

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Gláucia Maria Dalfré¹
Guilherme Aris Parsekian²

1.1 USO DE FRPs NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Nos últimos anos, questões voltadas ao reparo e reforço de elementos de concreto armado estão cada vez mais comuns. A ação do intemperismo, a ausência de inspeção regular e de manutenções preventivas, os erros de projeto e de construção, as mudanças de utilização, a alteração de normas e códigos – após a realização do dimensionamento, com imposições mais severas do que as anteriormente em vigor exigiam –, são algumas das causas que contribuem constantemente para o aumento das questões voltadas para o reforço (aumento da capacidade resistente para o qual o elemento havia sido projetado) e reparo (reposição das condições normais de suporte e desempenho) de elementos estruturais.

Diversas pesquisas foram realizadas para o desenvolvimento de novas tecnologias que tornem as estruturas mais eficientes e seguras. Nesse sentido, os elementos estruturais podem ser reforçados com o uso de diversos sistemas, tais como o baseado no aumento da seção transversal (encamisamento) com concreto armado, perfis metálicos ou chapas de aço externamente coladas ao concreto, protensão, aço-memória, concreto ou argamassa reforçada com materiais têxteis (TRC/TRM, *Textile Reinforced Concrete or Mortar*) ou com os polímeros reforçados, ou estruturados, com fibras (PRFs ou FRPs, *Fiber Reinforced Polymers*).

O reforço pelo aumento da seção transversal com concreto, argamassa ou graute é mais indicado em situações em que o concreto está danificado, podendo ser aplicado em regiões comprimidas ou tracionadas. É muito eficiente no incremento da capacidade de carga, da rigidez e da ductilidade do elemento reforçado. A Figura 1.1 apresenta diferentes configurações de reforço com o uso da técnica de aumento de seção. Como principais desvantagens podem-se citar possíveis limitações arquitetônicas (devido ao aumento nas dimensões da seção transversal

1 Professora da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

2 Professor da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

do elemento reforçado), aumento do peso próprio do elemento reforçado e do tempo necessário para a cura do concreto.³

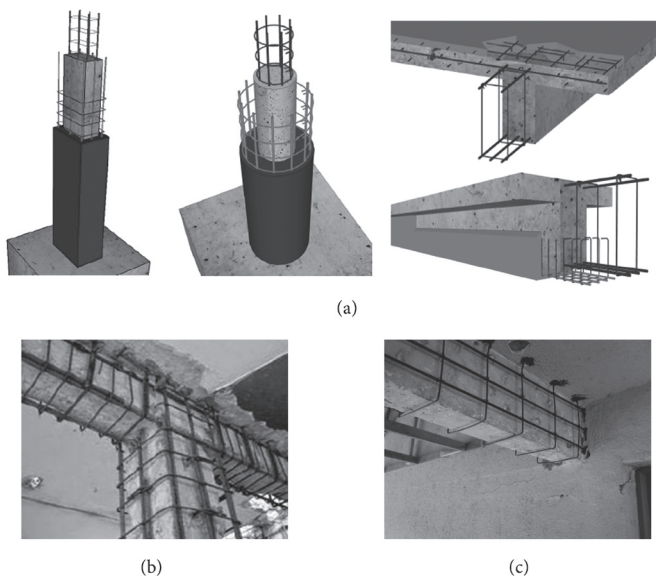


Figura 1.1 Reforço por aumento de seção com adição de concreto armado.

Fonte: (a) Chastre, (b) Intech Engenharia, (c) Queiroz Góis Engenharia e Construções.⁴

A técnica de reforço por colagem de chapas ou de perfis metálicos na superfície de concreto do elemento tem como principal vantagem, em relação à técnica de reforço por aumento da seção transversal, alterações mais discretas nas dimensões da seção transversal do elemento reforçado. As desvantagens deste sistema são a corrosão dos materiais metálicos, o alto peso do aço (o que pode dificultar a manipulação e o posicionamento do material de reforço), a limitação dos tamanhos comercialmente encontrados (o que pode causar a necessidade de emendas), a planicidade do substrato de concreto (no caso de chapas metálicas aderidas) e a necessidade de escoramento conforme o *FIB Bulletin 14*.⁵ Cita-se também o aspecto estético no uso dos perfis metálicos aderidos ou fixados aos elementos de concreto armado. A Figura 1.2 apresenta diferentes configurações do sistema de reforço por colagem de chapas com resina epoxídica ou uso de perfis metálicos.

³ Chastre (2014).

⁴ Id. *ibid.*, Intech Engenharia (2020), Queiroz Góis Engenharia e Construções (2020).

⁵ FIB (2001).

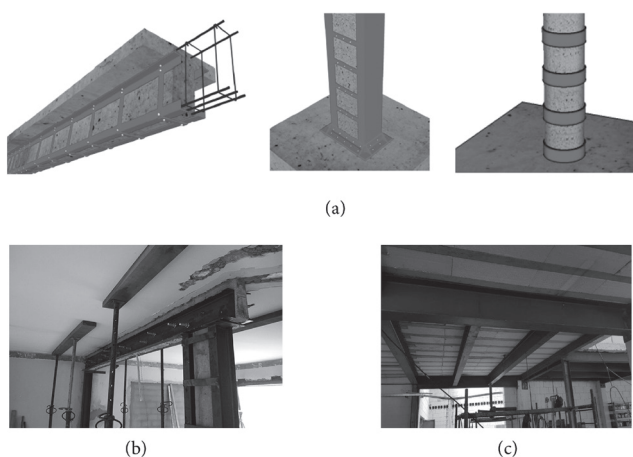


Figura 1.2 Reforço por colagem de chapas (a) ou perfis metálicos (b-c).

Fonte: (a) Chastre, (b) JEE Engenharia, (c) JB Estruturas Metálicas.⁶

Em adição aos métodos tradicionais de reforço de elementos de concreto armado, o sistema baseado no uso de FRPs vem ganhando espaço na construção civil.

Os FRPs são compósitos com elevada resistência à tração, com módulos de elasticidade adaptáveis às necessidades do projeto, neutralidade eletromagnética, resistência à corrosão e baixo peso próprio, trazendo vantagens para seu uso em sistemas de reforço de estruturas.

A facilidade de aplicação do sistema de reforço, as poucas alterações na geometria da seção transversal do elemento reforçado e o aumento ínfimo no peso próprio da estrutura são outros fatores que tornam os FRPs uma alternativa cada vez mais presente no reforço de estruturas de concreto armado na construção civil. Além disso, os FRPs são encontrados comercialmente em vários tamanhos e geometrias e podem ser moldados em diferentes formas nos sistemas pré-curados ou curados *in situ*, o que garante aos FRPs grande versatilidade de utilização no reforço de elementos estruturais em concreto, como vigas, lajes e pilares. A Figura 1.3 apresenta diferentes aplicações de FRPs no reforço de elementos estruturais de concreto armado segundo as técnicas EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) e NSM (*Near Surface Mounted*).

⁶ Chastre (2014), JEE Engenharia (2020), JB Estruturas Metálicas (2020).

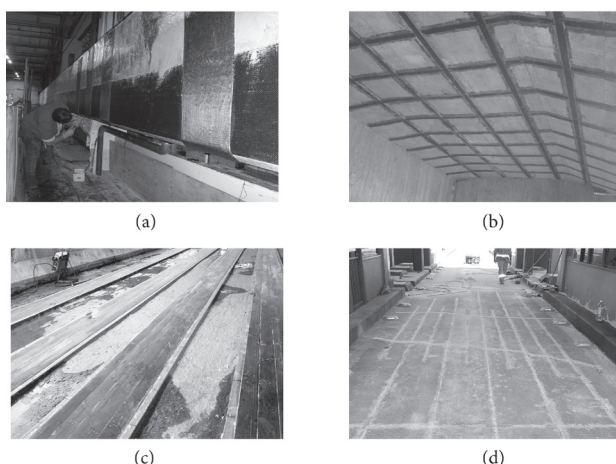


Figura 1.3 Reforço com compósitos de FRPs segundo a técnica EBR (a-c) e NSM (d).

Fonte: (a-b-d) S&P Clever Reinforcement Brasil, (c) Mc-Bauchemie.⁷

Os primeiros registros de utilização de compósitos datam do período pós-Segunda Guerra Mundial em aviões de caça britânicos, os *Spitfire*. Posteriormente, a utilização dos compósitos à base de FRP cresceram exponencialmente nas indústrias naval e aeronáutica.⁸ Entretanto, segundo Tavares,⁹ a introdução dos compósitos de FRP no âmbito da construção civil foi um processo moroso. Em meados da década de 1950 surgiram as primeiras aplicações de FRPs na Engenharia Civil.

Para demonstrar a versatilidade de uso dos plásticos modernos, a Monsanto e o MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) desenvolveram a *House of the future*, atração no *Tomorrowland* da Disneylândia, em Anaheim, Califórnia, a qual ficou aberta para visitas de 1957 a 1967 (Figura 1.4). Na construção foram utilizados 30 mil quilos de poliéster reforçado com fibra de vidro sob a forma de painéis-sanduíche, tapetes e mobiliário.

Nos Estados Unidos, algumas pesquisas sobre o tema foram iniciadas na década de 1960, e depois foi a vez da Europa e do Japão, nos anos 1970, investirem em pesquisas envolvendo os FRPs aplicados na construção civil.

⁷ S&P Clever Reinforcement Brasil (2020), Mc-Bauchemie (2020).

⁸ Couto (2007).

⁹ Tavares (2006).

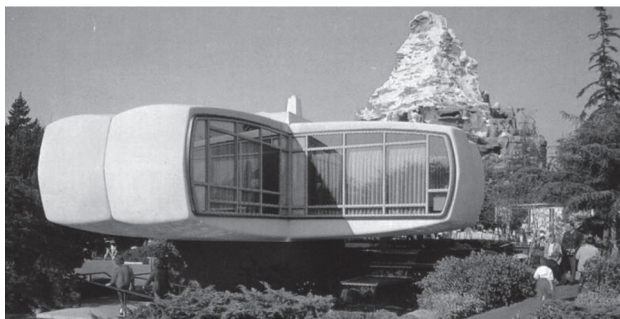


Figura 1.4 *House of the future.*

Fonte: Dalfré.¹⁰

Em 1974, em Lancashire, na Inglaterra, foi construído um edifício (Figura 1.5) em que toda a estrutura utilizava polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP, *Glass Fiber Reinforced Polymer*).



Figura 1.5 Estrutura em GFRP.

Fonte: Dalfré.¹¹

Contudo, foi somente no final da década de 1980, com o avanço tecnológico e o aumento da produção, que as pesquisas passaram a surtir resultado e os custos envolvendo a aplicação do material compósito na construção civil começaram a reduzir. Assim, os FRPs ganharam a atenção de pesquisadores e investidores de todo o mundo que estavam em busca de técnicas para combater os problemas de corrosão em armaduras de aço de forma eficiente e com baixo custo.

¹⁰ Dalfré (2007).

¹¹ Id. *ibid.*

1.2 FRPs (FIBER REINFORCED POLYMERS)

Materiais compósitos são materiais constituídos por dois ou mais componentes macroscópicos cujo produto da união destes apresenta propriedades superiores às propriedades individuais de cada componente. Neste sentido, os FRPs são materiais compostos de uma matriz polimérica (resina) que envolve fibras de alta resistência. A matriz polimérica confere forma ao compósito, garante proteção à abrasão e a transferência de forças entre fibras, enquanto as fibras conferem resistência e rigidez aos FRPs.¹² A Figura 1.6 ilustra a composição básica dos FRPs.

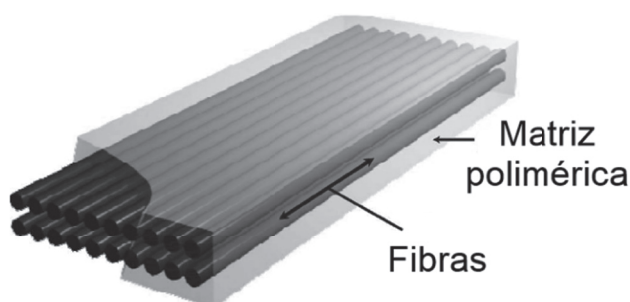


Figura 1.6 Componentes dos FRPs.

Fonte: adaptada de ISIS.¹³

Segundo o *FIB Bulletin* 40,¹⁴ os FRPs podem ser encontrados comercialmente em diferentes configurações, como em mantas ou tecidos de fibra para aplicação em sistemas curados *in situ* (por exemplo, os utilizados na técnica de reforço EBR, Figura 1.7a), em barras (para substituição das barras de aço convencionais ou para uso na técnica de reforço NSM, Figura 1.7b) ou ainda em chapas, laminados ou perfis pré-fabricados (Figura 1.7c).

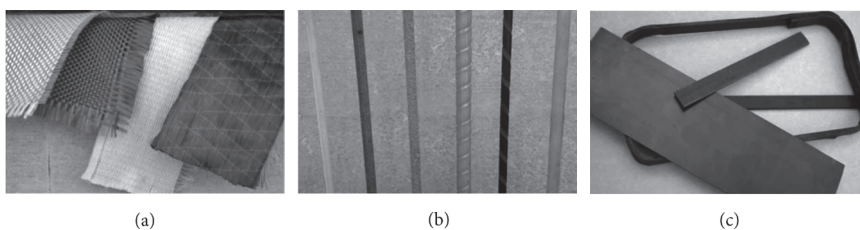


Figura 1.7 Apresentação dos FRPs comercialmente disponíveis.

Fonte: *FIB Bulletin* 40.

¹² ISIS (2006).

¹³ Id. (*apud* OLIVEIRA, 2019).

¹⁴ FIB (2007).

1.2.1 MATRIZ POLIMÉRICA

A matriz polimérica não influencia majoritariamente na resistência à tração do compósito. Contudo, quando o FRP está submetido à compressão, a resina reduz a ocorrência de flambagem das fibras.

As principais características esperadas das resinas a serem utilizadas para reforço são resistência aos esforços cisalhantes, envolvimento e aglutinação das fibras (de modo a garantir a transferência de tensões entre elas), garantia de perfeita transmissão de tensões entre o substrato de concreto e as fibras do FRP e proteção contra agressões ambientais e desgastes, a fim de permitir uma conveniente durabilidade e aplicabilidade ao compósito.¹⁵

A matriz polimérica do FRP pode ser classificada em dois tipos: as termorrígidas e as termoplásticas. Polietileno, poliestireno ou metacrilato de polimetila são exemplos de resinas termoplásticas, que possuem vantagens em relação às termorrígidas por serem mais resistentes a impactos e microfissuração. Contudo dispõem de maior viscosidade, o que dificulta a impregnação das fibras, e podem ser repentinamente fundidas quando aquecidas. As resinas termorrígidas apresentam endurecimento irreversível e, dessa forma, não se fundem quando aquecidas, degradando-se sob efeito de temperaturas elevadas. Entre as resinas termorrígidas citam-se epóxi, fenol, poliéster, poliuretano e silicone, e as propriedades físicas e mecânicas de alguns tipos de resinas são apresentadas na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 Propriedades das resinas termorrígidas mais utilizadas na produção de FRPs.

