



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto Politécnico

Thalles Manoel Quindeler de Paula Azevedo

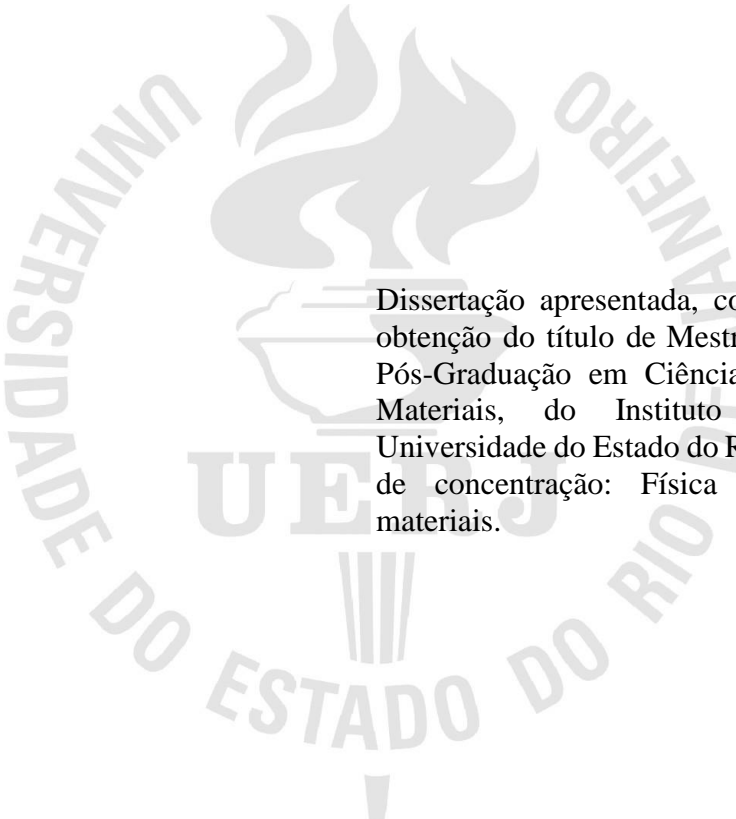
**Avaliação do comportamento da aderência de um novo sistema de
compósito laminado para reforço em estrutura de concreto**

Nova Friburgo

2021

Thalles Manoel Quindeler de Paula Azevedo

Avaliação do comportamento da aderência de um novo sistema de compósito laminado para reforço em estrutura de concreto



Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Física e mecânica dos materiais.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Martins Sampaio

Coorientador: Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assis

Nova Friburgo

2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/REDE SIRIUS/BIBLIOTECA CTC/E

A994 Azevedo, Thalles Manoel Quindeler de Paula.
Avaliação do comportamento da aderência de um novo sistema de compósito laminado para reforço em estrutura de concreto / Thalles Manoel Quindeler de Paula Azevedo. – 2021.
105 f. : il.

Orientador: Eduardo Martins Sampaio.

Coorientador: Joaquim Teixeira de Assis.

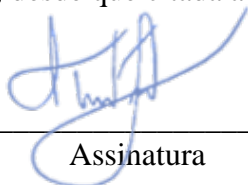
Dissertação (mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

1. Concreto – Estruturas – Teses. 2. Adesivos - Teses. 3. Estruturas – Reforço - Teses. 4. Compósitos poliméricos – Teses. I. Sampaio, Eduardo Martins. II. Assis, Joaquim Teixeira de. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto Politécnico. IV. Título.

CDU 691.32:665.93

Bibliotecária Cleide Sancho CRB7/5843

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.



Assinatura

07/06/2021

Data

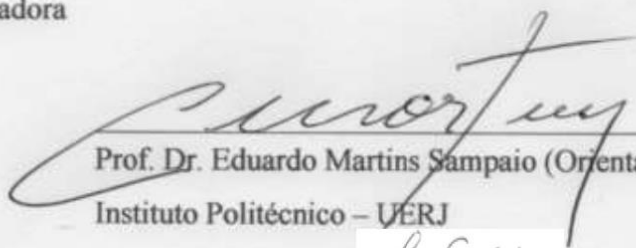
Thalles Manoel Quindeler de Paula Azevedo

Avaliação do comportamento da aderência de um novo sistema de compósito laminado para reforço em estrutura de concreto

Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Física e mecânica dos materiais.

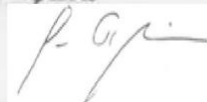
Aprovada em 29 de março de 2021,

Banca examinadora



Prof. Dr. Eduardo Martins Sampaio (Orientador)

Instituto Politécnico – UERJ



Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assis

Instituto Politécnico – UERJ



Prof. Dr. José Renato de Castro Pessôa

Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC

Nova Friburgo

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus avós, Plínio de Paula e Maria da Glória Quindeler de Paula, à minha mãe, Nilcimar Quindeler de Paula Azevedo e à minha irmã Thaynã Quindeler de Paula Azevedo, pois sem seu suporte e apoio nesta trajetória. Agradeço à minha namorada Maria Halfeld Barros Duarte que me acompanhou durante toda esta jornada respaldando minhas escolhas e que sem a qual este trabalho não seria possível.

Agradeço aos meus colegas mestrandos, principalmente aos mais próximos, João Guilherme Pedote, Miller Labandeira Languardia, Pedro Henrique Souza e Yuri Rocha, cuja amizade e parceria tornou esta difícil caminhada mais leve e prazerosa. Agradeço ao grande suporte que me proporcionaram, aos diversos momentos de descontração e pela oportunidade de convivência.

Agradeço ao corpo docente da Pós-Graduação de Ciência e Tecnologia de Materiais do Instituto Politécnico do Rio de Janeiro, que proporcionaram grande enriquecimento acadêmico, à equipe do Laboratório de Adesão e Aderência do IPRJ, que se dispuseram prontamente para o auxílio na realização dos experimentos, ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Martins Sampaio, que me deu a oportunidade de integrar um projeto tão promissor e de participar de uma equipe tão inspiradora quanto a do LAA e a do LEFI. Agradeço por fim à instituição, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, por proporcionar este programa, pois foi um divisor de águas em minha vida e possibilitou imenso aprendizado, crescimento. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe, sua amizade foi essencial. Dedico também aos meus avós, pelo exemplo e todo o suporte que me proporcionaram.

RESUMO

AZEVEDO, T. M. Q. P. *Avaliação do comportamento da aderência de um novo sistema de compósito laminado para reforço em estrutura de concreto*. 2021. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2021.

A utilização de materiais compósitos laminados para o reforço e/ou reparo de estruturas de concreto *in loco* vem aumentando significativamente nos últimos anos. Isso se deve aos procedimentos de aplicação mais simples em relação a outras técnicas de reforço e devido ao aumento das pesquisas dos adesivos estruturais, principalmente no estudo da interface de colagem com o concreto. Experimentos realizados anteriormente no Laboratório de Adesão e Aderência mostraram que o sistema de reparo laminado Pipefix que utiliza o adesivo estrutural NVT 201E não respondia bem apenas em substratos metálicos, mas também em superfícies de concreto. Neste trabalho investigou-se a interação deste promissor adesivo estrutural ao concreto. Devido a ausência de normas para certificação e qualificação de adesivos com esta finalidade, buscou-se utilizar experimentos parametrizados em fichas técnicas de adesivos estabelecidos no mercado, de modo a ser possível realizar comparações entre os resultados das propriedades encontradas. Foram feitos os ensaios de compressão axial, flexão de 4 pontos e *pull-out test*. O ensaio de flexão teve grande relevância para confirmar a eficiência do NVT 201E para este uso, visto que os corpos de prova com este adesivo obtiveram resultados 16,26% superiores aos que foram reforçados com adesivo de produto já comercializado para este fim. Os demais ensaios reiteraram a possibilidade do NVT 201E ser utilizado no reforço de estruturas de concreto e incentivaram à continuidade das pesquisas sobre o uso deste adesivo.

Palavras-chaves: Material. Compósito. Concreto. Adesivo. Reforço.

ABSTRACT

AZEVEDO, T. M. Q. P. *Analyze adherence behavior of a new laminated composite system for reinforcement in a concrete structure*. 2021. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2021.

The use of laminated composite materials for the reinforcement and / or repair of concrete structures at the site has increased significantly in recent years. This is due to the simpler application procedures in relation to other reinforcement techniques and due to the increased research on the adhesives available, mainly in the study of the bonding interface with the concrete. Previous experiments that the laminated laminate repair system PIPEFIX that uses the structural adhesive NVT 201E does not respond well only on metallic substrates, but also on concrete surfaces. In this work, an interaction of this promising structural adhesive with concrete was investigated. It requires the absence of standards for certification and qualification of adhesives with this standard, it was sought to use experiments parameterized in technical sheets of corrected adhesives on the market, so that it is possible to make comparisons between the results of the properties found. Axial compression tests, 4-point flexion and pull-out tests were performed. The flexion test was of great quality to confirm the efficiency of the NVT 201E for this use, since the specimens with this adhesive produced results 16.26% higher than those that were reinforced with a product label already marketed for this purpose. The other tests reiterated the possibility of NVT 201E being used to reinforce concrete structures and encouraged the continuity of the system's research.

Keywords: Material. Composit. Concrete. Adhesive. Reinforcement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquematização genérica de um material compósito	18
Figura 2 - Classificação dos compósitos	20
Figura 3 - Sequência genérica de empilhamento em um laminado	20
Figura 4 - Tecido de fibra de carbono LT450-C10-C da Devold AMT [®]	21
Figura 5 - Integração fase de reforço e fase de matriz.....	22
Figura 6 - Materiais Compósitos em função do tipo do reforço.....	23
Figura 7 - Tipos de fibra quanto a orientação.....	24
Figura 8 - Estrutura química do anel de epóxi.....	25
Figura 9 - Razão entre área superficial/volume de uma partícula cilíndrica de um dado em função da razão de aspecto ($a= 1/d$).....	27
Figura 10 - Diagrama tensão-deformação de fibras e metais	28
Figura 11 - Esquematização da seção transversal de um material composto por camadas de fibras de carbono	29
Figura 12 - Reforço à flexão de vigas de concreto armado	30
Figura 13 - Algumas formas disponíveis para a fibra de carbono.....	31
Figura 14 - Materiais componentes do sistema de reforço com fibra de carbono.....	31
Figura 15 - Reforços ao cisalhamento em vigas com compósitos de fibra de carbono.....	32
Figura 16 - Representação esquemática do processo de fabricação do cimento Portland	37
Figura 17 – Curva de Abrahms.....	39
Figura 18 - Fotografia microscópica do concreto endurecido	42
Figura 19 - Mecanismos de ruptura devido a esforços de ação de momento fletor (a) e ação da força cortante (b).....	45
Figura 20 - Aspecto e aplicação do laminado de fibras de carbono. (a) laminado de fibras de carbono; (b) aplicação do laminado.....	47
Figura 21 - Modelo holístico de deterioração do concreto	48
Figura 22 - Diferentes desempenhos de uma estrutura com o tempo em função de diferentes fenômenos patológicos	49
Figura 23 - Reforço do viaduto Santa Teresa	50
Figura 24 - Ilustração do sistema de reforço com fibra de carbono em estruturas de concreto	51
Figura 25 - Detalhe dos agregados expostos após a preparação da superfície de concreto	52
Figura 26 - Ilustração da preparação da superfície. (a) disco diamantado; (b) preparo da superfície	53
Figura 27 - Aumento de resistência do adesivo epoxídico (à temperatura de 15 °C)	54
Figura 28 - Mistura da resina. (a) componentes A e B da resina; (b) consistência da resina	

após mistura	55
Figura 29 - Esquema do adesivo estrutural do sistema de reforço com fibra de carbono	56
Figura 30 - Posicionamento da manta flexível	56
Figura 31 - Retirada do ar aprisionado e acabamento do reforço. (a) processo de laminação da fibra de carbono; (b) reforço aplicado	57
Figura 32 - Esquema de aplicação da manta flexível.	58
Figura 33 - Mistura e aplicação da resina de saturação.	59
Figura 34 - Representação esquemática da teoria mecânica da adesão.....	60
Figura 35 - Mecanismo de transferência de esforços entre concreto e reforço	61
Figura 36 - Modos de ruptura adesiva do sistema armado junto à superfície (NSM) observados em ensaios de aderência	63
Figura 37 - Fluxograma de desenvolvimento de um produto: condições de contorno e relações funcionais entre projeto, seleção de materiais e processo	65
Figura 38 - Corpos de prova enformados	73
Figura 39 - Esquema dos corpos de prova prismáticos	74
Figura 40 - Etapas de aplicação do reforço ao substrato de concreto.....	75
Figura 41 - Esquema representativo do ensaio de flexão de 4 pontos de corpos de prova prismáticos.....	76
Figura 42 - Esquema representativo do reforço com fibra de carbono usado nos ensaios.....	76
Figura 43 – Representação dos diagramas de esforços sofridos pelas vigas no ensaio de flexão de 4 pontos.....	77
Figura 44 - Dispositivo de ensaio para o teste de aderência.....	79
Figura 45 - Corpos de prova confeccionados do LEFI (Laboratório de Ensaios Físicos) para ensaio de aderência.....	79
Figura 46 - Espaçamento mínimo entre dispositivos.....	80
Figura 47 - Esquema representativo do ensaio de aderência.....	80
Figura 48 - Modos de ruptura	81
Figura 49 - Corpo de prova preparado para receber o reforço	82
Figura 50 - Componentes A e B do adesivo estrutural epóxi Pipe Fix NVT 201E.....	83
Figura 51 - Laminação da fibra de carbono utilizando resina Pipe Fix e rolete “tira bolhas” .	84
Figura 52 - Equipamentos para a realização do pull-out test	85
Figura 53 - Realização do ensaio de arrancamento	85
Figura 54 - Adesivo epóxi bicomponente para colagem de tecido de fibras de carbono Sikadur®-330	86
Figura 55 - Adesivo epóxi bicomponente para colagem de tecido de fibras de carbono MC-Carbosolid 1209 TX	87

Figura 56 - Prensa hidráulica utilizada para os ensaios	89
Figura 57 – Imagens do ensaio de flexão de 4 pontos realizado no LEFI.....	93
Figura 58 - Ilustração Tipo A - ruptura no substrato de concreto	94
Figura 59 - Ilustração Tipo A/B - ruptura na interface substrato/revestimento.....	94
Figura 60 - Ilustração Tipo B - ruptura no revestimento	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades típicas de algumas fibras	28
Tabela 2 - Lista dos principais produtores de Cimento Portland de 2011 a 2016.....	35
Tabela 3 - Valores limites para a irregularidade da superfície.....	53
Tabela 4 - Propriedades físicas do cimento CP II – F 32	66
Tabela 5 - Propriedades químicas do cimento CP II – F 32	66
Tabela 6 - Dados técnicos relevantes relacionados a aplicação do S&P 220.....	68
Tabela 7 - Propriedades do S&P 220.....	69
Tabela 8 - Resumo das principais propriedades do adesivo S&P Resin 220 sedidas pelo fornecedor	69
Tabela 9 - Dados técnicos do NVT 201E	70
Tabela 10 - Informações técnicas sobre a cura do NVT 201E	70
Tabela 11 - Propriedades da Fibra de Carbono LT450-C10-C	71
Tabela 12 - Dados técnicos da Resina PIPEFIX	71
Tabela 13 - Informações técnicas sobre a cura da Resina PIPEFIX	71
Tabela 14 - Propriedades da Resina PIPEFIX curada	72
Tabela 15 - Resistência à compressão axial de concreto aos 28 dias	89
Tabela 16 - Propriedades do NVT 201E	90
Tabela 17 - Tensão de tração máxima, Alongamento percentual e Módulo de elasticidade do NVT 201E	90
Tabela 18 - Comparação entre propriedades do NVT 201E e Sikadur®-330.....	91
Tabela 19 - Resultados do Ensaio de Flexão de 4 Pontos	92
Tabela 20 - Resistência de aderência e classificação dos tipos de ruptura.....	95

LISTA DE SÍMBOLOS

N	Newtons
E	Módulo de young ou módulo de elasticidade
ν	Coefficiente de Poisson
G_{LT}	Módulo de Cisalhamento
MPa	Megapascals
GPa	Gigapascals
F_{ck}	Resistência à compressão de projeto
MF	Módulo de finura (MF)
S_f	Metade do comprimento do vão livre
F_c	Resistência à compressão
V_c	Força cortante resistida pelo concreto
f_{ctd}	Valor de cálculo da resistência à tração do concreto
b_w	Largura da alma de uma viga
d	Altura útil

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	14
	OBJETIVO	16
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
1.1	Considerações gerais sobre reforço com compósito de fibra (PRF), em estruturas de concreto armado	17
1.2	Materiais compósitos	18
1.2.1	<u>Classificação dos Materiais Compósitos em Função das Fases</u>	22
1.2.2	<u>Materiais Compósitos de Matriz Polimérica</u>	24
1.2.2.1	Époxi	24
1.2.3	<u>Fibras</u>	26
1.2.3.1	Fibras de Carbono	29
1.2.4	<u>Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono</u>	30
1.2.4.1	Resistência e Rigidez.....	32
1.2.4.2	Coeficiente de expansão térmica	33
1.3	Concreto	33
1.3.1	<u>Desenvolvimento, ciência e tecnologia</u>	34
1.3.2	<u>Constituintes do Concreto</u>	35
1.3.2.1	Cimento Portland.....	36
1.3.2.2	Fator água/cimento	39
1.3.2.3	Agregados.....	40
1.3.2.4	Aditivos	41
1.3.3	<u>Porosidade do concreto</u>	42
1.3.4	<u>Rugosidade do Concreto</u>	43
1.3.5	<u>Mecânica da Fratura</u>	43
1.4	Sistema de reforço com PRFC	46
1.4.1	<u>Degradação do concreto e do aço</u>	47
1.4.2	<u>Processo de aplicação da técnica de reforço com PRFC</u>	49
1.4.2.1	Preparação do substrato	51
1.4.2.2	Aplicação do adesivo epóxi.....	54
1.4.2.3	Aplicação da fibra de carbono	55

1.4.2.4	Aplicação da resina de impregnação	58
1.4.3	<u>Ligação entre concreto e reforço</u>	59
2	MATERIAIS E MÉTODOS	65
2.1	Corpos de prova de concreto	66
2.1.1	<u>Dosagem do concreto</u>	68
2.2	Adesivos estruturais	69
2.2.1	<u>S&P 220</u>	69
2.2.2	<u>NVT 201E</u>	70
2.3	Fibra de carbono	71
2.4	Resina de laminação	71
2.5	Ensaio mecânicos	72
2.5.1	<u>Ensaio de compressão axial</u>	72
2.5.2	<u>Ensaio do reforço ao cisalhamento</u>	73
2.5.2.1	Execução dos corpos de prova	74
2.5.2.2	Aplicação do reforço	74
2.5.2.3	Estrutura do ensaio	76
2.5.3	<u>Ensaio de aderência</u>	78
2.5.3.1	Aplicação do reforço	82
2.5.3.2	Estrutura do ensaio	84
2.6	Comparação de preços entre adesivos epóxi para reforço de estruturas de concreto utilizando fibra de carbono	86
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	89
3.1	Resistência a compressão axial do concreto	89
3.2	Resistência mecânica do adesivo	90
3.3	Resistência ao cisalhamento	91
3.4	Resistência à aderência do NVT 201E	94
	CONCLUSÕES	97
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	98
	REFERÊNCIAS	99

INTRODUÇÃO

A história da humanidade tem sido marcada pela inquietude do homem no ato contínuo de explorar as potencialidades do universo ao seu redor. Desde cedo, o homem aprendeu a conviver e, em diversas oportunidades a desafiar, as leis da matéria, construindo estruturas cada vez maiores, mais altas e grandiosas (BEBER, 2003).

Para edificar, o homem teve que buscar um poderoso aliado, a técnica, ou seja, um conjunto de habilidades e regras que tornaria possível a implementação de todos os seus sonhos. A construção do *Pantheon*, em 27 a.C. (reconstruído no século II), marcou o início da aplicação da *pozzolona*, também conhecida como cimento romano, que se constituiu em uma técnica que revolucionou a indústria da construção e abriu novos horizontes para a expressão arquitetônica da época. A grande descoberta consistiu no aglomerante que, combinado com areia e pedra, além de proporcionar um material de grande resistência, permitiu a criação e o desenvolvimento de novas formas e tipologias de estruturas, com necessidades funcionais específicas (FIB, 1999; BEBER 2003).

O interesse pelo concreto foi também manifestado durante o período renascentista, tendo como exemplo a Basílica de São Pedro, em Roma, onde foi empregado um aglomerante similar à *pozzolana*. Entretanto, foi somente com a introdução do concreto armado, próximo do final do século XIX, que teve início sua extraordinária evolução, que se estendeu em meados do século XX, com a introdução do concreto protendido (McCORMAC, 1998; FIB, 1999; BEBER, 2003).

Embora sua utilização seja muito popular, o concreto não está isento de eventuais fatores que possam comprometer sua vida útil. O aumento das cargas não previsto em projetos pode prejudicar a capacidade estrutural de transferência dos esforços. As condições ambientais desfavoráveis e o próprio envelhecimento da estrutura também podem contribuir para a degradação da sua utilização em serviço. Por meio da aplicação de um reforço externo, é possível reestabelecer a capacidade de suportar cargas dos elementos estruturais de concreto (MUKHTAR; FAYSAL, 2018).

No ano de 1960, foram constatados problemas de corrosão das armaduras na superfície das estruturas de concreto das pontes de rodovias, devido, por exemplo, à alta salinidade e ao clima agressivo. Entre as soluções tradicionais, o reforço com chapas galvanizadas foi descartado, devido às reações de oxidação. Na década de 70, a Administração Federal de Auto Estradas dos EUA empenhou-se em pesquisas na busca de um novo material com resistência mecânica e resistente à corrosão (ACI 440, 1996). No início de 1980,

a companhia Pultrusion Internacional Grating reconheceu a fibra de carbono como um produto eficaz e a ingressou na indústria de barras de Fibra de Carbono. Em 1986, surgiu, na Alemanha, a primeira ponte rodoviária do mundo onde foi utilizada esta fibra de carbono para reforço de sua estrutura. Os governos dos EUA e do Canadá investiram na tecnologia deste material inovador. Neste tipo de reforço, a fibra de carbono toma a forma de barras, cabos, grelhas em camadas e, até, placas (ZHAO et al.,2010).

O método mais comumente utilizado é conhecido como o método EBR ou método de reforço colado externamente. Constitui uma das formas mais práticas de intervir em estruturas de concreto, pois a invasão é mínima e a instalação é realizada de forma fácil e rápida se comparada a outras técnicas de reforço. Sua eficácia depende da ação conjunta de todo o sistema, com destaque para a durabilidade da ligação química e mecânica estabelecida entre o substrato de concreto e o material compósito que ocorre por meio de um adesivo, geralmente um adesivo epóxi (CABRAL-FONSECA et al, 2018).

No sistema de reforço com fibra de carbono há uma interface entre dois materiais, fibra de carbono e concreto, por onde ocorre a transmissão da tensão da estrutura de concreto para a fibra de carbono (reforço). Essa tensão propaga-se na forma de tensão de cisalhamento na interface (na região do adesivo) entre o concreto e os polímeros reforçados com fibras de carbono (WOO et al.,2010). Desde 1991, tem sido pesquisado o reforço em estruturas de concreto com a colagem de polímero contendo fibra de carbono. Os estudos têm mostrado que a resistência do concreto (substrato) e o tratamento da superfície influenciam na resistência de aderência (SUBRAMANIAM et al., 2007 e STEPHEN KURTZS, 2008).

Um outro elemento que participa da interação entre fibra de carbono e concreto é o adesivo estrutural epóxi. Este material é formado por reações químicas de grupos epóxi com aminas, álcool, fenol e outros.

O sistema de reforço de estruturas de concreto utilizando fibras poliméricas reforçadas precisa que o adesivo utilizado atenda propriedades mecânicas e químicas para que o sistema seja eficiente e não ocorra descolamento em sua interface ou pontos de falha. Este recurso pode ser utilizado tanto para finalidade de reforço, como para reparo.

Não há norma reguladora para a qualificação de adesivos estruturais para reforço específico de estruturas de concreto no Brasil. No entanto, produtos já comercializados neste setor descrevem, em suas fichas técnicas, ensaios utilizados para comprovar suas propriedades mecânicas.

OBJETIVO

Trabalhos anteriores do LAA destinaram seu foco na comparação de performance mecânica de corpos de prova prismáticos de concreto reforçados com material compósito laminado e ao reparo de trincas com o adesivo estrutural – todos submetidos ao ensaio de resistência à flexão de três pontos. Nestes trabalhos, foram comparados corpos de prova de concreto utilizando um adesivo estrutural desenvolvido no LAA, frente a um adesivo comercial específico para aplicação em reforços de estrutura de concreto e já difundido no mercado. Os resultados obtidos nas amostras reforçadas e reparadas na interface concreto/laminado o adesivo estrutural de NVT 201E – desenvolvido no Laboratório de Adesão e Aderência no IPRJ – obtiveram excelentes resultados.

Este trabalho voltou-se para um próximo passo, que seria a análise das propriedades do adesivo epóxi para a utilização em substrato de concreto, ou seja, procurou-se testar a interação do adesivo ao concreto, visto que o adesivo já apresentou ótimas propriedades combinado à superfícies metálicas. Procurou-se realizar estes ensaios de forma comparativa entre o adesivo desenvolvido no LAA e adesivo já estabelecido no mercado.

Desta forma, serão verificadas se as características mecânica e de aderência do sistema de reforço e reparo com o uso do laminado PIPEFIX com o adesivo estrutural NVT 201E se enquadra inicialmente no mercado de reforço de estruturas de concreto armado com materiais compósitos laminados, já que vários outros ensaios ainda serão necessários para uma qualificação e/ou certificação de um sistema de reparo eficaz.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Considerações gerais sobre reforço com compósito de fibra (PRF), em estruturas de concreto armado

Desde 1940, os compósitos à base de fibras têm sido aplicados para o desempenho de funções importantes no campo da engenharia militar, aeroespacial, naval, ferroviária e automobilística (JUVANDES et al., 1996). A eficiência desta alternativa fez com que ela começasse a ser utilizada no setor da construção civil para intervenção em estruturas que sofrem de patologias ou erro de dimensionamento.

Os primeiros estudos voltados para aplicação de reforços externos em concretos datam da década de 1960 e são apresentados simultaneamente na África do Sul e França por L'Hermitte e Bresson, com a ideia principal de reforçar estruturas de concreto armado através da colagem de chapas de aço com adesivos na face do elemento submetida à tração (CZADERSKI; MEIER, 2018).

Segundo Landman (2001), só para as pontes de concreto brasileiras, estima-se que o custo atual em manutenção possa chegar a valores da ordem de 10 bilhões em planos de recuperação para cinco anos. Nos Estados Unidos, de acordo com o FHWA – Federal Highway Agency, cerca de 35% das pontes norte-americanas estão classificadas como deficientes ou em necessidade de reabilitação ou substituição.

A utilização de materiais compósitos e principalmente as fibras de carbono aumentou no decorrer dos últimos anos devido a alta resistência mecânica das fibras de carbono, boa resistência à corrosão eletroquímica, adaptação em várias formas, baixo peso específico e facilidade de aplicação .

A sua utilização tem sido significativa em diversos países, como é o caso do Japão, principalmente em aplicações relacionadas aos problemas de abalos sísmicos. Na Europa, as aplicações são mais direcionadas à reabilitação da infra-estrutura do patrimônio histórico, e na América do Norte, pode-se dizer que o maior enfoque é a durabilidade das construções (JUVANDES, 1999).

Segundo Nanni (2001) a técnica de reforço com Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC) vem sendo aplicada em obras de pequeno porte, como também, em obras de grande vulto (pontes, edifícios comerciais e grandes centros de convenções). Ainda, segundo o autor, a técnica substitui a aplicação de chapas metálicas, principalmente devido ao problema

de corrosão delas.

