fios, mantas ou tecidos em estado seco ou pré-impregnado, sobre uma resina epóxi previamente espalhada no substrato do elemento estrutural a se reforçar. Após a polimerização e consequente endurecimento da resina “in situ”, esse sistema terá um comportamento semelhante ao dos laminados pré-fabricados, desde que o substrato do elemento a se reforçar esteja devidamente limpo e regularizado (MEIER, 1997-a, apud JUVANDES, 1999).

Figura 14 – Técnica EBR. Laminados de PRFC colados na região tracionada das vigas.

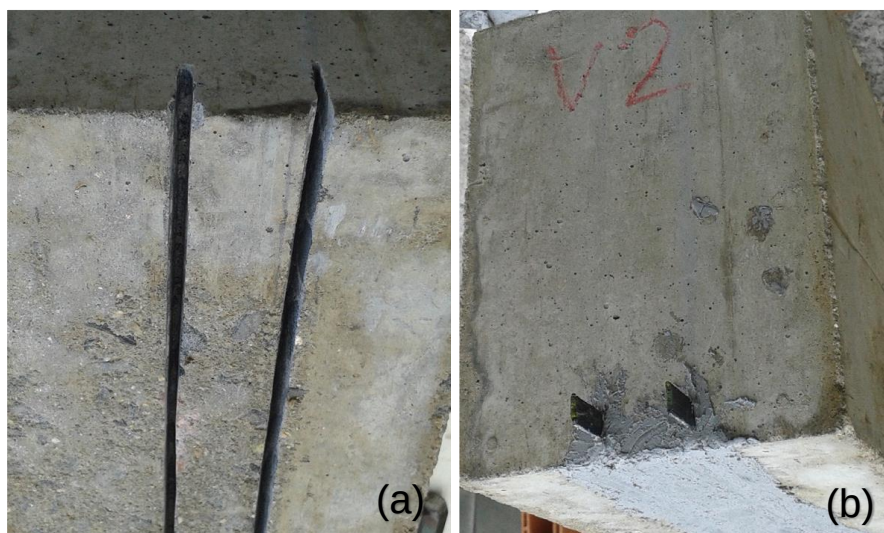


Fonte: Araújo *et al.* (2017).

Essa técnica de reforço feita pelo processo de fabricação do sistema curado “in situ” pode ser executada por colagem externa do compósito, designada por EBR (“Externally Bonded Reinforcement”), ou por colagem do compósito num rasgo aberto no elemento estrutural a se reforçar, referindo-se ao NSR (“Near-Surface Mounted Reinforcement”). Ambas as técnicas estão representadas nas Figuras 14 e 15.

Houve uma crescente demanda nos últimos anos da aplicação do tipo de reforço unidirecional nas vigas de concreto armado. Estudos indicam que a aplicação de laminados, colados na superfície externa do elemento pela técnica External Bonded Reinforcement (EBR) ou inseridos no cobrimento de concreto, pela técnica Near Surface Mounted (NSM) são alternativas muito eficazes no aumento e na reabilitação da capacidade resistente do elemento estrutural. (CARVALHO, 2010 apud ARAÚJO, 2017).

Figura 15 – Técnica NSM: (a) entalhes realizados no cobrimento de concreto da região tracionada da viga; (b) laminados de PRFC inseridos e colados nos entalhes realizados.



Fonte: Araújo *et al.* (2017).

Na concepção de Carvalho (2010, apud ARAÚJO, 2017), a aplicação dos sistemas EBR e NSM é de elevada facilidade e rapidez, permitindo a intervenção mais ágil na estrutura quando comparada com outras técnicas de reforço como o encamisamento ou a adição de chapas coladas.

No caso específico deste trabalho, interessará a técnica EBR pelo sistema

curado “in situ”.

Ao se utilizar compósitos de fibra de carbono como reforço para estruturas de concreto com a técnica de colagem externa do laminado, é necessário garantir que ocorra uma efetiva transferência de esforços entre o concreto e o CFC. Problemas devido ao desprendimento do reforço antes de se atingir o aproveitamento máximo do material podem vir a ocorrer, e a ruptura se dá entre a fase reforço e a fase matriz (resina) ou entre a resina e o substrato de concreto (ARQUEZ, 2010 apud ARAÚJO, 2017). Desta forma, é vital a verificação da força resistente na ligação reforço-estrutura, bem como adotar os procedimentos necessários para a correta preparação do substrato.

2.2.3.1 Sequência de aplicação do reforço

Se o elemento a ser reforçado estiver sofrendo com alguma patologia, este deverá passar primeiramente por um processo de recuperação (PEREIRA, 2012), pois de nada adianta ancorar um sistema de reforço sobre uma superfície deficiente.

O próximo passo é a imprimação da superfície, previamente limpa e tratada, sobre a qual será aplicado o sistema compósito (Figura 18). Para isso é necessário preparar o primer na devida proporção estabelecida pelo fabricante e aplicá-lo corretamente com o auxílio de um rolo.

Figura 16 – Imprimação da superfície de uma laje em reforço estrutural executado pela empresa Engecal.



Fonte: Pereira (2012).

Deve-se dar preferência por primers epóxi com elevados teores de sólidos, pois ao penetrar nos poros do concreto e estabelecer película sobre o seu substrato acaba criando uma interface muito eficiente para a transmissão de esforços entre o compósito e a peça o elemento estrutural de concreto (PEREIRA, 2012).

Em seguida deve ser aplicado, se necessário, o regularizador de superfícies (Figura 19). Quando as superfícies apresentam muitas imperfeições, se faz necessário corrigi-las com o uso de pastas regularizadoras de superfícies para, assim, estabelecer um plano adequado e nivelado para a aplicação do sistema compósito (PEREIRA, 2012).

Figura 17 – Aplicação do regularizador de superfície em uma viga numa das etapas do reforço estrutural executado pela empresa Engecal.



Fonte: Pereira (2012).

A próxima etapa consiste na aplicação da primeira camada resina de saturação que servirá para impregnar (saturar) a lâmina de fibras de carbono e aderir-la ao substrato de concreto. Após cortar as fibras de carbono nas devidas dimensões que o projetista estrutural tiver estabelecido, elas deverão ser aderidas às peças a serem reforçadas. Para isso, segundo Machado (2002), as fibras poderão passar pelo processo de saturação via úmida ou de saturação via seca.

No processo de saturação via úmida a lâmina de fibra de carbono é saturada em uma bancada própria para este fim, sendo depois transportada para sua aplicação

na peça a ser reforçada. Já no processo de saturação via seca (Figura 20) primeiramente a superfície do elemento estrutural de concreto a ser reforçado é saturada para, em seguida, ser colada a lâmina de fibra de carbono sobre ela.

Figura 18 – Aplicação de epóxi estruturante em laje. Reforço estrutural à flexão executado pela empresa Engecal.



Fonte: Pereira (2012).

Após isso, deverá ser aplicada a lâmina de fibras de carbono (manta ou tecido), como podemos ver na Figura 21.

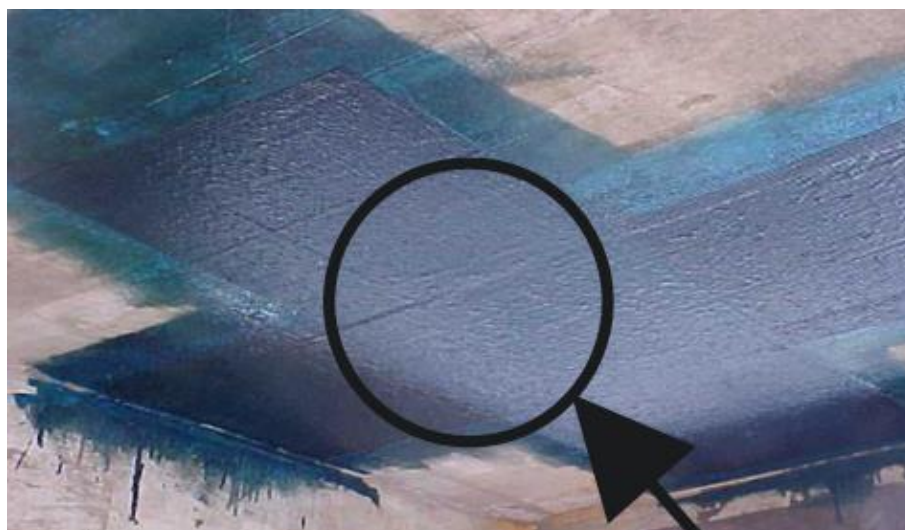
Figura 19 – Aplicação da lâmina da fibra em um reforço estrutural executado pela empresa Engecal.



Fonte: Pereira (2012).

A seguir deverá ser aplicada a segunda camada de resina saturante para completar a impregnação da lâmina de fibras, conformando a matriz epoxídica que envelopa o sistema (PEREIRA, 2012). Após essas etapas o reforço estará concluído (Figura 22). Porém, adicionalmente as etapas descritas anteriormente, poderá ser aplicado, adicionalmente, uma película de acabamento de alto brilho e resistente à corrosão, com o objetivo de proteção e/ou acabamento estético.

Figura 20 – Reforço estrutural à flexão em laje concluído com utilização manta de fibra de carbono.



Fonte: Pereira (2012).

2.3 ENSAIOS

2.3.1 Aderência por Tração Direta *Pull-off*

A garantia da boa aderência na ligação entre o sistema compósito e o substrato de concreto constitui um dos principais aspectos para o sucesso dos trabalhos de reforço das estruturas. Para isso, o ensaio de aderência por tração direta permite verificar se as especificações exigidas foram alcançadas.

O passo a passo desse ensaio consiste em colar uma pastilha metálica sobre o compósito com auxílio de uma cola epóxica (adesivo + endurecedor). Após a cura completa desta ligação, pode-se então colocar o equipamento, de modo que a garra (uma haste com rosca fuso) deste “abrace” a pastilha metálica, colocando em seguida

o indicador da escala em zero, e iniciando o ensaio propriamente dito. Para isso deverá ser aplicada uma força de tração exercida manualmente na manivela de tensão do aparelho de pull-off (Figura 23), após um determinado número de voltas (até no máximo 25) o compósito poderá, ou não, ser arrancado do substrato de concreto.