Propriedade	Resina		
	Poliéster	Éster vinílico	Epóxi
Densidade (g/cm ³)	1,1-1,4	1,1-1,3	1,2-1,3
Temperatura de transição vítrea (°C)	100,0	110,0	120,0
Resistência à tração (MPa)	34,5-103,5	73,0-81,0	55,0-130,0
Módulo de elasticidade (MPa)	2,1-3,4	3,0-3,3	2,8-4,1
Alongamento (%)	2,5	6,0	8,0

Fonte: adaptada de ISIS.¹⁶

Das resinas supracitadas, as do tipo epoxídicas são as mais utilizadas em aplicações de FRPs na engenharia civil por serem mais duráveis, se comparadas com o poliéster e éster vinílico, embora apresentem maior custo.

Entre as principais vantagens estão a alta resistência à corrosão, a baixa retração durante a cura (o que garante boas características de ligação se usadas como adesivos, podendo ser aplicadas em grandes áreas apenas com a pressão de contato), baixa viscosidade (sendo de fácil aplicação e saturação dos fios de

¹⁵ *Idem*.

¹⁶ ISIS (2006).

forma alinhada) e baixa fluência. Além disso, quando comparadas a outros tipos de resinas poliméricas, são menos afetadas quando submetidas ao aquecimento ou quando submersas.¹⁷

A Figura 1.8 apresenta um exemplo de moldagem de resinas epoxídicas seguindo as recomendações da norma ISO 527-2,¹⁸ enquanto a Figura 1.9 apresenta o ensaio e um exemplo do comportamento obtido por meio de ensaio de tração uniaxial.

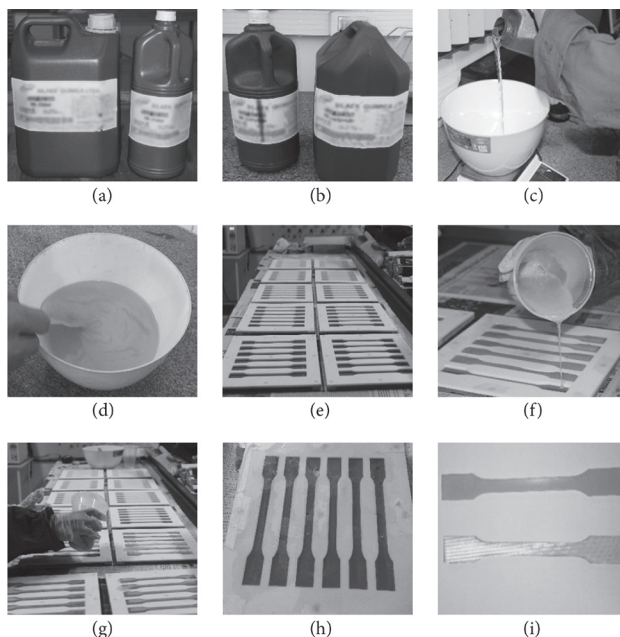


Figura 1.8 Etapas de confecção dos corpos de prova: resinas bicomponentes (a) *primer* e (b) saturação; (c) pesagem dos componentes em balança de precisão; (d) aspecto final da mistura mecanicamente realizada; (e) moldes de teflon utilizados na moldagem dos corpos de prova; (f-g) lançamento da resina nos moldes de silicone; (h) corpos de prova após 24 horas de lançamento das resinas; (i) aspecto final.

Fonte: Escobal e Dalfré.¹⁹

¹⁷ Carneiro e Teixeira (2008), FIB (2001).

¹⁸ ISO (2012a).

¹⁹ Escobal e Dalfré (2017).

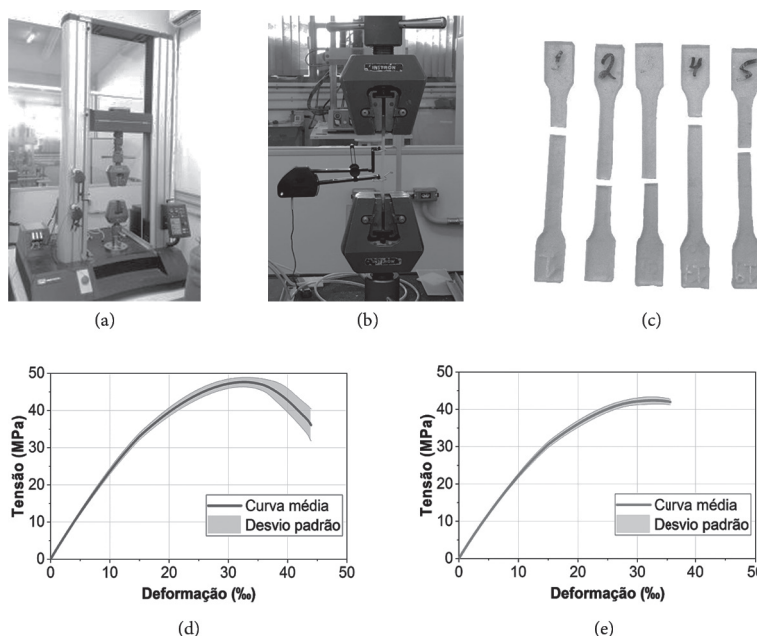


Figura 1.9 Arranjo de ensaio (a-b), aspecto final dos corpos de prova de resina epoxídica após o ensaio (c) e diagramas tensão *versus* deformação da resina tipo *primer* (d) e saturação (e) ensaiadas com idade de 14 dias.

Fonte: (a-c) Escobal e Dalfré, (d-e) Oliveira.²⁰

1.2.2 FIBRAS

Segundo o *FIB Bulletin* 90,²¹ as fibras disponíveis para produção dos FRPs são as de carbono (CFRP, *Carbon Fiber Reinforced Polymer*), vidro (GFRP, *Glass Fiber Reinforced Polymer*), aramida (AFRP, *Aramid Fiber Reinforced Polymer*), basalto (BFRP, *Basalt Fiber Reinforced Polymer*) e SFRP (*Steel Fiber Reinforced Polymer*).

A Tabela 1.2 apresenta as propriedades mecânicas das fibras contínuas normalmente usadas nos sistemas de reforço, enquanto a Figura 1.10 apresenta o comportamento típico de diferentes tipos de fibras quando ensaiadas à tração uniaxial.

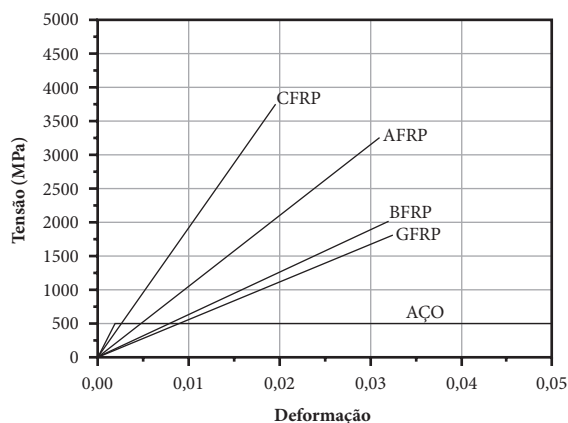
²⁰ Id. *ibid.*, Oliveira (2019).

²¹ FIB (2019).

Tabela 1.2 Propriedades das fibras de carbono, vidro, aramida, basalto, aço e naturais.

	Tipo de fibra	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão última à tração (MPa)	Deformação última mínima (‰)
Carbono	Alta resistência	215-235	3.500-4.800	14-20
	Ultra-alta resistência	215-235	4.800-6.000	20-23
	Alto módulo	350-500	2.500-3.100	5-9
	Ultra-alto módulo	500-700	2.100-2.400	2-4
Vidro	E	70	1.900-3.000	30-45
	S (AR)	85-90	3.500-4.800	45-55
Aramida	Baixo módulo	70-80	3.500-4.100	43-50
	Alto módulo	115-130	3.500-4.000	25-35
Basalto	Uso geral	80-90	2.500-3.200	30-35
Aço	Uso geral	185	3.070	17
Natural	Cânhamo	30-70	500-700	2,0-4,0
	Linho	30-40	500-1.500	2,5-3,5
	Kenaf	30-50	500-900	1,5-2,0

Fonte: adaptada de *FIB Bulletin 90*.

**Figura 1.10** Diagramas tensão *versus* deformação de compósitos à base de fibras e aço.

Fonte: adaptada de *FIB Bulletin 90*.²²

Pela análise da Tabela 1.2 e da Figura 1.10, percebe-se que os FRPs apresentam comportamento elástico linear até à ruptura do material e geralmente podem desenvolver tensões de tração muito superior à do aço. De acordo com a ACI 440.1R,²³ os FRPs atingem a tensão última sem apresentar patamar de escoamento, exibindo comportamento elástico linear e ruptura frágil. Note-se que a resis-

²² *FIB Bulletin 90* (2019 *apud* SARTI JUNIOR, 2020).

²³ ACI (2015).

tência e a rigidez de um FRP são intrinsecamente relacionadas com o tipo de fibra utilizada na confecção do compósito.

As fibras utilizadas em sistemas de reforço podem ser encontradas em diversas formas, como feixes de filamentos contínuos quase paralelos não torcidos (*rovings*) ou torcidos (*yarns*) e na forma de fibras curtas (*chopped*). Geralmente, as fibras utilizadas em FRPs na construção civil para reforço são compostas de filamentos contínuos com alta resistência à tração e rigidez.

As mantas de fibras utilizadas no reforço de estruturas normalmente possuem fibras dispostas de maneira unidirecional, aplicadas de forma a combater as solicitações de tração em uma determinada direção. Entretanto, também é possível encontrar fibras orientadas em duas direções ortogonais (bidirecionais, geralmente $0^\circ/90^\circ$ ou $+45^\circ/-45^\circ$), triaxiais (geralmente $0^\circ/+45^\circ/-45^\circ$) ou multidirecionais (Figura 1.11). Estas formas podem ainda ser combinadas, resultando em produtos têxteis contendo fibras de reforço contínuas direcionadas e fibras curtas ou contínuas dispostas aleatoriamente. Dependendo das direções preferenciais das fibras, o comportamento do FRP poderá ser anisotrópico, ortótropo ou quase isotrópico.²⁴

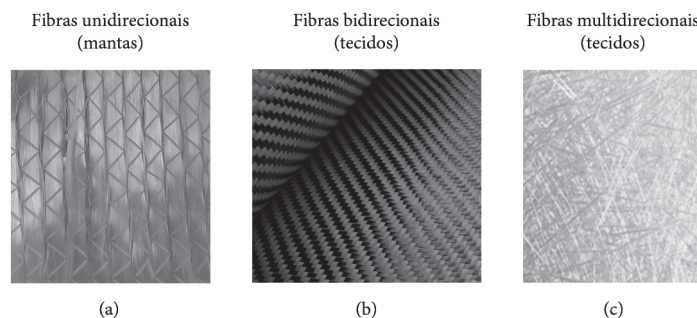


Figura 1.11 Principais direções das fibras utilizadas em sistemas de reforço.

Fonte: (a) elaboração própria, (b) *Made-in-China*, (c) Escobal e Dalfré.²⁵

Para Juvandes,²⁶ as fibras mais utilizadas para as técnicas de reforço são apresentadas com as seguintes disposições:

- Unidirecional, com orientação a 0° , disponíveis na forma de folhas com espessuras que variam de 0,1 a 0,2 mm e larguras entre 25 e 30 cm, comumente conhecidas como mantas (*sheets*);
- entrelaçadas, com orientação bidirecional 0° e 90° , as quais recebem o nome de tecidos (*fabrics*); e
- multidirecionais, com largura de aproximadamente 60 cm, cuja porcentagem de fibras em sua composição é indicada por meio do peso

²⁴ Carneiro e Teixeira (2008).

²⁵ *Made-in-China* (2020), Escobal e Dalfré (2017).

²⁶ Juvandes ([2011] 2018).

do produto por metro quadrado (g/m^2). Tais disposições são apresentadas na Figura 1.12.

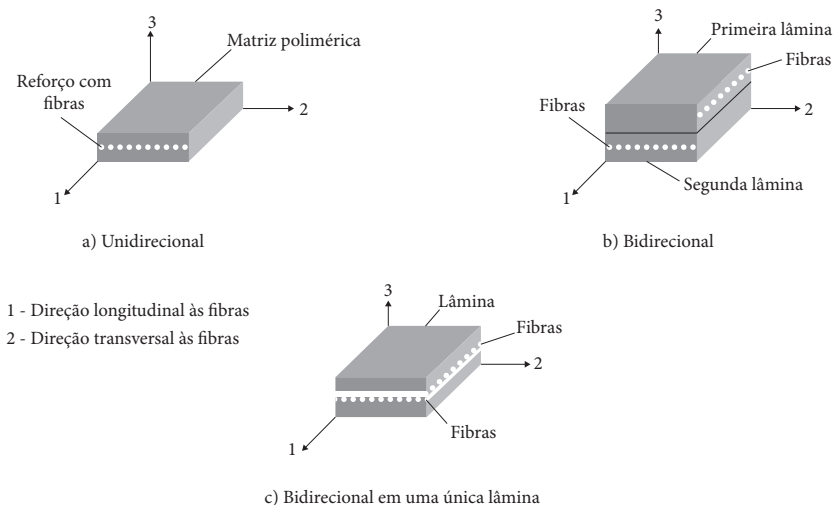


Figura 1.12 Representação esquemática do FRP.

Fonte: adaptada de Micali.²⁷

1.2.2.1 Fibra de carbono

As fibras de carbono são as que apresentam maiores valores de resistência à tração e módulo de elasticidade, além de serem mais leves em comparação com a fibra de aramida e a de vidro. As fibras de carbono também apresentam excelente resistência à degradação por agentes ambientais, a efeitos térmicos e químicos. Contudo, são mais caras que as fibras de vidro.²⁸

As fibras de carbono utilizam como matéria-prima o *pitch* (usando alcatrão ou alcatrão de ulha por extrusão em finos orifícios e estabilizadas por aquecimento) ou o PAN (produzidas a partir da poliacrilonitrila, que é carbonizada por diferentes tratamentos térmicos).