Esta alternativa, portanto, já se consolidou no mercado brasileiro para reforço em estruturas de concreto armado no Brasil. Isso se explica muito devido ao aumento da produção das mantas de fibra de carbono e conseqüentemente a diminuição do custo para a obtenção desse material.

1.2 Materiais compósitos

Segundo Mendonça (2005), define-se como material compósito, um conjunto de dois ou mais materiais diferentes, combinados em escala macroscópica, para funcionarem como uma unidade, tendendo a obter um conjunto de propriedades que nenhum dos componentes individualmente apresenta. A figura 1 ilustra fases constituintes de um compósito.

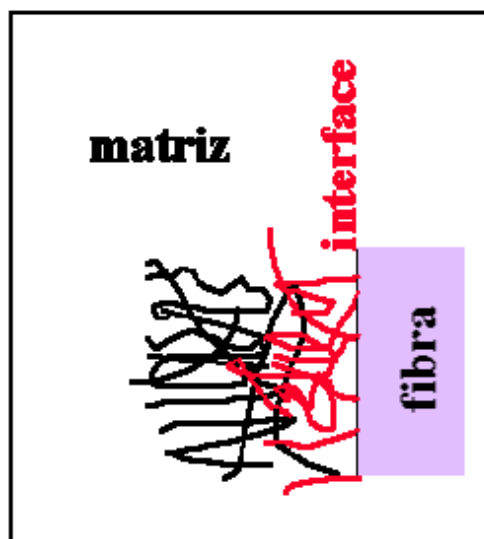
Fases constituintes:

Adesivos: Resinas empregadas na colagem do sistema compósito.

Matriz: Resina que aglomeram o reforço, para lograr as propriedades desejadas.

Reforço: Material específico de atesto que serve de reforço.

Figura 1 - Esquematização genérica de um material compósito



Fonte: MOREIRA, 2009.

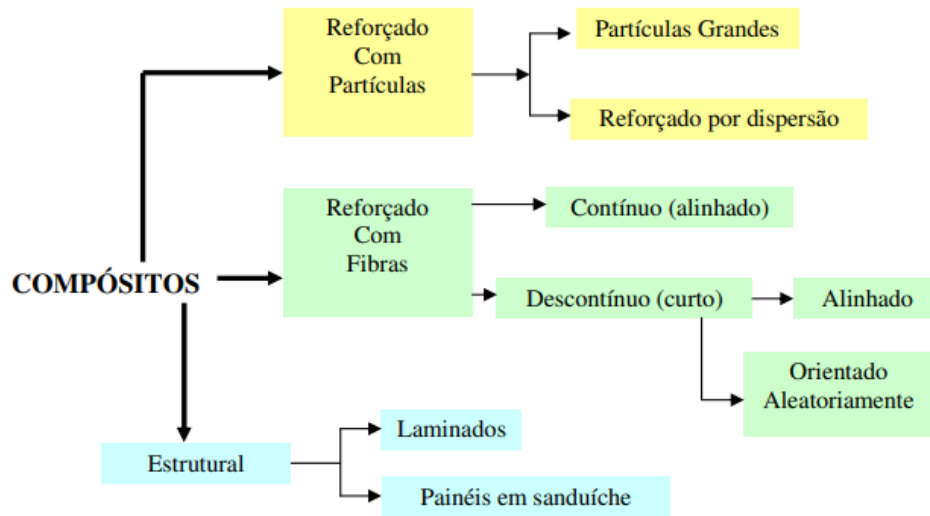
Na segunda metade do século XX, foi introduzido o conceito dos materiais compósitos como uma classe distinta de materiais. Essa classe seria responsável por definir aqueles materiais devidamente projetados para atender certas necessidades que materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos separadamente não poderiam atender. De forma ampla, o material compósito pode ser entendido como um material multifásico onde cada fase tem influência significativa no comportamento geral do elemento final (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2012).

Segundo Moreira (2009), o principal objectivo de se produzirem compósitos é o de combinar diversos materiais para produzir um único com propriedades superiores às dos componentes isolados, pelo que a combinação dos materiais constituintes é decidida a partir da aplicação específica que se pretende dar ao material compósito. A concepção deste tipo de materiais é milenar: existem referências escritas sobre a utilização de argila reforçada com palha em tijolos no Antigo Egito. No século XIX já se Materiais de Construção I Materiais Compósitos 5/11 utilizavam barras de ferro para reforçar alvenarias, abrindo-se assim o caminho para o desenvolvimento do concreto armado; nos anos 40 do século XX generalizou-se a utilização de plásticos reforçados em componentes eléctricos e a partir de 1960 desenvolveram-se as fibras de carbono que foram a partir de 1968 aplicadas em aviões. A combinação dos materiais depende da aplicação específica que se pretende do material compósito e a relativa importância de vários factores tais como:

- Resistência à corrosão
- Rigidez
- Peso
- Resistência à fadiga
- Expansão térmica
- Propriedades electromagnéticas
- Condutibilidade térmica
- Comportamento acústico
- Aspecto

Existem diversos tipos de composição para essa classe de materiais, a figura 2 esquematiza as principais formas em que os materiais compósitos estão presentes no setor de engenharia.

Figura 2 - Classificação dos compósitos

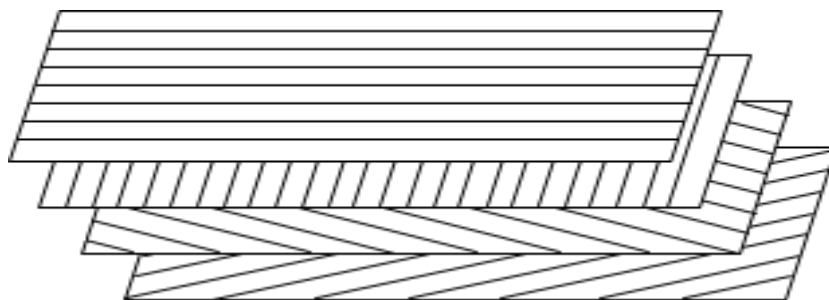


Fonte: MOREIRA, 2009.

A combinação de materiais tem o intuito de unir propriedades de distintos materiais para maior eficiência. Como essas combinações geram materiais versáteis, os compósitos ganham cada vez mais espaço. Utilizar o mecanismo de materiais compósitos permite reduzir problemas como o de resistência a altas temperaturas, problemas de fadiga, corrosão, reduzir peso específico e possivelmente reduzir custos para obtenção de determinada propriedade.

A parte do reforço no material compósito é a mais resistente mecanicamente. No caso de fibras, este material tem resistência distinta dependendo da sua disposição. Um material compósito pode ter diversas camadas de reforço e, no caso de fibras, pode ser disposto de diversas formas como mostra a figura 3.

Figura 3 - Sequência genérica de empilhamento em um laminado



Fonte: REDDY & MIRAVETE, 1995.

Embora usados nas construções há milênios, os materiais fibrosos tiveram seu grande desenvolvimento na área das Engenharias mecânica, aeroespacial, aeronáutica e bélica, a partir da Segunda Guerra Mundial. Por isso, a maior parte das pesquisas foi realizada com base em matrizes metálicas e poliméricas (KERN, 1999). A figura 4 mostra uma malha de fibra de carbono como exemplo.

Figura 4 - Tecido de fibra de carbono LT450-C10-C da Devold AMT®.



Fonte: O autor, 2021.

Quando surge a primeira fissura em um compósito sem adição de fibras, a abertura progressiva dessa fissura dá origem ao colapso da peça. Todavia, nos materiais com a presença de fibras em sua mistura, a fratura é retardada. A ruptura torna-se um processo progressivo, pois as pontes de transferência dormadas pelas fibras absorvem parte das solicitações e originam uma fissuração mais distribuída. O que se verifica em materiais reforçados com fibras é o que o número de fissuras aumenta, contudo a abertura dessas fissuras torna-se menor, reduzindo a área total de fissuração. Observa-se também que o aparecimento das primeiras fissuras devido a retração é retardado (SWAMY e STRAVIRDES, 1979 e KOVLER et. Al., 1992 apud TANESI, 1997).

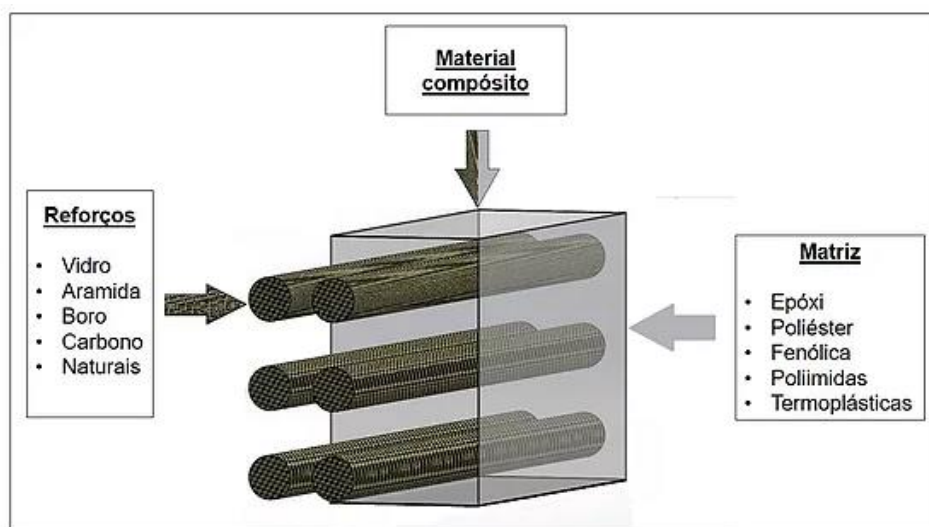
A matriz tem como funções manter a coesão das fibras, proteger as fibras de intempéries e desgaste e distribuir carregamento. São utilizados como matriz principalmente os materiais termoplásticos e termoendurecíveis, além de metais, cerâmicos e o Carbono.

A matriz desempenha um papel fundamental na prevenção à flambagem das fibras quando submetidas a esforços compressivos, tendo em parte uma influência considerável na resistência à compressão. Outro fator que deve ser levado em consideração na escolha do

material para a matriz é a resistência aos esforços cisalhantes. Quando submetidos à flexão, a resistência ao cisalhamento interlaminar é um critério importante a ser considerado, porém quando há esforços de tração, a resistência ao cisalhamento no plano é o fator de maior importância (MALLICK, 2008).

A matriz de um material compósito pode ser dúctil (tipo orgânica ou polimérica) ou frágil (tais como as cimentícias e as matrizes de vidro). As resinas termofixas ou termoplásticas ocupam papel especial nas pesquisas sobre materiais compósitos. Dentre as resinas disponíveis para este fim se destaca a resina epóxi, que permite a criação de uma matriz com excelente desempenho mecânico, estabilidade e elevada resistência química (BERNARDI, 2003). Segundo Mano (2000), as resinas epoxídicas são compatíveis com todas as fibras e são as mais utilizadas em compósitos que exigem alto desempenho mecânico. No entanto, a variedade de resinas de base epóxi, juntamente com os diferentes tipos de agentes de cura, podem fornecer, ao compósito, comportamentos distintos, o que pode tornar difícil a especificação desses produtos. A figura 5 mostra a composição de um sistema compósito laminado.

Figura 5 - Integração fase de reforço e fase de matriz



Fonte: GAS Engenharia, 2018.

1.2.1 Classificação dos Materiais Compósitos em Função das Fases

Os materiais compósitos podem ser classificados dependendo o tipo de matriz e o reforço empregado, assim como a disposição das fibras. Fernández Pérez (2016) esquematizou a classificação em função das fases.

Dependendo do tipo de matriz empregado:

- Compósitos de matriz polimérica.

Compósitos de poliéster e resinas epóxis reforçadas com fibra de vidro, fibra de carbono ou

fibra de aramida. Sua maior desvantagem: limitação ao uso em altas temperaturas.

- Compósitos de matriz metálica.

Ligas de alumínio, titânio e magnésio. Utilizadas na indústria automobilística principalmente.

- Compósitos de matriz cerâmica.

Óxido de alumínio e carboneto de silício.

Dependendo do tipo de reforço empregado:

- Compósitos por partículas.

Partículas numa matriz.

- Compósitos fibrosos.

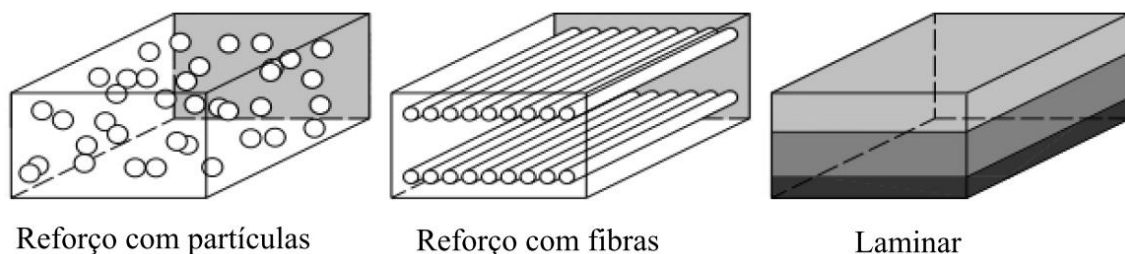
Fibras numa matriz.

- Compósitos laminados.

Camadas alternadas das fases.

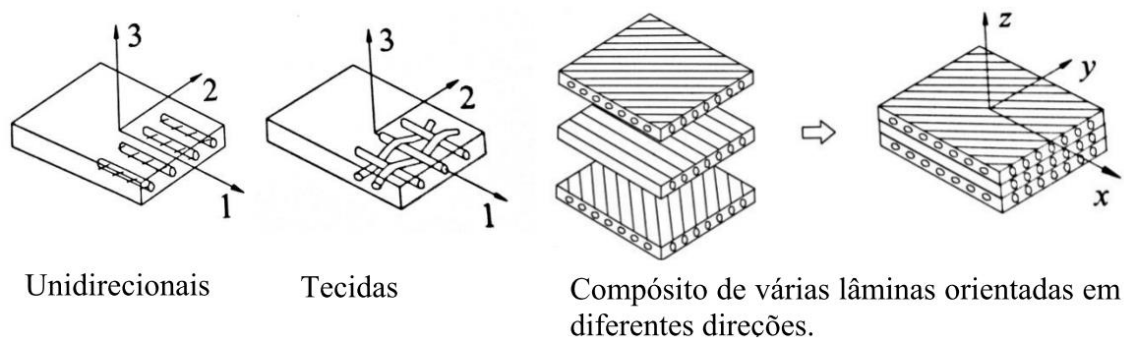
A figura 6 ilustra como se dispõe os diferentes tipos de reforço em materiais compósitos e a figura 7 ilustra os tipos de fibra quanto suas orientação e direção.

Figura 6 - Materiais Compósitos em função do tipo do reforço



Fonte: MOLINA, 2012

Figura 7 - Tipos de fibra quanto a orientação



Fonte: MENDONÇA, 2005.

1.2.2 Materiais Compósitos de Matriz Polimérica

Um material polimérico pode ser considerado como constituído por muitas partes, unidas ou ligadas quimicamente entre si, de modo a formar um sólido. Este grupo de materiais encontra-se dividido em dois, dependendo, a sua classificação do modo como estão ligados quimicamente e estruturalmente: estes podem ser termoplásticos ou termoendurecíveis. A principal diferença entre estes dois plásticos é que os primeiros quando voltam a ser aquecidos podem adquirir outra forma, enquanto os segundos uma vez arrefecidos a sua forma não se altera (VENTURA, 2009).

Entende-se, segundo Callister Jr. (1994), que a matriz polimérica promove a união das fibras umas às outras, protege a superfície da fibra contra abrasão mecânica tem como propriedade predominante a ductilidade.

Para que uma substância possa ser utilizada na fabricação de fibras poliméricas, ela deve ser constituída de macromoléculas naturais com estruturas de cadeia ou por moléculas produzidas sinteticamente e deve ser possível de transformação em líquido viscoso ou massa fundida fiável (ERHARDT et. Al, 1975). Para utilização na produção de fibras só interessam os polímeros lineares. A indústria química conseguiu, nas últimas décadas, produzir substâncias cujas moléculas possuem cadeias entre 10.000 a 100.000 átomos de carbonos.

1.2.2.1 Époxi

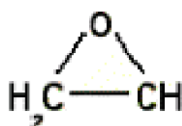
Helene (1995) e Konrad (2003) relatam que o inventor desse material foi o Dr. Pierre Castan em 1936 na Suíça, que trabalhava para a companhia De Trey Frères e desenvolvia um produto para a fabricação de dentaduras e outras próteses odontológicas. Segundo Konrad

(2003), posteriormente sua patente foi adquirida pela empresa Ciba Pharma & Plastics Ltd (atual Huntsman) que, após apreciável trabalho de pesquisa e desenvolvimento, lançou o epóxi para aplicação industrial, inicialmente como adesivo, o Araldite.

De lá para cá, os produtos se popularizaram no mercado da construção civil e segundo Helene (1995) estão cada vez mais, sendo utilizados em função com maior responsabilidade, como por exemplo, na construção de elementos pré-fabricados, na correção de manifestações patológicas (reforços estruturais, preenchimento de fissuras e juntas de concreto novo com antigo), em pisos industriais, entre outras aplicações.

Adesivo é uma substância usada para colar as superfícies de dois materiais sólidos, produzindo uma junta que deverá, se o adesivo for bom, uma elevada resistência mecânica. As forças de ligação entre o adesivo e a superfície aderida são consideradas eletrostáticas, semelhantes às forças de ligação secundárias entre as cadeias moleculares em polímeros termoplásticos. Os adesivos poliméricos podem ser usados para colar uma variedade de combinações de materiais, entre eles: metal-metal, metal-plástico e metal-cerâmico. A principal desvantagem na utilização de adesivos é a limitação da temperatura de serviço (SILVA, 2001). O termo epóxi refere-se a um grupo constituído por um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de Carbono, como mostra a figura 8.

Figura 8 - Estrutura química do anel de epóxi



Fonte: O autor, 2021.

As resinas epóxi são apresentadas na forma líquida contendo anéis epóxi. Para o endurecimento da resina é necessário a adição de agentes de cura e para reduzir o tempo de gel é necessário adicionar aceleradores á resina. Existem temperaturas e tempos envolvidos com o processo de cura das resinas epóxi e, subsequentemente, importantes para o adesivo.

Segundo Fernández Pérez (2016), quando são empregados adesivos epóxi se faz necessário conhecer conceitos fundamentais:

- **Pot life:** Tempo em que se pode trabalhar com o adesivo depois de misturar a resina e o endurecedor, antes que comece a endurecer no recipiente de preparação. Pode variar entre poucos segundos e vários anos.

- **Open Time:** Tempo máximo após a aplicação do adesivo sobre a superfície antes da união do material.
- **Glass transition temperature:** Temperatura de transição. Ocorre uma perda de propriedades, o adesivo passa a ter um comportamento vítreo a um comportamento plástico sem prestações mecânicas.

Vantagens dos adesivos epóxis. Segundo CEB – FIB, Bulletin 14. (2001)

- Perfeita aderência sobre dissimiles suportes, especialmente suportes minerais, concreto, alvenaria, pedra.
- Tem um longo Open Time, para facilitar os trabalhos em obra.
- Elevada coesão interna e aderência.
- Possibilidades de elasticidade, mediante adições.
- Não forma subprodutos depois do endurecimento.
- Baixa retração em comparação com resinas de poliéster, vinylester e acrílicas.
- Baixo escoamento
- Formulação com thixotropic para fazer trabalhos em vertical.
- Capacidade de união em suportes irregular.

1.2.3 Fibras

As fibras se constituem em um meio efetivo de reforço porque apresentam menor número de defeitos que em sua forma mássica. Acredita-se que foi Griffith que primeiro demonstrou esse fato na prática em 1920 (GORDON, 1991).

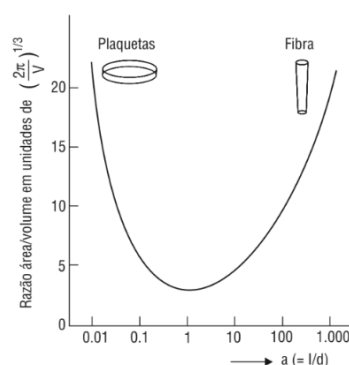
O conceito de reforço com fibras nos materiais de construção não é algo novo. As fibras têm sido aplicadas em construções desde os primórdios de nossa história; há evidências que fibras de amianto foram usadas para reforçar postes de argila há 5 mil anos, tijolos de adobe eram reforçados com fibras vegetais na Babilônia, pêlos de animais utilizados como reforço em argamassa de enchimento de paredes há centenas de anos, tijolos de barro eram produzidos pelos egípcios com argila cozida e reforçados com palha (MARAGON, 2016).

Entretanto, a adição de fibras para reforço do concreto é um método construtivo relativamente novo. O emprego de fibras descontínuas adicionadas aleatoriamente ao concreto desenvolveu-se a partir de 1960, quando surgiu no mercado novos produtos tais como fibras

poliméricas, metálicas, vegetais e minerais. Os primeiros estudos e pesquisas dirigidos à aplicação e utilização do concreto reforçado com fibras tiveram início a partir de 1971 nos Estados Unidos. Existem vários tipos de fibras envolvendo o estudo de reforços de materiais da construção (SPECHT, 2000).

À medida que se tornam mais finos, os materiais tendem a apresentar menor número de defeitos que possam induzir a falhas e, dessa forma, a resistência tende a se aproximar mais da resistência teórica do material, representada pela resistência coesiva das camadas adjacentes de átomos. As fibras, entretanto, praticamente não tem utilidade estrutural se não forem aglutinadas e estabilizadas por uma matriz. Isoladamente, as fibras só resistem a esforços de tração e, por serem muito esbeltas, não se mantem estáveis geometricamente (ou seja, colapsam) sob reduzidos esforços de compressão, flexão e torção. A configuração geométrica das fibras, ou seja, pequeno diâmetro e grande comprimento, ($l/d \gg 1$) permite um alto valor na relação área superficial/volume e, por consequência, a área interfacial fibra/matriz disponível para transferência de carga por unidade de volume da fibra aumenta em função da relação comprimento/diâmetro, como pode ser verificado na figura 9. A figura 9 mostra ainda que a área interfacial fibra/matriz disponível para transferência de tensões por unidade de volume da fibra aumenta com o aumento da relação comprimento/diâmetro, passando por um mínimo equivalente a uma partícula de formato esférico. Para as plaquetas (ou seja, l/d) a razão área superficial/volume aumenta à medida que a relação l/d decresce (LEVY NETO, 2016).

Figura 9 - Razão entre área superficial/volume de uma partícula cilíndrica de um dado em função da razão de aspecto ($a = l/d$)



Fonte: GIBSON, 1994.

De acordo com Fernández Pérez (2016), as fibras são o material de reforço do compósito, proporcionando a resistência e rigidez. Elas podem ser produzidas de forma contínua ou descontínua, mas neste estudo são apresentadas as fibras contínuas, as quais são

mais apropriadas no reforço de estruturas, devido a sua excelente capacidade de transferência de cargas e alta resistência à tração.

Existem três tipos principais de fibras para o reforço de estruturas na engenharia:

- Reforço com fibra de vidro, (PRFV)
- Reforço com fibra de aramida, (PRFA)
- Reforço com fibra de carbono, (PRFC)

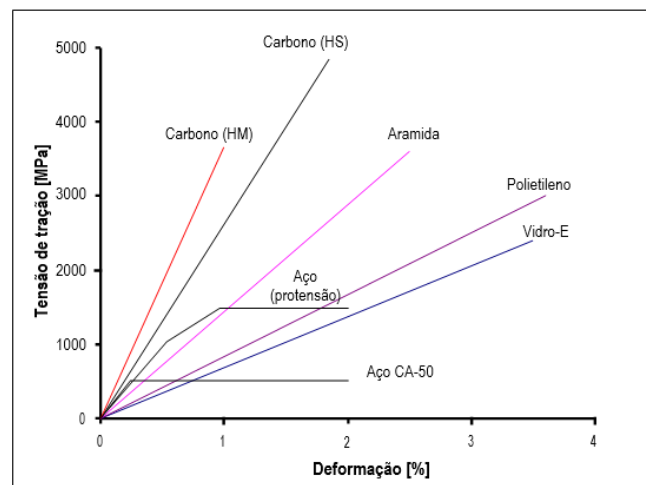
A tabela 1 expressam algumas das propriedades dos principais tipos de fibra. Já a figura 10 ilustra o gráfico de tensão-deformação de algumas fibras e metais.

Tabela 1 – Propriedades típicas de algumas fibras

Propriedade	Vidro-E	Aramida (A) Kevlar 49™	Carbono de elevada resistência (HS)	Carbono de elevado módulo (HM)	Aço CA-50
Resistência à tração [MPa]	2400	3600	3300 – 5000	1500 – 4700	500 (escoamento) 550 (ruptura)
Módulo de elasticidade [GPa]	70	130	230 – 300	345 – 590	210
Deformação na ruptura [%]	3,5	2,5	1,5 – 2,2	0,6 – 1,4	0,2 (escoamento) 6 (ruptura)
Peso específico [kN/m ³]	25,6	14,4	18	19	78,5
Coefficiente de dilatação térmica [10 ⁻⁶ /°C]	5,0	-2 (longitudinal) +59 (transversal)	-1 (longitudinal) +17 (transversal)	-1 (longitudinal)	12 (longitudinal)
Custo da fibra [US\$/kg]	2	22	15 - 22	90	1

Fonte: KENDALL, 1997.

Figura 10 – Diagrama tensão-deformação de fibras e metais



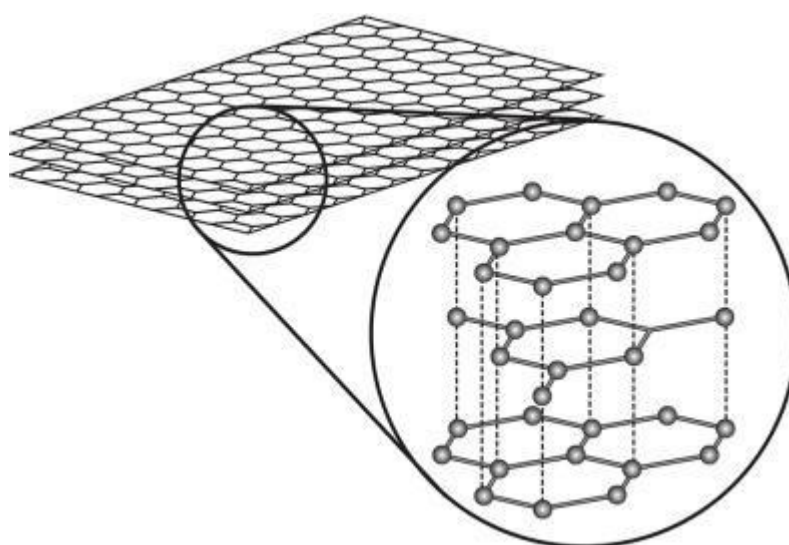
Fonte: BEBER, 2003.

1.2.3.1 Fibras de Carbono

A fibra de carbono é um material altamente promissor, baseado na força das ligações carbono-carbono e na leveza do átomo de carbono [Taylor, 1994]. Conforme Schwartz (1984), as fibras de carbono são caracterizadas por uma combinação de baixo peso, alta resistência e grande rigidez. O seu alto módulo de elasticidade e, de certo modo, alta resistência, dependem do grau de orientação das fibras, ou seja, do paralelismo entre os eixos das fibras. Ainda segundo Schwartz, todas as fibras de carbono são fabricadas através da pirólise de fibras orgânicas em uma atmosfera inerte. A temperatura de pirólise pode variar entre 1000° e 3000° C. Temperaturas de processo mais altas geralmente conduzem a fibras com maior módulo de elasticidade. Apenas três matérias-primas alcançaram importância na produção comercial de fibras de carbono. São elas: *rayon*, poliacrilonitrila (PAN) e piche.

As fibras de carbono são sólidos semicristalinos orgânicos organizados em um nível atômico por arranjos bidimensionais planos de átomos de carbono, como pode ser visto na figura 11. Essas fibras podem ser produzidas em diferentes níveis de acordo com seu módulo de elasticidade, sendo denominadas como módulo padrão (SM), módulo intermediário (IM), alta resistência (HS) e ultra alto módulo (UHM) (BANK, 2006).

