

**Práticas Recomendadas para Projeto de  
Estruturas de Concreto Armado com Barras de  
FRP**

**Junho/2021**

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Relevância</b> .....	1
<b>1.2. Normas Internacionais</b> .....	2
<b>1.3. Aplicações</b> .....	2
<b>2. ESCOPO</b> .....	<b>3</b>
<b>3. REFERÊNCIAS NORMATIVAS E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>4</b>
<b>4. TERMOS E DEFINIÇÕES</b> .....	<b>6</b>
<b>5. SIMBOLOGIA</b> .....	<b>8</b>
<b>5.1. Letras Minúsculas</b> .....	8
<b>5.2. Letras Maiúsculas</b> .....	8
<b>5.3. Letras Gregas Minúsculas</b> .....	9
<b>6. REQUISITOS GERAIS DE QUALIDADE DA ESTRUTURA E AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE DO PROJETO</b> .....	<b>11</b>
<b>7. DIRETRIZES PARA DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO COM BARRAS DE FRP</b> .....	<b>12</b>
<b>7.1. Mecanismos de Deterioração</b> .....	12
7.1.1. Mecanismos de Deterioração do Concreto .....	12
7.1.2. Mecanismos de Deterioração de Barras de FRP .....	12
7.1.3. Mecanismos de Deterioração de Barras de Aço .....	13
<b>7.2. Agressividade do Ambiente</b> .....	14
<b>7.3. Ensaios Acelerados</b> .....	14
<b>8. CRITÉRIOS DE PROJETO QUE VISAM A DURABILIDADE</b> .....	<b>15</b>
<b>8.1. Qualidade do Concreto e Cobrimento</b> .....	15
<b>8.2. Abertura de Fissuras</b> .....	15
<b>9. MATERIAIS E INTERFACE</b> .....	<b>16</b>
<b>9.1. Concreto</b> .....	16
<b>9.2. Aço (Armadura Passiva)</b> .....	16
<b>9.3. FRP</b> .....	16
9.3.1. Qualificação .....	16
9.3.2. Conformação Superficial .....	16
9.3.3. Sistema de Referência .....	16
9.3.4. Classificação das barras .....	17
9.3.5. Massa específica .....	17

9.3.6.	Coeficiente de dilatação térmica.....	18
9.3.7.	Comportamento à Tração .....	18
9.3.8.	Comportamento à Tração de Barras Dobradas.....	19
9.3.9.	Comportamento à Compressão.....	20
9.3.10.	Comportamento à Fadiga.....	20
9.3.11.	Fluência.....	21
<b>9.4.</b>	<b>Interface entre Concreto e Armadura .....</b>	<b>21</b>
<b>10.</b>	<b>SEGURANÇA E ESTADOS LIMITES .....</b>	<b>23</b>
<b>10.1.</b>	<b>Ações.....</b>	<b>23</b>
<b>10.2.</b>	<b>Resistências .....</b>	<b>23</b>
<b>10.3.</b>	<b>Verificação da Segurança .....</b>	<b>24</b>
<b>10.4.</b>	<b>Limites para Desempenho em Serviço .....</b>	<b>24</b>
<b>10.5.</b>	<b>Limites para Dimensões de Elementos Estruturais .....</b>	<b>25</b>
<b>11.</b>	<b>ANÁLISE ESTRUTURAL.....</b>	<b>26</b>
<b>11.1.</b>	<b>Princípios Gerais da Análise e Hipóteses Básicas .....</b>	<b>26</b>
<b>11.2.</b>	<b>Métodos de Análise Estrutural.....</b>	<b>26</b>
11.2.1.	Análise Linear sem Redistribuição .....	26
11.2.2.	Análise Não-Linear .....	27
11.2.3.	Aproximações para Análises Locais de Vigas.....	27
<b>11.3.</b>	<b>Estratégias para Ductilidade .....</b>	<b>27</b>
<b>12.</b>	<b>INSTABILIDADE E ANÁLISE DE 2ª ORDEM .....</b>	<b>29</b>
<b>12.1.</b>	<b>Análise de 2ª Ordem Global .....</b>	<b>29</b>
<b>12.2.</b>	<b>Análise de 2ª Ordem Local .....</b>	<b>29</b>
12.2.1.	Métodos para Análise de 2ª Ordem Local .....	30
12.2.2.	Efeitos de Fluência.....	31
<b>13.</b>	<b>VERIFICAÇÃO E DETALHAMENTO DE ELEMENTOS LINEARES .....</b>	<b>32</b>
<b>13.1.</b>	<b>ELU para Solicitações Normais (Flexão e Flexo-Compressão).....</b>	<b>32</b>
13.1.1.	Flexão Simples.....	32
13.1.2.	Flexão composta .....	34
<b>13.2.</b>	<b>ELU para Solicitações Tangenciais (Cortante e Torção) .....</b>	<b>34</b>
13.2.1.	Cortante.....	34
13.2.2.	Torção .....	35
<b>13.3.</b>	<b>ELU para Esforços Combinados .....</b>	<b>36</b>
<b>13.4.</b>	<b>ELU de Fadiga.....</b>	<b>36</b>
<b>13.5.</b>	<b>ELU de Fluência .....</b>	<b>37</b>

<b>13.6.</b>	<b>Verificações no ELS</b> .....	37
13.6.1.	ELS de Deformação Excessiva.....	37
13.6.2.	ELS de Fissuração .....	38
<b>13.7.</b>	<b>Armaduras Mínimas e Máximas</b> .....	39
13.7.1.	Elementos Sujeitos à Flexão .....	39
13.7.2.	Armadura de Pele.....	39
13.7.3.	Elementos Sujeitos a Força Cortante .....	39
13.7.4.	Elementos Sujeitos a Torção.....	40
13.7.5.	Elementos Sujeitos a Compressão .....	40
13.7.6.	Uso de Concreto com Fibras.....	40
<b>13.8.</b>	<b>Aspectos do Detalhamento e Regiões Especiais</b> .....	40
<b>14.</b>	<b>VERIFICAÇÕES E DETALHAMENTO DE ELEMENTOS DE SUPERFÍCIE</b> .....	<b>42</b>
<b>14.1.</b>	<b>ELU de Flexão</b> .....	42
<b>14.2.</b>	<b>ELU de Cortante</b> .....	42
<b>14.3.</b>	<b>Solicitações Gerais</b> .....	42
<b>14.4.</b>	<b>ELU de Punção</b> .....	42
<b>14.5.</b>	<b>ELU de Fluência e ELU de Fadiga</b> .....	42
<b>14.6.</b>	<b>Verificações no ELS</b> .....	43
<b>14.7.</b>	<b>Armaduras Mínimas e Máximas</b> .....	43
<b>14.8.</b>	<b>Aspectos do Detalhamento e Regiões Especiais</b> .....	43
<b>15.</b>	<b>ANCORAGEM E EMENDA DE BARRAS</b> .....	<b>45</b>
<b>15.1.</b>	<b>Ancoragem de Barras de FRP</b> .....	45
15.1.1.	Barras Tracionadas .....	45
15.1.2.	Barras Comprimidas .....	45
15.1.3.	Armadura Transversal na Ancoragem .....	45
15.1.4.	Recomendações Construtivas .....	46
<b>15.2.</b>	<b>Emenda de Barras de FRP</b> .....	46
15.2.1.	Barras Tracionadas .....	46
15.2.2.	Barras Comprimidas .....	46
15.2.3.	Armadura Transversal na Emenda.....	47
<b>15.3.</b>	<b>Ancoragem e Emenda de Barras de Aço</b> .....	47