Posteriormente tem-se o processo de conformação em forma de laminados, barras ou perfis pelo processo de extrusão. As fibras são impregnadas em um tanque de resina, esticadas e moldadas numa matriz aquecida que conforma e realiza a cura da resina.

Nos sistemas curados *in situ* as fibras de carbono são dispostas em fios, mantas ou tecidos e a produção do compósito de FRP é realizada no local de

²⁷ Micali (2010 *apud* Mazzú, 2020).

²⁸ ISIS (2006).

aplicação do sistema de reforço. Para tanto é realizada a impregnação da fibra de carbono com a resina de saturação e, posteriormente, ela é posicionada sobre um adesivo epoxídico previamente aplicado (*primer*) no substrato de concreto do elemento a ser reforçado. Desta forma, somente após a cura total da resina é que se obtém o material compósito.

1.2.2.2 Fibra de aramida

As fibras de aramida são compostas de materiais orgânicos aromáticos sintéticos e possuem como vantagem a baixa densidade, condutibilidade elétrica e retração. Estas fibras são menos usuais na construção civil e possuem custo e propriedades mecânicas intermediárias às das fibras de carbono e vidro, porém degradam-se quando expostas aos raios ultravioletas.²⁹

1.2.2.3 Fibra de vidro

As fibras de vidro são indicadas em sistemas de reforço ou em substituição às armaduras convencionais por combinarem custo relativamente baixo com alta resistência mecânica e bom desempenho quando submetidas a esforços dinâmicos. Em contrapartida, possuem como principal desvantagem um baixo módulo de elasticidade em relação às fibras de carbono e aramida, assim como baixa resistência à umidade e ambientes alcalinos. Além disso, são suscetíveis à ruptura por fluência.³⁰

As fibras de vidro podem ser classificadas em diferentes tipos, dependendo de sua composição química, podendo ser confeccionadas a partir de misturas baseadas em sílica e adições de óxidos de cálcio, boro, sódio, ferro e alumínio.³¹ A Tabela 1.3 apresenta os tipos de fibras de vidro atualmente disponíveis.

As fibras de vidro do tipo E apresentam grande quantidade de ácido bórico e aluminato, enquanto as fibras de vidro tipo S são mais resistentes e possuem módulo de elasticidade mais elevado que as do tipo E. Entretanto, ambas as fibras não são resistentes aos álcalis. Diante disso, o zircônio pode ser utilizado para aumentar a resistência aos álcalis deste material.

29 *Idem*, Carneiro e Teixeira (2008).

30 Figueira (2016), Silva (2002).

31 Carneiro e Teixeira (2008).

Tabela 1.3 Tipos de fibra de vidro.

Tipo de vidro	Ano de invenção	Principal atributo e indicações gerais	Resistência mecânica	Preço	Inventor
A	1938	Isolante; alto conteúdo de álcali	Baixa	\$	Owens Corning
E	1939	Boas propriedades elétricas; para fins gerais	Moderada	\$	Owens Corning
C	1943	Resistente à corrosão; resistência química	Baixa	\$	Owens Corning
R	1965	Alta resistência mecânica	Alta	\$\$	Saint-Gobain
S	1965	Alta resistência mecânica	Muito alta	\$\$\$	Owens Corning
AR	1974	Álcali-resistente	Baixa	\$\$	Owens Corning
E-CR	1980	Resistente à corrosão; para uso em ambientes ácidos	Moderada	\$	Owens Corning
Advantex®	1996	Resistente à corrosão; para uso em ambientes ácidos	Moderada	\$	Owens Corning
H	2004	Alta rigidez	Moderada	\$\$	Saint-Gobain
HPG	2004	Alta resistência mecânica	Alta	\$\$	Owens Corning
Fusão direta – S	2008	Alta resistência/rigidez	Muito alta	\$\$\$	Owens Corning

Fonte: Owens Corning.³²

Do ponto de vista de aplicação, a escolha do tipo de fibra de vidro fica condicionada ao tipo de utilização ao qual ela será empregada. A maioria das fibras utilizadas na construção civil é produzida a partir das fibras do tipo E, como é o caso da fibra tipo E-CR, que combina as características de resistência à tração, rigidez e não condutividade elétrica com a resistência à corrosão e a álcalis.³³

1.2.2.4 Fibra de basalto

Segundo o *FIB Bulletin* 90,³⁴ as fibras de basalto foram recentemente introduzidas no campo de reforço de estruturas com materiais compósitos. O basalto é uma rocha ígnea eruptiva (magmática) rica em silicatos de magnésio e ferro e com baixo conteúdo em sílica. A produção das fibras de basalto utiliza a mesma tecnologia de produção das fibras de vidro, entretanto com menor consumo de energia. Assim, a fibra é um produto derivado do processo de fundição do próprio basalto. Suas propriedades mecânicas são comparáveis às das fibras de vidro, porém com maior módulo de elasticidade.

³² Owens Corning (2011 *apud* OLIVEIRA, 2019).

³³ Carneiro e Teixeira (2008).

³⁴ FIB (2019).

1.2.2.5 Fibras de aço

Fios de aço contínuos, de alta resistência e com pequeno diâmetro, também podem ser utilizados em sistemas de reforço segundo a técnica SFRP (*Steel Fiber Reinforced Polymer*). Os fios de aço podem ser protegidos da corrosão com o uso de revestimentos à base de zinco ou bronze. Assim como as fibras de carbono, vidro, aramida e basalto, os fios de aço também apresentam comportamento elástico-linear até à ruptura.

1.2.2.6 Fibras naturais

As fibras naturais surgiram recentemente em aplicações de reforço com matrizes orgânicas e inorgânicas. As mais aplicadas nos sistemas de reforço são as fibras vegetais, incluindo cânhamo, linho e o kenaf. A resistência à tração dessas fibras pode variar de 500 MPa a 1.500 MPa, enquanto seu módulo de elasticidade, entre 30 GPa e 70 GPa. No entanto as propriedades mecânicas e físicas das fibras naturais são fortemente influenciadas por sua origem e pelos processos aos quais as fibras foram submetidas durante as atividades de transformação. A interação física e mecânica com as matrizes também deve ser considerada, uma vez que a ligação entre as fibras e as matrizes, bem como sua durabilidade, pode variar de acordo com a tipologia da fibra e da matriz. Assim, as propriedades mecânicas desses sistemas precisam ser cuidadosamente determinadas com base em ensaios mecânicos a serem realizados em cada sistema de reforço específico.

1.3 MATERIAIS COMPÓSITOS

Como visto anteriormente, os FRPs são formados por fibras contínuas embebidas por uma matriz polimérica. Geralmente os FRPs possuem proporção volumétrica de fibras que varia entre 50% e 70% do volume total de laminados e de 25% a 35% em compósitos moldados *in situ*, respectivamente.³⁵

Por possuírem módulo de elasticidade e resistência muito superior ao da matriz polimérica, as fibras, que possuem comportamento elástico linear até à ruptura, são as principais responsáveis pela resistência dos FRPs. Se conhecidas a taxa volumétrica e as propriedades mecânicas das fibras e da matriz polimérica, as propriedades mecânicas básicas dos FRPs (nomeadamente o módulo de elasticidade e resistência à tração) podem ser estimadas por simplificação, com o uso da regra das misturas, tal como o apresentado nas equações 1.1 e 1.2, em que E é o módulo de elasticidade, V é a taxa volumétrica, f é a

35 Id. (2006).

tensão de tração e os índices *FRP*, *fib* e *mat* referem-se às propriedades do FRP, das fibras e da matriz polimérica, respectivamente. Nota-se que nas equações 1.1 e 1.2, $V_{fib} + V_{mat} = 1$, conforme o *FIB Bulletin 35*.³⁶

$$E_{FRP} \cong E_{fib} \cdot V_{fib} + E_{mat} \cdot V_{mat} \quad \text{Equação 1.1}$$

$$f_{FRP} \cong f_{fib} \cdot V_{fib} + f_{mat} \cdot V_{mat} \quad \text{Equação 1.2}$$

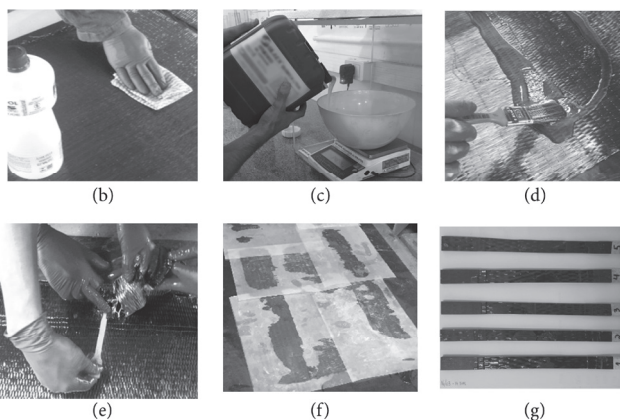
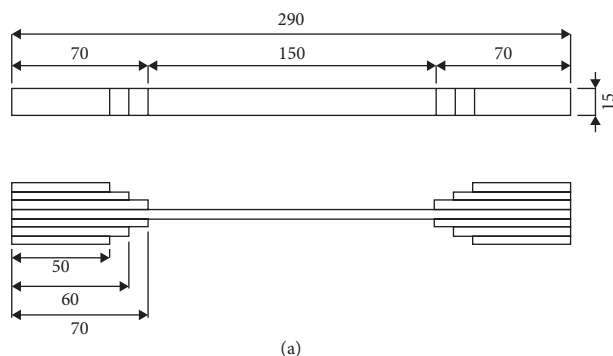


Figura 1.13 (a) Moldagem, (b) limpeza da manta de fibra de carbono, (c) preparo da resina epoxídica, (d) saturação do compósito, (e) execução de reforço nas extremidades dos corpos de prova, (f) processo de cura, (g) aspecto final dos corpos de prova.

Fonte: Ferreira.³⁷

Com o uso da regra das misturas é possível obter uma aproximação da expectativa da capacidade resistente e da rigidez dos FRPs. Entretanto, fatores como diâmetro, distribuição e paralelismo das fibras, defeitos locais e interação

³⁶ *Idem*.

³⁷ Ferreira (2019).

na interface fibra-matriz polimérica podem influenciar no comportamento tensão *versus* deformação do FRP. Dessa forma, recomenda-se que o comportamento real do compósito seja obtido por meio de ensaios experimentais.

A Figura 1.13 apresenta um exemplo de moldagem de compósitos de CFRP seguindo as recomendações das normas ISO 527-1 e ISO 527-5,³⁸ enquanto as figuras 1.14 e 1.15 apresentam o ensaio e um exemplo do comportamento obtido por meio de ensaio de tração axial, respectivamente.

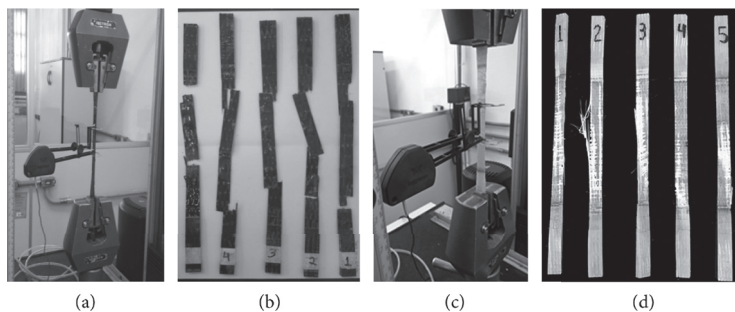


Figura 1.14 Ensaio de tração uniaxial e corpos de prova de CFRP (a-b) e GFRP (c-d) com os respectivos modos de ruptura.

Fonte: (a-b) Ferreira, (c-d) Oliveira.³⁹

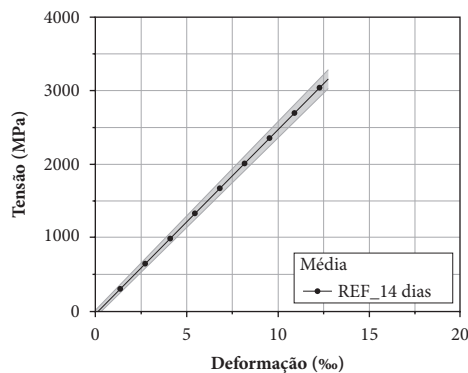


Figura 1.15 Diagramas tensão *versus* deformação dos compósitos de CFRP ensaiados com idade de 14 dias.

Fonte: Ferreira.⁴⁰

³⁸ ISO (2012a, 2012c).

³⁹ Ferreira (2019), Oliveira (2019).

⁴⁰ Ferreira (2019).

1.4 TÉCNICAS DE REFORÇO COM FRPs

Os materiais compósitos têm sido utilizados para reforço de diversos elementos em concreto armado, como vigas, lajes, colunas, paredes, entre outros, em substituição, principalmente, ao uso de chapas metálicas externamente aderidas ao concreto de substrato. Embora a técnica de colagem de materiais metálicos seja muito utilizada e proporcione bons resultados, ela apresenta algumas desvantagens, entre as quais se pode citar a necessidade de escarificação da superfície e planicidade para perfeita colagem, possibilidade de corrosão do aço com a consequente perda de capacidade resistente e de aderência, dificuldade de manuseio de chapas com grande massa ou dimensões e limitação do comprimento das chapas, obrigando muitas vezes à utilização de emendas.

Segundo o *FIB Bulletin 90*, o atual estado da arte de sistemas de reforço de elementos estruturais indica que os FRPs podem ser encontrados na forma de: (a) laminados unidirecionais, produzidos por meio de pultrusão e com espessura média de 1 mm; (b) mantas e tecidos flexíveis formados por fibras posicionadas em uma ou duas direções, respectivamente, que geralmente são impregnadas *in situ* ou raramente pré-impregnadas; e (c) barras ou perfis também produzidos por meio de pultrusão.

O campo de reforço está em constante desenvolvimento e hoje já podem ser encontradas distintas técnicas de aplicação, como as apresentadas na Figura 1.16.

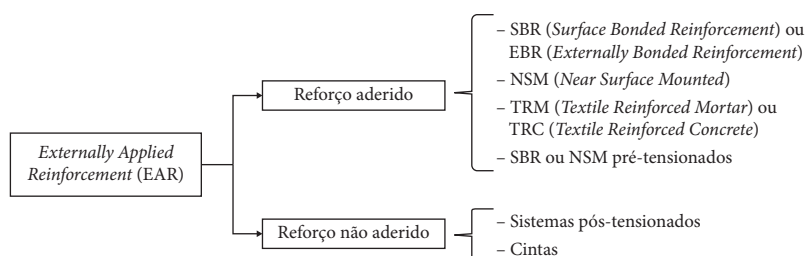


Figura 1.16 Técnicas de reforço.