Figura 11 - Esquematização da seção transversal de um material composto por camadas de fibras de carbono



Fonte: DAMBROT, 2016.

Fibras de carbono com módulo de elasticidade de cerca de 230 GPa são conhecidas

como fibras de alta resistência (AR), no entanto, ainda são consideradas de baixo módulo. As fibras de alto módulo (AM) têm valores que variam de 480 a 700 GPa desta propriedade. Melhorias significativas nas propriedades mecânicas das fibras de carbono estão sendo realizadas em alguns laboratórios de pesquisa e podem vir a ser incorporadas, no futuro, aos produtos de reforço que chegarem ao mercado. (SILVA, 2001; MACHADO, 2006).

1.2.4 Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono

Diversas técnicas de reforço de estruturas têm sido empregadas pelos profissionais que atuam na área de recuperação e reforço de estruturas. No campo dos elementos estruturais de concreto armado sujeitos à flexão, como as vigas, as técnicas de reforço mais difundidas no meio técnico são as tradicionais, como a colagem de chapas de aço, com ou sem parafusos na superfície de concreto; a adição no banzo inferior da viga de um novo concreto ou argamassa de elevado desempenho, com novas barras de aço longitudinais; e mais recentemente, a colagem externa de PRFC por meio de resinas epoxídicas estruturais. A figura 12 ilustra a aplicação de reforço à flexão em vigas de concreto armado (FERRARI, 2007).

Figura 12 – Reforço à flexão de vigas de concreto armado



a) adição de barra de aço



b) colagem de PRFC

Fonte: FERRARI, 2007.

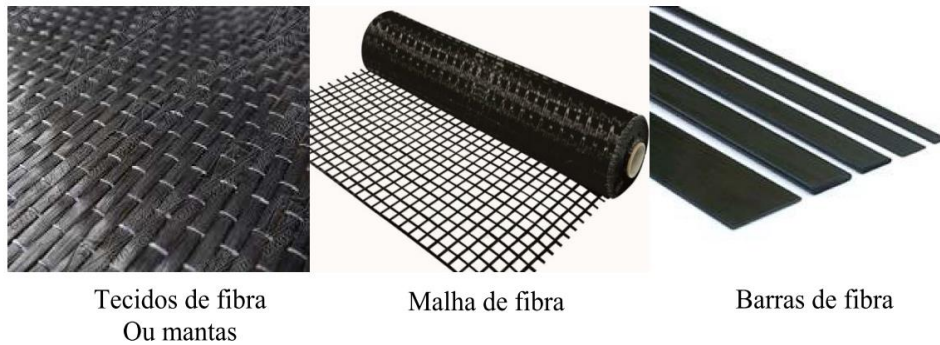
Embora o número de aplicações nesta área seja ainda reduzido, motivado principalmente pelo elevado custo de produção dos compósitos de fibra de carbono, existe um imenso potencial em sua utilização na reabilitação estrutural de elementos de concreto armado. Em muitos casos, a aplicação de compósitos pode significar um meio de estender a vida útil de uma estrutura que possivelmente não poderia ser reforçada utilizando materiais convencionais (KARBHARI & ZHAO, 2000). Ainda, a habilidade de se conduzir a completa operação de reforço em períodos muito curtos de tempo, sem que seja necessário interromper, completamente, a utilização da estrutura, é, sem dúvida alguma, a maior vantagem dos compósitos. Contudo, alguns aspectos

como o projeto, detalhamento e garantia da integridade da ligação concreto/reforço deve, ainda, ser melhor compreendida.

Segundo Nanni (2001) a técnica de reforço com PRFC vem sendo aplicada em obras de pequeno porte, como também, em obras de grande vulto (pontes, edifícios comerciais e grandes centros de convenções). Ainda, segundo o autor, a técnica substitui a aplicação de chapas metálicas, principalmente devido ao problema de corrosão delas.

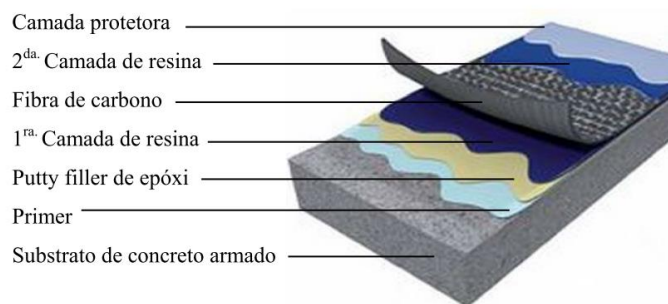
Na figura 13, apresentam-se algumas formas disponíveis para a fibra de carbono, na figura 14, apresentam-se os materiais componentes do sistema de reforço com fibra de carbono e na figura 15, mostram-se reforços ao cisalhamento em vigas.

Figura 13 - Algumas formas disponíveis para a fibra de carbono



Fonte: VIAPOL, 2016.

Figura 14 - Materiais componentes do sistema de reforço com fibra de carbono



Fonte: MASTER BUILDERS, 1998.

Figura 15 - Reforços ao cisalhamento em vigas com compósitos de fibra de carbono



Fonte: MATISSE, 2016.

1.2.4.1 Resistência e Rigidez

As fibras de carbono, como as fibras de vidro, foram os primeiros reforços utilizados para aumentar a rigidez e resistência de materiais compósitos avançados leves, comumente utilizados em aeronaves, equipamentos de recreação e aplicações industriais. A expressão “fibra de carbono” geralmente se refere a uma variedade de produtos filamentosos compostos por mais de 90% de carbono e filamentos de 5 a 15 μm de diâmetro, produzidos pela pirólise da poliacrilonitrila (PAN), piche ou rayon (LUBIN,1969).

Quando se utilizam materiais compósitos de fibras de carbono, a sua resistência e módulo de elasticidade podem ser orientados de modo otimizado para minimizar a massa final. Além da resistência e rigidez, as fibras de carbono possuem excelente resistência à fadiga, características de amortecimento de vibrações, resistência térmica e estabilidade dimensional. As fibras de carbono possuem também boa resistência elétrica e térmica e são quimicamente inertes, exceto quanto à oxidação (CALLISTER,1997).

As fibras de carbono são predominantemente utilizadas por permitirem que sejam alcançadas grande resistência e rigidez. A maioria dos compósitos de fibra de carbono (laminados, mantas e tecidos), comercializados atualmente, apresenta um módulo de elasticidade que pode variar entre 230 e 640 GPa, enquanto que a resistência varia entre 1500 e 5000 MPa (BEBER, 2003).

1.2.4.2 Coeficiente de expansão térmica

O coeficiente de expansão térmica refere-se a alteração relativa na dimensão linear devido ao aumento unitário na temperatura de um determinado material.

A expansão térmica dos materiais compósitos depende de uma série de fatores, do tipo de fibra, tipo de matriz, geometria da fibra e fração volumétrica. Em função desta versatilidade, os compósitos podem ser construídos para uma necessidade específica (BEBER, 2003).

O reforço de fibras de carbono, similarmente aos compósitos poliméricos, suporta os carregamentos mecânicos, direciona a condutividade térmica e mantém a integridade estrutural de estruturas, devido ao seu baixo coeficiente de expansão térmica ($1 \times 10^{-6}/C^{\circ}$) (BENTO, 2004).

Observe-se que o coeficiente negativo de dilatação térmica indica que o material sofre contração com o aumento de temperatura e dilata com a diminuição da temperatura (somente como referência, o coeficiente de dilatação térmico do concreto é da ordem de 4 a $6 \times 10^{-6}/C^{\circ}$) (MACHADO, 2002).

1.3 Concreto

O concreto, no sentido mais amplo, é qualquer produto ou massa produzido a partir do uso de um meio cimentante. Geralmente esse meio é o produto da reação entre um cimento hidráulico e água, mas atualmente mesmo essa definição pode cobrir uma larga gama de produtos. O concreto pode ser produzido com vários tipos de cimento e também conter pozolanas, como cinza volante, escória de alto-forno, sílica ativa, adições minerais, agregados de concreto reciclado, aditivos, polímeros e fibras. Além disso, esses concretos podem ser aquecidos, curados a vapor, auto-clavados, tratados à vácuo, prensados, vibrados por impacto (shock-vibrated), extrudados e projetados (NEVILLE, 2015).

Na mistura do concreto, o Cimento Portland, juntamente com a água, forma uma pasta com certa fluidez, dependendo do percentual de água adicionado. Essa pasta envolve as partículas de agregados com diversas dimensões para produzir um material, que, nas primeiras horas, apresenta-se em um estado capaz de ser moldado em fôrmas das mais variadas formas geométricas. Com o tempo, a mistura endurece pela reação irreversível da água com o cimento, adquirindo resistência mecânica capaz de torná-lo um material de excelente desempenho estrutural, sob os mais diversos ambientes de exposição. O concreto de Cimento Portland deve conter cimento, água e agregados, além da possibilidade de contar com aditivos, pigmentos, fibras, agregados especiais e adições minerais, cujos empregos tornam-se cada

vez mais frequentes nos concretos atuais. A proporção entre os diversos constituintes é buscada pela tecnologia do concreto, para atender simultaneamente as propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade requeridas para o concreto, além das características de trabalhabilidade necessárias para o transporte, lançamento e adensamento, condições estas que variam caso a caso (ISAIA, 2007).

1.3.1 Desenvolvimento, ciência e tecnologia

Apesar do concreto simples, ter sido magnificamente aplicado em centenas de quilômetros de rodovias e pavimentos do império romano como na Via Apia, existente até hoje nos arredores de roma, seu uso mais espetacular foi na cúpula de maior vão livre da antiguidade, o Panteão de Roma, com 44 m de vão livre, que somente foi superado em 1912, na cobertura de um centro de exposições na Alemanha. Tratava-se de um concreto primitivo, obtido da mistura de cal hidratada com argila pozzolânica, abundante na região de Pozzuoli nas cercanias de Nápoles, que o transformava em um material muito durável mas, ainda, com resistências baixas, comparadas às de hoje. Nessa cúpula foi utilizado com maestria todo o saber da época, contraventando os esforços horizontais da base com paredes estáveis e estruturais de 6m de largura; espessura da cúpula variável e decrescente dos apoios para o centro; concreto com densidade variável e decrescente dos apoios ao centro através do uso de diferentes agregados (calcário, carvão, tijolos e pedra pome); fôrmas de bronze com caixões tipo “cubetas” para reduzir peso de material e um eficiente adensamento e acabamento superficial. Depois dessa vitoriosa façanha estrutural, a Engenharia não mais utilizou esse concreto como material estrutural em obras importantes e parece ter esquecido esse conhecimento por muitos séculos (ISAIA, 2007).

Também segundo Isaia (2007), o concreto da era atual teve início somente após a patente do cimento Portland por John Aspdin em 1824 na Inglaterra. nesses primeiros anos, mesmo nos Estados Unidos, França e Inglaterra, que eram as três nações mais desenvolvidas da época, pouca aplicação significativa teve, destacando-se as patentes dos franceses Joseph-Louis Lambot, em 1855, para construir barcos, e, de Joseph Monier para construir vasos em 1867 (e postes e vigas em 1878), basicamente em argamassa armada. A Monier também é creditado o projeto e construção da primeira ponte de argamassa armada, inaugurada em 1875 no Castelo de Chazelet.

Atualmente o concreto está entre os materiais mais utilizados em todo mundo. Os pilares de sustentação do mercado de estruturas de concreto são pesquisa, confiança, conhecimento e

desenvolvimento tecnológico. Na construção civil, o cimento portland é o mais importante material estrutural hoje em dia. Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) as vendas de cimento no mercado interno, entre janeiro a dezembro de 2018, totalizaram 52,7 milhões de toneladas. A tabela 2 mostra os países que mais produziram cimento Portland de 2011 à 2016. O Brasil ocupou a 5ª colocação dessa lista.

Tabela 2 - Lista dos principais produtores de Cimento Portland de 2011 a 2016.

Países/Anos	2016	2015	2014	2013	2011	2012
China	2.410	2.350	2.480	2.420	2.100	2.210
India	290	270	260	280	240	270
EUA	85,9	83,4	83,2	77,4	68,6	74,9
Turquia	77	77	75	71,3	63,4	63,9
Brasil	60	72	72	70	64,1	68,8
Rússia	56	69	68,4	66,4	55,6	61,5
Irã	53	65	65	72	61	70
Indonésia	63	65	65	56	30	32
Coreia do Sul	55	63	63,2	47,3	48,3	48
Vietnã	70	61	60,5	58	59	60
Total Mundo	4.200	4.100	4.180	4.080	3.800	4.000

Fonte: cimento.org, 2017.

Em se tratando de concreto, a Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado (FIHP) estima que há um consumo médio aproximado de 1,9 tonelada de concreto por habitante por ano, valor inferior apenas ao consumo de água.

1.3.2 Constituintes do Concreto

A versatilidade do concreto não está associada apenas às formas que este material pode assumir, mas também à capacidade de ser produzido com vários tipos constituintes. Diversas classes de cimento disponíveis podem ser utilizados de acordo com a necessidade da construção. Além dos agregados mais comuns como pedra britada e areia, podem ser incorporados aditivos, polímeros, fibras e até mesmo concreto reciclado (NEVILLE; BROOKS, 2010).

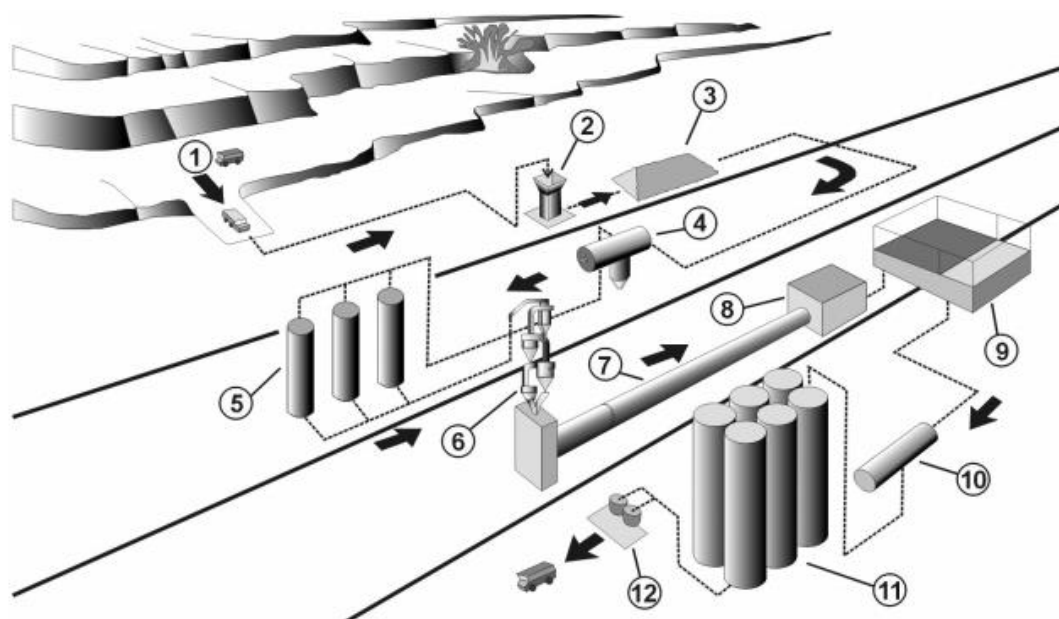
1.3.2.1 Cimento Portland

O material, conhecido dos antigos egípcios, ganhou o nome atual no século XIX graças à semelhança com as rochas da ilha britânica de Portland. A palavra “cimento” é originada do latim CAEMENTU, que designava na velha Roma espécie de pedra natural de rochedos e não esquadrejada. A origem do cimento remonta há cerca de 4.500 anos. Os imponentes monumentos do Egito antigo já utilizavam uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado. As grandes obras gregas e romanas, como o Panteão e o Coliseu, foram construídas com o uso de solos de origem vulcânica da ilha grega de Santorino ou das proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, que possuíam propriedades de endurecimento sob a ação da água. O grande passo no desenvolvimento do cimento foi dado em 1756 pelo inglês John Smeaton, que conseguiu obter um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos. Em 1818, o francês Vicat obteve resultados semelhantes aos de Smeaton, pela mistura de componentes argilosos e calcários. Smeaton é considerado o inventor do cimento artificial. Em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin queimou conjuntamente pedras calcárias e argila, transformando-as num pó fino. Percebeu que obtinha uma mistura que, após secar, torna-se tão dura quanto as pedras empregadas nas construções. A mistura não se dissolvia em água e foi patenteada pelo construtor no mesmo ano, com o nome de cimento Portland, que recebeu esse nome por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland (BATTAGIN, 2009).

A metodologia do processo de fabricação do cimento Portland pode ser ilustrado na figura 16 e resumido nas seguintes etapas:

- Mineração e britagem das matérias-primas;
- Preparação das matérias-primas (pré-homogeneização e moagem);
- Queima da farinha a 1.450°C em forno rotativo;
- Resfriamento;
- Moagem do clínquer com adições;

Figura 16 - Representação esquemática do processo de fabricação do cimento Portland.



Legenda: (1) mineração, (2) britagem, (3) pré-homogeneização, (4) moagem, (5) silos de farinha, (6) pré-aquecedor, (7) forno rotativo, (8) resfriador, (9) depósito de clínquer e gesso, (10) moinho de clínquer e adições, (11) silo do estoque de cimento e (12) despacho.

Fonte: GOBBO ET AL, 2000; MODIFICADO DE KIHARA ET AL. 1990.

Do ponto de vista da composição, o clínquer do cimento Portland sai como uma mistura de duas fases de silicatos bem cristalizados, silicatos tricálcico (C_3S), ou ainda alita, e silicatos dicálcico (C_2S), também chamado de belita, e uma fase intersticial composta de fase aluminato (C_3A) e fase ferrita (C_4AF), mais ou menos cristalizada. Além destas fases, também podem ser encontradas poucas impurezas como o peiclásio (MgO), óxido de cálcio endurecido (CaO) e sulfatos alcalinos (TIBONI, 2007).

Segundo Aitcin (2000), a adição de Al_2O_3 (aluminato e do Fe_2O_3 (ferro-aluminato) reduz a temperatura de calcinação das matérias-primas durante sua transformação em clínquer, criando duas fases (aluminato e ferroaluminato) que se fundem para a formação do C_3S , permitindo ainda que os íons Ca^{++} difundam-se mais rápido transformando o C_2S previamente formado em C_3S . Após a formação dentro dos fornos, ainda segundo o mesmo autor, é feito um resfriamento brusco até cerca de $150\text{ }^\circ\text{C}$, que é necessário para que os cristais dos compostos formados permaneçam de forma desordenada e, portanto, reativos com a água. O resfriamento rápido solidifica as diferentes fases nas suas formas à alta temperatura, não permitindo que elas sigam sua natural transformação de fase, que teria ocorrido sob o resfriamento lento. Depois de

resfriado, o clínquer será moído e sofrerá adições (gesso, fíler, cinza pozolânica, escória, etc.) para formar os diferentes tipos de cimentos.

As adições são matérias-primas incorporadas ao cimento na fase da moagem para que haja variação de suas propriedades de acordo com as necessidades de uso. Entre as adições, estão o gesso, escórias de alto forno, materiais pozolânicos, materiais carbonáticos e outros (ABCP, 2002). Segundo Pedrosa (2009) o mercado Brasileiro voltado para construção civil disponibiliza um total de oito tipos de cimento:

- Cimento Portland Comum (CP I), que não possui adições exceto o gesso e é regulamentado pela norma ABNT NBR 5732. Sugerido para aplicações que não são exigidas propriedades especiais do cimento;

- Cimento Portland Composto (CP II), onde as adições possíveis são as escórias de alto forno, pozzolana ou fíler calcário em pequenas proporções, sendo regulamentado pela norma ABNT NBR 11578. Atende grande parte das necessidades de aplicações usuais;

- Cimento Portland de Alto Forno (CP III), que pode conter escória de alto forno em proporções que variam entre 35 a 70% e é regulamentado pela norma ABNT NBR 5753. Sugerido para aplicações onde seja necessário concreto-massa;

- Cimento Portland Pozolânico (CP IV), que possui pozzolana em quantidade que varia de 15 a 50% em sua composição. É regulamentado pela norma ABNT NBR 5736 e é recomendado para obras situadas em ambientes sujeitos a ação da umidade;

- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI), que possui uma dosagem adequada de calcário e argila no momento da moagem. É regulamentado pela norma ABNT NBR 5733 e sua utilização é recomendada em aplicações onde seja necessária que uma alta resistência seja alcançada nos primeiros dias da cura.

- Cimento Portland Resistente a Sulfato (RS) que é regulamento pela norma ABNT NBR 5737 e é indicado para ambientes quimicamente agressivos como redes de esgoto e áreas litorâneas.

- Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC) que é regulamentado pela norma ABNT NBR 13116 é indicado para grandes obras com altas taxas de concretagem;

Cimento Portland Branco (CPB) obtido a partir de matérias-primas com baixo teor de óxidos de ferro e manganês, é regido pela norma ABNT 12989, sendo indicado para obras de projetos arquitetônicos e para aplicações não-estruturais.

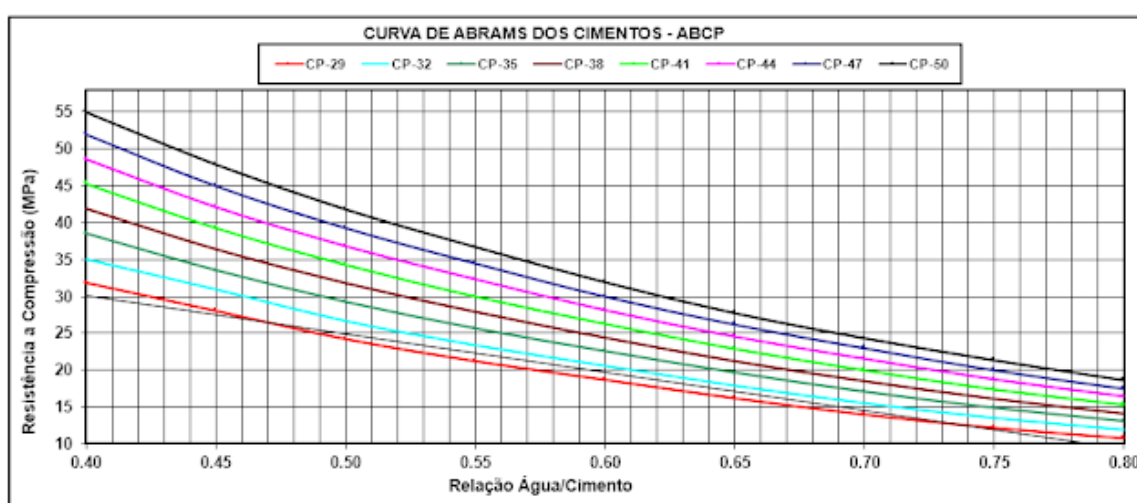
1.3.2.2 Fator água/cimento

Para se obter, a partir do cimento, um sólido com a resistência necessária é preciso misturá-lo com água. De fato, os sais minerais que compõem o cimento reagem com a água dando origem a um novo sistema de compostos hidratados estáveis que cristalizam com hábito acicular, emaranhando-se e colando-se uns aos outros, o que confere ao conjunto uma determinada resistência (DA SILVA, 2005).

A relação água/cimento, assim como a classe do cimento está diretamente relacionada com a resistência à compressão do concreto. No caso do fator água/cimento, a relação com a resistência mecânica ocorre de forma inversamente proporcional. Para a dosagem do concreto e para o dimensionamento de estruturas de concreto armado há especificações como relação água/cimento máxima.

Esta relação define as massas de cimento e água que serão incorporados ao estado fresco do concreto. Desempenha um papel importantíssimo em materiais que utilizam cimento como as argamassas e concreto. É proposto pela Lei de Abrams que a resistência à compressão do concreto a um determinado período de cura varia de forma inversa com a relação água/cimento (HAACH; VASCONCELOS; LOURENÇO, 2011). A figura 17 mostra a curva de Abrams, utilizada para a determinação da relação água/cimento em função das resistências do concreto e do cimento aos 28 dias.

Figura 17 – Curva de Abrams.



Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2016.

Deve levar-se em consideração que a relação água/cimento em determinados graus de hidratação da pasta de cimento também é responsável pela determinação do grau de porosidade que o concreto exibirá quando em estado endurecido (NEVILLE; BROOKS, 2010)

1.3.2.3 Agregados

Agregado é um material granular, sem forma e volumes definidos, geralmente inertes, de dimensões e propriedades adequadas para o uso em obras de engenharia. Sua aplicação é variada. Servem para lastro de vias férreas, bases para calçamento, são adicionadas aos solos que constituem a pista de rolamento das estradas, entram na composição de material para revestimentos betuminosos e são, finalmente, utilizados como material granuloso e inerte na produção de argamassas e concreto (PETRUCCI, 1998).

Pelo menos três partes do volume do concreto são ocupadas pelos agregados, portanto sua qualidade é de considerável importância. O agregado não pode só influenciar na resistência do concreto, pois agregados com propriedades indesejáveis podem não apenas produzir um concreto pouco resistente mas também podem comprometer a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto (NEVILLE, 1997).

Materiais em forma de grãos, geralmente inertes, sem tamanho e forma definidos, que têm por objetivo compor argamassas e concretos.

Funções dos agregados:

- Resistir aos esforços;
- Mecânicos;
- Desgaste;
- Intemperismo;
- reduzir as variações volumétricas;
- reduzir o custo.

Tamanho dos grãos:

- Miúdos: 75 μm a 4,8 mm;
- Graúdos: 48 mm a 50 mm.

Massa específica:

- Leves: $< 2000 \text{ kg/m}^3$;
- Normais: 2000 kg/m^3 a 3000 kg/m^3 ;
- Pesados: $> 3000 \text{ kg/m}^3$ Origem;
- Naturais – Artificiais.

Em média, a relação de ocupação do volume da massa de concreto pelos agregados está em torno dos 75%. A partir disso, é possível considerar que a qualidade dos agregados tem influência tanto no desempenho estrutural do concreto como em sua durabilidade. Apesar do seu baixo custo ser um grande atrativo, deve-se deixar claro que este não é o único motivo pela sua utilização. Os agregados garantem melhor estabilidade dimensional ao concreto do que em relação à pasta hidratada sem a incorporação de nenhum tipo de agregado (NEVILLE; BROOKS, 2010).

1.3.2.4 Aditivos

Segundo Andolfato (2002), denominam-se aditivos os materiais adicionados aos ingredientes normais do concreto, durante a mistura, para obter propriedades desejáveis, tais como:

- Aumento da plasticidade;
- Controle do tempo de pega;
- Controle do aumento da resistência;
- Redução do calor de hidratação.

A composição química dos aditivos tem uma variação ampla, e muitos desempenham mais do que uma função quando introduzidos na mistura do concreto. Sais e polímeros solúveis, por exemplo, podem ser adicionados à mistura fresca do concreto para que seja possível aumentar a trabalhabilidade do concreto sem que seja necessária a alteração da quantidade de água. Esses aditivos são denominados plastificantes ou redutores de água. Outros tipos estão disponíveis, como os retardantes ou aceleradores de cura e incorporadores de ar (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

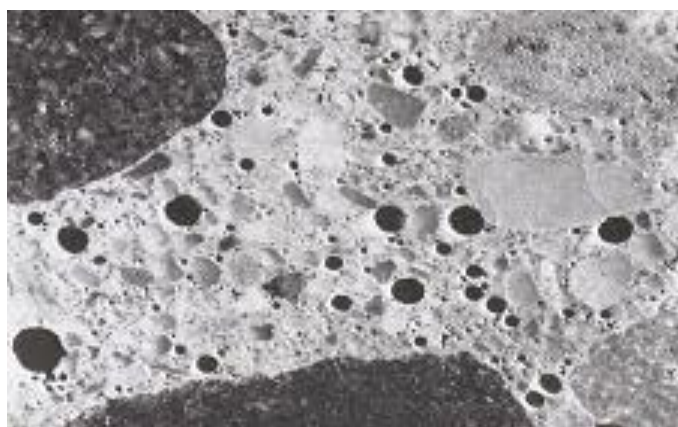
Os aditivos polifuncionais foram projetados a partir de misturas das estruturas químicas de aditivos plastificantes e superplastificantes com objetivo de conferir ao concreto em estado fresco um maior tempo de trabalhabilidade. Dessa forma, foi possível que o concreto formulado

nas centrais dosadoras chegasse aos canteiros de obra com uma plasticidade adequada a fim de evitar que fosse necessário o retrabalho em dosagem no local de aplicação (CORRÊA, 2010).