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Relevância

Materiais compósitos são aqueles constituídos pela combinação de dois ou mais materiais quimicamente distintos a fim de se obter propriedades físicas e mecânicas particularmente desejadas. Em compósitos com dois componentes, um dos dois é usualmente chamado de ‘reforço’ (fibras ou partículas, por exemplo) e é envolvido pelo outro componente, denominado ‘matriz’ (polímero, metálica ou cerâmica, por exemplo). No caso dos polímeros reforçados com fibra (FRP, do inglês *fiber-reinforced polymer*), o reforço na forma de fibra fica embebido em matriz polimérica. O FRP em geral tem várias vantagens sobre materiais de construção tradicionais, incluindo o seu peso específico relativamente baixo e sua elevada resistência à corrosão. Combinadas, essas características resultam em redução de custos associados ao transporte, montagem e manutenção. Outras vantagens são a elevada relação resistência/peso, a baixa condutividade térmica, a transparência eletromagnética, o baixo impacto ambiental e a versatilidade com relação à geometria e às propriedades mecânicas.

Barras de polímero reforçado com fibra são compostas por fibras longas embebidas em resina polimérica. São materiais anisotrópicos, tendo seu desempenho afetado pela direção de aplicação de tensão. As resinas termofixas, dentre elas a epóxi, fenólica e éster vinílico são as mais usadas para o processo de fabricação das barras, enquanto vidro, basalto, aramida e carbono estão entre as fibras mais usadas. Suas propriedades variam de acordo com a fração volumétrica de fibras utilizadas e com a condição ambiente. As barras de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP) para concreto armado comumente encontradas no mercado, por exemplo, têm uma resistência à tração variando 400 a 1000 MPa em temperatura ambiente, com um módulo de elasticidade entre 22 e 65 GPa e elevada resistência à fadiga. A conformação superficial dessas barras também pode variar em função do fornecedor, visando uma maior aderência com o concreto.

O uso de barras de FRP como substituição parcial ou total do reforço de aço convencional tem sido amplamente investigado. Essa substituição tem permitido a obtenção de um produto final com menor consumo de energia e maior durabilidade. Com o uso de barras resistentes à corrosão, uma outra interessante possibilidade que tem surgido é a utilização de água do mar para produção de concreto, que já conta com algumas aplicações em andamento. Apesar das vantagens, barras de FRP apresentam comportamento frágil, geralmente com módulo de elasticidade e aderência com o concreto inferiores às das

barras de aço. Além disso, suas propriedades podem ser afetadas por condições de temperatura, umidade e exposição a raios ultravioletas, bem como pela exposição a ambiente alcalino, de forma mais ou menos severa em função do tipo de resina utilizada. Quanto ao comportamento mecânico de longa duração, o comportamento à fluência precisa ser levado em consideração, já que polímeros podem apresentar deformações relevantes sob tensão mesmo em temperatura ambiente. Uma outra característica importante a ser considerada é a incapacidade de realização de dobras nas barras em campo e a redução de resistência nas regiões dobradas, onde geralmente ocorre enrugamento das fibras.

## **1.2. Normas Internacionais**

Dadas as particularidades no comportamento, estruturas de concreto com barras de FRP requerem um projeto adequado às suas características. Essa necessidade levou ao desenvolvimento de diversas normas e recomendações técnicas ao redor do mundo, como os relatórios do American Concrete Institute ACI 440.1R-15 (2015) e da Japanese Society of Civil Engineers JSCE (1997), e as normas canadense CAN/CSA S806-12 (2012), italiana CNR-DT 203 (2006) e russa SP 295.1325800.2017. A elaboração das recomendações é de extrema importância para a disseminação do material de construção para a sociedade, bem como dos procedimentos necessários para o desenvolvimento de projetos seguros. Além disso, elas podem servir como mola propulsora para a realização de novas pesquisas e para o desenvolvimento tecnológico.

## **1.3. Aplicações**

Desde as primeiras aplicações de barras de FRP como armadura em estruturas de concreto na década de 1980, essa solução tem conquistado mercado na Ásia, Europa e América do Norte, com aplicações principalmente em tabuleiros de pontes, pavimentos rígidos, reservatórios e estruturas em ambientes marinhos e agressivos, aplicações que exijam transparência eletromagnética ou em estruturas que sofrerão intervenção de equipamentos de corte em segunda etapa. A norma ACI 440.1R-15 aponta, ainda, que o uso de barras de FRP é indicado como uma solução de melhor custo-benefício em comparação ao uso de barras galvanizadas, revestidas com epóxi ou de aço inox. No Brasil, as aplicações ainda são majoritariamente destinadas a pavimentos rígidos, ‘soft eyes’ de paredes de diafragma em obras de metrô e enfilagem de túneis, mas registros recentes apontam aplicações em residências e pontilhões.

## 2. ESCOPO

O presente documento apresenta recomendações para o projeto de estruturas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras (FRP, do inglês *fiber-reinforced polymer*), contemplando as seguintes características e condições:

- a) As barras de FRP consideradas são aquelas obtidas a partir de polímeros termofixos e fibras contínuas de vidro, aramida, carbono ou basalto e produzidas por processo industrial com configurações superficiais diversas tais como entalhes, fio enrolado helicoidalmente ou revestimento de epóxi e areia, atendendo aos requisitos constantes em [Práticas Recomendadas XXX]. Barras lisas podem ser consideradas em aplicações sem fins estruturais ou com finalidade meramente construtiva;
- b) Estruturas com armaduras passivas, ou seja, não protendidas;
- c) Concretos estruturais com características e classes de resistência definidos na NBR 8953;
- d) Concretos com fibras para fins de ductilidade e controle de fissuração, com características definidas em [Práticas Recomendadas XXX];
- e) Armaduras compostas pela combinação de barras metálicas e não-metálicas para fins de ductilidade e comportamento em condições extremas. As barras de metálicas devem aos requisitos da NBR 7480; e
- f) Para situações onde a armadura estiver exposta a temperaturas de, no máximo, 60°C. Em nenhuma hipótese as recomendações constantes nesse documento devem ser utilizadas para estruturas em condições de incêndio onde não houver sistema de proteção adequado e para os casos em que as barras podem atingir temperaturas superiores à temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) do polímero que a compõe.

Esse documento é baseado nas experiências nacional e internacional reportadas na literatura acerca de concreto armado com barras de FRP, bem como em normas internacionais que abordam o assunto.

### 3. REFERÊNCIAS NORMATIVAS E RECOMENDAÇÕES

Essa Prática Recomendada foi elaborada tomando como base as seguintes referências normativas sobre concreto armado com barras de FRP:

CNR-DT 203 (2006). Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-reinforced Polymer Bars, National Research Council, Rome, Italy.

CAN/CSA S806-12 (2012). Design and Construction of Building Components with Fibre Reinforced Polymers, Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario.

ACI 440.1R-15 (2015). Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars, American Concrete Institute, Farmington Hills (MI).