Fonte: adaptada de *FIB Bulletin 90*.

1.4.1 TÉCNICA EBR

A técnica mais utilizada e conhecida, a EBR (*Externally Bonded Reinforcement*), é baseada na colagem de mantas, tecidos ou laminados de FRPs no substrato de concreto (Figura 1.17). Embora essa nomenclatura seja muito utilizada e já esteja consolidada, o *FIB Bulletin 90* apresenta o termo EAR (*Externally Applied Reinforcement*), que pode ser utilizado tanto para sistemas de reforço aderidos como para não aderidos ao concreto. Assim, a nova designação de SBR

(*Surface Bonded Reinforcement*) deve começar a ser utilizada devido à atualização e recomendação da norma europeia.

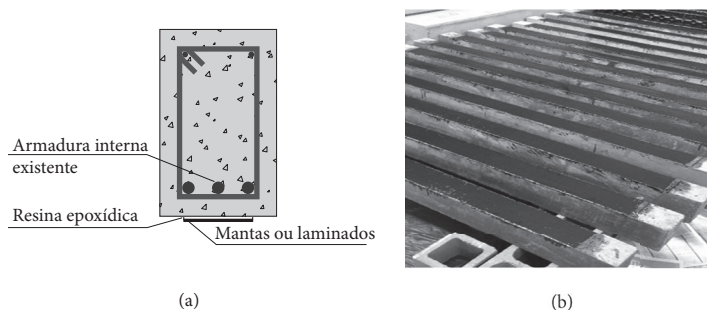


Figura 1.17 Técnica SBR/EBR.

Fonte: elaboração própria.

Esta técnica pode ser aplicada no substrato de concreto tracionado para atuar como reforço à flexão, ao cisalhamento, à torção e para encamisamento de elementos (Figura 1.18).

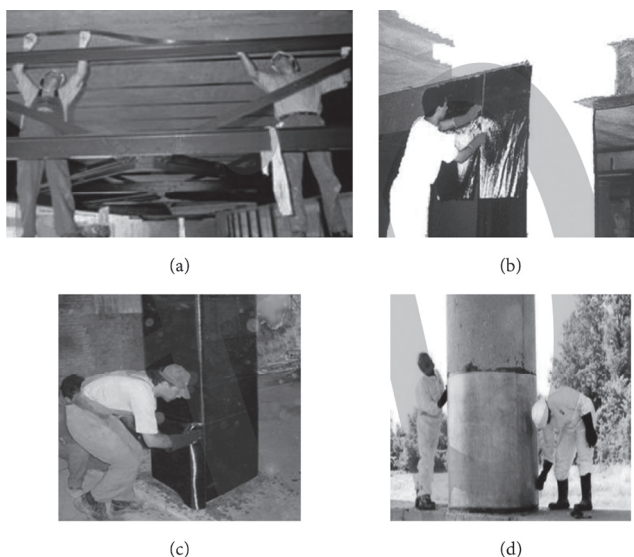


Figura 1.18 Possibilidades de reforço com o uso de FRPs: (a) flexão; (b) cisalhamento; (c) encamisamento de pilar; (d) reforço localizado.

Fonte: FIB Bulletin 90.

A aplicação geralmente segue os seguintes procedimentos:

- Demarcação e preparo do substrato de concreto que receberá o reforço por meio do desbaste da camada de nata de cimento até à exposição dos agregados para melhoria da rugosidade (Figura 1.19a-b). Deve-se prever o arredondamento de vértices vivas e arestas dos elementos a serem reforçados, de modo a evitar concentração de tensões no FRP;
- Limpeza da superfície desbastada com o uso de ar comprimido, visando à remoção de poeira e partículas soltas. Para além disso, deve-se assegurar que o substrato se encontra íntegro, isento de óleos, graxas ou qualquer substância contaminante (Figura 1.19c);
- O substrato que receberá o sistema de reforço deve estar seco e totalmente curado. Assim, recomenda-se a verificação da umidade, da temperatura (tanto do substrato quanto ambiente) e existência de padrão de fissuração superficial, o qual deve ser tratado para prevenir ruínas prematuras;
- Caso seja necessário, aplicação de resina de regularização de superfície, a qual deverá ser preparada segundo as recomendações do fabricante;
- Aplicação de resina *primer* no substrato, produzida segundo as recomendações do fabricante, para tamponamento de poros e melhoria da aderência entre o FRP e o concreto (Figura 1.19d-e);
- Medição, corte e posterior limpeza dos FRPs com acetona (Figura 1.19f);
- Aplicação de resina de saturação no substrato de concreto, posicionamento e aplicação do material de reforço. No caso de uso de mantas ou tecidos com grande densidade, recomenda-se a pré-saturação do material antes de sua aplicação;
- Aplicação de pressão com rolo de modo cauteloso, com o intuito de alinhar as fibras, remover o excesso de resina e eliminar possíveis bolhas presentes no tardo do material de reforço (Figura 1.19g-i); e
- Caso necessário, aspersão de areia de quartzo sobre a última camada de resina aplicada para permitir a aderência do material de acabamento ao material de reforço.

Recomenda-se, após a cura do adesivo, a realização de ensaios de controle de qualidade, a serem posteriormente apresentados para verificação da aderência concreto/resina/FRP e a possível existência de vazios no adesivo que podem levar à ocorrência de destacamentos prematuros.

Embora a técnica EBR seja muito utilizada, o incremento da capacidade portante do elemento é limitado pelo destacamento do FRP, que ocorre de forma frágil e sem aviso, fazendo com que muitas vezes a tensão máxima atuante no material de reforço seja muito inferior à resistência última à tração. Além disso,

o sistema de reforço sem proteção fica exposto à agressividade ambiental, atos de vandalismo, incêndio, entre outros.

A fim de evitar o destacamento precoce do FRP, avanços na aplicação da técnica SBR/EBR são propostos, e nesse âmbito citam-se, por exemplo, as técnicas MF-EBR, MF-FRP, EBRIG e EBROG.

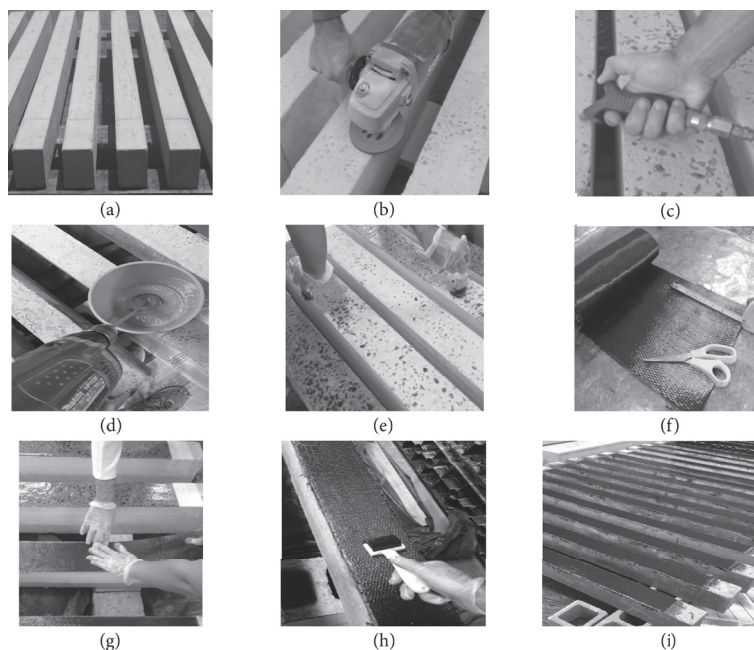


Figura 1.19 Procedimentos de aplicação da técnica de reforço EBR (SBR).

Fonte: Ferreira e Sarti Junior.⁴¹

1.4.2 TÉCNICA NSM

A técnica NSM (*Near Surface Mounted*) é baseada no reforço de elementos estruturais de concreto armado por meio de inserção de barras ou laminados de FRP em entalhes efetuados no cobrimento de concreto (Figura 1.20). Antigamente se utilizavam barras de aço convencional como material de reforço. Entretanto a barra de aço pode ser substituída por barras de FRPs, a fim de evitar corrosão. Neste caso, as dimensões reduzidas dos laminados facilitam a instalação do material de reforço e também minimizam o risco de interferência com as armaduras existentes.

41 Id. *ibid.*, Sarti Junior (2020).

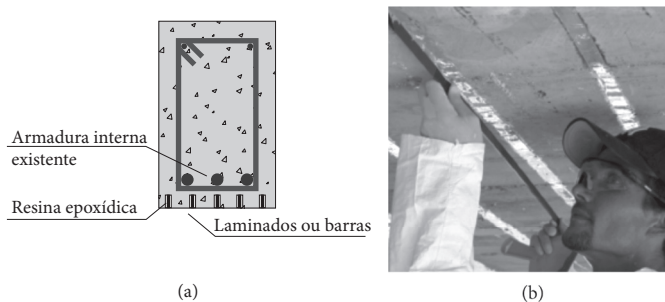


Figura 1.20 Técnica NSM.

Fonte: *FIB Bulletin* 90.

A técnica NSM permite, por exemplo, o reforço de vigas, lajes e pavimentos à flexão, de elementos ao cisalhamento e flexocompressão. Os procedimentos de aplicação são baseados em:

- Realização de pacometria para verificação do real cobrimento das armaduras existentes;
- Demarcação do substrato e execução de entalhe na face do elemento a reforçar (Figura 1.21a-c);
- Limpeza do entalhe efetuado com a aplicação de ar comprimido para a remoção de poeira e partículas soltas;
- Corte dos laminados ou barras e posterior limpeza destes com acetona;
- Preparo da resina epoxídica seguindo os procedimentos do fornecedor;
- Preenchimento dos entalhes com o adesivo epoxídico. Recomenda-se também a aplicação do adesivo nas faces dos laminados ou barras para que haja uma colagem homogênea (Figura 1.21d-e); e
- Inserção dos laminados ou barras no entalhe, com posterior remoção do adesivo em excesso (Figura 1.21f).

Embora a técnica NSM consiga mobilizar maior capacidade portante e ductilidade que a técnica EBR, é preciso garantir um cobrimento mínimo para a instalação dos laminados ou barras no elemento. Segundo a norma *FIB Bulletin* 90, é possível aumentar o cobrimento, entretanto a aderência entre o concreto novo e o antigo deve ser avaliada.

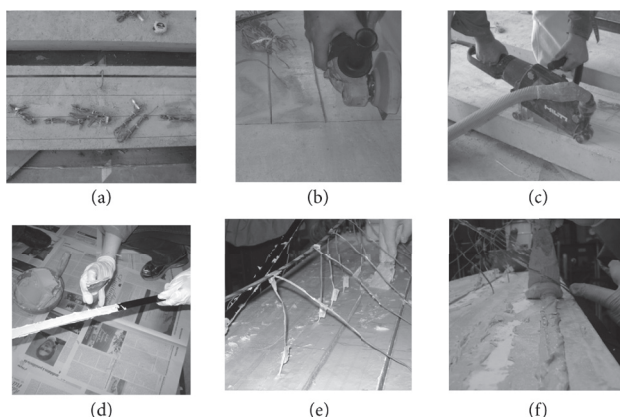


Figura 1.21 Procedimentos de aplicação da técnica de reforço NSM.

Fonte: Dalfré.⁴²

No caso de reforço ao cisalhamento, somente a configuração de reforço nas faces laterais pode ser utilizada.

1.4.3 TÉCNICAS MF-EBR E MF-FRP

A técnica MF-EBR (*Mechanically Fastened and Externally Bonded Reinforcement*) é baseada na colagem de laminados, mantas ou tecidos multidirecionais na superfície de elementos de concreto armado e ancoragem com parafusos metálicos simultaneamente, reduzindo a concentração de tensões em toda a extensão do reforço e aumentando a resistência da ligação (Figura 1.22a-b).

A técnica MF-FRP (*Mechanically Fastened*) recorre ao uso de laminados multidirecionais apenas ancorados com parafusos metálicos na superfície do elemento de concreto a reforçar, sem uso de resinas, demonstrando ser uma possibilidade rápida e simples porque não depende do preparo do substrato de concreto e possibilita a imediata utilização da estrutura (Figura 1.22c-d). Além disso, ambas as técnicas levam a um bom aumento da capacidade portante com pouca ou nenhuma perda de ductilidade.⁴³

⁴² Dalfré (2013).

⁴³ Bank e Arora (2007), Elsayed, Ebead e Neale (2009), Bank (2004), Coelho *et al.* (2011).

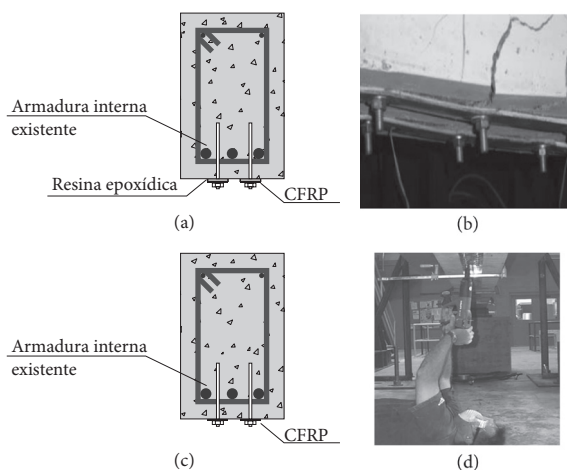


Figura 1.22 Técnicas (a-b) MF-EBR, (c-d) MF-FRP.

Fonte: Coelho *et al.*, Bank.⁴⁴

1.4.4 TÉCNICAS EBROG E EBRIG

Segundo Sarti Junior,⁴⁵ as técnicas de reforço EBROG e EBRIG são baseadas no reforço dos elementos estruturais de concreto armado aplicando-se simultaneamente as técnicas EBR e NSM.

A técnica EBROG (*Externally Bonded Reinforcement On Grooves*) é baseada na abertura de entalhes no concreto de cobertura dos elementos a serem reforçados, seguida pelo preenchimento destes com uso de adesivo estrutural e posteriormente pela colagem externa do FRP (Figura 1.23a).