A solicitação de tração é transmitida axialmente para a pastilha metálica de ensaio que está colada sobre o compósito e o aumento gradual da força pode ser observado diretamente num indicador de escala digital (em quilograma-força) que é registrado assim que se dá o arrancamento do corpo-de-prova na seção mais fraca deste. Ao analisando a região que foi arrancada, é possível observar se a seção pertence ao concreto (arrancamento por tração), ou se, por outro lado, está contida na superfície de ligação entre os materiais (arrancamento por aderência entre o PRFC e a superfície de concreto).

Figura 21 – Equipamento de para ensaio de tração direta via *pull-off*.



Fonte: Autor (2018).

A classificação com relação se o reforço será aprovado, ou não, é dada por Pereira (2009), onde o avaliador deverá utilizar o equipamento de arrancamento em, no mínimo, cinco regiões diferentes do elemento estrutural onde o reforço foi aplicado. De posse dos resultados, é necessário fazer uma média aritmética simples para prosseguir com a classificação. Além disso, é preciso verificar as características das regiões arrancadas. A classificação dada por Pereira (2009), está sintetizada na Tabela 5.

Tabela 5 – Classificação do reforço pelo ensaio de aderência *Pull-off*.

Ruptura	Média das tensões de aderência	Nota
No pino de ligação da placa com o equipamento de <i>pull-off</i>	Maior que 1,5 Mpa	3
Arrancamento do substrato de concreto	Maior que 1,5 Mpa	2
Descolamento do sistema compósito do substrato de concreto	Menor que 1,5 Mpa	1

Fonte: Autor (2018).

Os ensaios que obtiverem notas 3 ou 2 deverão ser aprovados. Os que tiverem nota 1 deverão ser reprovados (PEREIRA, 2009).

2.3.2 Sondagem Acústica

Esse ensaio foi descrito por Pereira (2009), da seguinte maneira: o avaliador deve analisar a estrutura reforçada através de um martelo de 2 kg, desferindo leves pancadas de maneira uniforme a cada 3 cm sobre a região onde o sistema compósito foi aplicado e, pela resposta sonora, identificar possíveis pontos em que a colagem não esteja adequada. As amostras são avaliadas de acordo com a resposta sonora obtida e possíveis áreas de delaminações existente (PEREIRA, 2009).

Assim como no ensaio de avaliação de aderência por equipamento de *pull-off*, a classificação do ensaio de sondagem acústica é dada por Pereira (2009) e os resultados do ensaio podem ter notas que variam de 1 a 3.

- Se não houver delaminações em toda a extensão do reforço aplicado, o ensaio estará terminado com a aceitação do reforço aplicado e deverá ser atribuída **nota 3** (PEREIRA, 2009).
- Se existirem delaminações, deverão ser feitas as medidas e soma de todas as áreas de delaminações e, em seguida, comparar o resultado com a área total do reforço. Se a área de delaminação for inferior a 5% da área total do reforço, ou sua área de delaminação for menor que 1300 mm², as delaminações são consideradas admissíveis e, portanto,

a aplicação do reforço será aceita com **nota 2** (PEREIRA, 2009).

- A aplicação do reforço será rejeitada e receberá **nota 1** no caso em que somatório das áreas das delaminações for superior a 5% da área total do reforço, ou quando a área total de delaminação for maior que 1300 mm² (PEREIRA, 2009).

Figura 22 – Ensaio de sondagem acústica.



Fonte: PEREIRA (2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 FIBRAS DE CARBONO

Foram utilizadas fibras de carbono da empresa Clever Reinforcement Company (Tabela 6), disponibilizadas pelo laboratório de materiais de construção do UNI-RN.

Tabela 6 – Características das fibras de carbono utilizadas no trabalho.

Dados técnicos (unidireccional)	200 g/m ²	300 g/m ²	400 g/m ²
Módulo elástico [kN/mm ²]	240	240	240
Resistência à tracção [N/mm ²]	3800	3800	3800
Gramagem da fibra [g/m ²] (direcção principal)	200	300	400
Gramagem por unidade de área de manta [g/m ²]	230	330	430
Densidade [g/cm ³]	1.7	1.7	1.7
Extensão de rotura [%]	1.55	1.55	1.55
Espessura para o cálculo (Gramagem da fibra/densidade) [mm]	0.117	0.176	0.234
Secção transversal teórica de calculo por 1000 mm largura [mm ²]	117	176	234
Factor de redução para calculo (Laminação manual/ UD)	1.2 (recomendado por S&P)	1.2 (recomendado por S&P)	1.2 (recomendado por S&P)
Força de tracção ultima 1000 mm de largura [kN]	$\frac{117 \times 3800}{1.2} = \underline{370.5}$	$\frac{176 \times 3800}{1.2} = \underline{557.3}$	$\frac{234 \times 3800}{1.2} = \underline{744.0}$
Força de tracção para 1000 mm largura a 0.6% ϵ para o cálculo [kN]	140	211	282
Embalagens: (Mantas especiais sob pedido)	largura: 300 ou 600 mm comprimento : 150 m	largura: 300 ou 600 mm comprimento: 150 m	largura: 300 ou 600 mm comprimento: 100 m
Aplicação :	• Reforço à flexão • Reforço de carga axial em pilares • Reposição de cintas em pilares		

Fonte: Clever Reinforcement Company (2018).

3.2 RESINAS EPÓXI

As resinas epóxi usadas neste trabalho foram fabricadas pela empresa Silaex Química Ltda. A resina base é o componente “A”, ela um produto líquido resultante da reação da epícloridrina com o bisfenol-A modificada. Já o endurecedor é o componente “B”, ele é uma poliaminoamida que promove a melhor adesão com boa resistência química e mecânica com baixa exotermia, possuindo fácil solubilização na resina e permitindo cura homogênea com velocidade e propriedades finais bastante controláveis.

O sistema de resina epóxi para impregnação utilizado foi o s&p resin 50 primer. A sua função é a impregnação e colagem de compósitos e preparação de substrato em cimento, concreto ou fibrocimento. As características dos componentes A e B da resina para impregnação estão na Tabela 7 e as propriedades na Tabela 8.

Tabela 7 – Características dos componentes A e B do epóxi para impregnação.

	Resina Componente A	Endurecedor Componente B
Aparência	líquido translúcido viscoso	líquido âmbar
Viscosidade, 25°C, cPs	1000 a 1.500	200 a 600
Peso Específico, 25°C, g/cm ³	1,12 +/- 0,01	1,00 +/- 0,02

Fonte: Silaex Química Ltda (2018).

Tabela 8 – Propriedades do sistema.

Proporção de mistura (Resina: Endurecedor)	100:50 partes em peso.
Viscosidade da mistura, 25°C, cPs	600 a 900
Temperatura ideal de manipulação (°C)	18 - 35.
Tempo de utilização da mistura (gel time) a 25°C	90 a 120 minutos
Tempo de endurecimento da mistura (100 ml, 25°C)	8 a 10 horas
Cura total a 25°C	72 a 120 horas.

Fonte: Silaex Química Ltda (2018).

O sistema de resina epóxi para laminação de compósitos utilizado foi o s&p resin 55 laminação. Ela alia a função de impregnar e colar os compósitos com boa resistência química e mecânica, possui boa molhabilidade aliada a tixotropia, para evitar escorrimento. As características dos componentes A e B da resina para laminação estão na Tabela 9 e as propriedades do sistema na Tabela 10.

Tabela 9 – Características dos componentes A e B epóxi para laminação.

	Resina Componente A	Endurecedor Componente B
Aparência	líquido translúcido viscoso	líquido âmbar
Viscosidade, 25°C, cPs	4000 a 7000	200 a 600
Peso Específico, 25°C, g/cm ³	1,10 +/- 0,01	1,00 +/- 0,02
Índice tixotrópico	Min. 1,5	Min. 1,0

Fonte: Silaex Química Ltda (2018).

Tabela 10 – Propriedades do sistema.

Proporção de mistura (Resina: Endurecedor)	100:50 partes em peso.
Viscosidade da mistura, 25°C, cPs	1500 a 2.500
Temperatura ideal de manipulação (°C)	18 - 35.
Tempo de utilização da mistura (gel time) a 25°C	90 a 120 minutos
Tempo de endurecimento da mistura (100 ml, 25°C)	8 a 10 horas
Cura total a 25°C	72 a 120 horas.

Fonte: Silaex Química Ltda (2018).

3.3 APLICAÇÃO DO SISTEMA COMPÓSITO

Para a realização do estudo sobre a aderência entre o sistema compósito de polímero reforçado por fibras de carbono e o substrato de concreto, foram disponibilizados pelo laboratório de materiais de construção do UNI-RN os seguintes materiais e equipamentos:

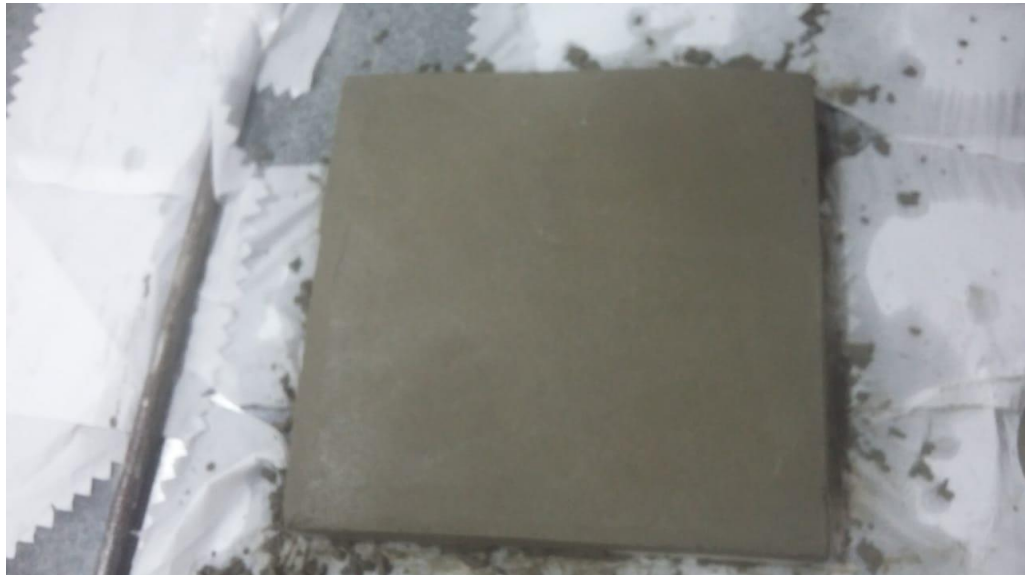
- 4 Placas de concreto;
- Resinas;
- Fibras de carbono;
- Rolos de espuma e metálico;
- Régua metálica;
- Tesoura de aço e estilete;
- Lixas;
- Equipamento de arrancamento *pull-off*.