SP 295.1325800.2017 (2017). Concrete structures reinforced with polymer composite rebars (fiberglass reinforced plastic - FRP). Regulations on design. Federal Agency for Technical Regulation and Metrology (Rosstandart) (2017). Moscow.

Além disso, as seguintes recomendações internacionais foram consultadas:

Japan Society of Civil Engineers (JSCE) (1997). Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials, in: A. Machida (Ed.), Concrete Engineering Series, vol. 23, Tokyo, Japan.

British Institution of Structural Engineers (BISE) (1999). Interim Guidance on the Design of Reinforced Concrete Structures using Fiber Composite Reinforcement, IStructE, SETO Ltd., London.

I.S.I.S. Canada (2007). Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers - ISISM03-07. Canadian network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, University of Winnipeg, Manitoba.

International Federation for Structural Concrete (fib) (2007). FRP reinforcement in RC structures. fib Bulletin 40, Lausanne.

International Federation for Structural Concrete (fib) (2013). fib Model Code for Concrete Structures 2010.



Dentre as normas brasileiras, são consideradas relevantes aquelas que atualmente encontram-se listadas na NBR 6118:

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014). NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.

#### 4. TERMOS E DEFINIÇÕES

Levando-se em conta as particularidades do concreto armado com barras de FRP com relação à prática do concreto convencional, a seguinte terminologia é aqui introduzida:

AFRP – polímero reforçado com fibras de aramida, que são fibras orgânicas altamente orientadas de poliamida aromática.

Alcalinidade – condição associada à presença íons de hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) dissolvidos.

BFRP – polímero reforçado com fibras de basalto, obtidas a partir da fusão de rochas basálticas trituradas e posterior extrusão na forma filamentos contínuos de pequeno diâmetro.

CFRP – polímero reforçado com fibras de carbono, que são fibras obtidas a partir do aquecimento de precursores orgânicos com alto teor de carbono, como rayon, poliacrilonitrila (PAN) ou piche em ambiente inerte.

Cura – processo associado ao endurecimento do polímero por interligação das suas cadeias; pode ser feita mediante uso de aditivos químicos, com calor ou com radiação ultravioleta.

Fração volumétrica – volume do constituinte por unidade de volume do material compósito.

Fração de massa – massa do constituinte por unidade de massa do material compósito.

Fibras – tipo de reforço de materiais compósitos caracterizados por forma alongada, com comprimento muito superior ao seu diâmetro; podem ser descontínuas (cortadas) ou contínuas; em barras de FRP, apenas são consideradas fibras contínuas.

FRP – material compósito obtido pela impregnação de reforço na forma de fibras por polímero, no inglês *fiber-reinforced polymer*; para efeito desse trabalho, as são consideradas apenas fibras na sua forma contínua.

GFRP – polímero reforçado com fibras de vidro, que são de origem inorgânica e obtidas por fusão de material de natureza silicosa (areia).

Ligação cruzada – ligação química entre cadeias poliméricas, característica de polímeros termofixos; a quantidade de ligações cruzadas aumenta com a cura, até estabilizar; o aumento das ligações leva a maiores resistências e módulos, mas reduz ductilidade do polímero.

Materiais compósitos – são aqueles constituídos pela combinação de dois ou mais materiais quimicamente distintos a fim de se obter propriedades físicas e mecânicas particularmente desejadas.

Matriz – material constituinte de um compósito, responsável pelo envolvimento e proteção do reforço, transferindo para ele as forças externas.

Polímero – macromolécula formada pela união em cadeia de unidades moleculares de baixa massa molecular (monômeros); o processo de formação da cadeia é chamado de polimerização.

Polímero termofixo – tipo de polímero caracterizado por ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas; uma vez endurecido, não pode ter sua forma alterada; também é conhecido como termorrígido ou termoendurecido.

Polímero termoplástico – tipo de polímero caracterizado por cadeias poliméricas lineares ou ramificadas, ligadas fracamente entre si; quando aquecidos a dada temperatura, torna-se moldável.

Pultrusão – processo de fabricação de materiais compósitos automatizado que consiste em ‘puxar’ continuamente fibras impregnadas com resina através de um molde aquecido, onde ocorre a cura.

Temperatura de decomposição – temperatura para a qual ocorre quebra das ligações covalentes dos polímeros, com decomposição em menores moléculas de outras substâncias ou em seus átomos constituintes.

Temperatura de transição vítrea – temperatura acima da qual o polímero passa de um estado sólido (vítreo) para um estado ‘borrachoso’ (ou de líquido super-resfriado), quando aquecido; nessa temperatura, não há mudança estrutural, ocorrendo apenas maior mobilidade na região desordenada do material (amorfa).

Reforço – material constituinte de um compósito, principal responsável por sua rigidez e resistência mecânica.

## 5. SIMBOLOGIA

A seguir é apresentada simbologia geral adotada ao longo desse documento. Outros símbolos específicos são apresentados ao longo do texto e também podem ser consultados na NBR 6118.

### 5.1. Letras Minúsculas

- b = largura
- c = cobrimento
- d = altura útil
- $f_k$  = resistência característica
- $f_d$  = resistência de cálculo
- h = altura
- t = espessura
- r = raio de giração
- r = raio de dobra
- s = espaçamento de armaduras transversais
- t = tempo
- u = perímetro
- x = profundidade da linha neutra
- y = distância com relação à linha neutra
- w = abertura de fissura

### 5.2. Letras Maiúsculas

- $A_c$  = área de concreto
- $A_f$  = área de armadura de FRP longitudinal
- $A_{ft}$  = área de armadura de FRP transversal
- $C_E$  = fator de redução ambiental
- E = módulo de elasticidade
- EI = rigidez à flexão

$I$	= momento de inércia
$L$	= comprimento
$M$	= momento fletor
$N$	= força normal
	= número de ciclos
$R_d$	= esforço resistente de cálculo
$S_d$	= esforço solicitante de cálculo
$T$	= momento torçor
$V$	= força cortante

### 5.3. Letras Gregas Minúsculas

$\alpha$	= coeficiente
$\alpha_c$	= parâmetro de redução da resistência do concreto na compressão
$\alpha_f$	= coeficiente de dilatação térmica da barra de FRP
$\varepsilon$	= deformação específica
$\varepsilon_c$	= deformação específica no concreto
$\varepsilon_f$	= deformação específica na barra de FRP
$\theta$	= ângulo de inclinação
$\lambda$	= índice de esbeltez
	= coeficiente para profundidade do bloco retangular de tensões em vigas
$\rho$	= massa específica
$\rho_f$	= taxa de armadura
$\gamma_m$	= coeficiente parcial de minoração da resistência
$\eta$	= coeficientes para cálculo de aderência
$\tau_b$	= tensão de aderência nominal
$\phi$	= diâmetro nominal da barra de FRP
$\phi_E$	= coeficiente de viscosidade para fluência

$\sigma$  = tensão

## **6. REQUISITOS GERAIS DE QUALIDADE DA ESTRUTURA E AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE DO PROJETO**

As estruturas de concreto armado com barras de FRP devem atender aos mesmos requisitos gerais definidos na NBR 6118, resumidamente descritos a seguir:

### 1) Requisitos de qualidade das estruturas:

As estruturas devem apresentar i) segurança à ruptura durante todas as fases construtivas e ao longo de sua vida útil; ii) desempenho em serviço satisfatório e compatível com a função da construção; e iii) durabilidade adequada frente à agressividade do meio em que a estrutura está inserida.