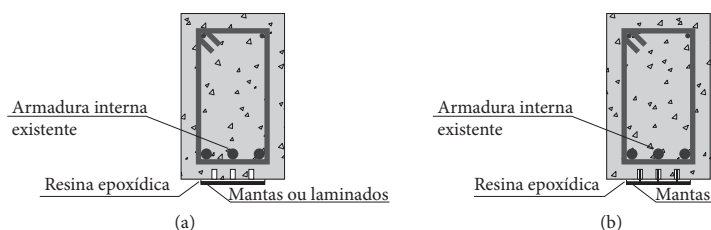


Figura 1.23 Técnicas (a) EBRIG, (b) EBROG.

Fonte: Mostofinejad, Shameli e Hosseini.⁴⁶

⁴⁴ Coelho *et al.* (2011), Bank (2004).

⁴⁵ Sarti Junior (2020).

⁴⁶ Mostofinejad, Shameli e Hosseini (2014).

A técnica EBRIG (*Externally Bonded Reinforcement In Grooves*) é baseada na colagem de mantas de FRPs na superfície do elemento e no interior dos entalhes realizados no concreto de cobrimento, respectivamente, com o uso de adesivo estrutural (Figura 1.23b).

1.4.5 FRP PROTENDIDO

Segundo o *FIB Bulletin* 90, pode ser vantajosa, para algumas aplicações, a colagem do reforço externo de FRP em superfícies do concreto em um estado protendido. Com relação ao reforço à flexão, a protensão dos laminados previamente à colagem tem as seguintes vantagens:

- Proporciona um comportamento mais rígido, pois nos estágios iniciais a maior parte do concreto está em compressão e, portanto, contribuindo para a resistência do elemento;
- A formação de fissuras de cisalhamento é retardada, e quando aparecem são mais distribuídas e apresentam menor abertura;
- Leva ao fechamento de fissuras preexistentes no elemento;
- Melhora a durabilidade devido à redução de fissuras;
- O mesmo incremento de capacidade de carga é alcançado com menores áreas de laminados protendidos em comparação com laminados somente aderidos;
- Com ancoragem adequada, a protensão pode aumentar o momento final do elemento, evitando modos de ruptura associados ao destacamento do material de reforço;
- A linha neutra do elemento com FRPs protendidos permanece em um nível mais baixo que nos elementos com reforço passivo, resultando em maior eficiência estrutural; e
- A protensão aumenta significativamente a força aplicada na qual o aço entra em escoamento em comparação com um elemento não protendido.

Entretanto, essa técnica também apresenta algumas desvantagens, como maior custo e dificuldade de aplicação que as técnicas convencionais (EBR ou NSM) devido ao maior número de operações e equipamentos necessários; além disso é mais morosa. O conceito de aplicação de um laminado protendido é esquematicamente apresentado na Figura 1.24.

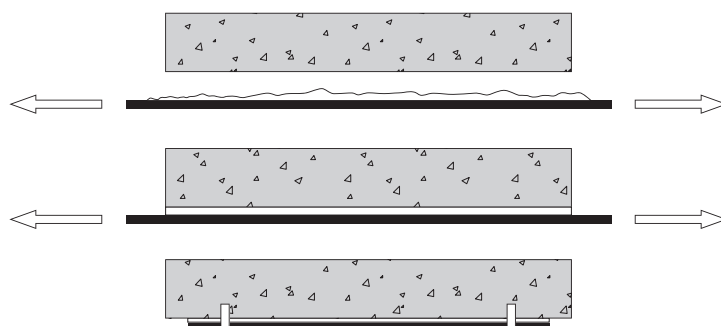


Figura 1.24 Laminados protendidos.

Fonte: *FIB Bulletin* 90.

Segundo o *FIB Bulletin* 90, análises experimentais demonstram que laminados simplesmente aderidos atingem no máximo de 5% a 10% de sua tensão de tração última. Entretanto tensões de até 50% podem ser atingidas com o uso de técnicas especiais de ancoragem, tal como o apresentado na Figura 1.25.

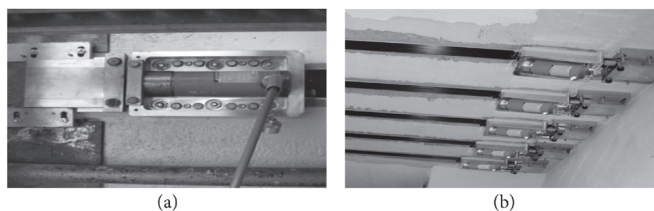


Figura 1.25 Sistema de protensão: (a-b) posicionamento do cilindro hidráulico colocado na caixa de fixação em alumínio.

Fonte: S&P Clever Reinforcement.⁴⁷

1.4.6 TÉCNICA ETS

As técnicas tradicionais de reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado são encamisamento das seções,⁴⁸ colagem de elementos metálicos e aplicação de pré-esforço exterior, por exemplo. Entretanto estudos experimentais realizados sobre o reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado com compósitos de CFRP, aplicados segundo as técnicas EBR ou NSM, demonstram que estas técnicas podem proporcionar soluções globalmente tão ou mais eficazes que as soluções de reforço tradicionais.⁴⁹ No entanto, a EBR apresenta baixa mobilização

⁴⁷ S&P Clever Reinforcement (2021a, 2021b).

⁴⁸ Viana (2004).

⁴⁹ Dirar *et al.* (2007), Basler, White e Desroches (2003), De Lorenzis e Nanni (2001).

da capacidade resistente do material devido ao destacamento precoce dos FRPs, e ambas as técnicas não têm aplicabilidade no reforço ao cisalhamento de lajes.

Segundo o *FIB Bulletin 90*, quando apenas as faces superior ou inferior dos elementos de concreto são acessíveis, pode-se utilizar uma técnica de reforço baseada na instalação de barras em verticais ou inclinadas, abertos na espessura do elemento a reforçar furos com o uso de resinas epoxídicas. Tal técnica também pode ser utilizada quando a eficácia das técnicas EBR ou NSM puder ser comprometida pela formação de fissuras de cisalhamento junto aos apoios centrais dos elementos reforçados ou, ainda, no caso de elementos estruturais – posteriormente a uma operação de reforço à flexão – cujo modo de ruptura passa a ser baseado em cisalhamento. A ocorrência deve ser evitada, dado que a ruptura por cisalhamento é frágil e quase instantânea.

Perante isto, foi desenvolvida uma técnica de reforço ao cisalhamento, designada na literatura internacional por ETS (*Embedded Through-Section*), a qual é baseada na instalação de barras em furos abertos na espessura do elemento a reforçar, sendo fixadas ao concreto por meio de adesivos (Figura 1.26).

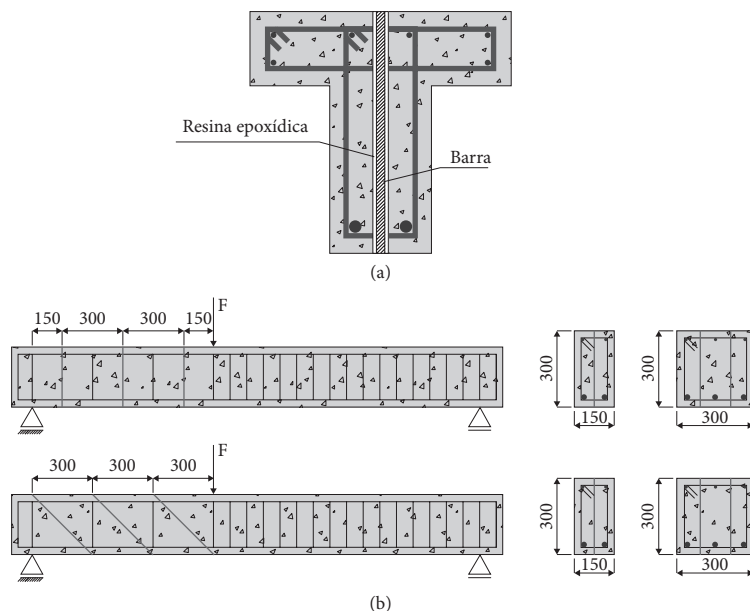


Figura 1.26 Técnica ETS – medidas em milímetros.

Fonte: (a) *FIB Bulletin 90*, (b) Dalfré⁵⁰

O procedimento de aplicação desta técnica é baseado na abertura dos furos passantes pelo elemento (Figura 1.27a), limpeza dos furos com o uso de ar

50 FIB (2019), Dalfré (2013).

comprimido, visando a remoção de poeira e partículas soltas (Figura 1.27b), injeção da resina epoxídica e posterior colocação da barra, com remoção do excesso de resina (Figura 1.27c).

A fim de validar a técnica proposta, foram realizados programas experimentais preliminares nos quais se investigou o comportamento de elementos reforçados ao cisalhamento com barras de aço e CFRP embebidos por um adesivo epoxídico.⁵¹ Os resultados dos ensaios permitiram concluir que a utilização de compósitos de CFRP ou barras de aço como elementos resistentes ao cisalhamento possibilita aumentos significativos da capacidade máxima de carga de elementos de concreto armado com ruptura por esforços cortantes. Além disso, esse sistema de reforço está mais protegido das condições de agressividade ambiental e de atos de vandalismo, uma vez que o sistema de reforço se encontra embebido no concreto.

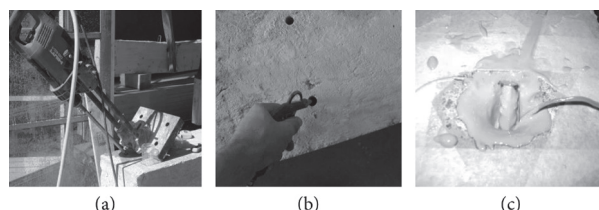


Figura 1.27 Técnica ETS.

Fonte: Dalfré.⁵²

1.4.7 TÉCNICA TRC (FRCM)

Embora as técnicas de reforço baseadas no uso de resinas epoxídicas consigam atingir grandes incrementos de capacidade de carga e boa ductilidade dos elementos reforçados, verificam-se problemas relacionados aos materiais de colagem (as resinas) como degradação devida ao aumento de temperatura, suscetibilidade à radiação ultravioleta e umidade, além de seu alto custo.

Diante do exposto, novos sistemas de reforço sem o uso de adesivos têm sido desenvolvidos, entre os quais se destacam os compósitos cimentícios reforçados com têxteis (TRC, *Textile Reinforced Concrete*) ou FRCM (*Fabric-Reinforced Cementitious Matrix*).

Segundo a norma ACI 549.4R,⁵³ os compósitos cimentícios são uma evolução da construção convencional onde os materiais metálicos são substituídos por fibras. O desenvolvimento da engenharia têxtil ampliou as opções de materiais que podem ser utilizados em sistemas de reparo ou reforço, nomeadamente no campo de tecidos bidimensionais e têxteis tridimensionais compostos de fibras

⁵¹ Barros *et al.* (2008), Dalfré, Barros e Trombini (2008).

⁵² Dalfré (2013).

⁵³ ACI (2013).

de carbono, de vidro álcali resistente (AR), fibras poliméricas ou sistemas híbridos usando uma variedade de configurações.

Os TRCs podem ser utilizados no reforço de: (a) aberturas em telhados para passagem de dutos com altas temperaturas (que inviabilizam, devido ao uso de resinas, a aplicação do reforço convencional aderido); (b) reforço de túneis com substrato de concreto úmido; (c) confinamento de elementos; (d) reforço de pilares de concreto armado; (e) reforço de chaminés de alvenaria não armada; (f) reforço de cúpulas de alvenaria; (g) reforço em base de equipamentos; entre outros.⁵⁴ A Figura 1.28 apresenta alguns exemplos de uso dos TRCs na área de reparo e reforço de elementos de concreto e alvenaria.

Tal técnica de reforço já possui aplicações no Brasil. Neste sentido, cita-se o reforço de pilares do Estádio do Maracanã, no qual grelhas bidirecionais híbridas formadas por fibras de carbono e vidro foram aplicadas na direção transversal e longitudinal do elemento, respectivamente (Figura 1.29, adiante).

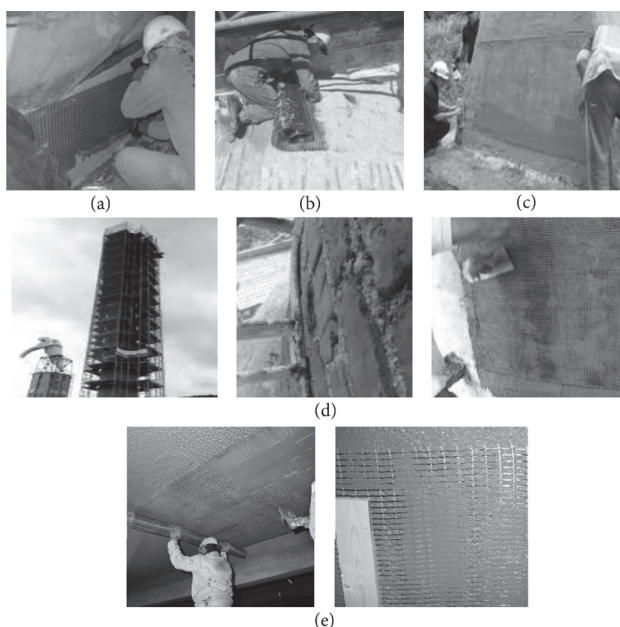


Figura 1.28 Técnica TRC: (a) reforço de base de equipamentos; (b) reforço de abóbodas; (c) encamisamento de elementos; (d) reforço de chaminé; (e) reforço de lajes (em razão do efeito da abrasão ou das cargas aplicadas na estrutura).

Fonte: (a-d) ACI 549.4R, (e) S&P Clever Reinforcement Brasil.⁵⁵

⁵⁴ *Idem*.

⁵⁵ *Idem*, S&P Clever Reinforcement Brasil (2020).

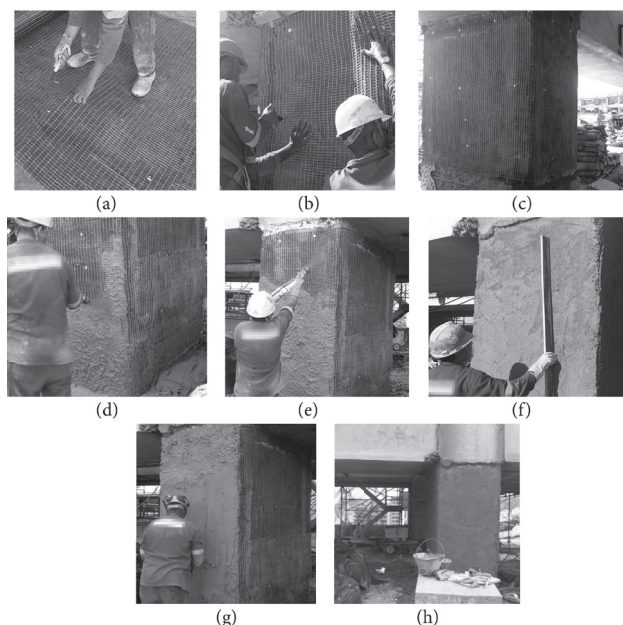


Figura 1.29 (a) Corte da grelha, (b) posicionamento, (c) fixação das grelhas, (d-e) projeção de concreto, (f-g) acabamento, (h) aspecto final.