Antes da aplicação do sistema compósito sobre as placas foi necessário fazer a preparação do substrato de concreto. Para isso foram utilizadas lixas nº 80 e 100.

A operação de lixamento manual foi suficiente, haja vista que as superfícies

das placas já estavam bem regularizadas desde sua manufatura, como é possível ver na Figura 25.

Figura 23 – Superfície de uma das placas de concreto após sua manufatura.



Fonte: Autor (2018).

As superfícies das placas de concreto foram lixadas até total uniformização (Figura 26) e, em seguida, foram removidas as partículas sólidas e poeira para que o sistema compósito pudesse ser aderido com segurança.

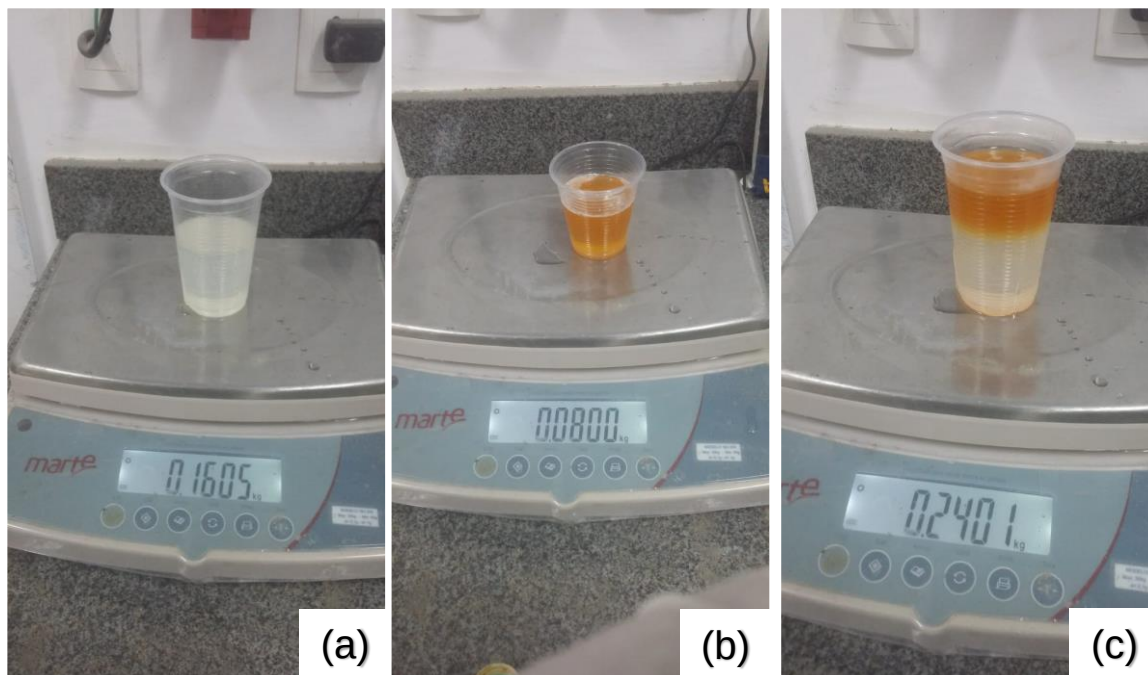
Figura 24 – Superfície de uma das placas após a etapa de lixamento.



Fonte: Autor (2018).

Após a conclusão da preparação do substrato de concreto, deu-se início a aplicação do sistema compósito. Para isso foi necessário preparar a mistura de cada resina epóxi (s&p resin 50 primer e s&p resin 55 laminação), com seu respectivo endurecedor (Figura 27) na proporção de 2 partes do componente A para 1 do B.

Figura 25 – Pesagem para preparação do primer epóxi: (a) resina base (componente A); (b) endurecedor (componente B); (c) mistura dos componentes.



Fonte: Autor (2018).

As fibras de carbono foram cortadas nas dimensões 10 x 10 cm em uma bancada especialmente destinada para esse fim. Nessa operação foram utilizadas uma régua metálica, tesoura de aço para realizar o corte transversal à direção principal das fibras e um estilete para o corte longitudinal.

Objetivando estabelecer uma ponte de aderência eficiente entre o substrato de concreto e o compósito, foi realizada a imprimação da superfície com o primer epoxídico bicomponente. Esperou-se o tempo determinado pelo fabricante para que o imprimador colmatasse os poros do concreto (Figuras 28 e 29).

Em seguida, as fibras de carbono foram aderidas por saturação via seca, onde a saturação das fibras pelo epóxi estruturante bicomponente foi feita diretamente sobre às placas de concreto.

Figura 26 – Detalhe da placa após a aplicação do primer epóxi.



Fonte: Autor (2018).

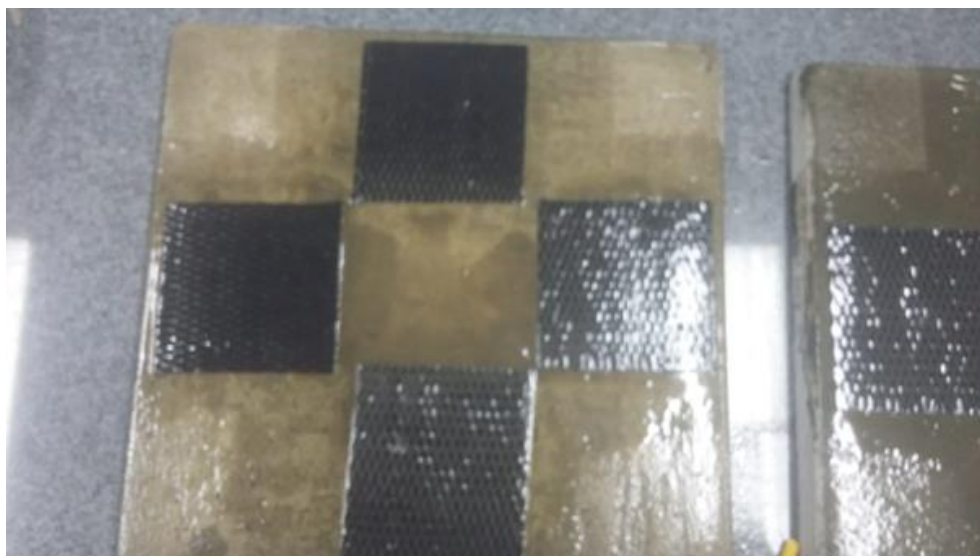
Após todas as etapas foi passado o rolo metálico para promover o alinhamento das fibras e a rolagem das bolhas de ar que pudessem estar aprisionadas dentro do sistema compósito. Na Figura 30 temos o PRFC aplicado e curado.

Figura 27 – Outras vistas mostrando os detalhes das placas após a aplicação do primer epóxi.



Fonte: Autor (2018).

Figura 28 – Sistema compósito aplicado e curado.



Fonte: Autor (2018).

As únicas variações que houveram nas aplicações dos sistemas compósitos foram em relação ao volume de resina de laminação utilizado em cada placa de concreto, dado de acordo com a Tabela 11, e em relação a quantidade de passadas do rolo metálico (rolo tira-bolhas) para cada placa.

Tabela 11 – Quantidade de demãos de resina de laminação sobre o sistema.

Placa de concreto	Quantidade de demãos de resina de laminação sobre a superfície de concreto	Quantidade de demãos de resina de laminação sobre as fibras de carbono
PL1	1	1
PL2	2	2
PL3	3	3
PL4	4	4

Fonte: Autor (2018).

É importante salientar que para cada movimento de vai e vem, o rolo de espuma era saturado com resina. Da mesma forma que a quantidade de demãos foi crescente desde a placa de concreto 01 até a placa de concreto 04, a quantidade de vezes que o rolo metálico tira-bolhas foi passado sobre o sistema compósito também variou:

- Para a primeira placa (PL1) o rolo metálico foi passado com apenas um

único movimento de vai e vem sobre as quatro lâminas de PRFC.

- Cada uma das quatro lâminas da segunda placa (PL2) recebeu duas passagens de movimento vai e vem do rolo metálico.
- Nas lâminas da terceira placa (PL3) o rolo metálico foi passado com três movimentos de vai e vem;
- As quatro lâminas de PRFC da quarta placa (PL4) receberam, cada uma, quatro passagens de movimento vai e vem do rolo metálico.

3.4 ENSAIOS DE ADERÊNCIA POR TRAÇÃO DIRETA *PULL-OFF*

O ensaio foi realizado no laboratório de materiais de construção do UNI-RN, com auxílio do equipamento de pull-off para arrancamento manual com contador de voltas digital, conforme pode ser visto na Figura 29.

Figura 29 – Equipamento de *pull-off*.