### 2) Requisito de qualidade do projeto:

O projeto estrutural deve ser desenvolvido considerando: i) a interação entre as diversas especialidades envolvidas no projeto, a funcionalidade da estrutura e sua construtibilidade; ii) atendimentos aos critérios de segurança, desempenho em serviço e durabilidade para os cenários mais desfavoráveis durante todas as fases da vida da estrutura, incluindo recomendações para a fase construtiva; e iii) a entrega de documentação técnica detalhada necessária à construção segundo a boa prática da engenharia, incluindo desenhos de forma, armadura e sequência construtiva, especificações técnicas, memórias de cálculo, dentre outros que se façam necessários.

### 3) Avaliação da conformidade do projeto:

O projeto deve ser avaliado por profissional habilitado e independente do profissional responsável pelo projeto e sua conformidade deve ser atestada antes do início da construção.

## **7. DIRETRIZES PARA DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO COM BARRAS DE FRP**

### **7.1. Mecanismos de Deterioração**

Da mesma forma que as estruturas de concreto armado convencional, as estruturas de concreto armado com barras de FRP também estão sujeitas a degradação por diferentes mecanismos. O projeto deve ser elaborado de forma que a estrutura possa conservar suas características de segurança dentro de uma vida útil pré-estabelecida sob condições de manutenção e uso estabelecidas. Além dos mecanismos de deterioração da estrutura como um todo (definidos na NBR 6118), os seguintes mecanismos podem ser identificados.

#### **7.1.1. Mecanismos de Deterioração do Concreto**

Os mecanismos de deterioração do concreto são os mesmos descritos na NBR 6118, a saber: lixiviação, expansão por sulfato e reação álcali-agregado. As ações mitigadoras desses mecanismos devem ser devidamente previstas no projeto, conforme estabelecido na NBR 6118.

#### **7.1.2. Mecanismos de Deterioração de Barras de FRP**

As barras de FRP possuem normalmente um desempenho superior quando em ambientes agressivos, mas também podem estar sujeitas a mecanismos de degradação, tais como:

##### **Efeitos da água**

As moléculas de água absorvidas pela barra podem provocar plastificação ou hidrólise da matriz. Esses fenômenos podem resultar em modificações das características **do polímero** e em tensões de inchamento que podem finalmente provocar alterações das propriedades mecânicas e em perda de adesão entre fibra e matriz. Resultados indicam que a influência deletéria da água passa a ser importante apenas para temperaturas em serviço superiores a 60 °C e, em geral, esses efeitos são considerados desprezíveis para temperaturas abaixo de 40 °C.

##### **Efeitos de cloretos**

Os estudos existentes parecem apontar que a presença de cloretos tem pouca influência na performance mecânica das barras de FRP. Vale destacar, no entanto, que o compósito absorve água quando imerso em solução salina, podendo estar sujeito a hidrólise, plastificação e tensões de inchamento. Por outro lado, como o



sal não é tão prontamente absorvido pela resina como a água, seu acúmulo sobre a superfície da barra inibe a absorção da água, diminuindo o nível de saturação.

#### Efeitos de álcalis

As propriedades das barras de FRP podem sofrer degradação importante em ambientes alcalinos. Pesquisas recentes têm indicado, no entanto, que ensaios em soluções com pH variando de 11,5 a 13 costumam levar a degradação mais severa que aquela que ocorre no concreto. O uso de um concreto com menor conteúdo de hidróxido de cálcio e o uso de barras feitas com constituintes apropriados podem mitigar o problema. Por exemplo, no caso de barras de fibra de vidro, fibras álcali resistentes (AR-glass) devem ser utilizadas. Além disso, os resultados das pesquisas têm indicado que resinas éster vinílicas apresentam uma maior resistência ao ingresso de umidade, sendo capazes de conferir maior proteção às fibras.

#### Efeitos de exposição a raios ultravioletas

A exposição a raios ultravioletas e umidade antes do posicionamento dentro do concreto pode ocasionar degradação dos polímeros (ou de fibras poliméricas), afetando seu desempenho mecânico. Recomenda-se uso de aditivos na composição do material ou de proteção contra a exposição ao sol e a umidade antes da aplicação.

#### Efeitos da temperatura

As características das barras de FRP dependentes da matriz são influenciadas significativamente pela temperatura, sobretudo quando estas atingem valores superiores à temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) da matriz polimérica, quando a matriz sofre transformações físicas e mecânicas importantes. Temperaturas elevadas também favorecem a degradação da interface e absorção de umidade. Desse modo, o uso de barras de FRP não é recomendado para estruturas sem proteção cuja integridade dependa da resistência a altas temperaturas.

#### 7.1.3. Mecanismos de Deterioração de Barras de Aço

Quando a estrutura contiver barras de aço, mecanismos de deterioração das barras também podem se desenvolver, conforme descrito na NBR 6118. São eles: despassivação por carbonatação e despassivação por ação de cloretos.

## **7.2. Agressividade do Ambiente**

As classes de agressividade ambiental (CAA) para uma estrutura de concreto armado com barras de FRP seguem as definições constantes da NBR 6118. No entanto, em qualquer situação onde o concreto estiver em contato permanente com a água, a classe mais severa de agressividade deve ser considerada.

## **7.3. Ensaios Acelerados**

Para comprovação da durabilidade da solução estrutural adotada, recomenda-se realização dos ensaios acelerados constantes em [Práticas Recomendadas XXX], descritos em normas internacionais ASTM ou ISO, ou não-normatizados com eficácia devidamente comprovada na literatura técnica internacional.

## **8. CRITÉRIOS DE PROJETO QUE VISAM A DURABILIDADE**

Recomendações de ordem geral com relação aos critérios de projeto voltados para a durabilidade tais como formas arquitetônicas e estruturais, drenagem e medidas de inspeção e prevenção devem seguir aquelas prescritas na NBR 6118. A seguir são descritos aspectos particulares associados às estruturas de concreto com barras de FRP.

### **8.1. Qualidade do Concreto e Cobrimento**

Apesar das barras de FRP serem reconhecidas pela elevada durabilidade em ambientes agressivos, recomenda-se que a classe do concreto e o cobrimento nominal sigam as recomendações da NBR 6118. Concretos de classe inferior e cobrimentos menores podem ser adotados desde que a durabilidade seja devidamente comprovada a partir de ensaios acelerados que simulem as condições do ambiente em que a estrutura ficará inserida, conforme descrito na Seção 7.3. Quanto à redução do cobrimento, o valor adotado deve ser suficiente para resistir a eventuais tensões de tração causadas por variação volumétrica diferencial entre os componentes ou como consequência da transferência de forças entre armadura e concreto.

### **8.2. Abertura de Fissuras**

Com relação ao aço, as barras de FRP possuem normalmente um menor módulo de elasticidade e/ou uma interface barra-concreto menos resistente, resultando em aberturas de fissura normalmente maiores. Devido à durabilidade elevada do material, aberturas de fissura maiores são toleradas, conforme apresentado na Seção 10.