Fonte: S&P Clever Reinforcement Brasil.⁵⁶

1.5 BARRAS NÃO METÁLICAS

A utilização de concreto com barras de aço convencional tem grande aplicabilidade na área da construção civil, sendo matriz para construção de diversos elementos estruturais. Contudo, com o tempo verificou-se a necessidade de manutenção e reparos dos elementos de concreto armado devido a um fator inicialmente ignorado, o processo corrosivo do aço, que pode ocasionar danos e comprometer o comportamento da estrutura.⁵⁷

Bertolini⁵⁸ afirma que a ação do ambiente sobre as estruturas de concreto armado pode causar danos progressivos na estrutura do tipo físico (devido ao efeito da temperatura ou químico, em razão das substâncias presentes no ambiente) ou mecânico (dado pelo efeito da abrasão ou das cargas aplicadas na estrutura).

No caso de danos do tipo físico, existe a degradação direta do concreto tanto na pasta de compostos de cimento quanto nos agregados. A degradação do concreto possibilita a corrosão das armaduras devido ao ataque de íons cloro ou pela

⁵⁶ S&P Clever Reinforcement Brasil (2020).

⁵⁷ Camacho (2011).

⁵⁸ Bertolini (2010).

carbonatação, por exemplo, seguida do destacamento do concreto e a consequente exposição das armaduras, podendo levar à ruína dos elementos estruturais.

Tendo em vista essa situação, torna-se necessário o estudo de materiais que possam substituir, parcial ou totalmente, as barras convencionais de aço, viabilizando sua aplicação em meios ambientalmente agressivos, como aqueles com alta concentração de dióxido de carbono, íons cloreto, ambientes industriais, marinhos e de grande variação de temperatura e umidade.

Como exemplo de materiais alternativos que visam a solução do problema da durabilidade do aço na construção civil citam-se os FRPs, que podem ser conformados como barras e que apresentam alta resistência à tração, propriedades não magnéticas (para GFRP) e ótima resistência aos processos corrosivos, possibilitando, assim, sua utilização em ambientes agressivos.

O início da utilização de barras com fibras remete ao ano de 1940, período reconhecido pelos grandes avanços na indústria aeronáutica, que necessitava de um material leve e com alta resistência. Além disso, a economia em rápida expansão dos Estados Unidos exigia materiais baratos para atender às demandas dos consumidores, e o processo de pultrusão permitiu um método rápido e econômico de obtenção de peças com perfil constante. Segundo Mazzú,⁵⁹ o processo de pultrusão produz elementos com seção transversal constante e comprimento limitado somente pelo transporte e o tamanho do galpão de armazenamento. Esse processo consiste no banho dos filamentos de fibra com resina (polímero), catalisador e aditivos. Durante o banho, as fibras são impregnadas, o excesso de resina líquida é removido e, posteriormente, as fibras são estiradas para a formação do perfil desejado.⁶⁰ A Figura 1.30 apresenta um esquema do processo de fabricação das barras.

Somente na década de 1960, porém, esses materiais foram seriamente considerados para uso como armadura em elementos de concreto armado.⁶¹

A expansão das rodovias norte-americanas na década de 1950 e a aplicação de sais de degelo em pontes rodoviárias fizeram aumentar a demanda por manutenção devido ao uso de sais – ricos em íons cloretos – para degelo do tabuleiro destes elementos.

Várias soluções foram investigadas, incluindo uso de galvanização do aço, uso de pintura com resinas epoxídicas, proteção catódica para a inibição da corrosão e, por fim, de barras de GFRP.⁶² Das soluções analisadas, a proteção com resina epoxídica foi considerada como a melhor delas, sendo, portanto, implementada para uso de elementos em ambientes agressivos. As barras de FRPs, na época, não foram consideradas viáveis e não estavam comercialmente disponíveis até o final da década de 1970.⁶³

59 Mazzú (2020).

60 Couto (2007).

61 ACI (2015).

62 *Idem*.

63 *Idem*.

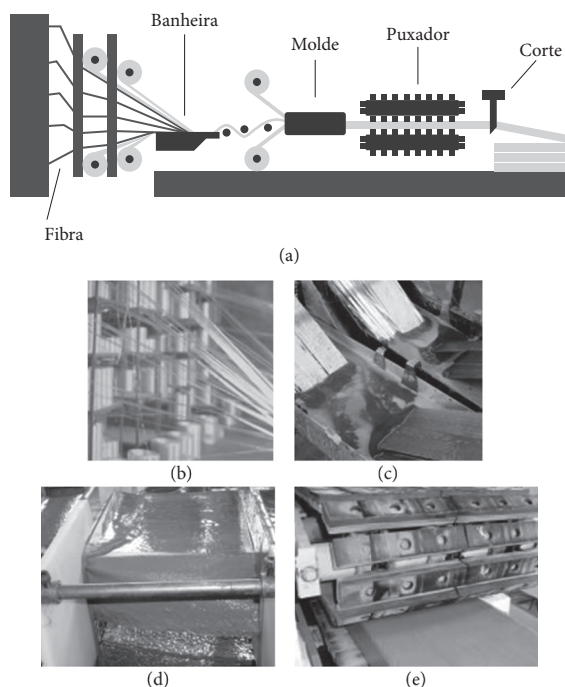


Figura 1.30 (a) Diagrama esquemático do processo de fabricação de perfis de FRP; (b) fibra de vidro; (c) banheira, pré-molde; (d-e) puxador.

Fonte: Stratus.⁶⁴

Posteriormente, a preocupação com a deterioração das pontes devido à corrosão ocasionada pelo ingresso dos íons cloreto voltou a ser discutida na década de 1970. Além disso, a corrosão nas barras de aço convencional revestidas com resinas epoxídicas instigou o interesse pelo desenvolvimento de métodos alternativos para combater a corrosão. Mais uma vez, o uso de barras de FRPs começou a ser considerado como solução geral para resolver problemas de corrosão nos tabuleiros de pontes e outros elementos estruturais.⁶⁵ Além disso, as barras de GFRP começaram a ser consideradas uma alternativa viável devido ao seu caráter não condutor (sendo utilizadas em estruturas para equipamentos médicos de ressonância magnética), na construção de muros de contenção, bases de reatores de subestações, pistas de aeroportos e laboratórios eletrônicos.⁶⁶ As figuras 1.31 e 1.32 apresentam alguns tipos de aplicação das barras de FRPs.

⁶⁴ Stratus (2020).

⁶⁵ *Idem*.

⁶⁶ *Idem*.

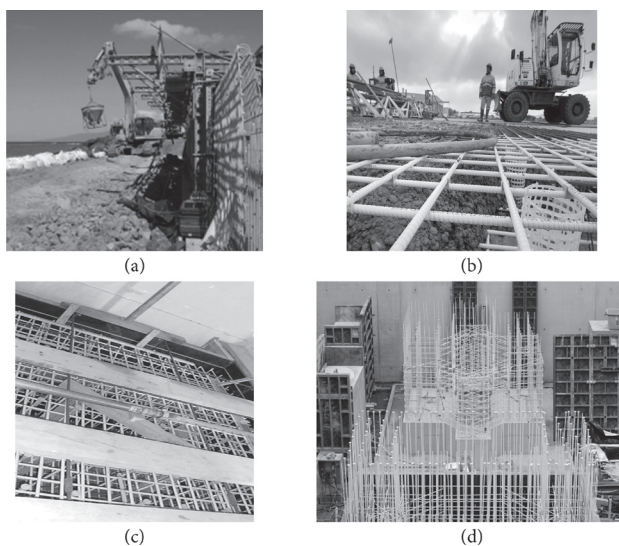


Figura 1.31 Exemplos de aplicação: (a) muro de contenção em Maui, no Havaí; (b) pista do aeroporto de Zurique; (c) centro de nanotecnologia da IBM, em Zurique; (d) laboratório de precisão do Instituto Max Planck, Stuttgart.

Fonte: (a) ACI 440.1R, (b-d) Schoeck.⁶⁷

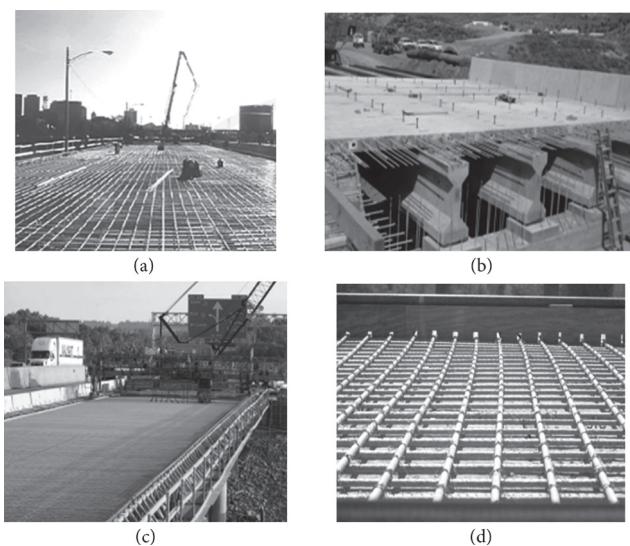


Figura 1.32 Barras de FRPs em tabuleiros de pontes nos Estados Unidos: (a) ponte da Avenida Salem, em Dayton, Ohio (1999); (b) ponte Emma Park (2009); (c) ponte sobre avenida em Kansas City (2013); (d) ponte Sierrita de la Cruz Creek em Amarillo, Texas (2000).

Fonte: ACI 440.1R.⁶⁸

⁶⁷ *Idem*, Schöeck (2020).

⁶⁸ ACI (2015).

A introdução das barras de FRPs na Europa iniciou-se em 1986, na Alemanha, com a construção de uma ponte rodoviária protendida. Desde a construção dessa ponte, programas de fomento foram implementados para aumentar a pesquisa e o uso de barras de FRPs no continente.

O Japão é o país com maior desenvolvimento e uso de armaduras de FRPs no mundo, incluindo em suas normas, em 1997, o dimensionamento com tais materiais, sendo utilizadas principalmente em edifícios hospitalares e na construção de ferrovias para evitar a interferência magnética ocasionada por materiais condutores e que podem ser prejudiciais ao funcionamento do sistema, tal como o apresentado na Figura 1.33.⁶⁹

No Canadá, a CAN/CSA-S6-06 foi a primeira norma a contemplar o uso de FRPs no projeto de pontes rodoviárias do país. Citam-se, por exemplo, a ponte de Headingley, em Manitoba, construída com barras de CFRP e GFRP,⁷⁰ a ponte Floodway, onde foram utilizados 140 mil quilos de barras de GFRP (tornando-se, na época, a maior ponte de concreto com armaduras não metálicas do mundo), a ponte Wotton, em Wotton, a ponte Magog, a ponte Cookshire-Eaton e a ponte Val-Alain na estrada 20 Leste.⁷¹ Além disso, as barras de GFRP também foram utilizadas na construção de garagens, pavimentos de concreto para estradas, reservatórios de água e incineradores.⁷²

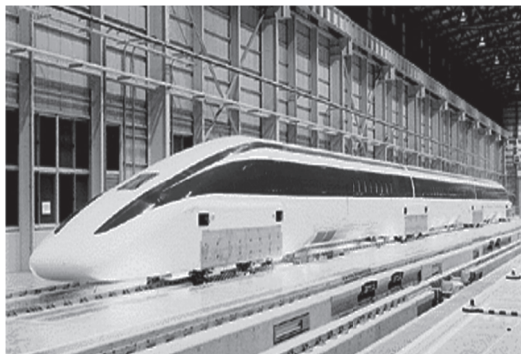


Figura 1.33 Sistema ferroviário japonês com trem de levitação.

Fonte: FIB Bulletin 40.

Segundo Head *et al.*,⁷³ no ano de 1997 a Lei de Eficiência do Transporte Intermodal de Superfície (ISTEA – *Intermodal Surface Transportation Efficiency Act*) gastou US\$ 2,5 bilhões com o *Highway Bridge Replacement Program* (Programa de Substituição de Pontes Rodoviárias), sendo a maioria dos fundos desti-

⁶⁹ FIB (2007).

⁷⁰ Rizkalla (1997 *apud* ACI, 2015).

⁷¹ ACI (2015).

⁷² *Idem*.

⁷³ Head *et al.* (2015).

nada à substituição ou reabilitação de tabuleiros de pontes que foram deteriorados por problemas de corrosão das armaduras. Os autores ainda afirmam que das cerca de 600 mil pontes dos Estados Unidos, mais de 25% são classificadas como estruturalmente deficientes e funcionalmente obsoletas, sendo necessários cerca de US\$ 9,4 bilhões por 20 anos para reparar essas pontes.

Segundo Mazzú,⁷⁴ com relação ao Brasil, em um inventário realizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes (DNIT), 66% dos danos observados nas 4.725 pontes registradas estão associados à corrosão das armaduras de aço e à degradação do concreto.⁷⁵

No Brasil, as barras de GFRP já têm sido produzidas por algumas empresas e atualmente existe um comitê – ABECE/IBRACON CT 303 – trabalhando na primeira norma regulamentadora nacional. Tendo em vista que grande parte das grandes cidades do Brasil está localizada em regiões litorâneas, as quais apresentam maiores índices de corrosão nas armaduras metálicas devido à ação do ambiente mais agressivo, o uso de barras não metálicas em estruturas de concreto pode minimizar e até evitar problemas referentes à corrosão do aço convencional.

As tabelas 1.4 e 1.5 apresentam a densidade e os coeficientes de dilatação térmica das barras de FRPs. Percebe-se que as barras de FRP apresentam densidades que variam de 1,25 a 2,1 g/cm³, aproximadamente de um sexto a um quarto da do aço convencional. Assim, o peso reduzido desse material reduz os custos de transporte e facilita o manuseio das barras no canteiro de obras.

Tabela 1.4 Densidades típicas das barras (g/cm³).

Aço	GFRP	CFRP	AFRP
7,90	1,25-2,10	1,50-1,60	1,25-1,40

Fonte: *FIB Bulletin* 90.

Tabela 1.5 Coeficientes de expansão térmica ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$).