1.3.3 Porosidade do concreto

A resistência à compressão do concreto é a propriedade mais importante, segundo engenheiros projetistas e de controle de qualidade. Há uma relação inversa entre porosidade e resistência do concreto. A figura 18 trata-se de uma fotografia microscópica de concreto endurecido na qual é possível observar a sua porosidade.

Figura 18 - Fotografia microscópica do concreto endurecido



Fonte: ENH, 2021.

Um concreto durável é caracterizado como um material com baixa porosidade, no qual os grãos individuais de cimento estão densamente empacotados antes do início da hidratação. Normalmente esse concreto é caracterizado por uma baixa relação água/cimento, que é responsável pelas propriedades mecânicas superiores e pela maior durabilidade. Porém, o uso de uma baixa relação água/cimento implica na redução da trabalhabilidade ou na utilização de um alto teor de cimento para a finalidade desejada. Além disso, para aplicação, um concreto necessita de muito mais água do que apenas para a hidratação do cimento, o que resulta em certa porosidade no concreto endurecido, reduzindo o potencial de suas propriedades mecânicas e facilitando a degradação desse material. Pela adição de pequenas quantidades de aditivos poliméricos - superplastificantes - pode-se diminuir consideravelmente a quantidade de água necessária para a obtenção da trabalhabilidade desejada e, conseqüentemente, a porosidade, melhorando a durabilidade do concreto (FLATT; BOWEN, 2003).

1.3.4 Rugosidade do Concreto

Segundo Subramaniam (2007), a rugosidade é o conjunto de irregularidades, de pequenas saliências e reentrâncias, que caracterizam uma superfície. Essas irregularidades (erros micro geométricos) podem ser avaliadas com aparelhos eletrônicos (Rugosímetro). A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos dos materiais e é muito utilizada na engenharia mecânica, pois influi na:

- Resistência ao desgaste;
- Qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras;
- Resistência à corrosão e à fadiga.

Superfícies reais, por mais perfeitas que sejam, apresentam particularidades que são uma consequência do método empregado em sua obtenção, por exemplo: fresamento, retífica, lapidação, apicoamento, lixamento, entre outros. As superfícies assim produzidas apresentam-se como um conjunto de irregularidades, com espaçamento regular ou irregular e que tendem a formar um padrão ou textura característicos em sua extensão. A rugosidade é formada por sulcos ou marcas deixadas pelo agente que atacou a superfície no processo (ferramenta, partículas abrasivas, ação química, entre outros) e encontra superposta a um perfil de ondulação provocado por deficiência nos movimentos do equipamento empregado, deformação, tensões residuais, ou até mesmo pela variação de pressão exercida sobre a ferramenta utilizada (GONZÁLEZ, 1998 apud SILVA, 2006).

1.3.5 Mecânica da Fratura

Segundo Rossmannith (1997), a revolução industrial do século XIX proporcionou um aumento significativo na procura de ferro e aço para o uso na engenharia, sobretudo a partir da segunda metade do século XIX. Erdogan et al. (1997) ressalta que o progresso alcançado na tecnologia metalúrgica foi fundamental para utilização desses metais como matéria prima em grandes estruturas. Os autores destacam, também, que concomitantes ao desenvolvimento desse período inúmeros acidentes catastróficos ocorreram em razão do uso indiscriminado desses materiais. Por exemplo, Rossmannith (1997) descreve que na década de 1870 a revista *Engineering* publicava as estatísticas semanais dos acidentes provocados nas ferrovias inglesas, devido a problemas de fraturamento nos eixos dos vagões e nas linhas férreas. Erdogan et al. (1997) informa que nesse período morriam, aproximadamente, duzentas pessoas por ano na

Grã-Bretanha em razão desses acidentes.

Barsom e Rolfe (1999) afirmam que as principais causas dos acidentes nas estruturas estão relacionadas à ruptura frágil dos materiais. Em Barsom e Rolfe (1999) são apresentados diversos casos de falhas provocadas devido à ruptura frágil do ferro e do aço. Em Leibowitz (1969) encontram-se as análises e discussões acerca de vários acidentes catastróficos ocorridos em grande estruturas, como por exemplo: Tanques de armazenamento de petróleo, gás e água; vasos de pressão, turbinas, caldeiras, gasodutos, pontes, aviões, ferrovias e navios.

Segundo Blake (2005) foi após a investigação das causas desses acidentes que culminaram nos desenvolvimentos e definições da moderna mecânica da fratura elástica linear. Blake (2005) destaca que as maiores contribuições referentes ao assunto ocorreram no início da década de 1950 quando Irwin e Kies (1952, 1954) e Irwin (1957) forneceram a extensão da teoria de Griffith e estabeleceram um critério de propagação da fratura com base na taxa de liberação de energia e no trabalho crítico requerido para a formação da nova superfície de fratura. Nesses trabalhos Irwin relacionou a taxa de liberação de energia ao campo de tensão na extremidade da fratura por meio da técnica apresentada em Westergaard (1939) *apud* Liebowitz (1968). Irwin demonstrou que esse campo podia ser determinado por meio de uma grandeza fundamental denominada fator de intensidade de tensão.

Os mecanismos de ruptura ou também denominado mecânica da fratura acontecem de formas previsíveis no material solicitado em função do tipo de carregamento submetido. Em compósitos de fibra de carbono, a mecânica da fratura não é diferente, onde cada tipo de carregamento ocasiona uma fratura distinta. A identificação do tipo de ruptura são essenciais para o estudo do comportamento dos elementos reforçados, para o desenvolvimento de critérios de dimensionamento e parâmetros na aplicação (SALLABERRY, 2005).

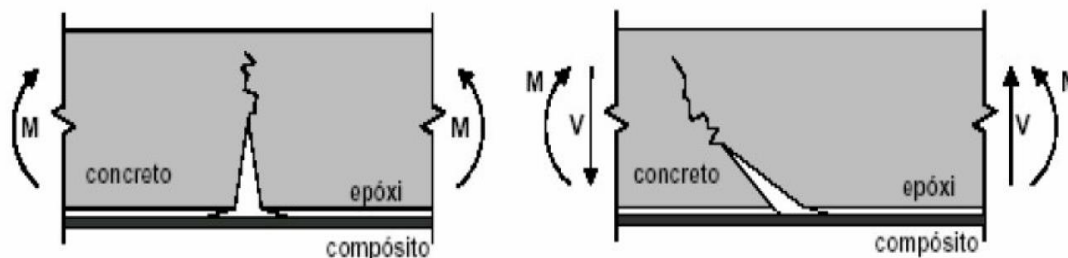
Os principais tipos de fratura comuns em compósitos de fibra de carbono quando combinados ao concreto são descritos abaixo;

- ruptura por esmagamento do concreto: a fissuração da peça se desenvolve diminuindo a zona comprimida, até o momento no qual a tensão de compressão no concreto atinge seu valor máximo, acarretando ruptura brusca dessa região;
- ruptura por força cortante: a fissura ocorre no extremo do reforço e se desenvolve de forma inclinada, ao longo da altura da viga devido à transferência das tensões tangenciais para os extremos do compósito de fibra de carbono. Geralmente, ocorre em vigas com armadura transversal insuficiente;
- ruptura por separação do substrato de concreto: esse tipo de ruptura ocorre quando um valor excessivo para a espessura do reforço é adotado, gerando um acréscimo

de tensões na extremidade e caso essas tensões ultrapassem a tensão de aderência admissível adesivo-concreto, o reforço separa inicialmente seu extremo, reduzindo seu comprimento efetivo, provocando uma ruptura horizontal devido ao aumento imediato da tensão de separação, representando uma ruptura brusca. Pode ocorrer também por falha na aplicação ou por escolha inadequada do adesivo;

- Os mecanismos de ruptura da ligação são do tipo frágil e resultam no destacamento localizado do compósito (peeling off), a partir de sua zona de ancoragem ou de zonas com fissuração excessiva, como pode ser observado na figura 19. Este tipo de ruptura pode ser dividido em três categorias, de acordo com a região e a sollicitação que a produz, isto é, descolamento no extremo do reforço proveniente da força cortante, descolamento na região de momento fletor máximo e descolamento iniciado por uma fissura de cortante numa região de momento fletor de magnitude média. (TRIANTAFILLOU, 1998; SUBRAMANIAM et al., 2007).

Figura 19 - Mecanismos de ruptura devido a esforços de ação de momento fletor (a) e ação da força cortante (b)



Fonte: MARINI, 2001.

No caso dos concretos, a existência de microfissuras e vazios, mesmo antes da aplicação de quaisquer carregamentos, favorece a ocorrência, na escala microscópica, de concentração de tensões elevadas, já nos estágios iniciais de carregamento do elemento estrutural. Nesse caso, com a elevação dos níveis de carregamento, e consequente aumento das tensões, verifica-se a perda progressiva de coesão entre a matriz e os agregados, dentro de um processo de ruptura frágil que promove as deformações permanentes na microestrutura do material (FERREIRA, 2007).

Também segundo Ferreira (2007), no que se refere a energia de fraturamento, sua determinação faz uso de uma técnica bastante simples que consiste na determinação do trabalho necessário à completa ruptura de uma seção transversal entalhada. A energia de fraturamento,

em termos unitários, é obtida dividindo-se o trabalho realizado pela carga até a ruptura do corpo, pela área da seção fraturada. O método foi proposto na década de 1980 por Hillerborg (1985), um dos precursores da Mecânica da Fratura do concreto. Por sua simplicidade, a metodologia proposta foi largamente aplicada, tendo sido sugerida pela RILEM (1985) para determinação da energia de fraturamento como parâmetro de resistência dos concretos e das argamassas. Posteriormente, com o desenvolvimento mais acelerado da Mecânica da Fratura do concreto, diversos pesquisadores concluíram que a energia de fraturamento assim obtida é fortemente dependente de escala, o que inviabilizaria, ao menos em tese, a aplicação irrestrita do método.

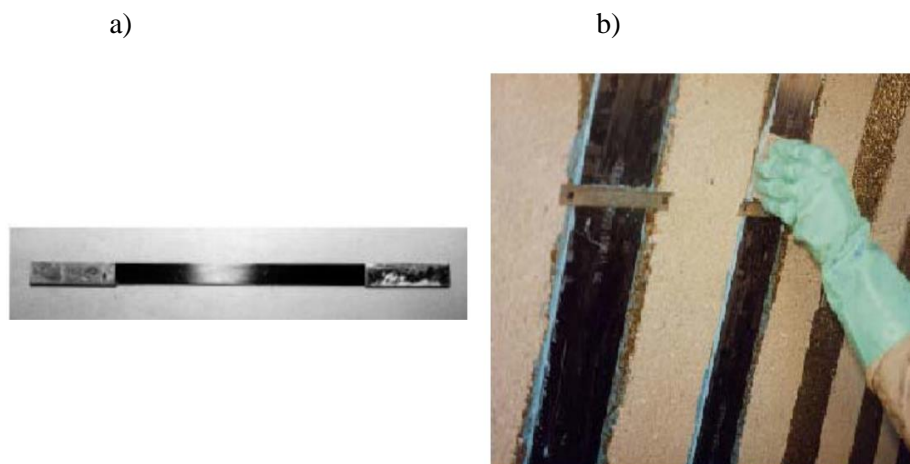
1.4 Sistema de reforço com PRFC

Os PRFC são considerados apropriados para reforço estrutural de elementos de concreto por conta do alto desempenho mecânico das fibras de carbono, facilidade de aplicação, aumento de resistência e manutenção da seção original da peça reforçada (BEBER, 2003).

A sua utilização tem sido significativa em diversos países, como é o caso do Japão, principalmente em aplicações relacionadas aos problemas de abalos sísmicos. Na Europa, as aplicações são mais direcionadas à reabilitação da infra-estrutura do patrimônio histórico, e na América do Norte, pode-se dizer que o maior enfoque é a durabilidade das construções (JUVANDES, 1999).

O sistema de reforço com polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) é utilizado no concreto como alternativa para patologias do concreto e do aço presente na estrutura. Este tipo de reforço tem sido o mais utilizado ultimamente para esta finalidade, mesmo tendo um custo considerado alto, e vem desbancando no mercado intervenções utilizando concreto, chapas de aço e perfis metálicos. Este tipo de reforço estrutural são utilizados sob a forma de sistemas pré-fabricados e sistemas moldados in loco. Como mostra a figura 20, nos sistemas pré-fabricados há camadas contínuas unidirecionais impregnadas por resinas termoendurecíveis através de um processo de pultrusão, de forma que se controle sua espessura e largura.

Figura 20 - Aspecto e aplicação do laminado de fibras de carbono. (a) laminado de fibras de carbono; (b) aplicação do laminado.



Fonte: FERRARI, 2007.

1.4.1 Degradação do concreto e do aço

Os problemas patológicos manifestam-se externamente de forma característica, de maneira que se pode deduzir a natureza e os mecanismos envolvidos, assim como prever as prováveis conseqüências. Os efeitos da atuação dos agentes agressivos podem ser evitados nas etapas iniciais do processo construtivo, tais como, na elaboração de um projeto convenientemente detalhado, ou pela escolha criteriosa dos materiais e dos métodos de execução (REIS, 2001).

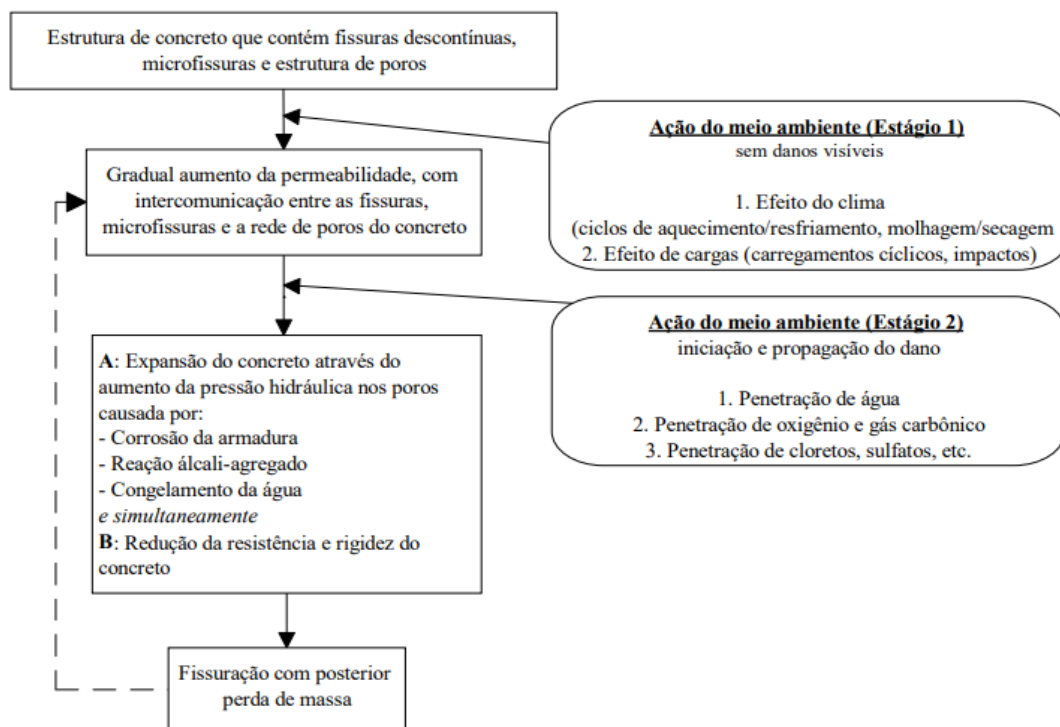
Os sintomas mais comuns, de maior incidência nas estruturas de concreto, são as fissuras, as eflorescências, as flechas excessivas, as manchas no concreto aparente, a corrosão de armaduras e os ninhos de concretagem – segregação dos materiais constituintes do concreto (HELENE, 1992).

Há um sinergismo entre todos os fatores responsáveis pela degradação das estruturas. A determinação do efeito combinado que existe entre o meio ambiente e as propriedades microestruturais do concreto é extremamente difícil de ser mensurado, devido à grande variabilidade existente entre dois fatores (MEHTA, 1994). Além disso, Bob (1996) cita que a aleatoriedade existente entre as diversas formas de degradação e a falta de um conhecimento adequado dos mesmos são dois fatores que tornam extremamente incertas as tentativas de se modelar temporalmente o comportamento das estruturas.

Desta forma, Metha (1994) propôs um modelo holístico de deterioração das estruturas ,

que pode ser observado na figura 21. O termo holístico vem do grego *holos*, e afirma que o perfeito entendimento de um fenômeno ou processo não pode ser deduzido a partir da soma de cada uma das partes constituintes dos mesmos, e sim através de uma visão global, que leve em consideração a interação existente entre tais partes que contribuem para o funcionamento do todo.

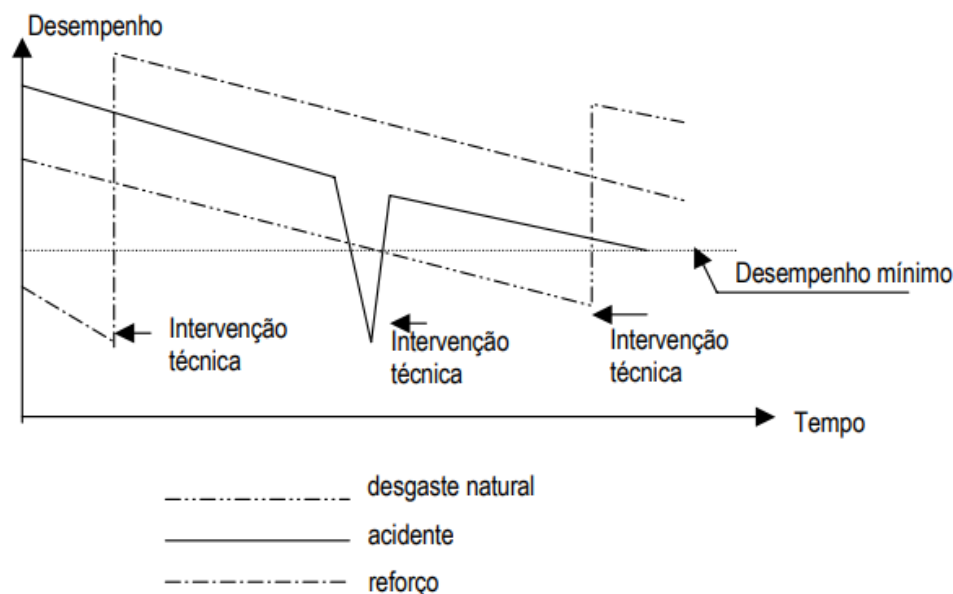
Figura 21 - Modelo holístico de deterioração do concreto



Fonte: MEHTA, 1994.

O conceito de desempenho reflete o comportamento em serviço de cada produto ao longo de sua vida útil, não significando, entretanto que o produto esteja “condenado” se apresentar desempenho insatisfatório. Neste caso, a estrutura requer imediata intervenção técnica, de forma a reabilitá-la. Um modelo proposto por Souza & Ripper (1998), mostrado na 22, apresenta três histórias de desempenho, em função de fenômenos patológicos diversos.

Figura 22 - Diferentes desempenhos de uma estrutura com o tempo em função de diferentes fenômenos patológicos



Fonte: SOUZA & RIPPER, 1998.

1.4.2 Processo de aplicação da técnica de reforço com PRFC

De todas as aplicações dos reforços com chapas de fibra de carbono disponíveis na literatura, a maioria ocorreu na Europa, principalmente na Suíça, onde o conceito desta técnica de reforço foi primeiramente proposto e desenvolvido. A primeira aplicação foi o reparo, em 1991, da ponte *Ibach*, localizada na cidade de Luzerna [McKenna & Erki, 1995]. Esta ponte apresentava uma seção do tipo caixão e comprimento total de 228 m. A necessidade de recuperação deveu-se à ocorrência de um acidente envolvendo os cabos de protensão, que resultou na diminuição da capacidade portante da ponte. Estimou-se que, para a recuperação da ponte, seriam necessários cerca de 175 kg de chapas de aço. No entanto, apenas 6,2 kg de compósito de *CFRP* foram utilizados. Adicionalmente, todo o trabalho de recuperação foi executado a partir de uma plataforma móvel, dispensando, assim a necessidade da instalação de andaimes e escoras (BEBER, 2003).

Também segundo Beber (2003), no Brasil, as primeiras aplicações dos compósitos de fibra de carbono, envolveram, primeiramente estruturas de pequeno porte. Em 1998, o viaduto Santa Tereza, construído entre anos de 1925 e 1927, localizado na cidade de Belo Horizonte, foi reforçado utilizando mantas flexíveis de fibra de carbono. Por tratar-se de obra tombada pelo patrimônio histórico, a opção pelas mantas de fibra de carbono foi motivada por aspectos

estéticos. Foram utilizados cerca de 3.870 m² de manta de fibra de carbono, que permitiram ao viaduto atingir a classe 45 toneladas. Na figura 23, observa-se um vão típico do viaduto com todos os elementos reforçados.

Figura 23 - Reforço do viaduto Santa Teresa

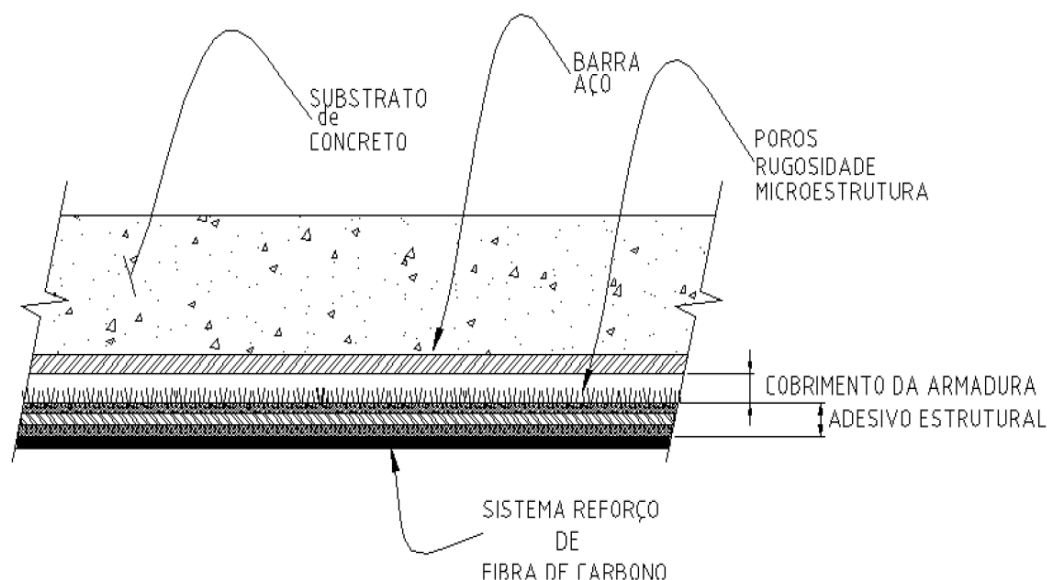


Fonte: MACHADO, 2002.

É importante salientar que, mesmo quando as condições de aplicação dos sistemas de reforços são esclarecidas de forma adequada, todos os processos executivos de aplicação destes devem estar de acordo com o projeto de recuperação estrutural realizado por um profissional devidamente qualificado. Todos os sistemas, de modo geral, consistem na aplicação de fibra de carbono na estrutura de concreto armado, seguindo as seguintes etapas, conforme pode ser ilustrado na figura 24:

- Preparação do substrato;
- Aplicação do adesivo epóxi para “colagem” da fibra de carbono;
- Aplicação de fibra de carbono; e
- Aplicação da resina de impregnação sobre a fibra de carbono (MARINI, 2001).

Figura 24 - Ilustração do sistema de reforço com fibra de carbono em estruturas de concreto.



Fonte: MARINI, 2001.

1.4.2.1 Preparação do substrato

Se, por um lado, a facilidade e rapidez de aplicação do reforço com fibras de carbono têm tornado o sistema atrativo, por outro, a técnica de reforço tem esbarrado em sua própria simplicidade, pois em várias situações tem-se percebido o descolamento prematuro do reforço, conseqüência de falhas na etapa de preparação e colagem, ou até mesmo pela utilização de técnicas e equipamentos inapropriados para preparação da superfície de concreto (FERRARI, 2007).

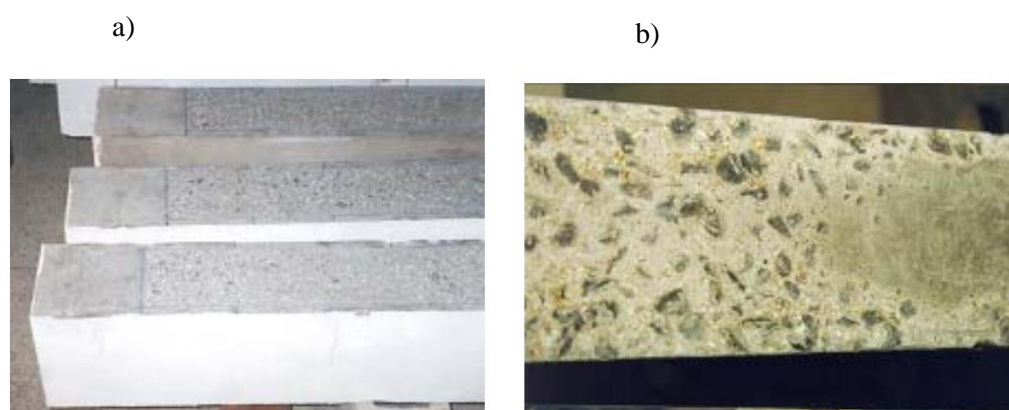
Segundo Mbrace (1998), a preparação da superfície de concreto é um processo através do qual se obtém um substrato limpo, sólido e convenientemente rugoso. Isso inclui lavagem com detergentes, limpeza por pressão de água, solução ácida, esmerilhamento, jato de areia, escarificação, desbastamento e fresagem. Tem cada um desses métodos suas vantagens e desvantagens em termos de eficiência de limpeza, remoção de materiais soltos e rugosidade da superfície (ICRI, 1997). A superfície de concreto deve ser preparada de acordo com o sistema de reforço a ser aplicado.

A preparação da superfície de concreto que receberá o reforço com mantas de fibra de carbono distingue-se da preparação para reforço com chapas de aço exatamente no aspecto regularidade da superfície. A camada de nata de cimento, deteriorada ou frágil, deve, também,

ser removida e os agregados expostos. No entanto, esse procedimento deve ser realizado utilizando-se um equipamento que permita que a superfície seja mantida o mais regular possível (BEBER, 1999).

A figura 25 mostra mini-vigas de concreto após a preparação, retirando a camada frágil de nata de cimento até expor os agregados.

Figura 25 - Detalhe dos agregados expostos após a preparação da superfície de concreto



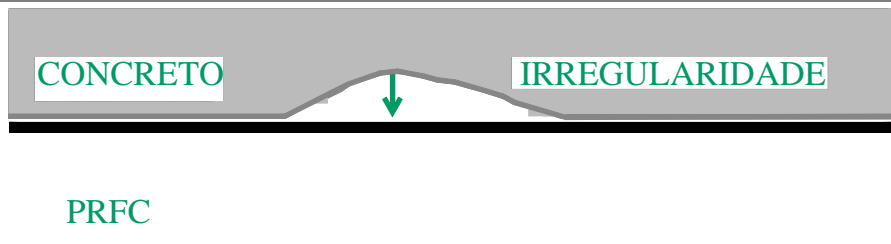
Fonte: (a) FERRARI, 2002; (b) BEBER, 1999.