## 9. MATERIAIS E INTERFACE

### 9.1. Concreto

As propriedades físicas e mecânicas do concreto para consideração em projeto são aquelas definidas na NBR 6118.

### 9.2. Aço (Armadura Passiva)

Caso barras de aço sejam utilizadas na estrutura, suas propriedades podem ser tomadas conforme prescrições da NBR 6118.

### 9.3. FRP

#### 9.3.1. Qualificação

As barras de FRP consideradas no presente documento são aquelas obtidas a partir de polímeros termofixos e fibras contínuas de vidro, aramida, carbono, basalto ou híbridas e produzidas por processo industrial. As barras devem estar em conformidade e atender aos requisitos mínimos descritos em [Práticas Recomendadas XXX].

#### 9.3.2. Conformação Superficial

Dada a baixa adesão entre concreto e FRP, as barras aqui consideradas devem apresentar **revestimento** superficial capaz de prover aderência mecânica entre os materiais. Alguns dos tipos de **revestimento** considerados são:

- a) entalhes;
- b) fios enrolados helicoidalmente;
- c) impregnação externa de epóxi e areia.

Outros tipos de **revestimento** são permitidos desde que a eficiência da aderência seja devidamente comprovada através de ensaios de arrancamento. Barras lisas podem ser utilizadas desde que para aplicações não-estruturais ou para fins construtivos.

#### 9.3.3. Sistema de Referência

Por apresentarem comportamento ortotrópico, é importante estabelecer sistema de referência apropriado para as barras, de maneira a possibilitar a correlação entre as direções e suas propriedades. De maneira geral, as propriedades serão referidas às

direções longitudinal (paralela às fibras, L) e transversal (perpendicular às fibras, T, ou radial), conforme apresentado na Figura 1.

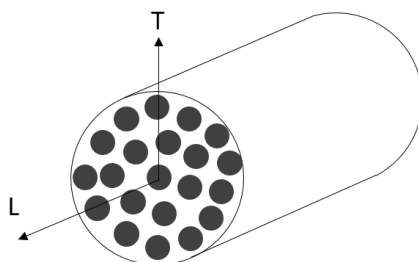


Figura 1 – Sistema de referência considerado.

#### 9.3.4. Classificação das barras

Dadas as possibilidades de combinação de constituintes, a classificação das barras é normalmente feita em função do tipo de fibra contínua adotada:

AFRP = barras de polímero reforçado com fibras de aramida

BFRP = barras de polímero reforçado com fibras de basalto

CFRP = barras de polímero reforçado com fibras de carbono

GFRP = barras de polímero reforçado com fibras de vidro

As especificações das barras devem atender àquelas descritas em [Práticas Recomendadas XXX].

#### 9.3.5. Massa específica

A massa específica das barras depende do tipo de fibra e polímero utilizados, bem como da fração volumétrica de fibras. A Tabela 1 a seguir apresenta valores usuais dessa propriedade física.

Tabela 1 – Massa específica  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) de barras de FRP.

<b>Material</b>	<b><math>\rho</math> (<math>\text{kg/m}^3</math>)</b>
<b>AFRP</b>	1400
<b>BFRP</b>	2400
<b>CFRP</b>	1700
<b>GFRP</b>	2200

### 9.3.6. Coeficiente de dilatação térmica

O coeficiente de dilatação térmica também é dependente dos constituintes e da fração de fibras, bem como da direção considerada. A Tabela 2 apresenta valores de referência dos coeficientes de dilatação térmica.

Tabela 2 – Coeficiente de dilatação térmica  $\alpha_f$  ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) de barras de FRP.

<b>Material</b>	<b>Direção</b>	<b><math>\alpha_f</math> (<math>\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}</math>)</b>
<b>AFRP</b>	<b>L</b>	-4,0
	<b>T</b>	70
<b>BFRP</b>	<b>L</b>	8,0
	<b>T</b>	22
<b>CFRP</b>	<b>L</b>	-4,5
	<b>T</b>	90
<b>GFRP</b>	<b>L</b>	8,0
	<b>T</b>	22
L = direção longitudinal T = direção transversal		

### 9.3.7. Comportamento à Tração

Quando solicitada longitudinalmente à tração, a barra de FRP apresenta comportamento essencialmente elástico linear até a ruptura. As propriedades mecânicas relevantes na referida direção como módulo de elasticidade médio ( $E_f$ ), resistência característica ( $f_{tk}$ ) e deformação última ( $\varepsilon_{fu}$ ) são dependentes das propriedades dos constituintes, bem como da fração de fibras. A Tabela 3 apresenta valores de referência para as propriedades em condições ideais, mas valores superiores aos da tabela podem ser adotados em projeto desde que devidamente comprovados a partir dos ensaios mecânicos definidos em [Práticas Recomendadas XXX]. A Figura 2 mostra um diagrama tensão-deformação idealizado para o material.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas de referência para tração longitudinal de barras de FRP.

Material	Propriedade	Valor de Referência
AFRP	$E_f$ (GPa)	70
	$f_{fk}$ (MPa)	1400
	$\varepsilon_{fu}$ (‰)	20,0
BFRP	$E_f$ (GPa)	50
	$f_{fk}$ (MPa)	800
	$\varepsilon_{fu}$ (‰)	16,0
CFRP	$E_f$ (GPa)	130
	$f_{fk}$ (MPa)	1400
	$\varepsilon_{fu}$ (‰)	10,7
GFRP	$E_f$ (GPa)	50
	$f_{fk}$ (MPa)	800
	$\varepsilon_{fu}$ (‰)	16,0

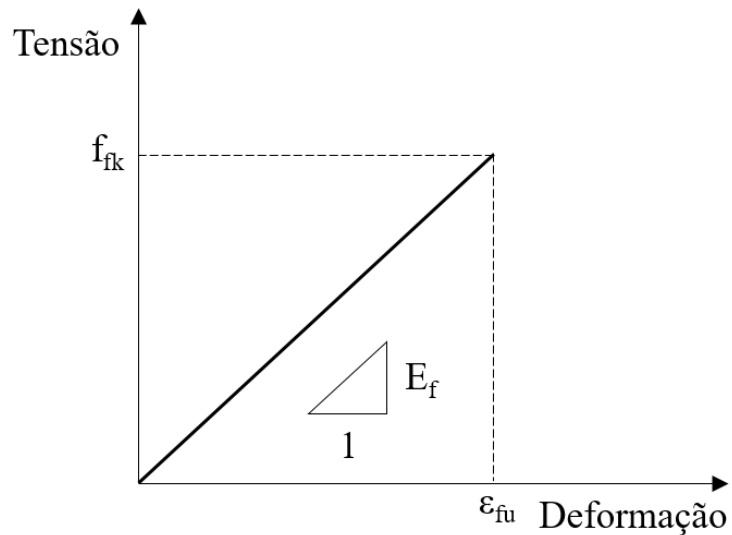


Figura 2 – Diagrama tensão-deformação idealizado.

### 9.3.8. Comportamento à Tração de Barras Dobradas

A resistência à tração característica de barras contendo dobras pode ser determinada a partir de ensaios mecânicos definidos em [Práticas Recomendadas XXX] ou estimada como:

$$f_{fbk} = \left( 0,05 \frac{r_b}{\phi} + 0,3 \right) f_{fk} \quad (1)$$

onde  $r_b$  é o raio de dobra e  $\phi$  é o diâmetro nominal da barra. O comportamento pode ser assumido como linear elástico.