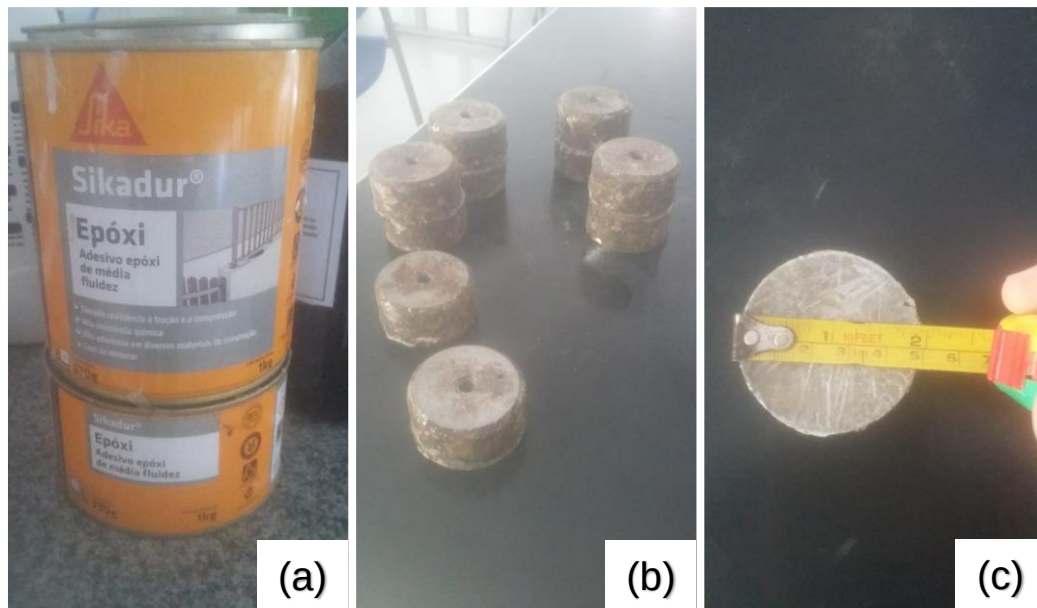


Fonte: Autor (2018).

O procedimento para a realização do ensaio ocorreu na seguinte ordem:

- 1º Colagem da pastilha metálica sobre o sistema compósito. Pela Figura 30 (a) podemos verificar que foi utilizada uma cola epóxi (adesivo + endurecedor);

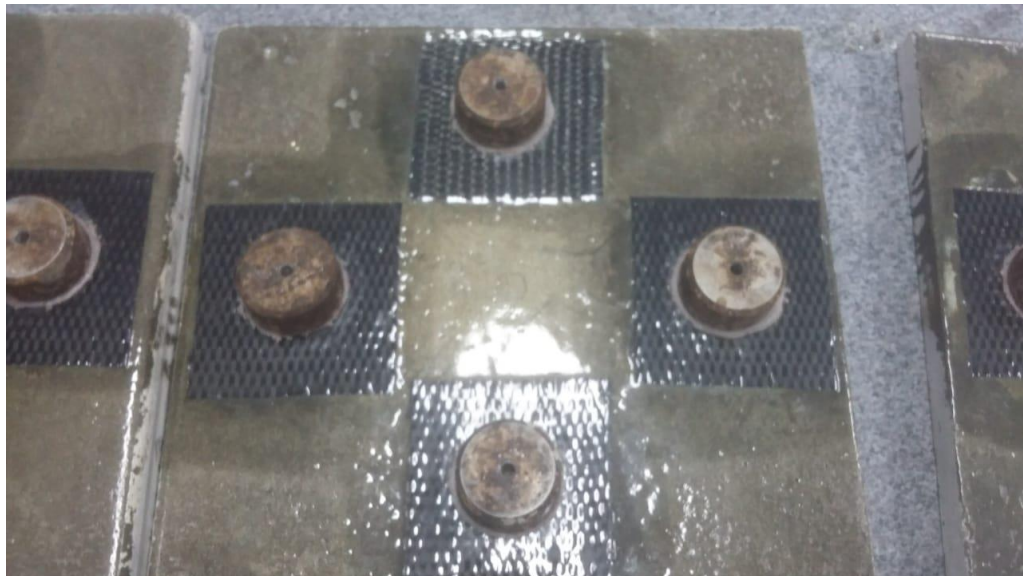
Figura 30 – (a) Epóxi (adesivo + endurecedor); (b) pastilhas metálicas do equipamento de *pull-off*; (c) diâmetro da pastilha (50 mm).



Fonte: Autor (2018).

2º Após o tempo necessário para a cura completa da cola, a pastilha metálica ficou totalmente aderida à superfície do compósito (Figura 31).

Figura 31 – Pastilhas metálicas circulares devidamente aderidas sobre os compósitos.

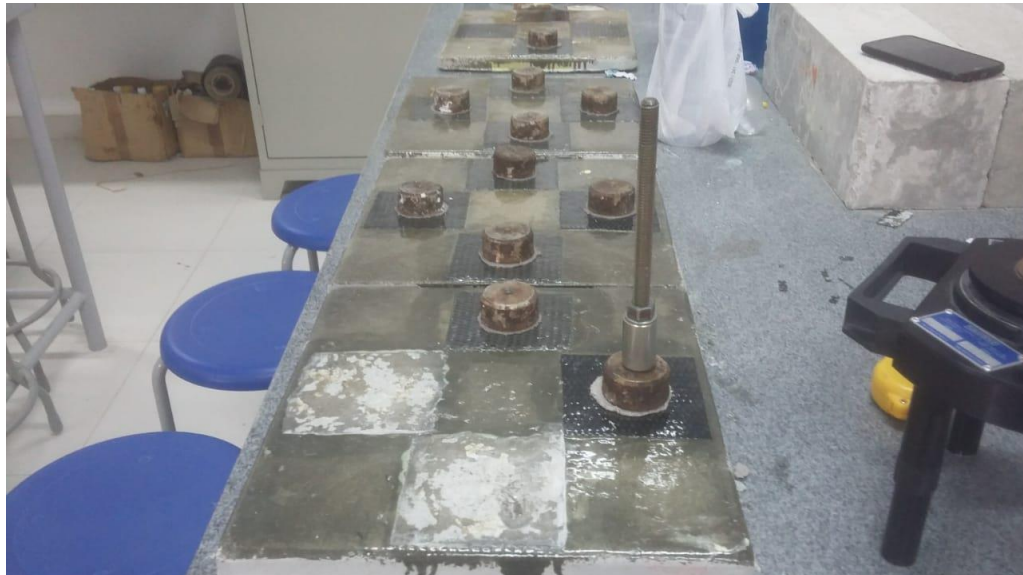


Fonte: Autor (2018).

Então o equipamento de *pull-off* foi colocado de modo que sua haste com

rosca fuso ficasse enroscada tanto na pastilha metálica quanto no equipamento (Figuras 32 e 33);

Figura 32 – Haste com rosca fuso do equipamento de *pull-off*.



Fonte: Autor (2018).

Figura 33 – Equipamento de *pull-off*.



Fonte: Autor (2018).

3º O indicador da escala digital foi zerado;

4º Aplicou-se uma força de tração exercida manualmente pela manivela de

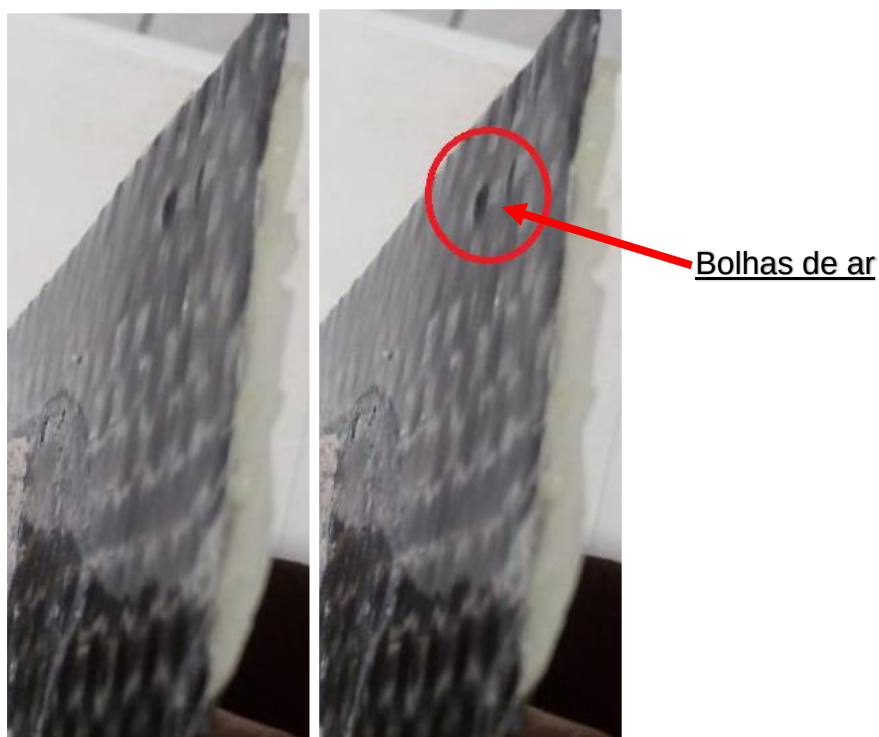
tensão do aparelho de pull-off e, após um determinado número de voltas, o corpo-de-prova foi rompido/arrancado na seção mais fraca deste;

5º Foi analisada se a região arrancada era da seção pertence ao concreto (arrancamento por tração), ou se estava contida na superfície de ligação entre o compósito e o concreto (arrancamento por aderência entre os materiais). Também foi analisado se o valor da tensão de arrancamento foi maior ou menor que 1,5 MPa.

3.5 ENSAIO DE SONDAGEM ACÚSTICA

Foram desferidas leves pancadas com um martelo de 2 kg sobre o sistema compósito aplicado, objetivando encontrar regiões com resposta sonora característica de presença de bolhas de ar. Apenas na lâmina número 1 (L1) da placa de concreto 1 (PL1) foram encontradas bolhas de ar (Figura 34).

Figura 34 – Presença de bolhas de ar na lâmina L1 da placa de concreto 01.