As exigências quanto à preparação da superfície de concreto devem ser baseadas no tipo de sistema que será empregado para reforço do elemento estrutural. O ACI 440.2R (2002) classifica os casos de reforço para esforços de flexão e cisalhamento, principalmente em vigas e lajes, como de *condição crítica de colagem*. Em tais casos, é exigido o estabelecimento de um sistema bastante eficiente de colagem, de maneira a garantir uma adequada transferência de esforços entre os materiais aderidos. Já os casos de confinamento de colunas, onde é necessário um contato íntimo entre o reforço e o concreto, são tratados como de *condição crítica de contato* (FERRARI, 2007).

Também segundo Ferrari (2007), o tratamento da superfície consiste na retirada da camada frágil de nata de cimento até uma parcial exposição das faces do agregado graúdo. Com isso, é removida também toda partícula sólida não aderente, substâncias oleosas ou graxas e eventuais recobrimentos existentes sobre a superfície de concreto que possam interferir na aderência do reforço. Este procedimento deve ser realizado utilizando-se equipamento que permita manter a superfície o mais regular possível. As recomendações do FIB (2001) sugerem os valores apresentados na tabela 3, como aceitáveis em casos da presença de irregularidades na superfície. O uso de disco diamantado, acoplado a uma esmerilhadeira elétrica pode ser

utilizado para preparo da superfície e é ilustrado na figura 26. Esse recurso tem sido usado em vários trabalhos de pesquisa no Brasil (SILVA, 2001; FERRARI, 2002; BEBER, 2003) e mostrado ser eficiente. O seu inconveniente é a produção de um alto volume de pó no ambiente e também ser pouco produtivo para preparo de grandes áreas. O desgaste também pode ser realizado com a utilização de abrasivos ou jatos de água sob pressão.

Tabela 3 – Valores limites para a irregularidade da superfície

Sistema de reforço	Irregularidade aceitável	
	Em 2m de comprimento do reforço	Em 0,3m de comprimento
Mantas flexíveis de fibras de carbono	4 mm	2 mm
		

Fonte: FIB, 2001.

Figura 26 - Ilustração da preparação da superfície. (a) disco diamantado; (b) preparo da superfície

a)



b)



Fonte: FERRARI, 2007.

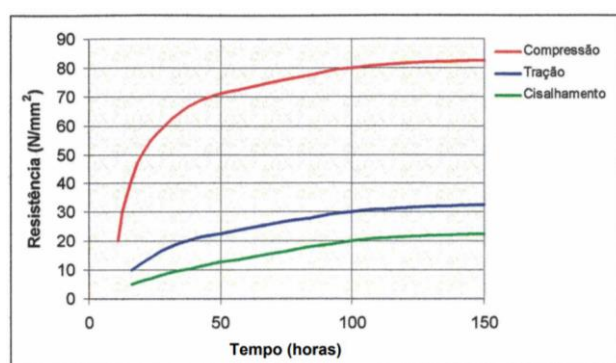
1.4.2.2 Aplicação do adesivo epóxi

Segundo Arquez (2010), os adesivos são materiais usados como ponte de aderência entre dois elementos, sendo em geral um de ler a superfície do concreto velho. A palavra epóxi vem do grego “EP” (sobre ou entre) e do inglês “OXI (oxigênio). Em um sentido geral, o termo refere-se a um grupo constituído por um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono. Os adesivos epóxi são adesivos sintéticos bastante diversificados em relação às suas próprias propriedades e são encontradas desde o estado líquido com baixa viscosidade e sem solvente até sólidas com alto ponto de fusão.

É importante o tempo de utilização e de endurecimento da resina epóxica. O tempo de utilização (“pot life”) é o período em que a resina mantém suas características de aderência e esta pode ser manipulada sem dificuldade. O tempo de endurecimento (“open time”) é o tempo que a resina leva para endurecer, é o período no qual o material deve ser colado a fim de que possa desenvolver suas propriedades de forma satisfatória. Nos dois períodos, a temperatura ambiente é um fator decisivo, podendo acelerar as reações químicas e diminuir o tempo de manipulação. (SALLABERRY, 2005).

O aumento de resistência ao longo do tempo é uma propriedade de fundamental importância no adesivo epoxídico utilizado em técnicas de colagem de materiais (chapas metálicas, fibras de carbono, fibras de vidro etc) para funcionar como reforço estrutural. Essa propriedade definirá quando será possível colocar a peça em serviço. Conforme se observa na figura 27, na maioria dos casos, é possível colocar a peça em serviço vinte e quatro horas (24h) após a colagem, embora seja mais prudente aguardar pelo menos quarenta e oito horas (48h), considerando que a resistência varia com a temperatura ambiente, dosagem e energia aplicada na mistura dos componentes (FORTES, 2000).

Figura 27 - Aumento de resistência do adesivo epoxídico (à temperatura de 15 °C)



Fonte: FORTES, 2000.

A maioria das resinas epóxi é fornecida em dois componentes (componente A – componente base; e componente B – componente endurecedor) que devem ser misturados mecanicamente (aproximadamente 3 minutos), pouco tempo antes da aplicação, em virtude do seu tempo de pot life, tempo útil de trabalhabilidade, ser pequeno. Esse tempo de trabalhabilidade da resina epóxi pode variar dependendo do fabricante, e possui o pot life médio, a 25 °C, de 50 minutos e, a 35 °C, aproximadamente, de 20 minutos (MARINI, 2011). A figura 28 ilustra os componentes de resina epóxi e o processo de mistura.

Figura 28 - Mistura da resina. (a) componentes A e B da resina; (b) consistência da resina após mistura



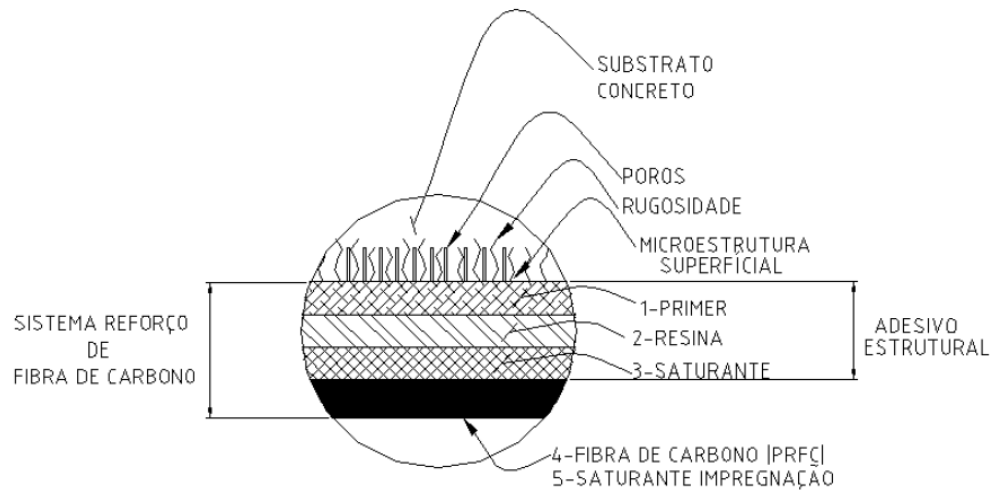
Fonte: ARQUEZ, 2010.

A resina epóxi para colagem da fibra de carbono deve possuir característica de tixotropia para não escorrer quando aplicada em superfícies verticais ou na face inferior de vigas e lajes ou em pilares, quando em projetos de confinamento desses. A aplicação da resina epóxi deve possuir espessura mínima de 0,5 milímetros. (MACHADO, 2006).

1.4.2.3 Aplicação da fibra de carbono

Após a aplicação da resina epoxídica, deve-se iniciar a aplicação da manta de fibra de carbono impregnada com saturante, deixando-a sobre o elemento estrutural de concreto, conforme pode ser ilustrado na figura 29 (MARINI, 2011).

Figura 29 - Esquema do adesivo estrutural do sistema de reforço com fibra de carbono



Fonte: MARINI, 2011.

A fibra deve ser aplicada imediatamente após a aplicação do adesivo epóxi para que ele não cure antes do contato com a fibra de carbono. A fibra pode ser cortada com guilhotina, estilete ou tesoura nas dimensões desejadas. É necessário a utilização de EPI's para evitar cortes ou ingestão de partículas de fibra de carbono. Durante a colagem, a fibra deve ser aplicada cuidadosamente observando um único sentido com a pressão das mãos, conforme ilustra a figura 30.

Figura 30 – Posicionamento da manta flexível



(a)

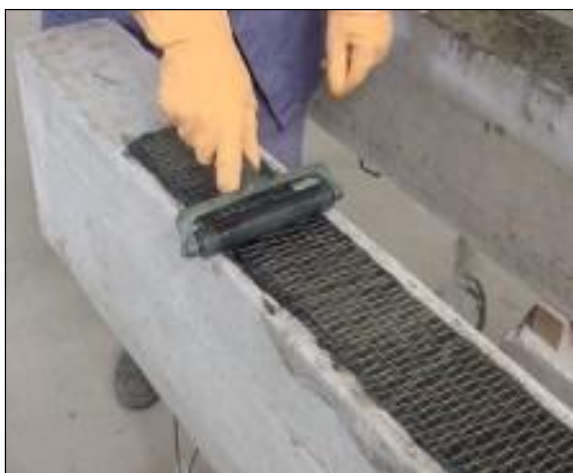


(b)

Fonte: BEBER, 2003.

Após o posicionamento da fibra, aplica-se um rolo de borracha em um único sentido, com o objetivo de expulsar o ar contido na interface e o excesso de resina, conforme mostra a figura 31.

Figura 31 – Retirada do ar aprisionado e acabamento do reforço. (a) processo de laminação da fibra de carbono; (b) reforço aplicado



(a)



(b)

Fonte: BEBER, 2003.

Têm-se como vantagens, no uso de reforços estruturais realizados com fibra de carbono, as descritas abaixo.

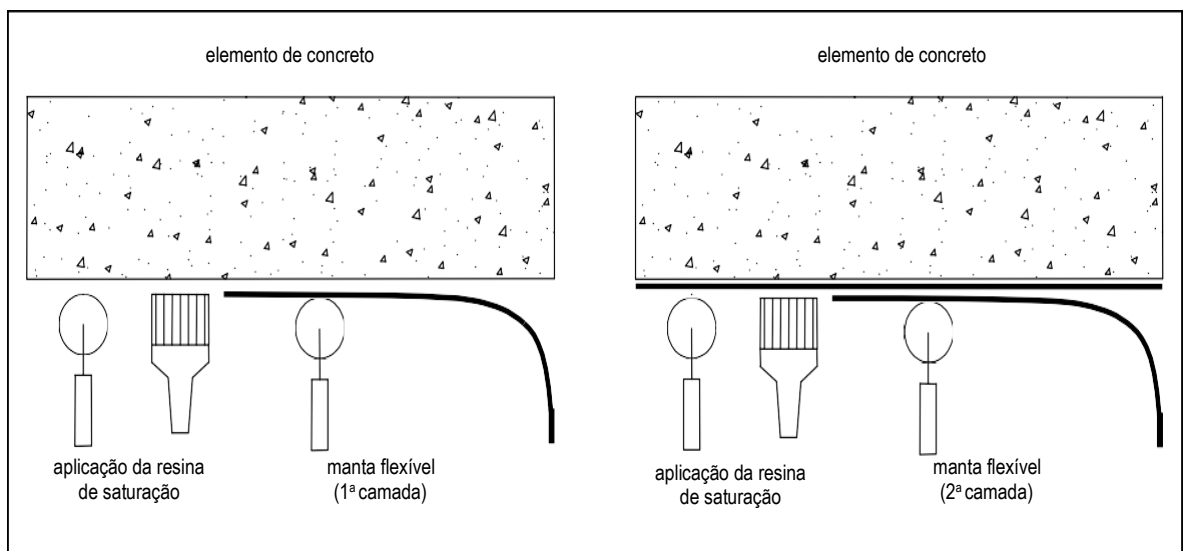
- Aumento das resistências à flexão, ao cisalhamento, à compressão, ao impacto, à fadiga;
- Manutenção de seções originais de peças reforçadas;
- Manutenção ou incremento de cargas de edificações;
- Facilidade no manuseio, instalação e limpeza da obra;
- Velocidade na execução do reforço;
- Qualidade nos reforços estruturais;
- Redução de custos com paralisações e manutenção;
- Utilização multifuncional para qualquer tipo de reforço; e
- Grande versatilidade em recuperações estruturais, em função de geometrias e elementos estruturais.

Por outro lado, as desvantagens no uso de reforços estruturais realizados com fibra de carbono são:

- Custo alto em relação aos métodos de reforços convencionais;
- Necessidade de mão de obra especializada para o dimensionamento e aplicação;
- Falta de confiabilidade entre engenheiros tradicionais;
- Não possui norma brasileira para aplicação e dimensionamento;
- Utilização em concreto com resistência à compressão superior à 15 MPa;
- A manta de fibra de carbono e os adesivos estruturais são importados;
- Material altamente flexível; e
- Resistência ao fogo é determinada pela qualidade da resina utilizada, a temperatura vítrea se situa entre 60° C a 80°C (MARINI, 2011).

Na figura 32, apresenta-se um esquema de procedimento de aplicação das mantas flexíveis de fibra de carbono.

Figura 32 – Esquema de aplicação da manta flexível



Fonte: BEBER, 2003.

1.4.2.4 Aplicação da resina de impregnação

A resina de saturação, à base de epóxi, também é bi-componente, ou seja, possui um agente principal e um catalisador. Sua função principal é formar a matriz do compósito de fibra de carbono. Além disso, a resina de saturação é também responsável pela aderência do compósito ao substrato de concreto, devidamente preparado com o *primer*. A quantidade de resina deve, no entanto, ser cuidadosamente controlada, de acordo com as recomendações do

fabricante do sistema de reforço. Quanto mais espessa a camada de resina, menos eficiente será o reforço. Por outro lado, se esta quantidade não for suficiente para promover a impregnação das fibras de carbono, não ocorrerá a formação do compósito, o que poderá comprometer seu desempenho estrutural. Nas figuras 33 (a) e (b) são apresentadas, respectivamente, a preparação da resina de saturação e sua aplicação sobre o substrato de concreto.

Figura 33 – Mistura e aplicação da resina de saturação. (a) Mistura mecânica da resina; (b) Aplicação da resina no elemento estrutural



(a)



(b)

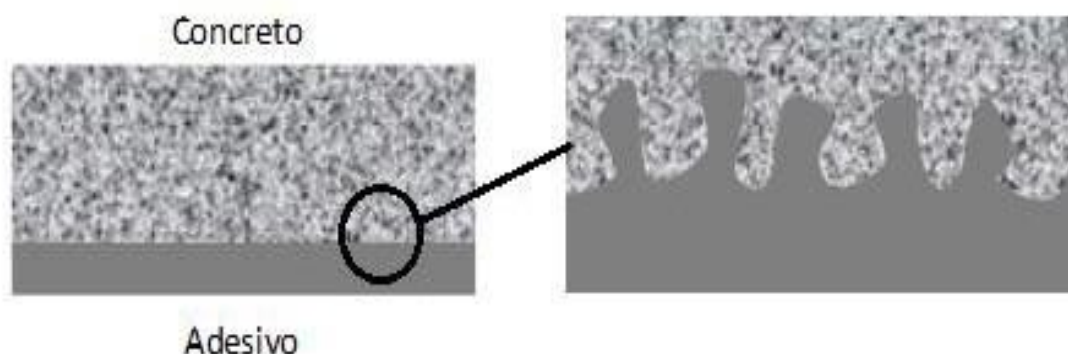
Fonte: BEBER, 2003.

1.4.3 Ligação entre concreto e reforço

Os mecanismos de interligações mecânicas podem ser melhor entendidos a partir da teoria mecânica de colagem. Segundo Silva, Magalhães e Moura (2007), ela se baseia no princípio que uma colagem adequada ocorre quando determinado adesivo permeia heterogeneidades da superfície do substrato (poros, cavidades, fendas) onde fica interligado mecanicamente, como pode ser visto na figura 34.

Além disso, o adesivo deve garantir uma molhabilidade apropriada em relação ao substrato em questão, assim como as propriedades reológicas necessárias para que essa penetração seja realizada em um tempo razoável, antes que ocorra sua cura. A microrugosidade das superfícies podem ser melhoradas de acordo com um tratamento superficial que favoreça as interligações mecânicas e conseqüentemente a durabilidade do sistema de ligação envolvido no reforço utilizado.

Figura 34 - Representação esquemática da teoria mecânica da adesão



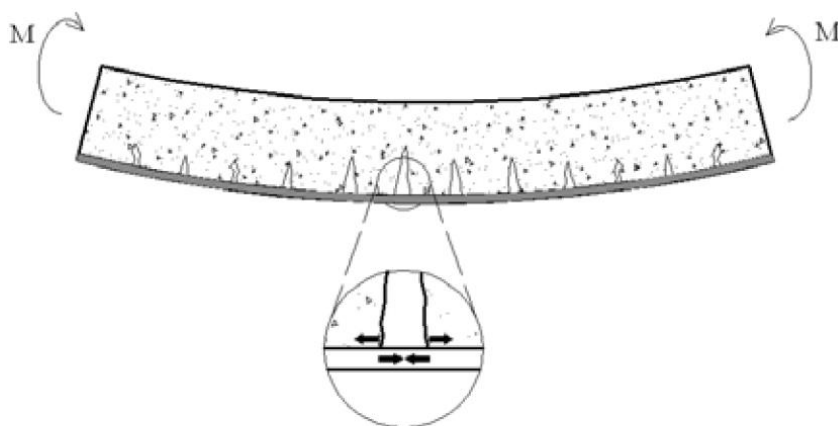
Fonte: SILVA, MAGALHÃES E MOURA, 2007.

Quando há penetração do adesivo a uma certa profundidade nas heterogeneidades das estruturas de concreto, por exemplo, pode resultar na formação de uma interface com propriedades próprias. Essa ligação circunvizinha o agregados e adquire uma alta resistência mecânica que a torna difícil de ser rompida (YIN; FAN, 2018).

Para que um reforço externo com PRF seja capaz de aumentar, de forma significativa e eficaz, a capacidade de carga de uma estrutura, é necessário que ocorra uma efetiva transferência de esforços entre o PRF e concreto. Ou seja, é necessário que a resistência da ligação, ou a resistência de aderência, seja elevada. A perda de aderência ocorre quando a força resistente na ligação reforço-estrutura original é superada, o que pode levar ao desenvolvimento de vários mecanismos de falha (MENEGETTI, 2007).

Para entender melhor como se processa o mecanismo, podemos utilizar a explicação proposta por Teng et al. (2002). Segundo esses autores, quando uma estrutura reforçada é solicitada à flexão, ocorre o aparecimento de fissuras na região tracionada do elemento. Nos pontos de fissuração do concreto, o PRF fica altamente tensionado, transferindo estas tensões para as bordas da fissura do elemento de concreto, conforme figura 35.

Figura 35 - Mecanismo de transferência de esforços entre concreto e reforço



Fonte: MENEGHITTE, 2007.

A ruína prematura tem chamado a atenção da grande maioria dos pesquisadores e, em paralelo, tem sido a razão de receio na especificação deste tipo de reforço por parte de projetistas mais conservadores. Grande parte das atuais publicações sobre o reforço com PRFC em vigas de concreto tem dado especial atenção à zona de ligação dos materiais concreto-adesivo-PRFC, para melhor conhecer o que se passa ao nível de comportamento geral nesta região, de forma que se possa criar critérios de prevenção e eliminação de ruínas prematuras. Vários mecanismos externos de incremento de ancoragem têm sido desenvolvidos e analisados, com o objetivo de se criar forças que exerçam uma compressão transversal à ligação acima citada, com efeitos benéficos, adiante dos mecanismos de ruína prematuros. De forma geral, tem-se buscado estabelecer hipóteses para que as vigas reforçadas atinjam modos de ruína clássicos, que são facilmente previsíveis e controláveis, impedindo a ocorrência de situações como a de desprendimento do reforço (FERRARI, 2002).

A aderência presente nas interfaces compósito-resina-concreto é o fator responsável pela solidarização entre o reforço e concreto, ditando a transferência de esforços entre estes e possibilitando que eles trabalhem em conjunto quando da solicitação da peça reforçada. A aderência é influenciada por diversos parâmetros: dimensão das barras e entalhes, resistência à tração e ao cisalhamento do concreto e adesivo, seção e configuração superficial da barra e grau de rugosidade do entalhe (DE LORENZIS; TENG, 2006). De Lorenzis e Teng (2006) fazem um resumo dos possíveis modos de ruptura em ensaios de aderência ilustrados na figura 36.

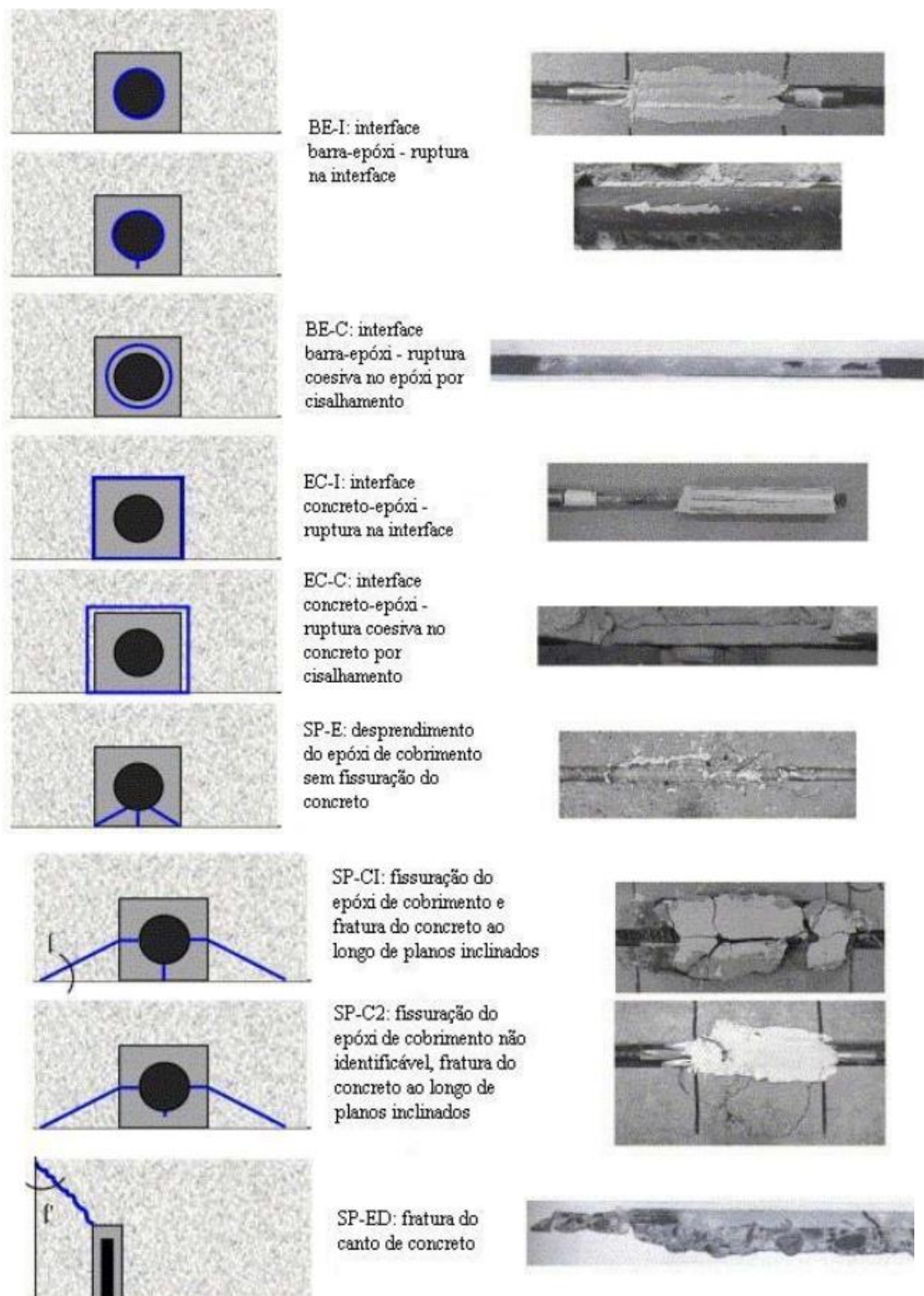
- Ruptura na interface PRF – epóxi: pode ocorrer puramente na interface ou por falha coesiva do adesivo (BE-I e BE-C). A ruptura puramente na interface é o modo de ruptura

crítico para barras de superfície lisa ou levemente impregnada por areia quando o grau de rugosidade é insuficiente para promover a interação entre a barra e o material de preenchimento do entalhe. Para barras circulares, este modo é crítico se as dimensões do entalhe são grandes o suficiente para prevenir a ruptura pelo destacamento do material de preenchimento do entalhe. A ruptura por falha coesiva do adesivo é crítica para fitas de PRF de superfície rugosa quando a resistência do epóxi é excedida.

- Ruptura na interface epóxi – concreto: pode ocorrer puramente na interface ou por falha coesiva do concreto (EC-I e EC-C). A ruptura puramente na interface é crítica nos casos em que o entalhe é pré-moldado. A falha coesiva do concreto não foi observada em ensaios de aderência, mas sim em ensaios de flexão em vigas na região reforçada ou na extremidade do reforço.

- Desprendimento do epóxi de cobertura: pode ocorrer com fissuração visível ou não do adesivo e com ou sem arrancamento do concreto adjacente (SP-E, SPC1, SP-C2 e SP-ED). Compreende os modos de ruptura em que há a fissuração longitudinal e/ou a fratura do concreto adjacente. Quando a razão entre a profundidade do entalhe e o diâmetro da barra é muito baixa (1,12-1,18), a ruptura se limita ao epóxi de cobertura sem dano significativo ao concreto (SP-E). Para valores maiores da razão entre a profundidade do entalhe e o diâmetro da barra, verifica-se a combinação da fissuração longitudinal do epóxi de cobertura com a fratura do concreto ao redor ao longo de planos inclinados (SP-C1). Para grande profundidade do entalhe e/ou quando a razão entre as resistências à tração do concreto e do epóxi é pequena, a fratura do concreto pode ocorrer antes da fissura do epóxi atingir a superfície externa (SP-C2). Quando as barras são dispostas à pequena distância dos cantos (distância menor que 20 mm (BLASCHKO7 , 2001 apud DE LORENZIS; TENG, 2006)) pode ocorrer ruptura por destacamento do canto de concreto (SP-ED). Espera-se que a resistência de aderência associada ao modo de ruptura SP-E tenha forte dependência da resistência à tração do concreto. Para os modos SP-C1 e SP-C2 essa resistência deve ser influenciada pela resistência à tração do concreto.

Figura 36 - Modos de ruptura adesiva do sistema armado junto à superfície (NSM) observados em ensaios de aderência



Nota: A maioria das figuras se refere a barras circulares porém BE-C e EC-C tem sido observados também para fitas.

Fonte: Adaptado de DE LORENZIS E TENG, 2006.

Segundo Chajes et al. (1996), a preparação da superfície e a resistência do concreto têm

influência significativa sobre o desempenho da ligação concreto-reforço. Ainda, segundo o autor, existe um comprimento de ancoragem efetivo, além do qual nenhum incremento de carga é alcançado. Teng et al. (2001) descrevem que a resistência da aderência entre reforço e concreto não necessariamente aumenta com o incremento no comprimento de ancoragem, o que significa que a máxima tensão de tração no reforço pode não ser alcançada.