### 9.3.9. Comportamento à Compressão

O comportamento à compressão longitudinal de barras de FRP também pode ser considerado linear elástico, com módulo de elasticidade igual ao de tração. Como a prevenção da flambagem das fibras é conferida pela matriz polimérica, as propriedades à compressão são mais dependentes da matriz. Como referência, pode-se assumir que as barras tenham resistência característica à compressão de  $f_{fck} = 300$  MPa, independentemente de sua classificação. Valores superiores podem ser adotados em projeto desde que devidamente comprovados a partir dos ensaios mecânicos definidos em [Práticas Recomendadas XXX].

### 9.3.10. Comportamento à Fadiga

Na ausência de dados experimentais específicos ou de modelos teóricos mais precisos, a resistência residual à fadiga,  $f_{f, fad}$ , pode ser obtida de acordo com a curva S-N proposta por Sendeckyj e dada conforme equação abaixo.

$$f_{f, fad}(N) = \frac{f_{fk}}{(1 - \alpha + \alpha N)^\beta} \quad (2)$$

Na equação acima, N é o número de ciclos a serem considerados e  $\alpha$  e  $\beta$  são parâmetros adimensionais ajustados a partir de ensaios e podem ser tomados respectivamente como 0,0038 e 0,14. Além disso, o carregamento cíclico leva à propagação de danos com consequente degradação da rigidez da barra. O módulo de elasticidade da barra em função do número de ciclos pode ser estimado da seguinte forma:

$$E_{f, fad}(N) = E_f \left[ 1 - KN \left( \frac{f_{fk}}{E_f} \right)^n \right] \quad (3)$$

onde K e n são parâmetros adimensionais ajustados a partir de ensaios e podem ser tomados respectivamente como  $1,15 \times 10^{12}$  e 8,06.



Para fins de projeto, a fadiga pode ser desprezada para número de ciclos inferior a 10.000. As equações acima podem ser estendidas ao caso de barras dobradas tracionadas quando necessário.

### 9.3.11. Fluência

Na ausência de dados experimentais específicos ou de modelos teóricos mais precisos, o módulo de elasticidade longitudinal dependente do tempo ( $E_{f,t}$ ), que inclui os estágios de fluência primária e secundária, pode ser determinado segundo a expressão abaixo, onde  $t = 0$  se refere ao instante de aplicação do carregamento.

$$E_{f,t}(t) = \frac{E_f}{1 + \phi_E(t)} \quad (4)$$

Onde  $\phi_E(t)$  se refere ao coeficiente de viscosidade e pode ser estimado conforme Tabela 4 (interpolando para valores intermediários). Na Eq. (4), nos casos em que a fadiga também for importante para o problema, deve-se utilizar  $E_{f,fad}$  calculado conforme Eq. (3) ao invés de  $E_f$ . Os efeitos da fluência podem ser desprezados para fins de verificação no estado limite último.

Tabela 4 – Coeficientes de viscosidade devido a deformações longitudinais para diferentes tempos após a aplicação do carregamento.

<b>Tempo <math>t</math></b>	<b><math>\phi_E(t)</math></b>
<b>1 ano</b>	<b>0,26</b>
<b>5 anos</b>	<b>0,42</b>
<b>10 anos</b>	<b>0,50</b>
<b>30 anos</b>	<b>0,60</b>
<b>50 anos</b>	<b>0,66</b>

## 9.4. Interface entre Concreto e Armadura

A resistência de aderência característica,  $f_{bk}$ , entre o concreto e uma barra de FRP pode ser obtida como 30% da tensão de aderência de pico obtida a partir de ensaio de arrancamento definido em [Práticas Recomendadas XXX]. Alternativamente, a resistência pode ser estimada como:

$$f_{bk} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 f_{ctk,inf} \quad (5)$$

onde:

$\eta_1 = 1,25$  para barras com revestimento de areia; 1,15 para barras com fios enrolados em espiral ou nervuras superficiais; e 0,7 para barras com reentrâncias no comprimento.

$\eta_2 = 1,0$  para zona de boa aderência e 0,7 para zona de má aderência, conforme definições da NBR 6118.

$\eta_3 = 1,0$  para barras com diâmetro inferior a 20 mm e 0,8 para barras com diâmetro superior a 20 mm.

$\eta_4 = 1,0$  para barras de GFRP, BFRP ou CFRP e 0,8 para barras de AFRP.

$f_{ctk,inf}$  é a resistência à tração característica inferior do concreto, determinada de acordo com a NBR 6118.

Para situações que envolvem carregamentos cíclicos com  $N > 10.000$  ciclos, recomenda-se que a resistência de aderência seja reduzida dividindo-se o valor computado na Eq. (5) por  $(1 - \alpha + \alpha N)^\beta$ , com os parâmetros da expressão obtidos conforme descrito na seção 9.3.10.

A resistência de aderência entre aço e concreto, quando necessária, deve ser determinada de acordo com a NBR 6118.

## 10. SEGURANÇA E ESTADOS LIMITES

Os critérios de segurança adotados nesta Recomendação Técnica são baseados na NBR 8681. Além disso, os Estados-Limites Último e de Serviço – ELU e ELS, respectivamente – são considerados nesse documento seguindo as mesmas recomendações da NBR 6118.

### 10.1. Ações

As ações e combinações consideradas para projeto no ELU e no ELS podem ser consideradas conforme recomendações da NBR 6118.

### 10.2. Resistências

Para fins de projeto, os valores característicos das resistências são tomados de forma que haja apenas 5% de probabilidade de não ser atingido dentro de um dado lote do material. As resistências de cálculo para concreto e aço podem ser obtidas da mesma forma que na NBR 6118, conforme Eqs. (6a)a e (6a)b, respectivamente. Já para as barras de FRP e sua interface com o concreto, a resistência de cálculo pode ser obtida conforme Eq. (6a)c.

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_c} \quad \begin{array}{l} \text{Concreto e interface} \\ \text{concreto/armadura} \end{array} \quad (6a)$$

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_s} \quad \text{Aço} \quad ((6a)b)$$

$$f_d = C_E \frac{f_k}{\gamma_m} \quad \text{FRP} \quad ((6a)c)$$

Nas equações acima,  $f_d$  e  $f_k$  se referem a valores genéricos de resistência de cálculo e característico, respectivamente, e os coeficientes de redução de resistência  $\gamma_s$  para aço e  $\gamma_c$  para o concreto são aqueles apresentados na NBR 6118. A Tabela 5 a seguir apresenta os valores do coeficiente parcial  $\gamma_m$  para as barras de FRP e sua interface com o concreto, enquanto os fatores de redução ambiental  $C_E$  são aqueles constantes na Tabela 6.

Tabela 5 – Coeficientes de redução de resistência  $\gamma_m$  para barras de FRP.

Combinação	$\gamma_m$
ELU Normal	1,30
ELU Especial ou de construção	1,20
ELU Excepcional	1,20
ELU Fadiga	1,20

<b>ELS</b>	1,00
------------	------

Tabela 6 – Fator de redução ambiental  $C_E$ .