Fonte: Autor (2018).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ADERÊNCIA POR TRAÇÃO DIRETA *PULL-OFF*

Das 4 placas ensaiadas foram obtidos 16 resultados onde apenas um deles ficou abaixo de 1,5 MPa. Deve-se salientar que o equipamento registra os valores na unidade de quilograma-força. Para converter esses resultados para megapascal é necessário considerar, além do valor da força, a área da pastilha metálica que está em contato direto com o compósito. Seu diâmetro é de 50 milímetros (Figura 30 (c)).

Onde:

- $1 \text{ kgf} \approx 9,81 \text{ N}$.

Portanto,

- $1 \text{ kgf/cm}^2 \approx 9,81 \text{ N/cm}^2$
- $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$

Sendo assim,

- $1 \text{ MPa} \approx 10,2 \text{ kgf/cm}^2$.

Os gráficos e tabelas a seguir trazem informações sobre os ensaios como a forma que se deu o arrancamento (arrancamento por tração ou por aderência entre os materiais), os valores dos resultados das forças e tensões de arrancamento, bem como a nota que o reforço recebeu.

Lembrando que o arrancamento por tração é caracterizado quando a região arrancada foi da seção pertencente ao concreto (ruptura do substrato de concreto), e o arrancamento por aderência entre os materiais se dá quando o compósito simplesmente descola do substrato de concreto.

4.1.1 Resultados do Ensaio de *Pull-Off* da Placa 01 (PL1)

Dos quatro ensaios realizados para o arrancamento das lâminas de polímero reforçado por fibras de carbono que estavam aderidos nesta placa, apenas 3 foram aceitos. Isso porque os arrancamentos das lâminas L2, L3 e L4 se deram por tração e foram necessárias tensões de arrancamento superiores a 1,5 MPa. Porém, o

arrancamento da lâmina L1 se deu por aderência (Figuras 37 e 38) para um valor de tensão abaixo do valor mínimo de 1,5 MPa, com uma força de 194 kgf (Figura 36).

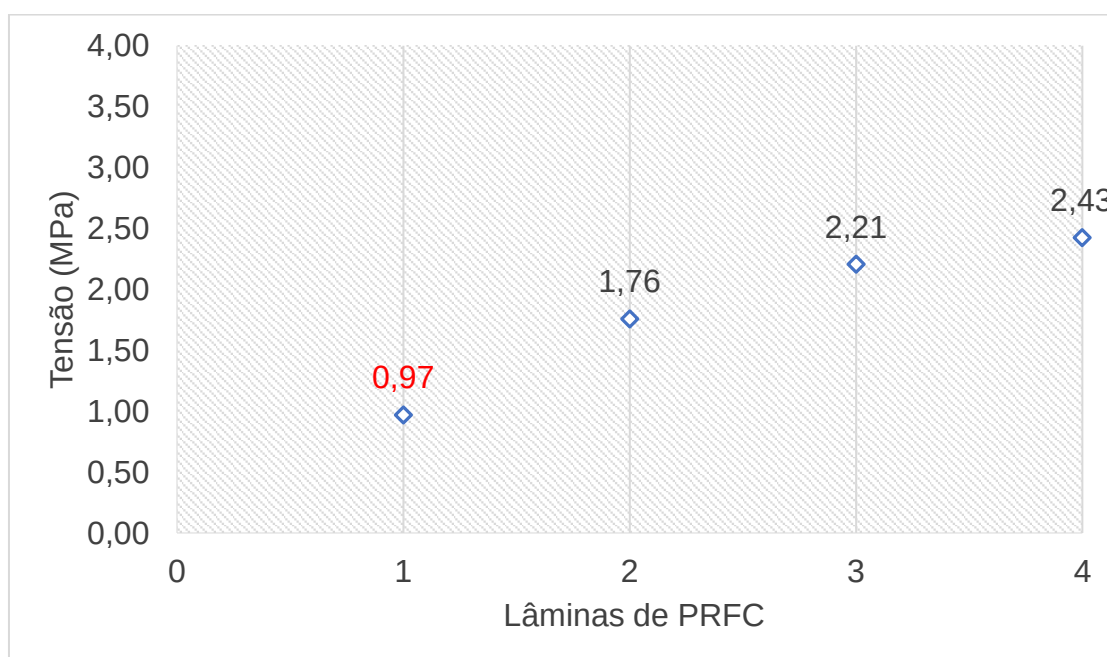
Tabela 12 – Resultados da placa de concreto 01.

Lâminas de PRFC	Força (kgf)	Tensão (MPa)	Forma de arrancamento	Nota
L1	194	0,97	Arrancamento por aderência	1
L2	352	1,76	Arrancamento por tração	2
L3	442	2,21	Arrancamento por tração	2
L4	486	2,43	Arrancamento por tração	2

Fonte: Autor (2018).

A tensão de arrancamento para a lâmina L1 da placa de concreto 01 foi de apenas 0,97 MPa (Tabela 12 e Figura 36). Sendo assim, a sua aplicação foi reprovada.

Figura 35 – Gráfico das tensões de arrancamento das lâminas de PRFC para placa de concreto 01.



Fonte: Autor (2018).

Figura 36 – Força de tração necessária para o arrancamento da lâmina L1 da placa de concreto 01.



Fonte: Autor (2018).

Nas Figuras 37 e 38 temos os aspectos da superfície da lâmina L1, onde é possível verificar que o arrancamento realmente se deu por aderência, haja vista que a lâmina L1 praticamente se descolou totalmente do substrato de concreto.

Figura 37 – Aspectos da superfície lâmina L1 e do substrato da placa de concreto 01 pós-ensaio.



Fonte: Autor (2018).

Figura 38 – Aspectos da superfície da lâmina L1 da placa de concreto 01 pós-ensaio.



Fonte: Autor (2018).

Examinando as Figuras 39 e 40 percebe-se que o arrancamento foi por tração, porque houve uma ruptura considerável do substrato de concreto após o ensaio.

Figura 39 – Aspectos da superfície da lâmina L2 e do substrato da placa de concreto 01 pós ensaio.



Fonte: Autor (2018).

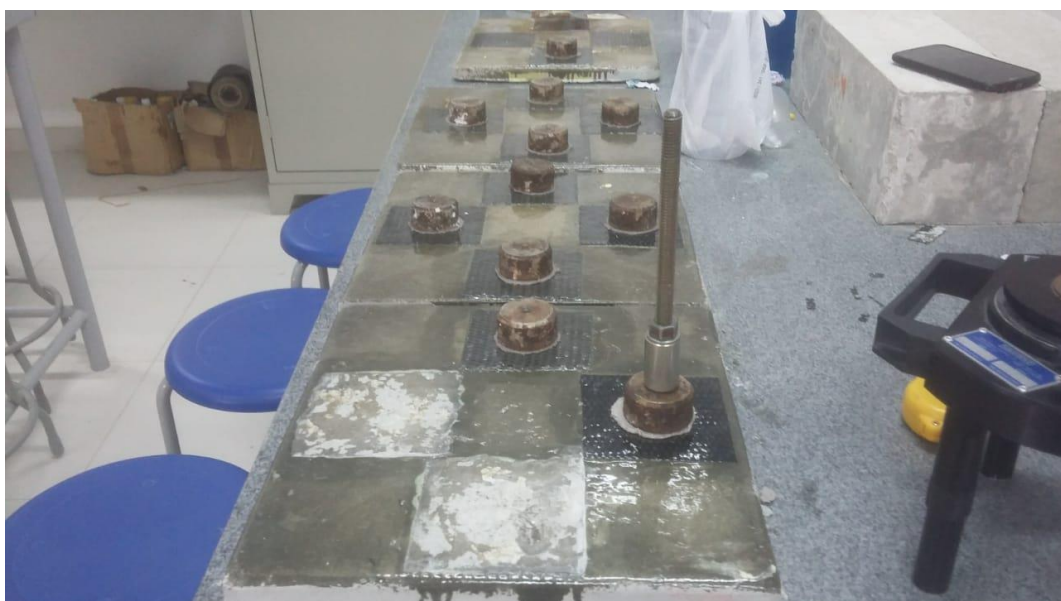
Figura 40 – Volume de concreto aderido na lâmina L2 da placa de concreto 01 pós-ensaio.



Fonte: Autor (2018).

A Figura 41 mostra uma das etapas do ensaio de *pull-off*, em que uma haste é rosqueada primeiramente em uma pastilha metálica e, em seguida, é conectada ao equipamento.

Figura 41 – Haste com rosca fuso do equipamento de *pull-off* devidamente colocada para o ensaio da lâmina L3 da placa de concreto 01.



Fonte: Autor (2018).

Figura 42 – Preparação para o ensaio da lâmina L3 da placa de concreto 01.



Fonte: Autor (2018).

A Figura 42 apresenta o equipamento devidamente nivelado para dar prosseguimento ao ensaio da lâmina L3 da placa PL1. Na Figura 43 é possível verificar a força de tração (442 kgf) necessária para o arrancamento da lâmina L3 da placa PL1.

Figura 43 – Força de tração necessária para o arrancamento da lâmina L3 da placa de concreto 01.



Fonte: Autor (2018).

Figura 44 – Força de tração necessária para o arrancamento da lâmina L4 da placa de concreto 01.



Fonte: Autor (2018).

Como podemos ver pela Figura 44, a força de tração necessária para o arrancamento da lâmina L4 da placa de concreto 01 (PL1) foi de 486 kgf.