Segundo o FIB (2000), os concretos de resistência normal, raramente apresentam falha na interface do adesivo. Os adesivos estruturais apresentam resistência à tração muito maior do que a do concreto e embora tenham baixo módulo de deformação transversal, transferem com eficiência as tensões para o concreto. No entanto, modos de ruína associados à falha do concreto junto à interface, são por sua vez, os mais frequentes.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

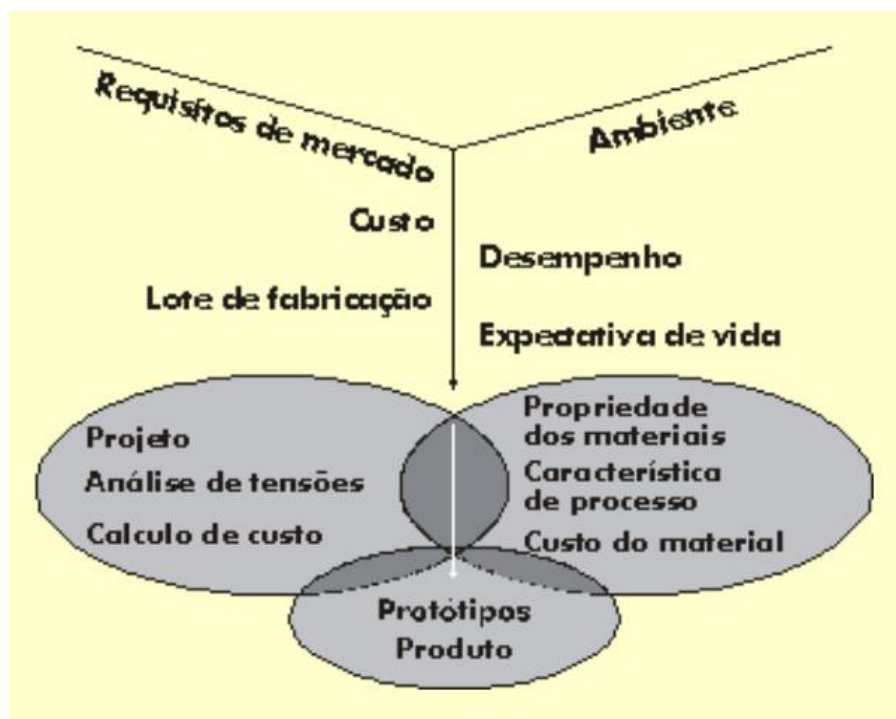
Nesta seção apresentam-se as propriedades dos materiais utilizados na execução dos corpos de prova da etapa experimental e o trabalho de caracterização destes materiais. Os materiais utilizados estão agrupados em três constituintes principais dos corpos de prova em análise foram:

- (i) O concreto armado;
- (ii) O material compósito laminado;
- (iii) O adesivo de ligação e a resina de saturação.

Uma grande área de ação do Engenheiro de Materiais é a seleção de materiais . Trata-se de atividade que envolve uma gama de conhecimentos técnicos, cuja amplitude dificilmente é abrangida por um só tipo de profissional por ser o ponto focal de uma série de especialidades tecnológicas. Essas vão desde a feitura do projeto até a análise de desempenho em campo e necessariamente reúnem profissionais de diversas especialidades. Em outras palavras, interdisciplinaridade e interatividade são particularmente exigidas em SM, da qual seleção de processo e design do produto também fazem parte, integrando assim engenheiros de produção, de materiais e mecânicos. A figura 37 mostra esquematicamente as relações interativas ou de retroalimentação que juntam materiais, processo e projeto, evidenciando que o caminho que une a idéia ao produto final compõe-se de um certo número de etapas, cada uma necessitando de informações de diversas naturezas. Iniciando com os requisitos de mercado, tanto a faixa de custo como a escala de produção são definidos a partir de dados mercadológicos, que geram decisões referentes a seleção de processo e composição do custo provável (manufatura, material, manutenção, etc.) Ainda, do conhecimento das demandas ambientais depende o estabelecimento da expectativa de vida do produto, seu desempenho, os requisitos de manutenção e as condições de operação. Por exemplo, determinado ambiente industrial pode incentivar a corrosão sob tensão, o que deve ser levado em conta na análise de tensões e no dimensionamento. Em resumo a figura 37 mostra os passos necessários para produzir determinado produto e ressalta quatro considerações principais:

- (iv) a função – o que o objeto deve fazer;
- (v) em que ambiente deverá operar;
- (vi) por quanto tempo, e
- (vii) qual o custo da solução encontrada e como este se compara com as expectativas do mercado (FERRANTE, 2000).

Figura 37 - Fluxograma de desenvolvimento de um produto: condições de contorno e relações funcionais entre projeto, seleção de materiais e processo.



Fonte: FERRANTE, 2000.

2.1 Corpos de prova de concreto

Os corpos de prova de concreto foram fabricados segundo recomendações da Norma Técnica Brasileira – NBR 5738 (Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova). O concreto foi constituído por cimento Portland CP II F 32 da marca Mauá, o agregado miúdo foi areia média e o agregado graúdo foi brita 0 provenientes de uma usina de concreto com sede na cidade de Nova Friburgo, RJ.

O cimento utilizado é difundido no mercado para uso geral, ideal para estruturas, pavimentos, argamassa, pré-moldados, artefatos de concreto, etc. O CP II F-32 tem adição de fíler calcário, em teor entre 6 e 10% e não é o mais indicado para aplicação em meios muito agressivos. As tabelas 4 e 5 expressam as propriedades físicas e químicas deste tipo de cimento.

Tabela 4 - Propriedades físicas do cimento CP II – F 32

ENSAIOS FÍSICOS		
Blaine (cm ² /g)	>2600	NBR NM 76
Tempo de início de pega (h:min)	>1	NBR NM 65
Tempo de fim de pega (h:min)	<10	NBR NM 65
Finura na peneira # 200 (%)	<12,0	NBR 11579
Finura na peneira # 325 (%)	–	NBR 9202
Expansibilidade a quente (mm)	<5,0	NBR 11582
Consistência normal (%)	–	NBR NM 43
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	–	NBR 7215
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	>10,0	NBR 7215
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	>20,0	NBR 7215
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	>32,0	NBR 7215

Fonte: ABCP, 2002.

Tabela 5 - Propriedades químicas do cimento CP II – F 32

ENSAIOS QUÍMICOS		
Perda ao fogo (%)	<6,5	NBR 5743
Resíduo insolúvel (%)	<2,5	NBR 5744
Trióxido de enxofre – SO ₃ (%)	<4,0	NBR 5745
Óxido de cálcio livre CaO Livre (%)	–	NBR 7227
Óxido de magnésio – MgO (%)	<6,5	NBR 9203
Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃ (%)	–	NBR 9203
Óxido de silício – SiO ₂ (%)	–	NBR 9203
Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃ (%)	–	NBR 9203
Óxido de cálcio – CaO (%)	–	NBR 9203

Fonte: ABCP, 2002.

O agregado graúdo utilizado foi brita 0 e proveniente da Pedrinco – indústria da área de concreto, localizada em Nova Friburgo, RJ. O agregado miúdo utilizado na dosagem também é proveniente desta indústria e ambos os agregados foram utilizados no mesmo estado em que foram fornecidos, sem sofrer processos de beneficiamento e mantendo as propriedades iniciais. A água de amassamento do concreto foi fornecida pelo abastecimento público pela concessionária Águas de Nova Friburgo. Conforme a NBR 15900, a utilização de águas provenientes do abastecimento público é adequada para utilização em concretagem sem que seja preciso caracterizar as suas propriedades.

2.1.1 Dosagem do concreto

O objetivo de qualquer método de dosagem é determinar uma proporção adequada e econômica dos materiais constituintes do concreto, que possam ser usados na sua produção, chegando-se o mais perto possível de se alcançar as várias propriedades que se deseja, com o menor custo. Será sempre difícil desenvolver um método de dosagem teórico, que possa ser usado universalmente com várias combinações de cimento Portland, quaisquer agregados e quaisquer adições. Isto acontece porque além do fato de que os elementos constituintes do concreto devem responder a alguns critérios de aceitação normalizados, o produto final também deve obedecer a critérios de resistência e trabalhabilidade. Além disso, até certo ponto, as mesmas propriedades do concreto, seja fresco ou endurecido, podem ser alcançadas de várias maneiras, com os mesmos materiais (AITCIN, 1998).

Há diversos métodos de dosagem para concreto convencional, um deles é o método ACI/ABCP. O Comitê 211 do ACI publicou este método de dosagem de concreto no ano 1989 (ACI 211/1989) que se baseia no fornecimento de quantidade de material para uma primeira tentativa de “traço”, e que deve ser ajustado em função da trabalhabilidade e resistência. Para que fosse seguida a NBR 7211/2009, este método foi adaptado para a realidade brasileira, principalmente quanto as particularidades dos materiais nacionais.

O presente artigo utilizou este método de dosagem do concreto para os experimentos. É necessário realizar uma análise granulométrica e massa específica dos agregados, medir a massa unitária do agregado graúdo e módulo de finura do agregado miúdo. Complementando as informações obtidas nos ensaios mencionados, os dados definidos para a dosagem foram:

- *do concreto*: fck e o slump;
- *do cimento*: tipo, resistência aos 28 dias e massa específica;
- *do agregado*: módulo de finura, dimensão máxima característica, massa específica e massa unitária compactada;
- *do fator água/cimento*: Curva de Abrams;

Definidos estes dados, se estabelecem as dimensões máximas dos agregados e qual será o seu consumo. Desta forma é possível determinar qual a dosagem do concreto que será utilizado e representa-la em massa ou volume. Algumas correções podem ser necessárias no caso de falta ou excesso de argamassa. No caso de falta de argamassa, é preciso acrescentar agregado miúdo e no caso de excesso de argamassa, acrescentar agregado graúdo. Em ambos

os casos, é preciso que seja mantido constante a relação entre água e cimento. A água de amassamento não deve ser inserida na mistura em sua totalidade no início, mas sim gradativamente, para que seja observada a consistência do concreto pelo ensaio de abatimento, até que seja obtida a consistência desejada.

2.2 Adesivos estruturais

2.2.1 S&P 220

É um adesivo bi componente tixotropico de cor cinzenta, sem adição de nenhum tipo de solvente, desenvolvida para a aplicação em colagens estruturais de laminados de fibra de carbono ou chapas de aço (SP-REINFORCEMENT, 2019). Os dados técnicos dessa substância foram informados pelo fornecedor e são apresentados nas tabelas 6 e 7 abaixo:

Tabela 6 - Dados técnicos relevantes relacionados a aplicação do S&P 220

Densidade a ~ 23 °C	1,7 ~ 1,8 g/cm ³
Relação de mistura	4:1 (em volume)
Temperatura de aplicação	+ 8 ~ + 35 °C
Tempo de trabalhabilidade a ~23 °C (EM ISO 9514:2005)	Aproximadamente 25 minutos

Fonte: O autor, 2021.

Tabela 7 - Propriedades do S&P 220

Resistência à compressão (EN 1504-4)	≥ 70 N/mm ²
Módulo de elasticidade (DIN EN ISO 178)	≥ 7100 N/mm ²
Resistência ao corte (DIN EN ISO 12615)	≥ 26 N/mm ²
Dureza Shore – D (DIN EM ISO 53505)	87 ~ 93
	≥ 3 N/mm ² em concreto
Tensão de aderência (DIN EN 13892-8)	3 N/mm ² em laminado de Fibra de carbono ≥ 14 N/mm ² em aço/aço

Fonte: S&P Reinforcement, 2021.

O adesivo tem como características a aplicação imediata (não necessita de filler), tempo de trabalhabilidade adequado, permanece consistente em superfícies horizontais (como tetos), elevada resistência mecânica, endurece sem retração, é impermeável à água. A tabela 8 apresenta valores das principais propriedades do adesivo.

Tabela 8 - Resumo das principais propriedades do adesivo S&P Resin 220 sedidas pelo fornecedor.

<i>Propriedade</i>	<i>S&P 220 Resin</i>
Resistência à Tração [MPa]	>30
Aderência aos Laminados de CFK [MPa]	> 3
Duração Prática de Utilização (Pot life) [mm]	60
Razão em peso	4:1

Fonte: MACEDO, COSTA e BARROS, 2008.

2.2.2 NVT 201E

O NVT 201E é um adesivo epóxi estrutural semiflexível de base epóxi para uso em conjunto com o sistema de reparos PIPEFIX. Sua formulação foi desenvolvida balanceando agente flexibilizante, promotor de aderência e cargas inertes (NOVATEC, 2020).

Este adesivo tem como principais propriedades uma alta resistência à abrasão, proteção anticorrosiva, alta adesão e cura inicial rápida. A sua utilização é sugerida para recuperação de dutos, colagem de chapas metálicas, nivelador de superfícies, vedações de dutos e revestimento corrosivo. Ou seja, é um adesivo difundido no mercado para substratos de aço. Este trabalho testa as propriedades do adesivo em substratos de concreto, mais especificamente no reforço utilizando laminados de fibra de carbono.

As tabelas 9 e 10 apresentam os principais parâmetros técnicos do adesivo informados pelo fornecedor:

Tabela 9 - Dados técnicos do NVT 201E

Relação de mistura	100:43 (Em peso)
Densidade	1,24 g/cm ³
Rendimento	1,24 kg/m ²

Fonte: NOVATEC, 2020.

Tabela 10 - Informações técnicas sobre a cura do NVT 201E

Temperatura	Tempo de aplicação	Cura inicial	Cura funcional
25 °C	35 minutos	120 minutos	24 horas
35 °C	28 minutos	120 minutos	24 horas

Fonte: NOVATEC, 2020.

2.3 Fibra de carbono

Conforme descrito por uma grande fabricante deste material, Devold ATM, as fibras de carbono são uma nova geração de materiais de alta resistência. A fibra de carbono pode ser descrita como uma fibra que contém pelo menos 90% de carbono obtido pela pirólise controlada de fibras apropriadas. Os compósitos de fibra de carbono são ideais para aplicações em que a resistência, rigidez, baixo peso e características excelentes de fadiga são requisitos críticos. Eles também podem ser usados na ocasião em que alta temperatura, inércia química e alto amortecimento são importantes.

A fibra de carbono utilizada como reforço para os ensaios de cisalhamento e aderência foi a LTC400-C10-C produzida pela Devold AMT[®], disponível para utilização em estudos no Laboratório de Adesão e Aderência (LAA) do Instituto Politécnico da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (IPRJ). A fabricante desta fibra disponibiliza em sua ficha técnica algumas propriedades atestadas em ensaios técnicos normatizados, conforme tabela 11.

Tabela 11 - Propriedades da Fibra de Carbono LT450-C10-C

Propriedades	Ensaio Normatizado	Resultado	Unidade
Resistência à Tração	ISO 527 – 4	877	MPa
Módulo de Elasticidade	ISO 527 – 4	63	GPa
Resistência à Compressão	EN 2850	334	Mpa
Teor da Fibra (por volume)	EN 2564	60	%

Fonte: DEVOLD AMT [®], 2020.

2.4 Resina de laminação

A resina de laminação escolhida foi a fabricada pela PIPEFIX. Isto se deve ao fato de esta resina ter sido desenvolvido no LAA e estar disponível para uso no laboratório. O composto de laminação PIPEFIX é uma massa epóxi bicomponente de alta tecnologia formulada para reforço em superfícies metálicas submetidas a elevadas temperaturas. Possui como diferencial alta Temperatura de transição vítrea (Tg). A resina é indicada na laminação de materiais compósitos para o reforço e reparo de estruturas (NOVATEC, 2020).

Esta massa de laminação tem como principais propriedades uma alta resistência à abrasão, alta dureza e resistência à altas temperaturas. A sua utilização é sugerida para recuperação de dutos, preenchimento de partes desgastadas, colagem de diferentes tipos de

materiais e revestimento corrosivo.

As tabelas 12, 13 e 14 apresentam os principais parâmetros técnicos da massa epóxi de laminação informados pelo fornecedor:

Tabela 12 - Dados técnicos da Resina PIPEFIX

Relação de mistura	100:17,6 (Em peso)
Densidade	1,38 g/cm ³
Rendimento	1,38 kg/m ²

Fonte: NOVATEC, 2020.

Tabela 13 - Informações técnicas sobre a cura da Resina PIPEFIX

Temperatura	Tempo de aplicação	Cura inicial	Cura funcional
25 °C	30 minutos	6 horas	24 horas

Fonte: NOVATEC, 2020.

Tabela 14 - Propriedades da Resina PIPEFIX curada

Parâmetros	Valores
Temperatura de Transição Vítrea (T _g) – DMA (°C)	24 horas

Fonte: NOVATEC, 2020.

2.5 Ensaios mecânicos

2.5.1 Ensaio de compressão axial

O ensaio de compressão axial de corpos de prova de concreto é um ensaio normatizado pela ABNT NBR 5739/2018 e utiliza-se mensurar principalmente a resistência a compressão da amostra. No caso deste trabalho, este ensaio serviu para a caracterização do concreto utilizado nos demais ensaios, já que alguns destes exigem uma resistência a compressão mínima.

Os corpos de prova cilíndricos foram moldados na intenção de caracterizar a resistência a compressão da dosagem utilizada aos 28 dias de idade, para que esta propriedade fosse conhecida quando os demais ensaios fossem realizados. Moldaram-se os corpos de prova com um diâmetro de 10 cm, uma altura de 20 cm e uma dosagem de 30 MPa.

A dosagem do concreto utilizado nos corpos de prova foi dimensionada para obter com $f_{ck} = 30$ MPa aos 28 dias de idade, abatimento do tronco de cone (slump test) de 80 a 100 mm

e fator $a/c = 0,52$. A dosagem do concreto utilizado foi 1:1,42:3,12:0,52 (Cimento:Areia:Brita:Água/Cimento). O abatimento do concreto foi feito de forma manual, utilizando uma haste cilíndrica de aço, com superfície lisa e foram dados 24 golpes divididos igualmente em duas camadas, conforme descrito na ABNT NBR 5738/2015. As amostras foram moldadas em fôrmas, conforme figura 38, e retiradas após 24 horas. A cura também seguiu o recomendado nesta norma, respeitando pelo menos 24 horas após a concretagem permanecendo em local protegido de intempéries e pelo menos 21 dias submerso em um tanque d'água.

Figura 38 – Corpos de prova enformados



Fonte: O autor, 2021.

2.5.2 Ensaio do reforço ao cisalhamento

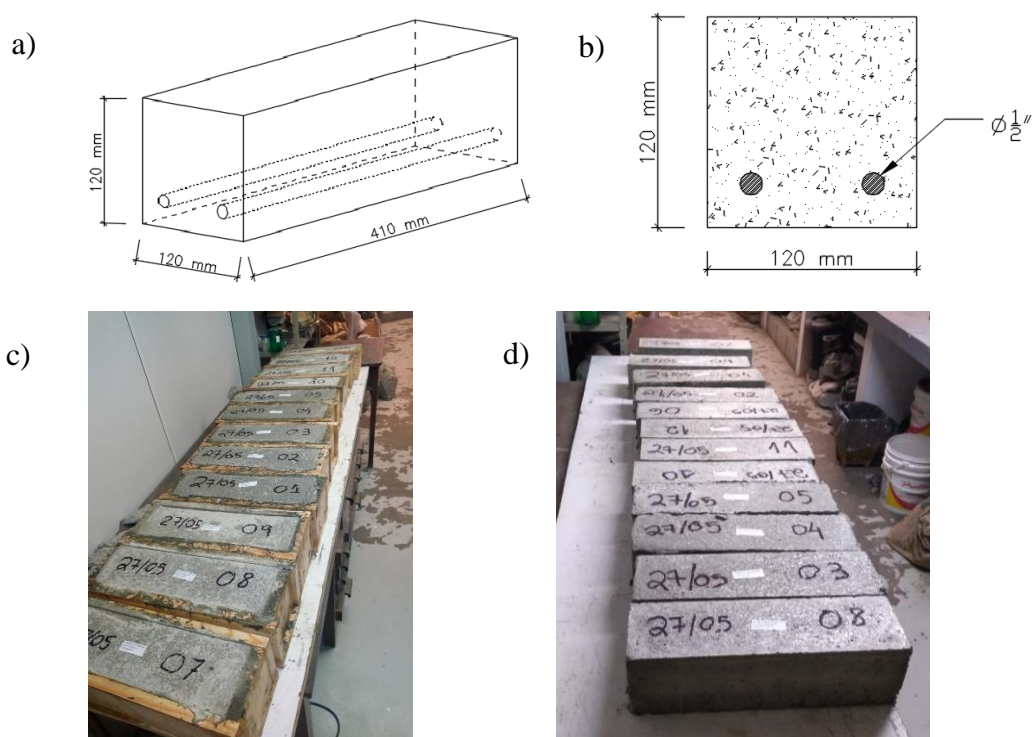
O adesivo epóxi NVT 201E apresentou bons resultados no reforço a flexão em experimentos realizados anteriormente, como atestou Ferreira (2019). Partindo destes resultados, foram realizados ensaios de cisalhamento em vigas utilizando o adesivo epóxi NVT 201E – adesivo utilizado normalmente para interfaces metálicas – e utilizando o adesivo epóxi S&P 220 – adesivo difundido no mercado no setor de reforços de estruturas de concreto com laminado de fibras de carbono.

Foram feitos alguns procedimentos que serão descritos com maiores detalhes. Podem ser citadas algumas etapas como a dosagem do concreto, o dimensionamento dos corpos de prova, o dimensionamento do reforço de compósito laminado, a aplicação deste reforço, o ensaio de compressão axial do concreto e principalmente o ensaio de flexão de 4 pontos do concreto reforçado, que será utilizado como base para uma análise estatística de comparação entre a utilização de dois adesivos estruturais.

2.5.2.1 Execução dos corpos de prova

Foram feitos corpos de prova cilíndricos e prismáticos, seguindo o procedimento da ABNT NBR 5738/2015. O esquema representado na figura 39 mostra as dimensões dos corpos de prova prismáticos feitos no Laboratório de Ensaio Físicos – IPRJ, para o ensaio de flexão de 4 pontos, de acordo com a ABNT NBR 12142/2010.

Figura 39- Esquema dos corpos de prova prismáticos.



Legenda: (a) perspectiva, (b) seção transversal com dois vergalhões de 1/2”, (c) corpos de prova moldados em formas de madeira, (d) imagem dos corpos de prova feitos no LEFI.

Fonte: O autor, 2021.

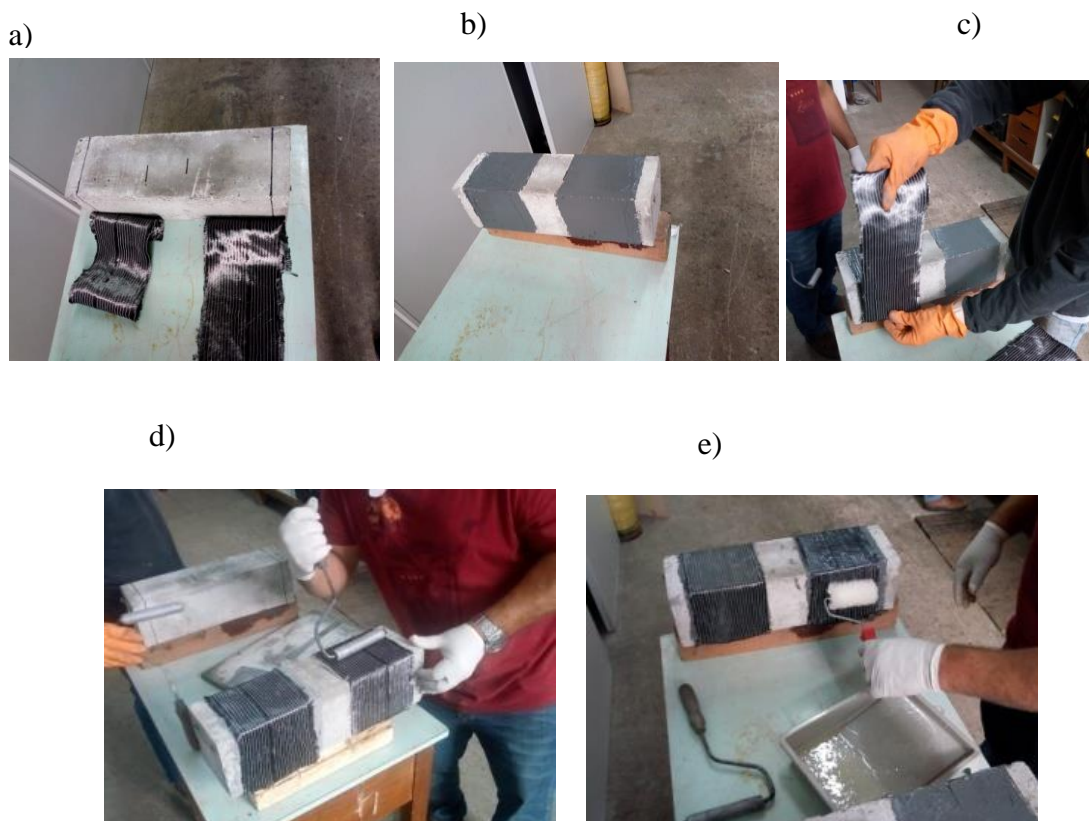
2.5.2.2 Aplicação do reforço

Para o reforço das vigas de concreto, o reforço foi composto por adesivo estrutural a base epóxi, uma camada de fibra de carbono e resina de laminação, que teve aproximadamente 1 mm de espessura. Para o dimensionamento do reforço foi utilizada a norma Americana ACI Committee 440 (2002) e os adesivos epóxi que foram comparados – NVT 201E e S&P 220 – respeitaram a composição recomendada pelo fabricante.

Para o experimento, foram feitos reforços em 3 vigas utilizando-se o adesivo estrutural

NVT 201E, em 3 vigas utilizando-se o adesivo estrutural S&P 220, e outras 3 vigas permaneceram sem reforço, para que fossem utilizadas como referência. Para as 3 vigas reforçadas com o NVT 201E, utilizou-se 321,5 g do Componente A e 169,21 g do Componente B. Após aplicado o adesivo, fixou-se uma camada da fibra de carbono LT450-C10-C, e posteriormente aplicou-se a Resina Pipe Fix para fazer a laminação, a medida utilizada foi de 250,0 g do Componente A e 43,85 g do Componente B. Para as 3 vigas reforçadas com o S&P 220, utilizou-se 540,0 g do Componente A e 135 g do Componente B. Após aplicado o adesivo, fixou-se uma camada da fibra de carbono LT450-C10-C, e posteriormente aplicou-se a Resina Pipe Fix para fazer a laminação, a medida utilizada foi de 250,0 g do Componente A e 43,85g do Componente B. A figura 40 abaixo, é um esquema da metodologia de aplicação do reforço ao substrato de concreto.

Figura 40 – Etapas de aplicação do reforço ao substrato de concreto.



Legenda: (a) Gabarito para aplicação, (b) Adesivo estrutural aplicado, (c) e (d) Fixação da fibra de carbono e (e) Processo de laminação.

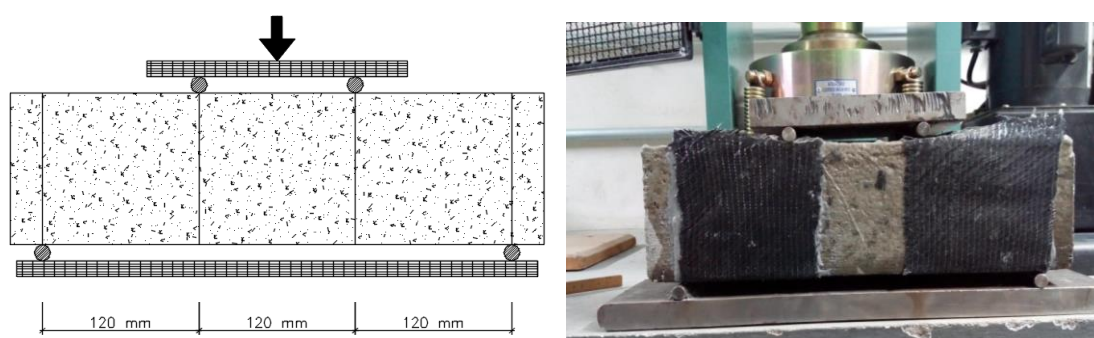
Fonte: O autor, 2021.