Direção	Aço	GFRP	CFRP	AFRP	Concreto
Longitudinal	11,7	6 a 10	-9,0 a 0	-6 a 2	7,2 a 10,8
Transversal	11,7	21 a 23	74 a 104	60 a 80	7,2 a 10,8

Fonte: *FIB Bulletin* 90.

Segundo a ACI 440.1R,⁷⁶ os coeficientes de expansão térmica das barras de FRP são dependentes do tipo e volume de fibras e resina, variando nas direções longitudinal e transversal. Assim, o coeficiente longitudinal de expansão térmica é regido pelas propriedades das fibras, enquanto o coeficiente transversal é dependente da resina. Nota-se que um coeficiente de expansão térmica negativo indica

⁷⁴ Mazzú (2020).

⁷⁵ Oliveira, Greco e Bittencourt (2019).

⁷⁶ ACI (2015).

que o material se contrai com o aumento da temperatura e se expande com sua redução. Percebe-se também que a expansão térmica é superior na direção transversal em relação à longitudinal, além de ser superior à do concreto endurecido.

Por fim, as propriedades mecânicas das barras quando submetidas à tração são apresentadas na Tabela 1.6.

Tabela 1.6 Propriedades mecânicas das barras.

Tensão	Aço	GFRP	CFRP	AFRP
Tensão de escoamento (MPa)	276 a 517	–	–	–
Tensão máxima (MPa)	483 a 1.600	483 a 690	600 a 3.690	1.720 a 2.540
Módulo de elasticidade (GPa)	200	35 a 51	120 a 580	41 a 125
Deformação no escoamento (‰)	1,4 a 2,5	–	–	–
Deformação na tensão máxima (‰)	60 a 120	12 a 31	5 a 17	19 a 44

Fonte: *FIB Bulletin* 90.

Segundo Mazzú,⁷⁷ com relação à compressão, as barras de FRP não se comportam tão bem quanto à tração. Nesse caso a ruptura está ligada à microfissuração das fibras, e os valores precisos da resistência à compressão são muito dependentes das propriedades dos materiais constituintes e do volume de fibras, sendo, desta forma, difíceis de determinar. A resistência ao cisalhamento dessas barras é geralmente baixa e dependente das propriedades da matriz e distribuição local das tensões, sendo que as barras podem ser facilmente cortadas com serras comuns em direção perpendicular às fibras.⁷⁸

Campana *et al.*⁷⁹ afirmam que a resistência ao cisalhamento de vigas de concreto com barras de aço é formada pela contribuição de vários mecanismos, sendo eles a parcela do cisalhamento resistida pelas bielas de concreto comprimido, as forças de atrito desenvolvidas ao longo do comprimento das fissuras (engrenamento dos agregados), a resistência à tração residual existente entre as fissuras inclinadas, a resistência ao cisalhamento proporcionada pela armadura longitudinal (efeito pino) e a resistência ao cisalhamento proporcionada pela armadura transversal (quando esta existir).

Fico *et al.*⁸⁰ afirmam que, no caso de vigas de concreto armadas com barras de FRPs, as propriedades mecânicas das armaduras longitudinais ou transversais afetam os mecanismos de resistência ao cisalhamento. Segundo a ACI 440.1R,⁸¹ ao se comparar uma seção transversal armada à flexão com barras de FRP com uma seção armada com barras de aço, totalizando a mesma área das barras de FRP, após a fissuração se observa uma menor profundidade da linha neutra devi-

⁷⁷ Mazzú (2020).

⁷⁸ Couto (2007).

⁷⁹ Campana *et al.* (2013).

⁸⁰ Fico, Prota e Manfredi (2008).

⁸¹ ACI (2015).

do à menor rigidez axial (produto entre a área de armadura e o módulo de elasticidade). Assim a região de compressão da seção transversal é menor e a abertura de fissuras, maior. Como resultado, a resistência ao cisalhamento fornecida pela parcela do engrenamento dos agregados e pelo concreto comprimido é menor. Devido à maior abertura das fissuras, a resistência à tração residual entre as fissuras inclinadas e o efeito pino são reduzidos. Os autores afirmam ainda que a resistência ao cisalhamento proporcionada pelo efeito pino da armadura longitudinal de FRP pode ser negligenciada para os diâmetros de barras usuais, dado que é menor do que outras contribuições de resistência ao cisalhamento, da mesma forma que o considerado para o caso de armadura longitudinal de aço.

Segundo El-Sayed e Soudki,⁸² em vigas de concreto com armadura longitudinal e transversal formada por FRPs considera-se que as forças de cisalhamento serão resistidas pelos mesmos mecanismos apresentados por vigas de concreto armadas com armadura longitudinal e transversal de aço. Entretanto se observa a formação de fissuras com maior abertura e profundidade devido ao menor módulo de elasticidade do FRP quando comparado ao aço, e, desta forma, todas as componentes resistentes ao cisalhamento serão menores. Consequentemente, a capacidade resistente ao esforço cortante de vigas armadas com barras de FRP deve ser menor do que a apresentada por vigas armadas com barras de aço.

Conforme Camacho,⁸³ em estruturas armadas com barras de GFRP, o Estado Limite de Serviço (ELS) é o condicionante do dimensionamento, tendo em vista que a deformação é influenciada pelo reduzido módulo de elasticidade que este material apresenta. Ainda assim, segundo Tavares,⁸⁴ o dimensionamento é baseado no Estado Limite Último (ELU), sendo que este dimensionamento é semelhante ao empregado para estruturas de concreto armado convencionais.

De acordo com Feeser e Brown,⁸⁵ não é possível realizar uma substituição direta entre o FRP e o aço devido às diferenças nas propriedades mecânicas dos materiais. O módulo de elasticidade do FRP é muito inferior ao do aço, e, por isso, são necessárias deformações maiores para desenvolver tensões de tração comparáveis na armadura. Se uma substituição direta for utilizada, as seções cuja armadura longitudinal é formada por barras de FRP apresentarão maiores deslocamentos e fissuras em comparação com as seções armadas com aço.

Tavares e Giongo⁸⁶ afirmam que, em vigas armadas com GFRP, o pequeno módulo de elasticidade faz com que os deslocamentos sejam maiores para uma mesma força. Este pequeno módulo de elasticidade causa um grande aumento na taxa de armadura de GFRP necessária para que uma viga obedeça ao Estado Limite Último e Estado Limite de Serviço. Segundo Castro,⁸⁷ o módulo de elasticidade

82 El-Sayed e Soudki (2011).

83 Camacho (2011).

84 Tavares (2006).

85 Feeser e Brown (2005).

86 Tavares e Giongo (2009).

87 Castro (1997).

nas barras de aço pode ser considerado o mesmo para barras de diferentes fabricantes. Já para as barras de FRP, este depende dos materiais utilizados na fabricação das barras, da quantidade dos materiais utilizados e dos detalhes do processo de fabricação, que, portanto, podem diferir entre fabricantes distintos.

A diferença de rigidez entre elementos armados com aço e elementos armados com FRP faz com que o comportamento em serviço de cada um seja diferente. Desta forma, em elementos de concreto armados com FRP a deformação e a abertura de fissuras serão maiores após o carregamento, quando comparados com um elemento armado com aço na mesma quantidade.⁸⁸

Como conclusão final, Couto⁸⁹ afirma em seu estudo que a utilização de barras de GFRP é viável, mas é necessário que se utilizem maiores comprimentos de ancoragem quando comparadas às barras de aço, uma vez que a sua resistência de aderência é menor.

Segundo Wang e Belarbi,⁹⁰ devido ao comportamento elástico linear das barras de FRP, o comportamento à flexão de elementos estruturais armados com FRP não é dúctil como os elementos armados com barras de aço. Neste sentido, um grande esforço foi feito para melhorar a ductilidade de vigas armadas com barras de FRP, chegando a uma abordagem que diz respeito à utilização de barras híbridas de FRP, cujos materiais pseudodúcteis são fabricados combinando-se dois ou mais materiais de FRP para simular o comportamento elástico-plástico do aço e melhorar as propriedades do concreto. Embora tenha mostrado sucesso nos trabalhos de pesquisa, esta abordagem não resultou em aplicações práticas, uma vez que o processo de fabricação das barras híbridas é complicado e dispendioso.⁹¹

Por fim, a Figura 1.34 apresenta as possíveis conformações superficiais disponíveis para as barras de FRPs.

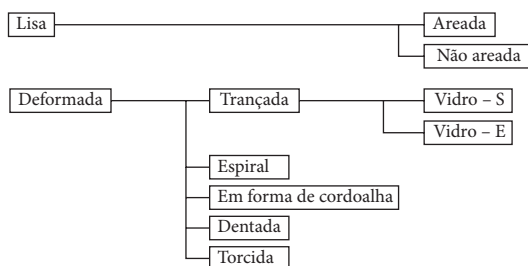


Figura 1.34 Possíveis conformações superficiais das barras de FRPs.

Fonte: adaptada de Tavares.⁹²

⁸⁸ Tavares (2006).

⁸⁹ Couto (2007).

⁹⁰ Wang e Belarbi (2005).

⁹¹ Mazzú (2020).

⁹² Tavares (2006 *apud* Mazzú, 2020).

1.6 PERFIS DE FRPs

Os problemas de durabilidade dos materiais tradicionais e a exigência do aumento da velocidade de construção têm levado ao desenvolvimento de novas soluções estruturais. No âmbito dos FRPs, o uso de perfis, principalmente de GFRPs, tem sido muito demandado devido ao seu baixo peso próprio e elevadas resistência e durabilidade.

Os perfis de FRPs possuem aplicações estruturais ou não estruturais. Neste sentido cita-se o uso de perfis para confecção de escadas, guarda-corpos, grades de piso, plataformas *offshore*, elementos para a indústria petroquímica ou estações de tratamento. A Figura 1.35 apresenta alguns tipos de perfis, enquanto exemplos de uso não estrutural de perfis de GFRP podem ser vistos na Figura 1.36.

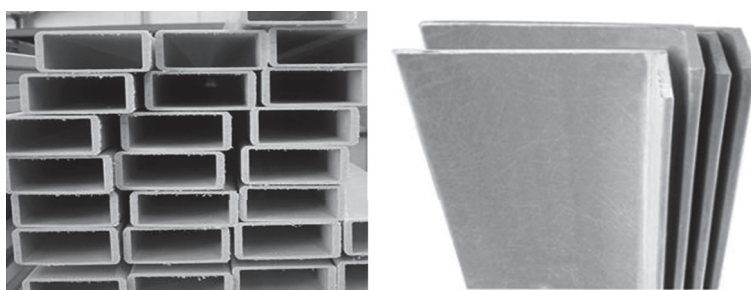


Figura 1.35 Exemplos de perfis de FRPs.

Fonte: Pullwell Composites Co., Ltd.⁹³



Figura 1.36 Possíveis usos de perfis não estruturais de GFRP: (a) estação de tratamento de esgoto (ETE); (b) guarda-corpo.

Fonte: Stratus.⁹⁴

⁹³ Pullwell Composites Co., Ltd. (2020).

⁹⁴ Stratus (2020).

Entretanto aplicações estruturais começaram a surgir nos últimos anos. Segundo Branco *et al.*,⁹⁵ os FRPs podem ser divididos em dois grupos distintos: (a) componentes unidirecionais submetidos à tração (laminados, mantas, barras e cabos) ou (b) componentes bidirecionais submetidos à flexão (perfis e painéis multicelulares pultrudados e painéis do tipo sanduíche), apresentando-se na forma de armaduras não metálicas, materiais de reforço de elementos estruturais, elementos híbridos e elementos totalmente confeccionados com materiais compósitos.

Os elementos híbridos são obtidos pela união do uso de FRPs com materiais tradicionais ou pelo uso de FRPs em certos elementos, como cabos exteriores, vigas ou mesmo como lajes de tabuleiros.

Os painéis de FRPs utilizados em tabuleiros de pontes dividem-se em dois tipos: (a) seções multicelulares fechadas (produzidas por meio de pultrusão) e (b) painéis sanduíche (produzidos por moldagem), sendo normalmente ligados entre si por colagem e fixados às vigas ou longarinas confeccionadas com materiais tradicionais por meio de colagem, parafusos ou com chumbadores.⁹⁶ Neste âmbito cita-se a passarela desenvolvida no projeto Pontalumis,⁹⁷ que possui comprimento total de 11 metros e largura de 2 metros (Figura 1.37).

A seção transversal é formada por uma laje em concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (SFRSCC, *Steel Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete*) com 38 mm de espessura, apoiada em dois perfis pultrudados de GFRP com seção em I e dimensões de $400 \times 200 \times 15 \text{ mm}^3$. As principais vantagens deste processo construtivo são o baixo peso, a rapidez para a montagem, a facilidade de instalação, as propriedades de isolamento eletromagnéticas, a durabilidade melhorada, os baixos custos de manutenção e o maior ciclo de vida. A passarela, denominada de Ponte São Silvestre, foi instalada na cidade de Ovar, Portugal, em dezembro de 2015.

No caso de elementos totalmente confeccionados com o uso de FRPs, geralmente tais materiais são utilizados na superestrutura, enquanto os demais elementos são produzidos com materiais tradicionais.⁹⁸ A Figura 1.38 apresenta a passarela Pontresina, na Suíça, que foi totalmente construída com perfis pultrudados de GFRP. Esta passarela, composta de duas vigas com vão de 12,5 metros, é instalada todos os anos no outono e removida na primavera.

95 Branco *et al.* (2012).

96 Id. *ibid.*

97 Gonilha *et al.* (2014).

98 Branco *et al.* (2012).

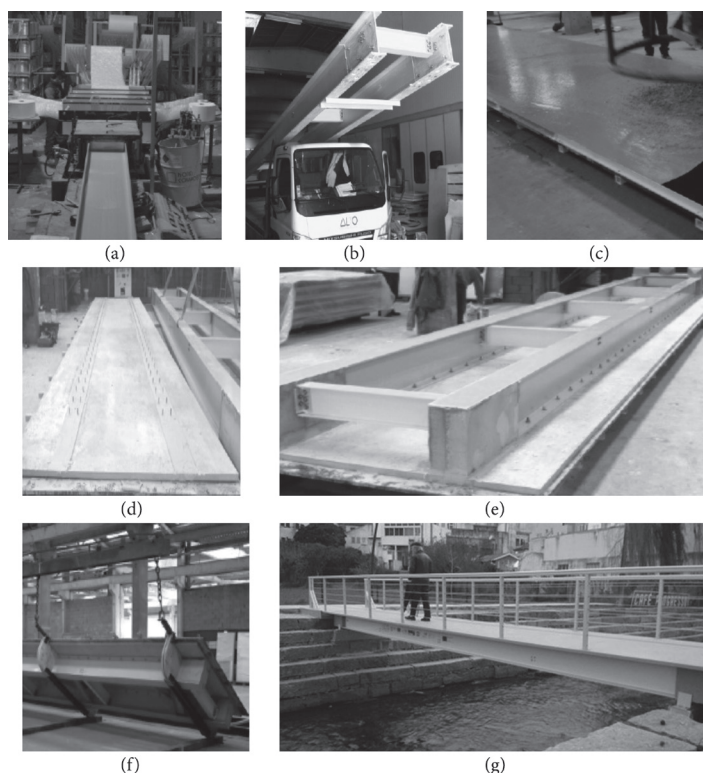


Figura 1.37 Ponte São Silvestre: (a) pultrusão dos perfis de GFRP; (b) transporte da subestrutura; (c) concretagem do tabuleiro; (d) instalação dos sistemas de conexão; (e) montagem dos elementos em GFRP sobre o tabuleiro; (f) posicionamento do elemento; (g) aspecto final do elemento em uso.