4.1.2 Resultados do Ensaio de *Pull-Off* da Placa 02 (PL2)

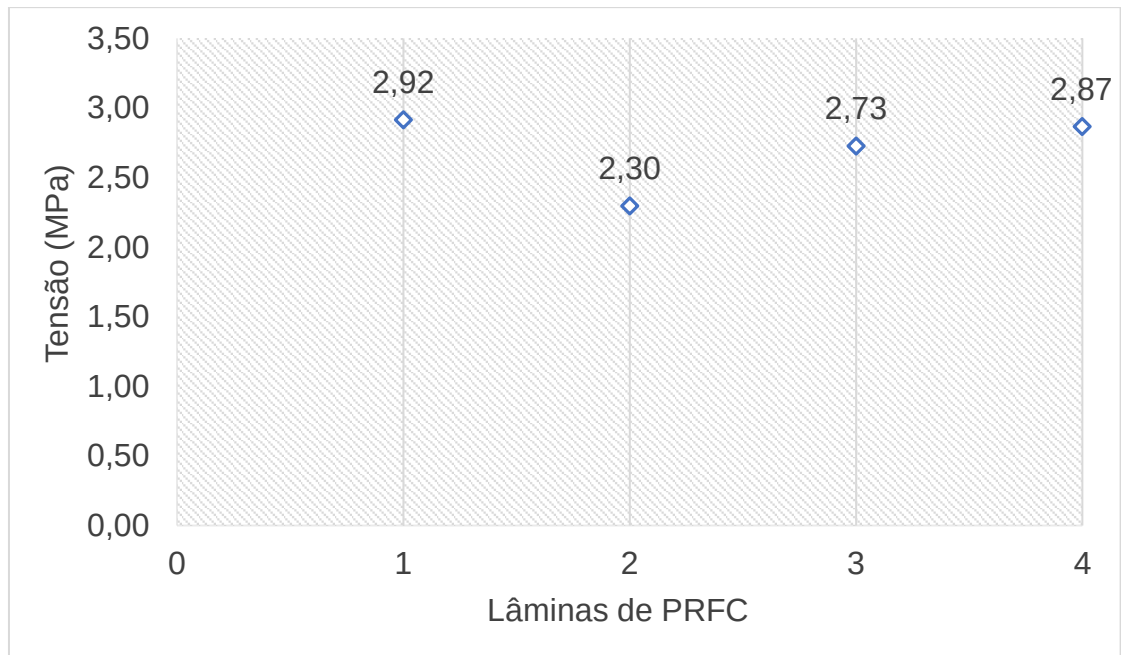
Os quatro ensaios realizados nesta placa foram aceitos e obtiveram nota 2 (Tabela 13), pois houve a ruptura no substrato de concreto (arrancamento por tração) e as tensões de aderência foram superiores a 1,5 MPa (Figura 47).

Tabela 13 – Resultados da placa de concreto 02.

Lâminas	Força (kgf)	Tensão (MPa)	Forma de arrancamento	Nota
L1	584	2,92	Arrancamento por tração	2
L2	460	2,30	Arrancamento por tração	2
L3	546	2,73	Arrancamento por tração	2
L4	574	2,87	Arrancamento por tração	2

Fonte: Autor (2018).

Figura 45 – Gráfico das tensões de arrancamento das lâminas de PRFC para placa de concreto 02.



Fonte: Autor (2018).

A força de tração para o arrancamento da lâmina L1 da placa PL2 foi de 584 kgf (Figura 46). Pela Figura 47, é possível confirmar que o arrancamento foi por tração, pois realmente houve ruptura do substrato.

Figura 46 – Arrancamento por aderência da lâmina L1 da placa de concreto 02.



Fonte: Autor (2018).

Figura 47 – Volume de concreto aderido na lâmina L1 da placa de concreto 02 pós-ensaio.



Fonte: Autor (2018).

4.1.3 Resultados do Ensaio de *Pull-Off* da Placa 03 (PL3)

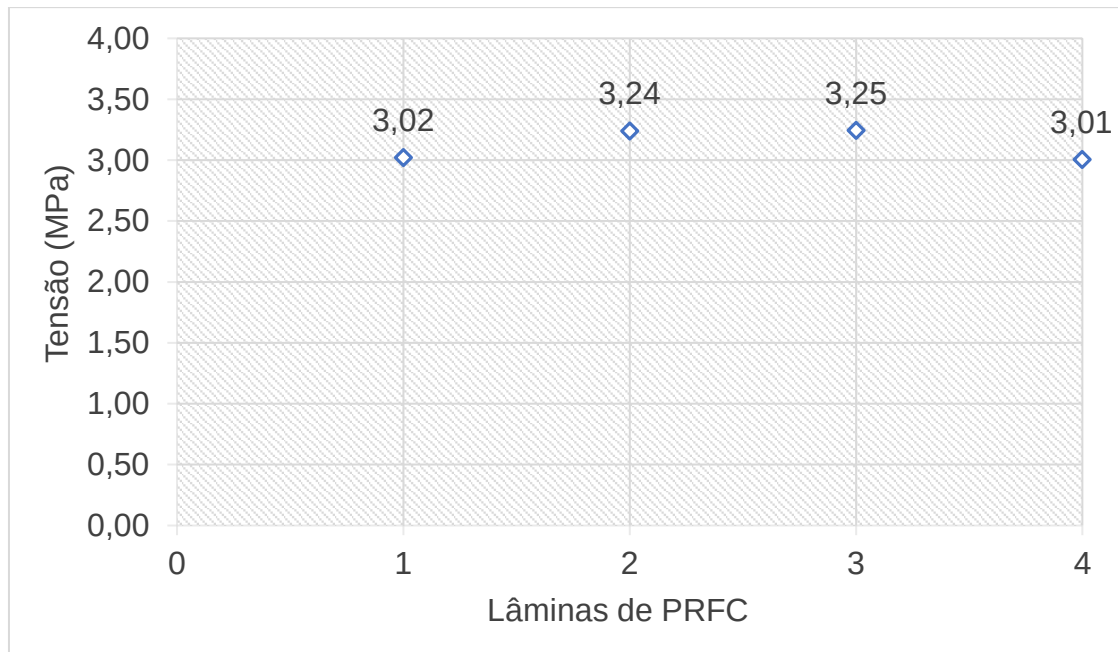
Assim como na placa anterior, os quatro ensaios realizados nesta placa foram aceitos e obtiveram nota 2 (Tabela 14), isso porque no arrancamento das lâminas houve a ruptura no substrato de concreto (arrancamento por tração) e as tensões de aderência foram superiores a 1,5 MPa.

Tabela 14 – Resultados da placa de concreto 03.

Lâminas	Força (kgf)	Tensão (MPa)	Forma de arrancamento	Nota
L1	605	3,02	Arrancamento por tração	2
L2	649	3,24	Arrancamento por tração	2
L3	650	3,25	Arrancamento por tração	2
L4	602	3,01	Arrancamento por tração	2

Fonte: Autor (2018).

Figura 48 – Gráfico das tensões de arrancamento das lâminas de PRFC para placa de concreto 03.



Fonte: Autor (2018).

A Figura 49 apresenta o equipamento devidamente nivelado para dar prosseguimento ao ensaio da terceira lâmina de PRFC aderida na placa PL3. O arrancamento dessa lâmina, como podemos ver na Figura 50, se deu por tração.

Figura 49 – Preparação para o ensaio da lâmina L3 da placa de concreto 03.



Fonte: Autor (2018).

Figura 50 – Volume de concreto aderido na lâmina L3 da placa de concreto 03 pós-ensaio.



Fonte: Autor (2018).

4.1.4 Resultados do Ensaio de *Pull-Off* da Placa 04 (PL4)

Observando a Tabela 15 é possível verificar que um fato interessante ocorreu no ensaio da lâmina de fibras de carbono número 3 (L3) desta placa de concreto, haja vista que seu resultado foi bem inferior aos demais, apesar de ter sido utilizada a mesma quantidade de resina de laminação.

Tabela 15 – Resultados da placa de concreto 04.

Lâminas	Força (kgf)	Tensão (MPa)	Forma de arrancamento	Nota
L1	716	3,58	Arrancamento por tração	2
L2	724	3,62	Arrancamento por tração	2
L3	287	1,43	Arrancamento por aderência	1
L4	714	3,57	Arrancamento por tração	2

Fonte: Autor (2018).

A provável resposta para esse resultado abaixo dos demais se encontra na falta de regularidade da superfície onde a lâmina foi aderida. Como é possível ver na Figura 51, a região do substrato de concreto onde essa lâmina foi aderida (região circulada de vermelho) está com muita irregularidade. Como não foi utilizada a pasta regularizadora de superfície nessa pesquisa, era de se esperar que o resultado para a aderência dessa lâmina fosse diferente das demais, onde as lâminas foram aderidas sobre superfícies regulares.

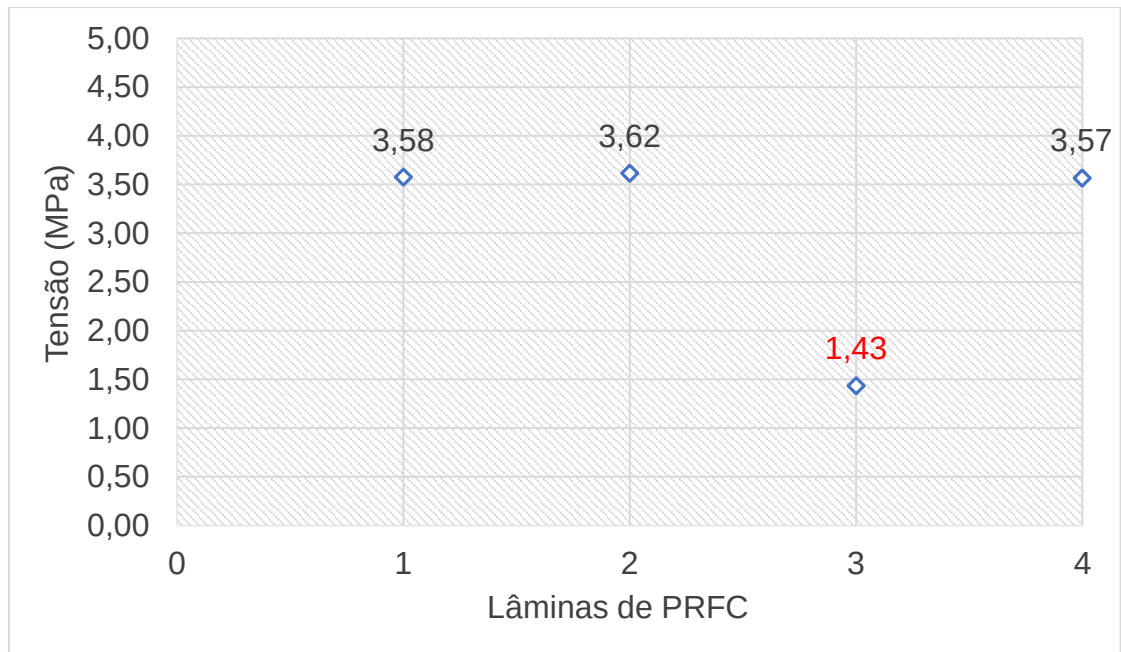
O ensaio realizado na lâmina L3 obteve nota 1 e foi reprovado, pois ela descolou do substrato de concreto para uma tensão de 1,43 MPa. No arrancamento das outras três lâminas houve a ruptura do substrato de concreto e tensões de aderência superiores a 1,5 MPa obtendo, dessa forma, nota 2.