2.5.2.3 Estrutura do ensaio

Foram confeccionadas 9 vigas compostas de seção retangular e constituídas por armadura positiva de aço CA-50 de diâmetro de $\frac{1}{2}$ ", conforme esquematizado em Figura 2. Para a realização dos ensaios foram utilizados o adesivo estrutural NVT 201E, composto por fibras de carbono em 3 dessas vigas (reforçando ao cisalhamento), o adesivo S&P 220, composto por fibras de carbono em 3 dessas vigas (reforçando ao cisalhamento) e 5 vigas sem reforço ao cisalhamento.

Para a determinação estatística da comparação da influência do reforço ao cisalhamento com fibras de carbono e com o NVT 201E e o S&P 220, a viga foi dimensionada para que a ruptura acontecesse fora do terço médio, aonde o cisalhamento tem valor máximo. O suporte foi feito pelo Laboratório de Ensaios Físicos no IPRJ, de forma que os pontos de apoio estejam espaçados 120 mm entre si, conforme esquematizado na figura 41.

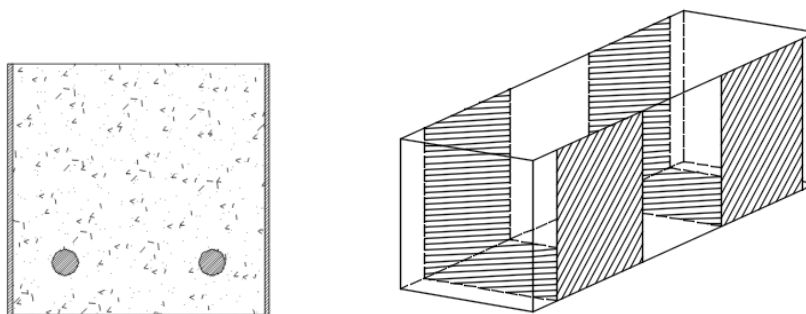
Figura 41 – Esquema representativo do ensaio de flexão de 4 pontos de corpos de prova prismáticos.



Fonte: O autor, 2021.

O reforço ao cisalhamento feito nas vigas corresponde ao denominado de “U”, conforme figura 42, e que abrange apenas três lados do elemento (duas laterais e o fundo) de concreto. Essa disposição geralmente é imposta pela existência de laje na parte superior da viga e pela não conveniência ou impossibilidade da abertura de rasgos na mesma para permitir a passagem da fibra. Essa é uma solução de fácil execução e que permite razoável incremento na resistência nominal de cisalhamento da peça (MACHADO, 2002).

Figura 42 – Esquema representativo do reforço com fibra de carbono usado nos ensaios.

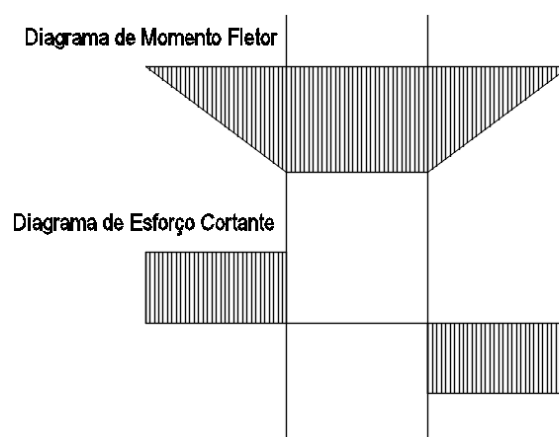


Fonte: O autor, 2021.

A aplicação do reforço foi feita seguindo a recomendação técnica dos fabricantes e a mistura feita manualmente. O adesivo estrutural NVT Pipe Fix ® teve uma composição de mistura por peso de 1,9:1,0, o adesivo S&P 220® teve uma composição de mistura por volume de 4,0:1,0. A laminação foi feita diretamente nas vigas, e o tempo de cura, de 24 horas conforme especificado pelos fabricantes foi aguardado com o reforço já aplicado nas vigas.

O terço central da viga, no ensaio de flexão de 4 pontos, é composto por flexão pura, já nos terços externos há flexão com cisalhamento, conforme a figura 43. As vigas foram dimensionadas com os mesmos parâmetros para flexão, e sem armadura de cisalhamento, portanto, as vigas de referência (que não terão reforço com material compósito laminado) resistirão ao cisalhamento apenas com a parcela do concreto e a parcela da armadura longitudinal. Será feita análise estatística sobre a influência dos reforços a partir da carga de ruptura das vigas.

Figura 43 – Representação dos diagramas de esforços sofridos pelas vigas no ensaio de flexão de 4 pontos.



Fonte: O autor, 2021.

2.5.3 Ensaio de aderência

O ensaio de aderência, também chamado de *pull-out test*, segundo NBR 14050/1998, consiste em aplicar uma tensão de tração perpendicular à seção transversal do reforço com fibra de carbono, para determinar a resistência de aderência e avaliar os tipos de rupturas do sistema de reforço com fibra de carbono no substrato de concreto. Para o ensaio foi utilizado o aparelho de arrancamento hidráulico manual com capacidade de 1500 kgf e resolução de 1 kgf, conforme figura 44, segundo as especificações prescritas pela ASTM D4541.

Figura 44 - Dispositivo de ensaio para o teste de aderência.



Fonte: O autor, 2021.

Este ensaio foi adaptado da NBR 14050, que trata de “Sistemas de revestimento de alto desempenho, à base de resinas epoxídicas e agregados minerais”. Os corpos de prova para ensaio em laboratório foram minilajes de concreto, obedecendo as dimensões estabelecidas na norma. Estes artefatos de concreto foram dosados para obter 30 MPa de resistência à compressão axial ao 28 dias de idade. Foram feitos duas lajes para os testes de aderência, utilizando formas de madeira, conforme pode ser observado na figura 45, e dois corpos de prova cilíndricos para atestar a resistência a compressão axial.

Figura 45 - Corpos de prova confeccionados do LEFI (Laboratório de Ensaios Físicos) para ensaio de aderência.



a)



b)

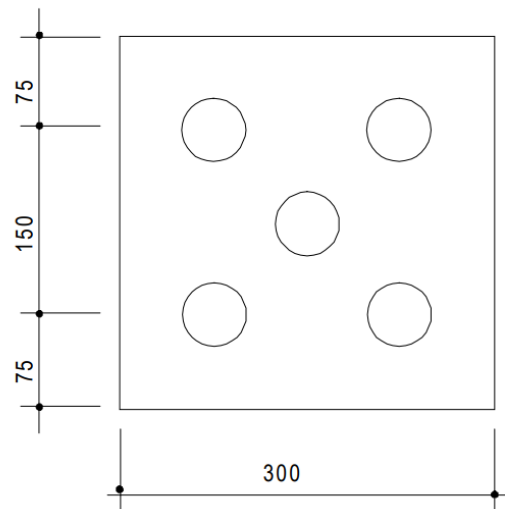


c)

Fonte: O autor, 2021.

A norma referenciada acima determina que o agregado graúdo com dimensão máxima de 19 mm. Os corpos de prova de concreto devem ser curados durante vinte e um dias em água e mais sete dias em condições normais de laboratório. A superfície dos corpos de prova foram previamente preparadas com escova de aço. Foram retiradas 5 amostras de cada minilaje, portanto a norma prescreve uma dimensão de 30 cm x 30 cm x 10 cm e uma distância mínima para a colocação dos anteparos de aço deve ser de 50 mm, como pode-se observar na figura 46.

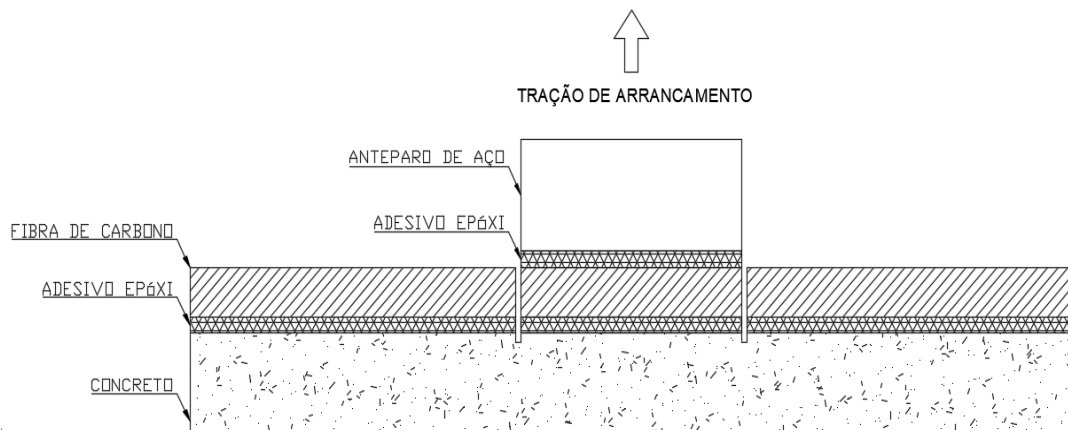
Figura 46 - Espaçamento mínimo entre dispositivos.



Fonte: ABNT NBR 14050/1998.

Optou-se por utilizar anteparos de 50 mm de diâmetro para a realização do ensaio. Aplicado o reforço de acordo com as especificações da fabricante, utiliza-se um dispositivo composto de um cilindro de corte (furadeira serra copo) e cortar a superfície em uma profundidade de 5 mm a 10 mm, além da espessura do reforço conforme a figura 47. Os anteparos devem ser colados 24 h antes do ensaio com adesivo epóxi. Alguns cuidados devem ser tomados ao colar os anteparos, como evitar que ele interaja com o substrato. A velocidade que o dispositivo de arrancamento exerce sobre esta área colada ao anteparo é de 0,1 N/mm, até que ocorra a falha.

Figura 47 - Esquema representativo do ensaio de aderência

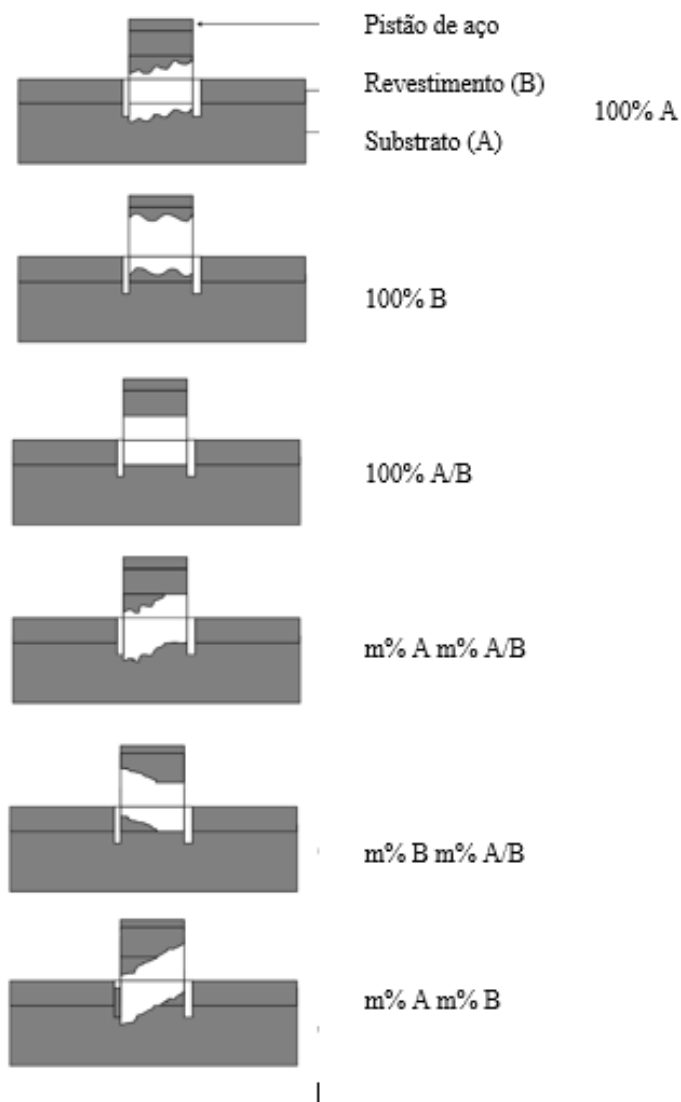


Fonte: O autor, 2021.

A NBR 14050 determina que seja anotado o valor máximo registrado pelo dispositivo (carga no momento da falha) e que se observe-se os tipos de ruptura, que podem ser ilustradas conforme figura 48 e são classificadas da seguinte forma:

- a) Tipo A – ruptura no substrato de concreto (ruptura coesiva);
- b) Tipo A/B – ruptura na interface substrato/revestimento; e
- c) Tipo B – ruptura do revestimento (ruptura adesiva).

Figura 48 - Modos de ruptura



Fonte: NBR 14050/1998.

A motivação deste ensaio é observar se o adesivo epóxi NVT 201E desenvolvido pela PipeFix e difundido no mercado para uso em substratos de aço, também pode ser utilizado na interação entre concreto e laminado de fibra de carbono. Adesivos epóxi já qualificados utilizados com esta finalidade apresentam em ficha técnica um desempenho de resistência adesiva à tração superior a 4 MPa e que apresentem falha no concreto ao serem submetidas ao *pull-out test*.

Neste ensaio está sendo testado o conjunto concreto-resina-laminado. O bom desempenho que a transferência de forças do laminado para o concreto é conhecido, no entanto a aderência entre laminado e concreto é de extrema importância para que o sistema de reforço seja eficaz. Para atestar essa propriedade, foi utilizado este ensaio que permite uma análise da interface dos materiais.

2.5.3.1 Aplicação do reforço

Para o reforço das minilajes de concreto, o reforço foi composto por adesivo estrutural a base epóxi, uma camada de fibra de carbono e resina de laminação, que teve aproximadamente 1 mm de espessura e o adesivo epóxi – NVT 201E – respeitou a composição recomendada pelo fabricante. A superfície na qual o reforço foi colado passou por tratamento com escova de aço, conforme recomenda a NBR 14050/1998 e retiradas as partículas de sujeira para não interferir na aderência entre concreto e o laminado de fibra de carbono. A face utilizada para a colagem do reforço foi a face oposta à moldagem (fundo da forma). A figura 49 ilustra o corpo de prova após o tratamento superficial escova de aço.

Figura 49 - Corpo de prova preparado para receber o reforço



Fonte: O autor, 2021.

Para o experimento, foram feitos reforços em 2 minilajes utilizando-se o adesivo estrutural NVT 201E. Utilizou-se 190,0 g do Componente A e 100,0 g do Componente B. A mistura foi feita pelo técnico do Laboratório de Adesão e Aderência do IPRJ e está ilustrada na figura 50.

Figura 50 - Componentes A e B do adesivo estrutural epóxi Pipe Fix NVT 201E



a)



b)



c)

Fonte: O autor, 2021.

Após aplicado o adesivo, fixou-se uma camada da fibra de carbono LT450-C10-C, e posteriormente aplicou-se a Resina PIPEFIX para fazer a laminação, a medida utilizada foi de 250,0 g do Componente A e 43,85 g do Componente B. A figura 51 abaixo, é um esquema da metodologia de laminação do reforço de fibra de carbono ao substrato de concreto.

Figura 51 - Laminação da fibra de carbono utilizando resina Pipe Fix e rolete “tira bolhas”.

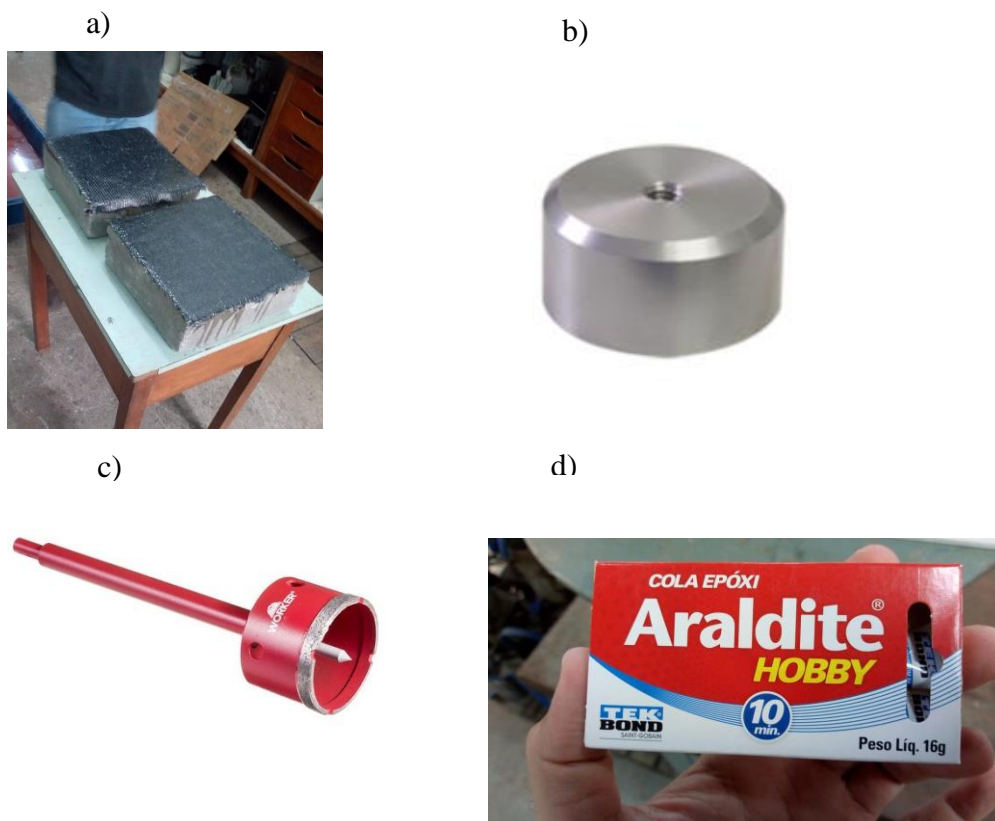


Fonte: O autor, 2021.

2.5.3.2 Estrutura do ensaio

Após a aplicação do reforço, respeitou-se o tempo de cura do material compósito recomendado pelo fabricante e foram feitos os cortes utilizando a broca *serra copo* com diâmetro de 50 milímetros. Para a colagem dos anteparos, utilizou-se a cola epóxi Araldite Hobby. Estes procedimentos estão ilustrados na figura 52 e foram realizados no Laboratório de Adesão e Aderência.

Figura 52 - Equipamentos para a realização do pull-out test.



Legenda: (a) mini-lajes reforçadas; (b) anteparo utilizado para o ensaio de arrancamento; (c) serra copo diamantada; (d) cola epóxi utilizada para a colagem dos anteparos junto ao reforço.

Fonte: O autor, 2021.

Como descrito anteriormente, neste ensaio foram colados 5 anteparos em cada minilaje e a velocidade de 0,1 N/mm, duas vezes por segundo, sem golpes, até a ocorrência da falha. A figura 53 apresenta o posicionamento do dispositivo de arrancamento.

Figura 53 - Realização do ensaio de arrancamento



Fonte: O autor, 2021.

2.6 Comparação de preços entre adesivos epóxi para reforço de estruturas de concreto utilizando fibra de carbono

No mercado nacional, há grandes fabricantes de adesivos voltados para a construção civil, especialmente no que se refere à estruturas de concreto. É possível citar empresas como a Sika, Viapol, MC-Bauchemie, Vedacit, entre outros. Essas fabricantes possuem setor comercial e é possível encomendar seus produtos diretamente com estas. Partindo deste panorama, entrou-se em contato com o setor de vendas das principais fabricantes brasileiras, foi esclarecido o objetivo da pesquisa e que se tratava de um artigo científico e solicitou-se um orçamento do adesivo epóxi utilizado para reforço de estruturas de concreto com fibras de carbono.

O adesivo estrutural para colagem de tecido de fibras de carbono da fabricante Sika é o Sikadur®-330, conforme ilustrado na figura 54. A fabricante descreve suas características e utilização em sua ficha técnica. Este adesivo pode ser utilizado para colagem de tecidos de fibras de carbono e impregnação para o sistema de aplicação úmida, além de não requerer primer. Entrou-se em contato com o setor comercial da fabricante e o produto é fornecido em dois componentes que somados tem 5 kg, prazo de validade de 24 meses a partir da data de produção, densidade de 1,30 kg/L, consumo aproximado entre 0,7 e 1,5 kg/m² por camada (dependendo da porosidade do substrato e tipo de tecido) e preço de R\$ 928,00.

Figura 54 - Adesivo epóxi bicomponente para colagem de tecido de fibras de carbono Sikadur®-330.



Fonte: O autor, 2021.

O adesivo estrutural para colagem de tecido de fibras de carbono da fabricante MC-Bauchemie é o MC-Carbosolid 1209 TX, conforme ilustrado na figura 55. A fabricante descreve suas características e utilização em sua ficha técnica. Este adesivo pode ser utilizado para colagem de tecidos de fibras de carbono, além de não requerer primer e requerer resina para impregnação. Entrou-se em contato com o setor comercial da fabricante e o produto é fornecido em dois componentes que somados tem 12 kg, prazo de validade de 12 meses a partir da data de produção, densidade de 1,33 kg/L, consumo aproximado entre 0,7 e 1,0 kg/m² por camada (dependendo da porosidade do substrato e tipo de tecido) e preço de R\$ 1131,00.

Figura 55 - Adesivo epóxi bicomponente para colagem de tecido de fibras de carbono MC-Carbosolid 1209 TX.



Fonte: O autor, 2021.

O adesivo estrutural para colagem de tecido de fibras de carbono da fabricante Weber Saint-Goban é o weber.rep bond CF55, conforme ilustrado na figura 56. A fabricante descreve suas características e utilização em sua ficha técnica. Este adesivo pode ser utilizado para colagem de tecidos de fibras de carbono, impregnação, porém requer primer. Entrou-se em contato com o setor comercial da fabricante e o produto é fornecido em dois componentes que somados tem 1 kg, prazo de validade de 24 meses a partir da data de produção, densidade de 1,05 kg/L, consumo aproximado 0,50 kg/m² por camada (dependendo da porosidade do substrato e tipo de tecido) e preço de R\$ 495,00.

O adesivo estrutural para colagem de tecido de fibras de carbono da fabricante Viapol é o Viapol Carbon Adesivo. A fabricante descreve suas características e utilização em sua ficha

técnica. Este adesivo pode ser utilizado para colagem de tecidos de fibras de carbono, impregnação, porém requer primer. Entrou-se em contato com o setor comercial da fabricante e o produto é fornecido em dois componentes que somados tem 15 kg, prazo de validade de 12 meses a partir da data de produção, densidade de 1,50 g/cm³, consumo aproximado 0,30 kg/m² por camada (dependendo da porosidade do substrato e tipo de tecido) e preço de R\$ 1.180,21.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resistência a compressão axial do concreto

O ensaio de compressão axial que foi realizado de acordo com os procedimentos descritos em 2.6.1, no dia 27 de junho de 2019 e os tipos de ruptura foram majoritariamente cisalhados e cônicos. A carga de ensaio foi aplicada continuamente, sem choques e a uma velocidade de 0,5 MPa/s, conforme ABNT NBR 5739/2018. A figura 56 mostra a prensa hidráulica Solotest®. Foram moldados 10 corpos de prova e a tabela 15 apresenta os resultados dos ensaios.

Figura 56 – Prensa hidráulica utilizada para os ensaios.



Fonte: O autor, 2021.

Tabela 15 – Resistência à compressão axial de concreto aos 28 dias

Referência	Carga (tf)	Resistência à Compressão (MPa)
L1CP1	24,38	31,04
L1CP2	22,83	29,07
L1CP3	26,02	33,13
L1CP4	22,23	28,30
L1CP5	23,64	30,10
L1CP6	20,37	25,94
L1CP7	24,09	30,67
L1CP8	22,42	28,55
L1CP9	25,05	31,89
L1CP10	26,60	33,87
MÉDIA	23,76	30,26
DESVIO PADRÃO	1,881	2,394

Fonte: O autor, 2021.

Esperava-se uma resistência de compressão axial de 30 MPa quando a dosagem foi calculada. Esta resistência foi atingida e o concreto fabricado no LEFI atendeu os pré-requisitos para os demais ensaios realizados.

3.2 Resistência mecânica do adesivo

Para referenciar as propriedades mecânicas do adesivo epóxi NVT 201E, utilizou-se fichas técnica de alguns adesivos já qualificados para a uso em substrato de concreto. A tabela 16 mostra resultados dos ensaios de tensão de cisalhamento, teste de abrasão, teste dureza e perda de massa. Estes dados do adesivo epóxi NVT 201E foram disponibilizados pelo fornecedor.

Tabela 16 - Propriedades do NVT 201E

Tensão de cisalhamento (ASTM D1002)	16 MPa
Teste de abrasão (DIN 53516)	0,45
Dureza Shore D (ASTM D2240)	60
Perda de massa (TGA)	≥ 300

Fonte: NOVATEC, 2021.

Para complementar dados disponibilizados pelo fornecedor, consultou-se trabalhos anteriores que testaram algumas propriedades deste adesivo. O trabalho de Silva (2018) testou diversas propriedades do NVT 201E, entre eles a tensão de tração máxima, o alongamento percentual no momento da ruptura e módulo de elasticidade. A tabela 17 mostra os resultados obtidos nos ensaios realizados por Silva.

Tabela 17 – Tensão de tração máxima, Alongamento percentual e Módulo de elasticidade do NVT 201E

Tensão de tração máxima (ASTM D638)	27,28 MPa	$\pm 3,552$
Alongamento (ASTM D638)	2,552 %	$\pm 0,395$
Módulo de elasticidade (ASTM D790-10)	4207 MPa	$\pm 0,116$

Fonte: SILVA, 2018.

Tendo em mãos estes valores de caracterização do NVT 201E, é possível compará-los com valores informados em fichas técnicas de outros adesivos epóxis que são consolidados no mercado para reparos em estruturas de concreto utilizando laminados de fibra de carbono. A tabela 18 é um comparativo dos resultados obtidos por Silva (2018) do NVT 201E e o adesivo epóxi Sikadur®-330.

Tabela 18 - Comparação entre propriedades do NVT 201E e Sikadur®-330.

Propriedades	NVT 201E	Sikadur®-330	Varição Percentual
Resistência à Tração	27,28 MPa	30 MPa	9,97
Alongamento	2,552 %	0,9 %	-64,73
Módulo de Elasticidade	4207 MPa	4500 MPa	6,96

Fonte: O autor, 2021.

A variação encontrada na comparação entre o NVT 201E e o Sikadur®-330 foi de 9,97 % no que se refere a resistência à tração e 6,96 % no módulo de elasticidade. Estas duas propriedades apresentaram uma mesma ordem de grandeza. Já o alongamento no momento da ruptura teve uma maior variação percentual. O adesivo da PipeFix apresentou um alongamento 64,73 % maior do que o adesivo da Sika. Esta alta deformação sob tensão pode ser considerada uma propriedade positiva para determinadas aplicações.

3.3 Resistência ao cisalhamento

Foi calculada, através da fórmula descrita a seguir, a parcela resistida pelo concreto na viga referência, e seu valor foi de $V_c = 10,43$ kN. O valor extra de resistência ao cisalhamento requerida é de aproximadamente 200 kN. Para o dimensionamento do reforço, foram utilizados os valores acima citados e a metodologia de cálculo descrita em ACI Committee 440 (2002). Concluiu-se que bastava uma camada de fibra de carbono para atingir a resistência extra necessária, portanto foram feitos reforços com uma camada de fibra de carbono com espessura de aproximadamente 1 mm.

- Cálculo da resistência ao cisalhamento da seção sem armadura transversal.

$$V_c = 0,6 f_{ctd} b w d$$

Foram realizados ensaios de flexão de 4 pontos em 5 vigas de referência (sem reforço ao cisalhamento), em 3 vigas reforçadas ao cisalhamento se utilizando o NVT 201E e em 3 vigas reforçadas ao cisalhamento se utilizando o S&P 220. As cargas de ruptura são expressas na tabela 19.