<b>Condição de exposição</b>	<b>Material</b>	<b>Fator de redução ambiental <math>C_E</math></b>
<b>Interior e sem contato com solo</b>	<b>AFRP</b>	0,9
	<b>CFRP</b>	1,0
	<b>GFRP / BFRP</b>	0,8
<b>Exterior ou em contato com solo</b>	<b>AFRP</b>	0,8
	<b>CFRP</b>	0,9
	<b>GFRP / BFRP</b>	0,7

### 10.3. Verificação da Segurança

Assim como no caso das estruturas de concreto armado convencionais, as estruturas de concreto armado com barras de FRP devem atender aos estados-limites últimos e de serviço (ELU e ELS) para o todo e para as partes durante toda sua vida útil, incluindo as fases construtivas. Para tal, os esforços solicitantes de cálculo ( $S_d$ ) devem ser inferiores às resistências de cálculo correspondentes ( $R_d$ ):

$$S_d \leq R_d \quad (7)$$

Na determinação de  $S_d$ , os cenários mais desfavoráveis passíveis de ocorrência ao longo da vida útil da estrutura (incluindo construção) devem ser considerados, incorporando efeitos de 2ª ordem, exceto quando houver dispensa de sua consideração.

Mais detalhes com relação aos princípios gerais que regem as etapas de projeto são apresentados na NBR 6118.

### 10.4. Limites para Desempenho em Serviço

#### 10.4.1. Abertura de Fissuras

As aberturas de fissura em estruturas de concreto armado com barras de FRP devem atender aos limites apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Aberturas de fissura limite para estruturas de concreto com barras de FRP.

<b>Condição de exposição</b>	<b>w<sub>max</sub> (mm)</b>
<b>Ambiente interno (todas as CAA)</b>	0,7
<b>Ambiente externo (todas as CAA)</b>	0,5

Caso a estrutura tenha apelo estético, os limites podem ser reduzidos de comum acordo com o Contratante. Na presença de barras de aço, os limites impostos na NBR 6118 devem prevalecer.

#### 10.4.2. Deslocamentos

Os deslocamentos-limites para estruturas de concreto armado com barras de FRP devem seguir aqueles prescritos na NBR 6118, levando-se em conta adequadamente as características do FRP em serviço.

### **10.5. Limites para Dimensões de Elementos Estruturais**

As dimensões-limites para os elementos estruturais devem seguir aquelas recomendadas na NBR 6118, visando garantir execução adequada e desempenho satisfatório dos elementos estruturais. No entanto, a menor dimensão da seção de pilares de concreto com barras de FRP deverá ser igual ou superior a 19 cm.

## 11. ANÁLISE ESTRUTURAL

### 11.1. Princípios Gerais da Análise e Hipóteses Básicas

Os princípios gerais e as hipóteses assumidas para a análise de estruturas de concreto com barras de FRP são os mesmos considerados para a análise de estruturas de concreto armado convencional descritos na NBR 6118.

Por se tratar de material com comportamento linear, tensões e esforços permanentes gerados na fase construtiva devem ser somados àqueles na fase final. O modelo de cada fase deve respeitar as condições geométricas e de contorno correspondentes.

### 11.2. Métodos de Análise Estrutural

No caso de estruturas de concreto armado com barras de FRP, análises plásticas e análises lineares com redistribuição não são permitidas. As análises permitidas são descritas a seguir.

#### 11.2.1. Análise Linear sem Redistribuição

Em estruturas de nós fixos (indeslocáveis), análise lineares sem redistribuição e utilizando as propriedades da seção bruta podem ser utilizadas para vigas hiperestáticas, desde que a rigidez fissurada (estádio II) ao longo da viga apresente variação de no máximo 15%. Alternativamente, os esforços podem ser obtidos por análise linear utilizando as propriedades da seção fissurada nos trechos de momento positivo e negativo, conforme ilustrado na Figura 3. Nesse caso, os comprimentos dos trechos de momento positivo e negativo precisam ser estimados com base no carregamento e condições de contorno.

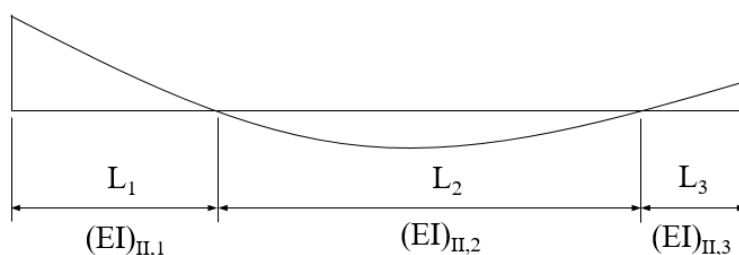


Figura 3 – Distribuição de rigidez em função do diagrama de momentos, onde  $(EI)_{II}$  é a rigidez no estágio II.

Para a análise de lajes e elementos estruturais de superfície, análises elásticas sem redistribuição e considerando isotropia podem ser adotadas desde que as armaduras inferior e superior nas direções ortogonais principais do elemento estrutural não tenham

suas áreas por unidade de largura do elemento estrutural variando em mais de 15%. Alternativamente, os esforços podem ser obtidos considerando análise elástica com ortotropia e propriedades obtidas no estágio II.

#### 11.2.2. Análise Não-Linear

Análises não-lineares considerando não-linearidade física e geométrica podem ser realizadas em sistemas de nós fixos (deslocáveis) ou móveis (deslocáveis), utilizando métodos numéricos adequados. Na próxima seção serão discutidos métodos aproximados para realização de análise não-linear.

#### 11.2.3. Aproximações para Análises Locais de Vigas

Em análises locais de vigas em sistemas indeslocáveis, os pilares podem ser assumidos como apoios simples, mas momentos na ligação viga-pilar devem ser considerados. O método aproximado recomendado pela NBR 6118 pode ser adotado.

### 11.3. Estratégias para Ductilidade

Nos casos em que seja necessário prover ductilidade e grande capacidade de redistribuição de esforços aos sistemas estruturais, algumas estratégias podem ser consideradas, tais como:

#### a) Uso de armaduras metálicas complementares

As armaduras metálicas complementares podem ser dispostas de forma localizada, preferencialmente nas ligações viga-pilar, de modo a possibilitar a formação de rótulas plásticas, provendo ductilidade ao sistema. A Figura 4 ilustra a utilização de armadura complementar em apoio intermediário de viga contínua em um sistema indeslocável. O comprimento de rótula pode ser tomado como a largura do pilar acrescida de  $1,2h$ . A análise da rotação da rótula plástica pode ser feita segundo a NBR 6118, desde que as deformações últimas na barra de FRP sejam superiores às deformações últimas válidas para a armadura metálica. Nos casos em que a durabilidade for uma questão importante no projeto, recomenda-se que a barra de aço seja revestida com epóxi ou uso de outro sistema preventivo.