Figura 51 – Placa de concreto 04, detalhe para o local onde ficou aderida a lâmina de fibra de carbono L3.



Fonte: Autor (2018).

Figura 52 – Gráfico das tensões de arrancamento das lâminas de PRFC para placa de concreto 04.



Fonte: Autor (2018).

Na Figura 52 temos o gráfico das tensões de arrancamento das lâminas aderidas à placa de concreto 04. Os resultados para as lâminas L1, L2 e L4 ocorreram de maneira quase constante. Porém, a lâmina 3 ficou bem abaixo.

Figura 53 – Força de tração necessária para o arrancamento da lâmina L1 da placa de concreto 04



Fonte: Autor (2018).

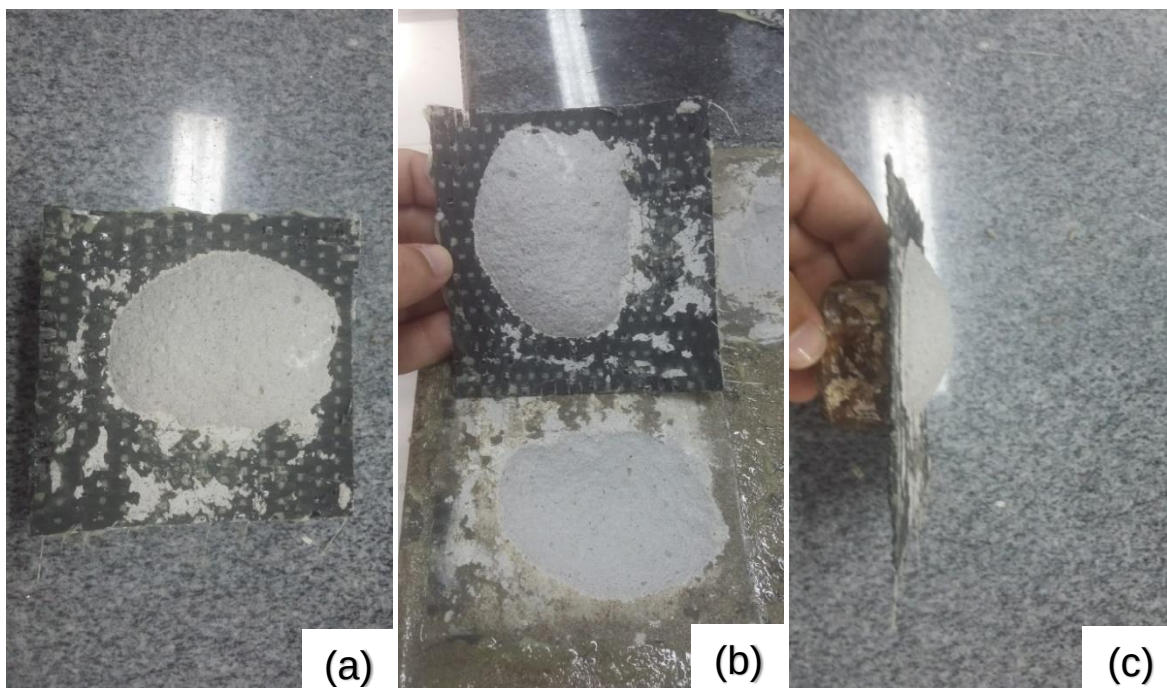
Figura 54 - Aspectos da superfície da lâmina L1 e do substrato da placa de concreto 04 pós-ensaio.



Fonte: Autor (2018).

A tração na lâmina L1 da placa de concreto 04 foi de 716 kgf (Figura 53) e o seu arrancamento ocorreu por tração, isso pode ser confirmado pelas Figura 54 e 55 onde um volume considerado de concreto da placa ficou aderido à lâmina de PRFC.

Figura 55 – Superfícies: (a) do sistema PRFC; (b) substrato de concreto e PRFC; (c) volume de concreto aderido na lâmina L1 da placa de concreto 04 no pós-ensaio.



Fonte: Autor (2018).

Figura 56 - Força de tração necessária para o arrancamento da lâmina L2 da placa de concreto 04.



Fonte: Autor (2018).

A força de tração para o arrancamento da lâmina L2 da placa de concreto 04 foi de 724 kgf (Figura 56) e é possível confirmar pela Figura 57 que o seu arrancamento foi por tração, devido ao volume que ficou aderido à lâmina de PRFC.

Figura 57 – Aspectos da superfície da lâmina L2 e do substrato da placa de concreto 04 pós-ensaio.



Fonte: Autor (2018).

Figura 58 – Força de tração necessária para o arrancamento da lâmina L4 da placa de concreto 04.



Fonte: Autor (2018).

Na Figura 58 temos a força de tração para o arrancamento da lâmina L4 da placa de concreto 04 (714 kgf). O seu arrancamento se deu por tração, como podemos confirmar pela Figura 59, devido ao volume que ficou aderido à lâmina de PRFC.

Figura 59 – Aspectos da superfície da lâmina L4 e do substrato da placa de concreto 04 pós-ensaio.



Fonte: Autor (2018).

Figura 60 – Placa de concreto 04 pós-ensaio.



Fonte: Autor (2018).

Pela Figura 60 é possível ver como ficou a superfície da placa de concreto 04 após o ensaio.

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SONDAGEM ACÚSTICA

Das dezesseis amostras ensaiadas, apenas na lâmina número 1 (L1) da placa de concreto 01 foram encontradas bolhas de ar, haja vista o som característico, sendo que área desse defeito foi inferior a 5% da área total do reforço. Portanto, sua nota foi 2 e a mesma foi aprovada. Deve-se lembra que as lâminas de PRFC da placa de concreto 01 foram as que receberam apenas uma passada num movimento de vai e vem do rolo metálico tira-bolhas.

As outras 15 lâminas ensaiadas foram aprovadas com nota 3, haja vista que não foram obtidas respostas sonoras com som característico (som oco), sendo assim, não haviam pontos de delaminações.

5 CONCLUSÕES

A placa de concreto 04 foi a que recebeu o maior volume de resina de saturação e a maior quantidade de passagens do rolo metálico tira-bolhas. Três dos seus resultados foram os maiores para o ensaio de *pull-off*, quando comparados com os das outras placas. Além disso, seus resultados foram muito próximos um do outro (3,58 Mpa, 3,62 Mpa e 3,57 Mpa), diferentemente do que ocorreu para a placa de concreto 01 que teve os resultados mais baixos no ensaio de *pull-off* e, além disso, foram muito discrepantes (0,97 Mpa, 1,76 Mpa, 2,21 Mpa e 2,43 Mpa). Além do mais, foi também na placa de concreto 01 que uma de suas lâminas de PRFC apresentou defeitos (bolhas de ar) no ensaio de sondagem acústica. O provável motivo para isso foi que nela só foi passado o rolo metálico tira-bolhas em um único movimento de vai e vem.

Na placa de concreto 04 ocorreu um fato interessante. Apenas um de seus resultados ficou abaixo de 1,5 Mpa para o ensaio de *pull-off* (lâmina de PRFC 03). Isso ocorreu, talvez, pelo fato da superfície onde a lâmina 03 foi colada não estar totalmente regularizada (Figura 51).

Analisando a variação dos resultados obtidos nos ensaios de *pull-off* para as lâminas aderidas nas quatro placas de concreto, foi possível notar que quanto maior o volume de resina de laminação utilizado (ou seja, quanto maior quantidade de demãos de resina aplicada no substrato de concreto e nas fibras de carbono), maiores eram as tensões de tração necessárias para arrancar o sistema compósito. Também foi possível concluir que para se obter uma máxima de eficácia com relação à aderência, é necessário que a superfície em que o sistema compósito será aplicado esteja bem regular e limpa, sem presença de impurezas. Essas conclusões foram baseadas na Tabela 11 e nos resultados obtidos no item 4 do trabalho.

A proposta da metodologia para avaliação da aplicação do sistema PRFC foi aprovada nos ensaios realizados em laboratório, devendo a mesma ser encaminhada à ABNT como proposta de efetivação de norma brasileira. Dessa forma, será possível reduzir os defeitos apresentados nas aplicações em obras de reforço estrutural principalmente pela falta de aderência entre o compósito e o substrato de concreto.

REFERÊNCIAS

- ABDELRAHMAN, A. A. "**Serviceability of Concrete Beams Prestressed by Fiber Reinforced Plastic Tendons**," Ph.D. Thesis, University of Manitoba, Nov. 1995, 350 pp.
- ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures** – ACI 440.2r, 2008.
- ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **State-of-the-art report on fiber reinforced plastic reinforcement of concrete structures**. ACI Committee 440. Detroit, Jan. 1996.
- ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Use of Epoxy Compounds with Concrete** – ACI 503.r, 1998.
- ADESIVI SICUREZZA. **Unidirectional carbon fibre tapes**. Various widths 100 to 200mm. Disponível em: <<https://www.adesivisicurezza.it/pt/pagina-inicial/402-rolo-de-tecido-feito-de-fibra-de-carbono-genuino-200-g-m-12-k-ud-lisas-unidirecionais-20-cm.html>>. Acesso em: 02 out. 2018.
- ALVES, Claudia Rosane R.; HECK, Nestor Cezar; SCHNEIDER, Ivo André H. Análise termodinâmica da produção de FeCr-AC a partir das cinzas da incineração de aparas de couro. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 5, n. 2, p. 83, 2008.
- ARAÚJO, Ciro José Ribeiro Villela et al. **Estudo experimental de viga de concreto armado reforçada com laminados de fibra de carbono pela técnica NSM**. Revista IPT: Tecnologia e Inovação, v. 1, n. 4, 2017.
- ARQUEZ, Ana Paula. **Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Terminology of Composite Materials** – ASTM D3878-18, 2018.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers.** ASTM D4541, 2017.