Fonte: (a-f) Gonilha *et al.* e Civitest.⁹⁹



Figura 1.38 Passarela Pontresina.

Fonte: EPFL.¹⁰⁰

⁹⁹ Gonilha *et al.* (2014), Civitest (2020).

¹⁰⁰ EPFL (2020).

REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). Committee 549.4R. *Guide to design and construction of externally bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for repair and strengthening concrete and masonry structures*. Farmington Hills: ACI, 2013.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). Committee 440.1R: guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars. Farmington Hills: ACI, 2015.
- BANK, L. Mechanically-fastened FRP (MF-FRP): a viable alternative for strengthening RC members. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRP COMPOSITES IN CIVIL ENGINEERING (CICE), 2., *Proceedings* [...]. Adelaide, 2004.
- BANK, L.; ARORA, D. Analysis of RC beams strengthened with mechanically fastened FRP (MF-FRP) strips. *Composite Structures*, v. 79, p. 180-191, 2007.
- BARROS, J. A. O.; DALFRÉ, G. M.; TROMBINI, E.; APRILE, A. Exploring the possibilities of a new technique for the shear strengthening of RC elements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE CHALLENGES FOR CIVIL CONSTRUCTION, 4., *Proceedings* [...]. Porto, 2008.
- BASLER, M.; WHITE, D.; DESROCHES, M. Shear strengthening with bonded CFRP L-shaped plates. *Field Applications of FRP Reinforcement: Case Studies*, ACI International SP-215, p. 373-384, 2003.
- BERTOLINI, L. *Materiais de construção*. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 408 p.
- BRANCO, F.; CORREIA, J. R.; GONILHA, J.; SÁ, M.; GARRIDO, M. Materiais estruturais compostos: aplicações em GFRP. In: JORNADAS ARGENTINAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 22., Buenos Aires, 5-7 set. 2012.
- CAMACHO, L. F. C. *A utilização de varões de GFRP nas estruturas de betão armado*. 189 p. Dissertação de Mestrado. Universidade da Madeira, Funchal, 2011.
- CAMPANA, S.; RUIZ, M. F.; ANASTASI, A.; MUTTONI, A. Analysis of shear-transfer actions on one-way RC members based on measured cracking pattern and failure kinematics. *Magazine of Concrete Research*, v. 65, n. 6, p. 386-404, 2013.
- CARNEIRO, L. A. V.; TEIXEIRA, A. M. A. J. Propriedades e características dos materiais compostos poliméricos aplicados na engenharia e construção. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, v. 3, p. 54-66, 2008.
- CASTRO, P. F. Barras de FRP: avaliando o módulo de elasticidade não destrutivamente. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 7, n. 2, p. 58-65, abr./jun. 1997.
- CHASTRE, C. Materiais e tecnologias de reforço de estruturas de betão: potencialidade e limitações. In: CONGRESO LATINO-AMERICANO REHABEND: PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN, TECNOLOGÍA DE LA REHABILITACIÓN Y GESTIÓN DEL PATRIMONIO, 5., *Anais* [...]. Santander, 2014. 10 p.
- CIVITEST. Disponível em: <http://www.civitest.pt/2016/03/15/ovar-inaugura-ponte-somente-com-4-cm-de-espessura/>. Acesso em: 1 maio 2020.

- COELHO, M.; SILVA, L.; SENA-CRUZ, J. M.; BARROS, J. Estudo comparativo de diferentes técnicas no reforço à flexão de vigas de betão armado com recurso a CFRPs sob acções monotónicas e de fadiga. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, 2011.
- COUTO, I. A. *Análise teórica e experimental do comportamento da aderência entre o concreto e barras de fibra de vidro impregnada por polímero*. 153 p. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- DALFRÉ, G. M. *Cruzetas de polímeros reciclados: caracterização dos materiais, análise numérica e ensaios de modelos reduzidos*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- DALFRÉ, G. M. *Flexural and shear strengthening of RC elements*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade do Minho, Guimarães, 2013.
- DALFRÉ, G. M.; BARROS, J.; TROMBINI, E. *Análise do desempenho de uma nova técnica de reforço ao corte para elementos estruturais de betão armado*. Guimarães: Encontro Nacional de Betão Estrutural, 2008.
- DE LORENZIS, L.; NANNI, A. Shear strengthening of reinforced concrete beams with near surface mounted fiber-reinforced polymer rods. *ACI Structural Journal*, v. 98, n. 1, p. 60-68, jan./fev. 2001.
- DIRAR, S. H.; MORLEY, C.; LEES, J. Effect of effective depth and longitudinal steel ratio on the behaviour of precracked reinforced concrete T-beams strengthened in shear with CFRP fabrics. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIBER REINFORCED POLYMER REINFORCEMENT FOR CONCRETE STRUCTURES (FRPRCS), 8., *Proceedings* [...]. Patras: University of Patras, 2007.
- EL-SAYED, A. K.; SOUDKI, K. Evaluation of shear design equations of concrete beams with FRP reinforcement. *Journal of Composites for Construction*, v. 15, n. 1, p. 9-20, 2011.
- ELSAIED, W. E.; EBEAD, U. A.; NEALE, K. W. Studies on mechanically fastened fiber-reinforced polymer strengthening systems. *ACI Structural Journal*, v. 106, n. 1, p. 49-59, 2009.
- EPFL. Disponível em: <https://www.epfl.ch/en/>. Acesso em: 1 maio 2020.
- ESCOBAL, A. D.; DALFRÉ, G. M. *Caracterização da degradação de adesivos estruturais utilizados em sistemas de reforço de estrutura de concreto armado*. Relatório científico de progresso. Projeto FAPESP, processo 2016/20025-6. São Carlos, 2017.
- FÉDÉRATION INTERNACIONALE DU BETÓN (FIB). *Bulletin 14: externally bonded FRP reinforcement for RC structures*. Lausanne: FIB, 2001. p. 130.
- FÉDÉRATION INTERNACIONALE DU BETÓN (FIB). *Bulletin 35: retrofitting of concrete structures by externally bonded FRPs*. Lausanne: FIB, 2006. p. 2017.
- FÉDÉRATION INTERNACIONALE DU BETÓN (FIB). *Bulletin 40: FRP reinforcement in RC structures*. Lausanne: FIB, 2007. p. 147.
- FÉDÉRATION INTERNACIONALE DU BETÓN (FIB). *Bulletin 90: externally applied FRP reinforcement for concrete structures*. Lausanne, 2019. 242 p.

FEESER, W. K.; BROWN, V. L. Guide examples for design of concrete reinforced with FRP bars. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF FIBER-REINFORCED POLYMER REINFORCEMENT FOR CONCRETE STRUCTURES, 7., *Anais [...]*. Kansas, 2005. v. 230, p. 935-954.

FERREIRA, D. C. *Avaliação da degradação de vigas reforçadas com FRP quando expostas ao intemperismo*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

FICO, R.; PROTA, A.; MANFREDI, G. Assessment of Eurocode-like design equations for the shear capacity of FRP RC members. *Composites Part B: engineering*, v. 39, n. 5, p. 792-806, 2008.

FIGUEIRA, S. P. S. *Reforço de pilares por confinamento com mantas de fibras de carbono: avaliação de modelos de comportamento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade da Madeira, Funchal, 2016.

GONILHA, J. A.; CORREIA, J. R.; BRANCO, F. A.; SENA-CRUZ, J.; BARROS, J.; RAMOS, L.; GONÇALVES, D.; SANTOS, T.; ALVIM, M. Pontalumis: ponte pedonal mista GFRP-betão: descrição da solução, ensaios e modelação. *5as. Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, 2014.

HEAD, M.; ASHBY-BEY, E.; EDMONDS, K.; EFE, S.; GROSE, S.; MASON, I. *Stainless steel prestressing strands and bars for use in prestressed concrete girders and slabs*. Baltimore: Maryland State Highway Administration; Morgan State University, 2015. p. 121.

ISO. *ISO 527-1: plastics – determination of tensile properties – part 1: general principles*. Genebra: ISO, 2012a. 5 p.

ISO. *ISO 527-2: plastics – determination of tensile properties – part 2: test conditions for moulding and extrusion plastics*. Genebra: ISO, 2012b. 5 p.

ISO. *ISO 527-5: plastics – determination of tensile properties – part 5: test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites*. Genebra: ISO, 2012c. 5 p.

INTECH ENGENHARIA. Disponível em: <https://www.intech.eng.br/reforco-estrutural/>. Acesso em: 4 maio 2020.

INSTITUTO DE ENGENHARIA. Disponível em: <https://www.institutodeengenharia.org.br/site/2009/10/27/novas-tecnicas-e-software-de-reforcos-com-fibra-de-carbono-e-laminados-pretensionados/>. Acesso em: 4 maio 2020.

INTELLIGENT SENSING FOR INNOVATIVE STRUCTURES (ISIS). *Durability of FRP composites for construction*: educational module n. 8. Manitoba: The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS) Canada Corporation, 2006.

JEE ENGENHARIA. 2020. Disponível em: <http://www.jeeengenharia.com.br/>. Acesso em: 4 maio 2020.

JB ESTRUTURAS METÁLICAS. Disponível em: <http://www.estruturasjb.com.br/reforco-estrutural-viga-metalica>. Acesso em: 4 maio 2020.

JUVANDES, L. F. P. Aplicações de compósitos FRP no reforço de estruturas. *1as. Jornadas de Materiais da Construção*, p. 239-270, 2011. Disponível em: <https://goo.gl/AGJQ42>. Acesso em: 19 nov. 2018.

MADE-IN-CHINA. Disponível em: <https://es.made-in-china.com/>. Acesso em: 9 maio 2020.

MAZZÚ, A. D. E. *Estudo sobre a substituição de armadura metálica por barras de GFRP em vigas de concreto armadas à flexão quando submetidas ao ataque acelerado de íons cloreto*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

MC-BAUCHEMIE. Disponível em: <https://www.mc-bauchemie.com.br/cases-referencias/viaduto-jaguare-sp.html>. Acesso em: 4 maio 2020.

MICALI, R. M. *Análise teórica de vigas pré-moldadas de concreto com armadura de aço e de polímeros reforçada com fibra de vidro em meio altamente agressivo*. 150 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

MOSTOFINEJAD, D.; SHAMELI, S.; HOSSEINI, A. EBROG and EBRIG methods for strengthening of RC beams by FRP sheets. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2014.

OLIVEIRA, C. B. L.; GRECO, M.; BITTENCOURT, T. N. Analysis of the Brazilian federal bridge inventory. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 12, n. 1, jan./fev. 2019.

OLIVEIRA, M. C. *Análise do comportamento estrutural e durabilidade de pilares de concreto armado reforçados com mantas de GFRP*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

OWENS CORNING. *Reforço de fibra de vidro: guia de resistência química*. [S. n., s. l.], 2011.

PULLWELL COMPOSITES CO., LTD. Disponível em: <http://pt.grp-china-es.com/frp-profiles/fiberglass-profiles/high-strength-frp-pultruded-composite.html>. Acesso em: 1 maio 2020.

QUEIROZ GÓIS ENGENHARIA E CONSTRUÇÕES. Esforço estrutural: quando deve ser utilizado. 2020. Disponível em: <https://queirozgois.com.br/2019/11/06/esforco-estrutural-quando-deve-ser-utilizado/>. Acesso em: 4 maio 2020.

RIZKALLA, S. H. A new generation of civil engineering structures and bridges. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NON-METALLIC (FRP) REINFORCEMENT FOR CONCRETE STRUCTURES (FRPRCS), 3., *Proceedings [...]*, v. 1. Tóquio: Japan Concrete Institute, 1997. p. 113-128.

SARTI JUNIOR, L. A. *Durabilidade de vigas de concreto armado reforçadas com mantas de CFRP submetidas à degradação acelerada*. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

SCHÖECK. Disponível em: <https://www.schoeck.com>. Acesso em: 1 maio 2020.

S&P CLEVER REINFORCEMENT BRASIL. 2020. Disponível em: <http://www.sp-reinforcement.com.br/>. Acesso em: 1 maio 2020.

S&P CLEVER REINFORCEMENT PORTUGAL. 2021. Disponível em: https://www.sp-reinforcement.pt/sites/default/files/field_literature_file/net_frp_pt_21.06.18.pdf. Acesso em: 23 jun. 2021.

S&P CLEVER REINFORCEMENT ESPANHA. 2021. Disponível em: <https://www.sp-reinforcement.es/es-ES/productos/laminados/sp-c-laminate-pretensados>. Acesso em: 23 jun. 2021.

SILVA, A. S. *Comportamento de pilares curtos confinados por compósitos de fibras de vidro e carbono*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

STRATUS. Stratus FRP. *Processo de pultrusão*. 2020. Disponível em: http://www.stratusfrp.com/index.php?option=com_content&view=article&id=13&Itemid=25. Acesso em: 1 maio 2020.

TAVARES, D. H. *Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de GFRP*. 128 p. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

TAVARES, D. H.; GIONGO, J. S. Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de GFRP. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos: EESC-USP, v. 11, n. 52, p. 143-156, 2009.

VIANA, R. D. A. *Programa para dimensionamento de reforço à flexão e ao corte de vigas de betão armado*. 130 p. Dissertação de Mestrado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

WANG, H.; BELARBI, A. Flexural behavior of fiber-reinforced-concrete beams reinforced with FRP rebars. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF FIBER-REINFORCED POLYMER REINFORCEMENT FOR CONCRETE STRUCTURES, 7., *Anais [...]*. Kansas, 2005. v. 230, p. 895-914.