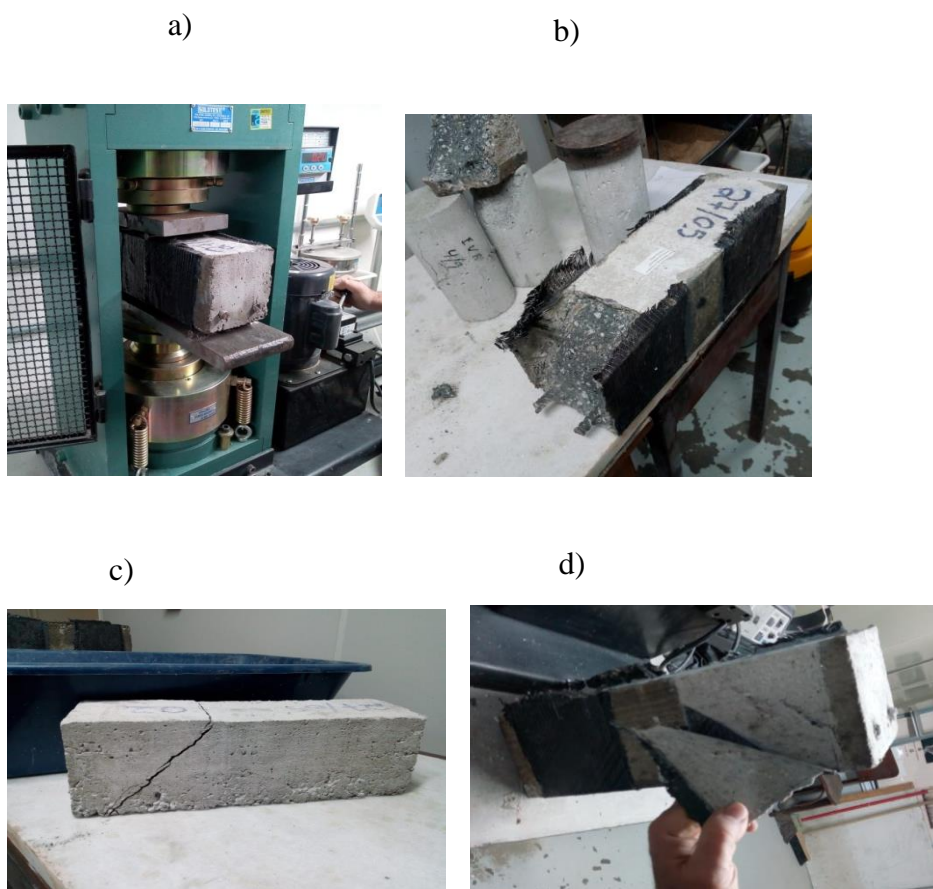
Tabela 19 – Resultados do Ensaio de Flexão de 4 Pontos

Corpos de Prova de Referência	Carga (tf)	Resistência ao Cisalhamento (tf)
F1CP1	7,37	3,69
F1CP2	6,73	3,37
F1CP3	7,52	3,76
F1CP4	5,12	2,56
F1CP5	6,08	3,04
MÉDIA	6,56	3,28
DESVIO PADRÃO	0,989	0,496
Corpos de Prova reforçados com NVT 201E	Carga (tf)	Resistência ao Cisalhamento (tf)
F2CP1	10,24	5,12
F2CP2	10,41	5,21
F2CP3	10,69	5,35
MÉDIA	10,45	5,23
DESVIO PADRÃO	0,227	0,116
Corpos de Prova reforçados com NVT 201E	Carga (tf)	Resistência ao Cisalhamento (tf)
F3CP1	9,75	4,88
F3CP2	9,10	4,55
F3CP3	8,09	4,05
MÉDIA	8,98	4,49
DESVIO PADRÃO	0,836	0,418

Fonte: O autor, 2021.

Os corpos de prova de referência apresentaram uma resistência média ao cisalhamento de 3,28 tf, os reforçados com o adesivo NVT 201E apresentaram resistência média de 5,22 tf e os reforçados com o adesivo S&P 220 apresentaram resistência média de 4,49 tf. As vigas que utilizaram o adesivo estrutural NVT 201E obtiveram resistência 59,15% superior às vigas de referência e 16,26% superior em relação às vigas reforçadas com o adesivo estrutural S&P 220, adesivo este qualificado para uso em substrato de concreto e difundido no mercado. A figura 57 ilustra o ensaio e alguns resultados do ensaio realizado no LEFI, como a disposição do corpo de prova e a forma de ruptura das amostras de referência e as reforçadas.

Figura 57 – Imagens do ensaio de flexão de 4 pontos realizado no LEFI.



Legenda: a) Amostra posicionada para o ensaio; b) Corpo de prova reforçado com o NVT 201E fraturado por flexocisalhamento; c) Viga de referência rompida por flexocisalhamento; d) Amostra reforçada com o S&P 220 apresentando descolamento do reforço após o ensaio.

Fonte: O autor, 2021.

As vigas reforçadas com o adesivo estrutural NVT 201E obtiveram resultados superiores aos obtidos nas vigas reforçadas com o adesivo S&P 220, que já está estabelecido no mercado e qualificado pelos órgãos reguladores como adesivo estrutural para o uso em substrato de concreto. Além de maior resistência no ensaio de flexão de 4 pontos, as vigas reforçadas com o NVT 201E apresentaram menor taxa de descolamento do reforço no momento da ruptura do que as reforçadas com o adesivo usado de comparação. Esses resultados favoráveis ao NVT 201E sugeriram que o adesivo pode ser utilizado também para reparos em estruturas de concreto.

A partir deste cenário – onde o NVT 201E apresentou sucessivos resultados positivos – procurou-se investigar sobre sua qualificação como um adesivo epóxi estrutural para reforço de estruturas de concreto.

3.4 Resistência à aderência do NVT 201E

Para a análise dos resultados do ensaio de aderência à tração e os tipos de ruptura do sistema de reforço com fibra de carbono, utilizou-se o ensaio de acordo com o Anexo C da ABNT NBR 14050/1998. O corpo de prova de concreto foi dimensionado para obter uma resistência à compressão de 40 MPa aos 28 dias de idade e um agregado graúdo de dimensão máxima de 19 mm. O concreto passou por um processo de cura de 21 dias em água e sete dias em condições normais de laboratório, também conforme indica a norma.

No ensaio de resistência à aderência, as amostras apresentam três tipos de rupturas possíveis conforme discutido anteriormente no tópico 3.2 do presente trabalho.

As figuras 58, 59 e 60 abaixo são fotografias dos anteparos do experimento deste trabalho e exemplificam cada tipo de ruptura.

Figura 58 – Ilustração Tipo A – ruptura no substrato de concreto.



Fonte: O autor, 2021.

Figura 59 - Ilustração Tipo A/B - ruptura na interface substrato/revestimento.



Fonte: O autor, 2021.

Figura 60 - Ilustração Tipo B - ruptura no revestimento.



Fonte: O autor, 2021.

Analisando os resultados do ensaio de aderência, observou-se que houve rupturas dos três tipos que a norma estabelece. O corpo de prova A-07 não pôde ser contabilizado nos resultados para fins estatísticos, pois a sua área de colagem foi danificada no momento do corte. A tabela 20 mostra os resultados obtidos no ensaio e o tipo de ruptura ocorrido conforme recomendado pela ABNT NBR 14050/1998.

Tabela 20 - Resistência à aderência e classificação dos tipos de ruptura

Amostra	Área (mm²)	Força (kgf)	Força (N)	Resistência (MPa)	Tipo de Ruptura
A1CP1	1963,00	202	1981,01	1,01±0,2	A/B
A1CP2	1963,00	275	2696,93	1,37±0,2	A/B
A1CP3	1963,00	298	2922,49	1,49±0,2	A
A1CP4	1963,00	212	2079,08	1,06±0,2	B
A1CP5	1963,00	201	1971,81	1,00±0,2	A/B
A1CP6	1963,00	255	2500,79	1,27±0,2	B
A1CP7	1963,00	-	-	-	-
A1CP8	1963,00	144	1412,21	0,72±0,2	B
A1CP9	1963,00	197	1931,98	0,98±0,2	A
A1CP10	1963,00	186	1824,10	0,91±0,2	B
MÉDIA		218,89	2146,71	1,09±0,2	
DESVIO PADRÃO		48,131	471,997	0,242	

Fonte: O autor, 2021.

A média aritmética da resistência de aderência das amostras é 0,98 MPa. Os valores obtidos neste ensaio foram um pouco inferiores aos de alguns adesivos utilizados com a mesma finalidade. A resina epóxi bicomponente Viapol Carbon Stuc, por exemplo, tem resistência média de aderência de 2 MPa, segundo ficha técnica do produto. É importante destacar que nos catálogos dos adesivos comumente comercializados no reforço de estruturas de concreto que utilizou-se de comparação com o NVT201E quanto a resistência à aderência, não se descreveram minuciosamente os procedimentos de ensaio. Nesse tipo de experimento a forma com que a superfície que receberá o adesivo é preparada influencia diretamente nos resultados. Portanto esta ausência de informações sobre os procedimentos de colagem dos adesivos difundidos no mercado faz com que essa comparação não possa ser feita com tanta precisão.

CONCLUSÕES

Neste trabalho procurou-se analisar o desempenho do NVT 201E no reforço de estruturas de concreto utilizando laminado de fibra de carbono frente a adesivos comumente comercializados no setor da construção civil. As comparações foram feitas principalmente sobre suas propriedades mecânicas, baseando-se nos experimentos descritos nas fichas técnicas dos adesivos que já são comercializados.

Em uma primeira análise, comparou-se a resistência ao cisalhamento de corpos de prova reforçados com PRFC utilizando os adesivos estruturais NVT 201E e S&P 220. As vigas reforçadas com o adesivo estrutural NVT 201E obtiveram resultados superiores aos obtidos nas vigas reforçadas com o adesivo S&P 220. Além de maior resistência no ensaio de flexão de 4 pontos, as vigas reforçadas com o NVT 201E apresentaram menor descolamento do reforço no momento da ruptura do que as reforçadas com o adesivo utilizado de comparação. Esses resultados favoráveis ao NVT 201E sugeriram que o adesivo pode ser utilizado também para reforço em estruturas de concreto.

Mediante aos bons resultados do NVT 201E no sistema de reforço de estruturas de concreto utilizando laminado de fibras de carbono, e na ausência de normas qualificadoras ou certificadoras deste tipo de sistema, realizaram-se ensaios descritos na ficha técnica do Sikadur®-330, um dos líderes do mercado no Brasil. Compararam-se a resistência à tração, o módulo de elasticidade e o alongamento no momento da ruptura descritos nas fichas técnicas destes dois adesivos. Suas resistência à tração e módulo de elasticidade apresentaram mesma ordem de grandeza, já o alongamento no momento de ruptura apresentou resultados discrepantes. De acordo com os dados disponibilizados pela Sika, fabricante do produto, seu adesivo possui alongamento na ruptura 64,73% inferior ao apresentado pela PIPEFIX, fabricante do NVT 201E. Esta alta deformação do NVT 201E pode ser considerada uma propriedade positiva e que contribui para um menor descolamento do sistema em ensaios destrutivos em corpos de prova de concreto.

Os resultados obtidos no ensaio de aderência utilizando o NVT 201E na interface de ligação entre laminado e concreto foram inferiores aos disponibilizados nas fichas técnicas dos adesivos estruturais comercializados no reforço de estruturas de concreto. No entanto, é importante destacar que nestes catálogos não foram descritos minuciosamente os procedimentos de ensaio, principalmente no que se refere a preparo da superfície do concreto – fator determinante para o desempenho da aderência. Quanto a superfície de fratura do sistema NVT, apesar da falta de medida percentual da área coesiva e adesiva, visualmente podemos

considerar uma boa aderência do NVT à superfície de concreto.

Por fim, considerando os resultados das pesquisas realizadas pelo LAA com o sistema de reforço com materiais compósitos laminados PIPEFIX que utiliza como adesivo estrutural NVT 201E, somados aos resultados encontrados neste trabalho, incentiva-se a continuidade no desenvolvimento de um produto nacional para reforço e reparo de estruturas de concreto.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de futuras pesquisas, seria interessante a realização dos ensaios descritos nas fichas técnicas que não foram realizados neste trabalho (como por exemplo o ensaio de Temperatura de Deflexão ao Calor e Coeficiente de Expansão Térmica). Além disso, deveriam ser elaborados ensaios de resistência à aderência comparando o NVT 201E e adesivos difundidos no mercado (Sikadur[®] - 330, por exemplo).

Recomenda-se também um estudo mais aprofundado sobre as interações físicas e químicas do NVT 201E com o concreto a longo prazo e a microestrutura destes materiais combinados.

Por fim, a realização de ensaios avaliando o efeito escala nos ensaios de flexão e cisalhamento também não foi atestada neste trabalho e estes experimentos poderiam confirmar que o NVT 201E também obteria bons resultados em dimensões que realmente são usuais.

REFERÊNCIAS

- ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *State-of-the-art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures* – ACI 440R-96, Detroit, Michigan, EUA, 1996.
- AÏTCIN, P.C. (2000). *Concreto de alto desempenho*, São Paulo: PINI.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *ACI 440.2R: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. October, 2003. Detroit, 2002
- ANDOLFATO, Rodrigo Piernas. *Controle tecnológico básico do concreto*. Ilha Solteira:[s. N.], 2002.
- 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*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. *Guia básico de utilização do cimento Portland (BT-106)*. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p.
- BANK, L. C. *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- BARSOM, JOHN M., ROLFE, S. T., *Fracture and fatigue control in structures : applications of fracture mechanics*. Prentice-Hall international series in civil engineering and engineering mechanics, West Conshohocken : ASTM. 1999. 516 p.
- BATTAGIN, Arnaldo Forti. *Uma breve história do cimento Portland*. São Paulo: Associação Brasileira de, 2009.
- BEBER, A. J. *Avaliação do desempenho de vigas de concreto armado reforçadas com lâminas de fibra de carbono*. Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1999. 108 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia.
- BEBER, Andriei Jose. *Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono*. 2003.
- BEBER, A. J. *Reforço de estruturas de concreto com compósitos de fibra de carbono*. Porto Alegre: PPGE/UFRGS, 1999. 37 p. Caderno Técnico.
- BERNARDI, Stefania Tesi. *Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar*. 2003.
- BLAKE, A., *Practical Fracture Mechanics in Design*. New York: Marcell Dekker ed. 2005. 437 p.
- CABRAL-FONSECA, S. et al. Durability of FRP - concrete bonded joints in structural rehabilitation: A review. *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, [s.l.], v. 83, p.153-

167, jun. 2018.

CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CALLISTER, W. D. *Materials Science and Engineering*. Nova York: Ed. John Wiley & Sons. Inc, 1997.

CEB – FIB. Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures. Bulletin 14. Technical Report. Julho, 2001.

CHAJES, M. J.; JANUSZKA, T. F.; MERTZ, D. R.; THOMSON, T. A. (1996). Bond and force transfer of composite material plates bonded to concrete. *Concrete International*, Detroit, ACI, v.93, n.2, p.208-217, mar-apr. 1996.

CIMENTO.ORG. *O mundo do cimento*. Disponível em: <https://cimento.org/>. Acesso em: 18 fev. 2020.

CORRÊA, A. C. A. *Estudo do desempenho dos aditivos plastificantes e polifuncionais em concretos de cimento portland tipo CPIII-40*. 2010. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2010.

DAMBROT, S. M. American Chemical Society. 2016. Disponível em: <<https://www.acs.org/content/acs/en/education/resources/highschool/chemmatters/past-issues/2015-2016/april-2016/salt-facts.html>>. Acesso em: 25 out. 2018.

DA SILVA, Romário Aurélio Pereira. Determinação da relação água/cimento utilizando microondas. 2005.

DE LORENZIS, L.; TENG, J. G. *Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures*. Composites: Part B, 38, Available online 18 October 2006. www.sciencedirect.com/locate/compositesb

EHN Tecnologia do Concreto. Disponível em: <https://sites.google.com/site/ehntecnologiadoconcreto>. Acesso em: 25 fev. 2020.

ERDOGAN, F., FISHER, J. W., WEI, R. P., ROBERTS. R., YEN, B. T., Fracture research in retrospect : an anniversary volume in honour of George R. Irwin's 90th birthday / edited by H.P. Rossmanith. Rotterdam, Brookfield, VT: Balkema, 1997. p. 217-226.

ERHARDT, T; BLUMCKE, A.; BURGER, W.; MARKLIN, M.; QUINZLER, G. Curso Técnico Têxtil, São Paulo: EPU, v.1,2,3, 1975.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (2001). FIB 2001: Externally bonded FRP reinforcement for RC Structures. Lausanne, 2001 (Bulletin 14).

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (2001). FIB 2001: Externally bonded FRP reinforcement for RC Structures. Lausanne, 2001 (Bulletin 14).

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. Structural Concrete: Textbook on

behaviour, design and performance. Lausanne, 1999 (Bulletins 1, 2,3).

FERNÁNDEZ PÉREZ, Ailín. Reforço de vigas ao cisalhamento com compósito de fibra de carbono (PRFC). 2016.

FERRANTE, Maurizio. Seleção dos Materiais de Construção Mecânica: estratégias e metodologia básica. Simpósio Matéria, 2000.

FERRARI, Vladmir José; PADARATZ, Ivo José. *Modos de preparação da superfície de concreto de vigas para execução de reforço à flexão com fibras de carbono*. Iniciação Científica Cesumar, v. 6, n. 1, p. 45-51, 2007.

FERRARI, Vladmir José. *Reforço à flexão de vigas de concreto armado com manta de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) aderido a Substrato de transição constituído por compósito Cimentício de alto desempenho*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2007.

FERRARI, V.J. (2002). *Reforço à flexão em vigas de concreto armado com manta de fibra de carbono: mecanismos de incremento de ancoragem*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2002.

FERREIRA, D. S. S.; *Avaliação do comportamento mecânico de vigas de concreto com falha crítica reforçadas com compósito laminado de fibra de carbono*. Dissertação (Mestrado). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2019.

FERREIRA, Luiz Eduardo Teixeira; HANAI, João Bento de. *Mecânica da Fratura. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, IBRACON, 2007.

FLATT, Robert J.; BOWEN, Paul. Electrostatic repulsion between particles in cement suspensions: Domain of validity of linearized Poisson–Boltzmann equation for nonideal electrolytes. *Cement and concrete Research*, v. 33, n. 6, p. 781-791, 2003.

FORTES, Adriano Silva et al. *Vigas de concreto armado reforçadas com fibras de carbono*. 2000.

GIBSON, R.F., *Principles of Composite Materials Mechanics*. McGraw Hill, N.Y., 425p.,1994.

GONZÁLEZ, Ricardo V. B. *Rugosidade Superficial – Uma abordagem prática*. Mitutoyo, São Paulo, 1998.

GORDON, J. E., *The new science of strong materials*, 2ed. England, UK: Penguin, 1976.

HAACH, Vladimir G.; VASCONCELOS, Graça; LOURENÇO, Paulo B. Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 6, p. 2980-2987, 2011.

HELENE, P. R. L. Ensaios para controle de adesivos epóxi destinados a estruturas de concreto. *Revista A Construção São Paulo*. São Paulo,1995, IPT, ed. 3, 8 p.

HELENE, P. R. L. *Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto*. 2 ed. São Paulo: Ed. Pini, 1992. p. 10-28.

HILLERBORG, Arne. The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_F of concrete. *Materials and structures*, v. 18, n. 4, p. 291-296, 1985.

IRWIN, G.R., Analysis of stress and strain near the end of a crack traversing a plate. *Journal of Applied Mechanics*, vol. 24, 361-364. 1957.

IRWIN, G. R., KIES, J. A., Critical energy rate analysis of fracture. *Welding Journal Research Supplement*, vol. 33, pp. 193–198. 1954.

IRWIN G. R., KIES, J. A., Fracturing and Fracture Dynamics. *Welding Journal Research Supplement*, vol. 31, pp. 95–100. 1952.

ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). *Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais*. Ibracon, 2007.

JUVANDES, L. (1999). *Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de “CFRP”*. 400p. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Departamento de Engenharia Civil, Porto. 1999.

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

KERN, A.P. *Estudo da Viabilidade da Incorporação de Resíduos de Contrafortes de Calçados em Matriz de Gesso para Uso como Material de Construção Civil*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 1999.

KHALIFA, A.; NANNI, A. Rehabilitation of Rectangular Simply Supported RC Beams with Shear Deficiencies using CFRC Composites. *Construction and Building Materials*, Vol. 16, Apr. 2002.

KLAIBER, F. W.; DUNKER, K. F.; WIPF, T. J.; SANDERS JR., W. W. Methods of strengthening existing highway bridges. Transportation Research Record no 1180. Transportation Research Board, Washington, D.C., 1987.

KONRAD, R. M. (2003). *Os primórdios da resina epóxi*. *Revista Pisos Industriais*. Disponível em: <<http://www.pisosindustriais.com.br/materias/noticia.asp?ID=39>>. Acesso em: 27 dez. 2019.

LANDMAN, R. (2001). Inspeções de obras-de-arte especiais rodoviárias: abordagem crítica. Apresentado na 4ª Conferência Anual IBC – “Melhores práticas e novas tecnologias para construção, manutenção e recuperação de pontes, túneis e viadutos”, São Paulo, 2001.

LEBRAO, Guilherme Wolf. Fibra de carbono. *Revista Plástico Sul*, n. 91, p. 34-5, 2008.

LEVY NETO, Flaminio Levy; PARDINI, Luiz Claudio. *Compósitos estruturais: ciência e tecnologia*. Editora Blucher, 2016.

LIEBOWITZ, H., Fracture, an advanced treatise. H. Liebowitz (ed). New York: *Academic Press, Fracture Design of Structure vol V*. 1968. 525 p.

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

MACEDO, L.; COSTA, Inês; BARROS, Joaquim AO. Avaliação da influência das propriedades de adesivos e da geometria de laminados de fibra de carbono no comportamento de ensaios de arranque. In: *Betão Estrutural*. 2008.

MACHADO. A. P.; *Fibra de Carbono* ed. BASF The Chemical Company, 2006.

MACHADO, Ari de Paula. *Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono*. Belo Horizonte, 2002.

MALLICK, P. K.. *Fiber reinforced composites: Materials, Manufacturing, and Design*. 3. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2008.

MARAGON, Ederli. *Aspectos do comportamento e da degradação de matrizes de concreto de cimento portland reforçados com fibras provenientes da reciclagem de garrafa pet*, v. 16, 2016.

MARINI, Marcio Vinicius et al. *Avaliação da aderência entre o concreto e o sistema de reforço com fibra de carbono*. 2011.

MATISSE, *Reforço e recuperação de estruturas*. Disponível em: <http://reforcodeestruturas.com.br>. Acesso em: 22 jan. 2020.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: Microstructure, properties, and materials*. 3. ed. Berkeley: Mcgraw-hill Companies, 2005.

MANO, E.B. *Polímeros como materiais de engenharia*. São Paulo: Edgar Blucher, 2 ed., 2000.

MBRACE, T. M. *Composite Strengthening System, Engineering Design Guideline*. Master Builders Technologies, Inc., Cleveland, OH, 1998.

McCORMAC, J. C. *Design of reinforced concrete*. Menlo Park: Addison Wesley Longman, 1998. 726 p.

MENDOÇA, PAULO DE TARSO R. *Materiais Compostos e Estruturas – Sanduíche: projeto e análise*. Barueri, São Paulo, Manole, 2005.

MENEGHETTI, Leila Cristina. *Análise do comportamento à fadiga de vigas de concreto armado reforçadas com PRF de vidro, carbono e aramida*. 2007.

MOLINA, J. L. *Refuerzo a flexión de vigas de hormigón mediante polímeros reforzados con fibra de carbono*. 2012. Trabajo fin de Máster (Máster en Edificación. Especialidad Tecnología de la Edificación) – Valencia, Diciembre 2002.

MOREIRA, Anabela Mendes. *Materiais compósitos*. Área de construção, 2009.

MORRIS COHEN (Editor) e JOSÉ ROBERTO GONÇALVES DA SILVA (Tradutor); *Ciência*

e engenharia de materiais: sua evolução, prática e perspectivas. Parte II: A ciência e engenharia de materiais como uma multidisciplinária, Segunda edição, UFSCar, São Carlos, 1987.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Concrete Technology*. 2. ed. Harlow: Pearson, 2010.

NEVILLE, Adam M. *Propriedades do Concreto-5ª Edição*. Bookman Editora, 2015.

PEDROSO, Fábio Luís. *Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem*. Concreto & Construções, São Paulo, n. 53, p.14-19, jan. 2009.

PETRUCCI, Eladio G. R. *Concreto de cimento Portland*. São Paulo: Globo, 1998.

REDDY, J. N.; MIRAVETE, A. *Composite laminates*. Boca Raton: Taylor & Francis, 1995.

REIS, Lilia Silveira Nogueira. *Sobre a recuperação e reforço das estruturas de concreto armado*. 2001.

ROSSMANITH, H. P., *Fracture research in retrospect : an anniversary volume in honour of George R. Irwin's 90th birthday / edited by H.P. Rossmannith*. Rotterdam, Brookfield, VT: Balkema, 1997. p. 37-94.

SALLABERRY R. D. *Limite de deformação das fibras de carbono usadas no reforço à flexão de vigas de concreto armado*. Rio Janeiro, 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 14 p.

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

SILVA. A. O. B. *Reforço à flexão de vigas de concreto de elevada resistência por meio da colagem de manta polimérica reforçada com fibras de carbono*. Campinas, 2001. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 169 p.

SILVA, F. P. da. *O uso da digitalização tridimensional a laser no desenvolvimento e caracterização de texturas aplicadas ao design de produtos*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica, e de Materiais – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. PPGEM/UFRGS. Porto Alegre. 2006.

SILVA, L. F. M. da; MAGALHÃES, A. G. de; MOURA, M. F. S. F. de. *Juntas Adesivas Estruturais*. Porto: PubIndústria, 2007.

SILVA, Ramon Luiz Rodrigues Macário da. *Estudo do desempenho térmico e mecânico de adesivo epóxi modificado com nanotubos de carbono e grafeno*. 2018. 134 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2018.

SMITH, William F.; HASHEMI, Javad. *Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais*. AMGH Editora, 2013.

SOUZA, V. C., RIPPER, T. *Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto*. 1 ed. São Paulo: Ed. Pini, 1998. 255 p.

SPECHT, L. P. *Comportamento de Misturas Solo-Cimento-fibra submetidas a Carregamentos Estáticos e Dinâmicos Visando a Pavimentação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS. 2000.

STEPHEN KURTZ P.E; BALAGURU P; HELM J. Experimental Study of Interfacial Shear Stresses in FRP-Strengthened RC Beams. *Journal of Composites for Construction*, vol 12, nº 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*, vol 74, pp. 578-594 - 2007.

SWAMY, R.N. MANGAT, P.S.: RAO, C.V.S.K. The mechanics of fiber reinforcement of cement matrices. An International Symposium: Fiber Reinforced Concrete. Canadá: 1974. Detroit, ACI, 1974. p. 1-27

TANESI, J.: AGOPYAN, V. Compósitos reforçados com fibras plásticas para construção civil. II Encontro Tecnologia de Sistemas Plásticos na Construção Civil. EPSP. São Paulo, 1997.

TAYLOR, G. *Materials in construction*. 2.ed. London: Longman Scientific & Technical, 1994. 284p.

TENG, J.G, CHEN, J.F, SMITH, S. T, LAM, L. *FRP Strengthened RC structures*. West Susses, England: John e Wiley & Sons, 245 pp, 2002.

TIBONI, Rafaelle. *A utilização da cinza da casca de arroz de termoelétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento Portland*. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

VENTURA, Ana Mafalda FM. Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, v. 21, n. 3-4, p. 10-19, 2009.

WINSLOW D.;LIU D. The pore structure of paste in concrete. *Cement and Concrete research*. vol.20, pp 227-235 - 1989.

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

YIN, Y.; FAN, Y. Influence of Roughness on Shear Bonding Performance of CFRP-Concrete Interface. *Materials*, [s.l.], v. 11, n. 10, p.1875-1890, out. 2018.

ZHAO HM.; WANG SG.; WU ZM.; CHE GJ; Concrete slab installed with carbon fiber heating wire for bridge deck deicing. *Journal of transportation engineering-ASCE*. vol. 136 pp. 500-509 – 2010.