BRITO JUNIOR, Carlos A. R. et al. Poliacrilonitrila: **processos de fiação empregados na indústria.** Polímeros, São Carlos, v. 23, n. 6, p. 764-770, 2013. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010414282013000600012&lng=en&nrm=iso>. Access on 12 Mar. 2019. <http://dx.doi.org/10.4322/polimeros.2013.006>.

BROOKS, J. D. TAYLOR, G. H. **The formation of some graphitizing carbons.** **Chemistry and Physics of Carbon.** New York, v.4, p.243-286, 1968.

BUNSELL, A. R. **Fibre reinforcements for composite materials,** Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science Publishers B. V., pp. 90-120, 1988.

CALLISTER JR, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução,** 7 Edição. Rio de Janeiro, LTC editora, 2008.

CLEVER REINFORCEMENT COMPANY. **Fibras de carbono.** Disponível em: <<https://www.sp-reinforcement.eu/en-EU>>. Acesso em: 07 dez. 2018

DE CARVALHO, Tiago. Silva. **Reforço à flexão de vigas de betão armado com compósitos de CFRP.** 2010 Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

DIAS, S. J. E. **Estruturas de Betão com Compósitos Reforçados com Fibras de Carbono.** Disponível em: < <https://www.engenhariacivil.com/estruturas-betao-compositos-reforçados-fibras-carbono>>. Acesso em: 17 jan. 2019.

DONNET, J. B. **Carbon Fiber.** 3rd. Ed. Marcell-Dekker, Inc, 1998.
E-COMPOSITES. **Tecido de fibra de carbono RC203P.** Disponível em: <https://www.e-composites.com.br/tecido_de_fibra_de_carbono_rc203p/prod-4871634/>. Acesso em: 02 out. 2018.

FERNANDES, Lucia de Paula, **Estrutura do tecido plano.** Disponível em: <http://cortandoecosturando.com/dica_caimentoperfeito.html>. Acesso em: 02 out. 2018.

GALLI, Cecília Antunes, **Caracterização das Propriedades Mecânicas de Compósitos de Matriz Epóxi com Fibras de Carbono Unidirecionais**. 2016. Projeto de Graduação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Engenharia de Materiais, Rio de Janeiro, RJ.

GUIMARÃES, Bárbara Silva Sales, **Estudo do Tratamento Superficial de Fibras de Carbono para Aplicação no Setor Aeronáutico**. 2018. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Engenharia de Materiais, Londrina, PR.

HALL, Lawrence; VLACK, Van. Princípios de ciências dos materiais. **Editora Edgard Blucher**, 2000.

HEGDE, R. R., DAHIYA, A., KAMATH, M. G. **Carbon Fiber**, 2004. Disponível em: <<http://web.utk.edu/~mse/Textiles/CARBON%20FIBERS.htm>>. Acesso em: 30 novembro 2013.

JULIÃO, J. T. **Desenvolvimento de Fibras de Carbono e Precursores de Alto Valor Agregado a Partir de Óleo Decantado**. Campinas: FEM, UNICAMP, 2002. (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002. 132p.

JUVANDES, Luis Filipe Pereira. **Aplicações de Compósitos FRP no Reforço de Estruturas**. 1ª Jornada de Materiais na Construção. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2011.

JUVANDES, Luis Filipe Pereira. **Reforço e reabilitação de estruturas-Módulo 2**. Formação Profissional-Ordem dos Engenheiros-Secção Regional da Madeira. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2002.

JUVANDES, Luis Filipe Pereira. **Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de “CFRP”**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1999. 302p. Tese de Doutorado em Engenharia.

KADLA, J. F. et al. “Lignin-based carbono fibers for composite fiber applications”, **Carbon**, v.40, pp. 2913-2920, 2002.

LEWIS, I. C. **Chemistry of carbonization**. **Carbon**, U.S.A, v.20, n;6, p.519-529, 1982.

LEWIS, I. C., et al. **Carbon fiber production using high pressure treatment of a precursor material**. U.S.pat., n. 4.317.809., March 2, 1982.

LV, P. FENG, Y. ZHANG, P. CHEN, H. ZHAO, N. FENG, W. **Increasing the interfacial strength in carbono fiber/epoxy composites by controlling the orientation and length of carbono, nanotubes grown on the fibers.** Carbon 2011; 49:4665-73.

MACHADO, Ari de Paula. **Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono.** Belo Horizonte, 2002.

MARADUR, S. P. et al. "Preparation of carbono fibers from a lignina copolymer with polyacrylonitrile". **Synthetic Metals**, v. 162, p. 453 – 459, 2012.

MARINELLI, Alessandra L. et al. **Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica.** Polímeros, São Carlos, v. 18, n. 2, p. 92-99, junho 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010414282008000200005&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 10 mar. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282008000200005>.

MARINI, Marcio Vinicius. **Avaliação da aderência entre o concreto e o sistema de reforço com fibra de carbono.** 2011. 103 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/258422>>. Acesso em: 02 dez. 2018.

MARINUCCI, Gerson. **Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e Tecnologia.** São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2011. 333p.

MARLUVAS. **Botina 10 VB48 vulcaflex com solado pu – sem biqueira.** Disponível em: <<https://www.epibrasil.com.br/botina-10vb48-vulcaflex-com-solado-pu-sem-biqueira-p5950/>>. Acesso em: 05 dez. 2018.

MARSH, H. **Introduction to carbon science.** Butterworth. London, 1989.

MARTZBOR. **Manta fibra de vidro.** Disponível em: <http://br.melinterest.com/?r=site/search&seller_id=57192154&seller_nickname=MA RTZBOR>. Acesso em: 03 mai. 2019.

MAZUMDAR, S. **Composites Manufacturing – Materials, Product and Process Engineering** CRC Press, 2002.

NORBEG, I. **Carbon Fibers from Kraft Lignin**, Tese de doutorado, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2012.

PADILHA, Ângelo Fernando. **Materiais de Engenharia: Microestrutura e Propriedades**. São Paulo. Hemus, 2000.

PARDINI, Luiz C.; GONÇALVES, Adriano. **Processamento de compósitos termoe estruturais de carbono reforçado com fibras de carbono**. Journal of Aerospace Technology and Management, v.1, n.2, pp. 236 – 237, 2009.

PARDINI, Luiz C.; LEVY NETO, Flaminio. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. Edição. Ed. Edgard Blucher. São Paulo, 2006.

PEREIRA, F. S. C. **Avaliação da Ação do Fogo em Concretos Reforçados por Confinamento Através de Manta de Fibra de Carbono com e sem Utilização de Proteção Passiva**. 2012. 86 f. (Pós-doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia de Materiais, Ciência e Engenharia de Materiais, Natal, RN.

PEREIRA, F. S. C. **Avaliação de Concretos Reforçados por Confinamento com Manta de Fibra de Vidro Estrutural Pré-impregnada**. 2009. 102 f. (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia de Materiais, Ciência e Engenharia de Materiais, Natal, RN.

SCHMIDT, D. L. & JONES, W. C. “**Materiales plásticos reforzados com fibras a base de carbono**” AFML, WPAFB, Dayton, Ohio, ASD-TDR-62-635, Agosto, 1962.

SEBASTIÃO, V. CANEVAROLO, JR. **Ciência dos Polímeros**. Artliber, São Paulo, 2ed, 2006.

SHACKELFORD, James F. **Ciência dos materiais**. Pearson Prentice Hall, 2008.

SHARIG, K., Anderson, E., JAECKEL, M., SAKUMA, Y., “**Carbon Fibers**,” Chemical Economics Handbook Marketing Research Report, SRI International, Menlo Park, CA, April 1995.

SHARIG, K., Anderson, E., JAECKEL, M., SAKUMA, Y., “**Carbon Fibers,**” Chemical Economics Handbook Marketing Research Report, SRI International, Menlo Park, CA, July 1999.

SILAEX QUIMICA. **RESINAS EPÓXI**. Disponível em: <<https://silaex.ind.br/resinas-epoxi>>. Acesso em: 07 dez. 2018.

SINGER, L. S. Union Carbide Corporation, New York, NY. **High modulus, high strength carbon fibers produced from mesophase pitch**. US n. 4,005,183. January 25,1977.

SOUTO, F.; CALADO, V; PEREIRA JR, N. **Fibras de carbono a partir de lignina: uma revisão da literatura**. Revista Matéria, v.20, n.1, pp. 100 – 114, 2015.

STEPHEN KURTZ P. E.; BALAGURU, P.; HELM, J. Experimental Study of Interfacial Shear Stresses in FRP-Strengthened RC Beams. **Journal of Composites for Construction**, v. 12, n. 3, jun. 2008.

SUBRAMANIAM K, V.; CARLONI C.; NOBILE, L. Width effect in the interface fracture during shear debonding of FRP sheets from concrete. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 74, p. 578-594, 2007.

WARREN, C. D., **Low cost carbono fiber overview**. Field Technical Manager Transportation Materials Research – Oak Ridge National Laboratory, 2010. Disponível em: <http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/merit_review_2010/lightweight_materials/lm002_warren_2010_o.pdf>. Acesso em: 10 janeiro 2019.

WOO SK.; LEE Y. Experimental study on interfacial behavior of CFRP-bonded concrete. **Journal of civil engineering**. vol. 14 pp.385-393 – 2010.

ZHAO, L.; KARBHARI, V. M. Use of Composites for 21st Century Civil Infrastructure. **Computer Methods Applied Mech. Engrg.** 2000. p. 433-454.