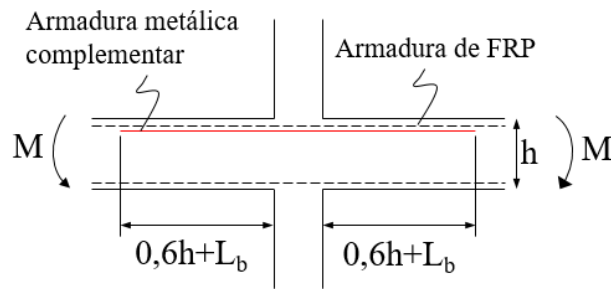


Figura 4 – Disposição de armadura metálica complementar em apoio intermediário de viga contínua.

b) Uso de concreto com fibras discretas

Com a incorporação de fibras discretas ao concreto, a deformação última do concreto pode ser aumentada, como resultado da maior estabilidade provida pela fibra quando da formação da cunha de ruptura do concreto na zona comprimida. Nesse caso, para se obter a ductilidade adequada, é necessário garantir que a ruptura à flexão seja governada pelo concreto. O limite de deformação adotado deve ser devidamente confirmado por ensaio estrutural.

c) Uso de armadura de confinamento na região comprimida

O uso de armadura de confinamento na zona de compressão também pode ser adotado para ampliar os limites de deformação do concreto e, portanto, para conferir ductilidade ao elemento estrutural. Disposições com relação às propriedades do concreto confinado são apresentadas no Model Code 2010.



## 12. INSTABILIDADE E ANÁLISE DE 2ª ORDEM

Nessa seção são descritos procedimentos para análise de 2ª ordem com incorporação de não-linearidades física e geométrica.

### 12.1. Análise de 2ª Ordem Global

A análise de 2ª ordem global pode ser realizada através do método do coeficiente  $\gamma_z$  ou de método p-delta, com carregamentos devidamente majorados conforme preconizado pela NBR 6118. Na análise de 2ª ordem, as rigidezes dos elementos estruturais devem ser reduzidas de forma aproximada para levar em conta a não-linearidade física, como descrito na Tabela 8.

Tabela 8 – Rigidez dos elementos estruturais para consideração de não-linearidade física.

Elemento Estrutural	EI
Pilares	0,8 $E_{cs} I_c$
Vigas	0,4 $E_{cs} I_c$
Lajes	0,3 $E_{cs} I_c$
* $I_c$ = inércia da seção bruta	

As estruturas com deslocamentos de 2ª ordem inferiores a 10% dos deslocamentos de 1ª ordem podem ser classificadas como indeslocáveis e os efeitos de 2ª ordem globais podem ser desprezados. Caso contrário, as estruturas são classificadas como deslocáveis e devem ser cuidadosamente avaliadas, usando uma das técnicas descritas acima.

### 12.2. Análise de 2ª Ordem Local

Os efeitos de 2ª ordem locais em elementos comprimidos podem ser obtidos através da análise dos elementos isoladamente. Antes da análise, os esforços locais de 1ª ordem na extremidade dos elementos comprimidos devem ser obtidos através de análise global, conforme descrito na Seção 12.1. Esses esforços devem atender aos valores mínimos apresentados na NBR 6118 e a esbelteza dos elementos  $\lambda = L_e/r$  deve ser inferior a 200, onde  $L_e$  é o comprimento efetivo do elemento isolado e  $r$  é o raio de giração na direção considerada.

### 12.2.1. Métodos para Análise de 2ª Ordem Local

Caso os valores de esbeltez sejam inferiores a 35, pode-se desconsiderar o cálculo dos efeitos de 2ª ordem locais. Caso contrário, os seguintes métodos podem ser adotados:

#### a) Pilar-padrão com rigidez aproximada

Para elementos comprimidos com  $\lambda \leq 90$ , o momento solicitante de cálculo pode ser obtido de forma aproximada a partir da amplificação do momento de primeira ordem, através da expressão a seguir:

$$M_{d,tot} = \frac{\alpha_b M_{1d,A}}{1 - N_d/N_{cr}} \geq M_{1d,A} \quad (8)$$

onde  $\alpha_b$  é o coeficiente de uniformização do diagrama de momento tomado conforme NBR 6118,  $M_{1d,A}$  é o maior momento de 1ª ordem das extremidades,  $N_d$  é a força normal solicitante de cálculo e  $N_{cr}$  é a força crítica de flambagem elástica, determinada a partir da expressão a seguir.

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E_{cs} I_{eq}}{L_e^2} \quad (9)$$

Na equação acima,  $I_{eq}$  é a inércia equivalente da seção homogeneizada da coluna e pode ser tomada de forma aproximada como:

$$I_{eq} = 0,4I_c \quad (10)$$

#### b) Pilar-padrão acoplado a diagramas N-M- $\Phi$

Para elementos comprimidos com  $\lambda \leq 140$ , o momento solicitante de cálculo pode ser obtido através do método do pilar-padrão acoplado a diagramas norma-momento-curvatura (N-M- $\Phi$ ) para a seção crítica. Em nenhuma hipótese o momento adotado no dimensionamento pode ser inferior a  $M_{1d,A}$ . Na análise, as propriedades de compressão da armadura de FRP poderão ser consideradas quando estas se encontrarem sob compressão.

#### c) Método geral

O método geral baseado na analogia de viga conjugada (analogia de Mohr) ou outro processo adequado deverá ser obrigatoriamente adotado para elementos comprimidos com  $\lambda > 140$ . Na análise, as propriedades de compressão da

armadura de FRP deverão ser consideradas quando estas se encontrarem sob compressão.

#### 12.2.2. Efeitos de Fluência

Recomenda-se que a fluência seja considerada tanto para o concreto quanto para as barras de FRP para qualquer esbeltez relativa do elemento comprimido. Na ausência de estudos sobre o assunto, a abordagem recomendada pela NBR 6118 deve ser seguida.

## 13. VERIFICAÇÃO E DETALHAMENTO DE ELEMENTOS LINEARES

### 13.1. ELU para Solicitações Normais (Flexão e Flexo-Compressão)

#### 13.1.1. Flexão Simples

O dimensionamento à flexão é feito seguindo as seguintes hipóteses usuais empregadas para o cálculo de vigas de concreto armado:

- seções permanecem planas após a flexão;
- bloco retangular de tensões no concreto com tensão  $\alpha_c f_{cd}$  e altura  $\lambda x$ , onde  $x$  é a profundidade da linha neutra e  $\alpha_c$  e  $\lambda$  são dados conforme NBR 6118. Para concretos de resistência normal e seções transversais retangulares,  $\alpha_c = 0,85$  e  $\lambda = 0,8$ ;
- resistência à tração do concreto deve ser desprezada;
- tensões na armadura de FRP proporcionais às deformações e comportamento elástico linear até a ruptura;
- aderência perfeita entre o concreto e as barras de FRP.

O dimensionamento de elementos estruturais armados com barras de FRP, apesar de apresentar similaridades com o dimensionamento de elementos de concreto armado convencional, deve ser feito de forma cuidadosa diante do comportamento frágil das barras de FRP. A Figura 5 a seguir apresenta duas condições possíveis de dimensionamento, com a ruptura acontecendo devido ao esmagamento do concreto ou por ruptura da barra. A forma de ruptura que governa o comportamento depende da relação entre a taxa de armadura  $\rho_f = A_f/bd$  e a taxa de armadura balanceada  $\rho_{fb}$ , que é definida como sendo a taxa de armadura para a qual acontece a transição entre os modos de falha. Considerando a Figura 5, a taxa de armadura balanceada  $\rho_{fb}$  pode ser definida por:

$$\rho_{fb} = \lambda \alpha_c \frac{f_{cd}}{f_{fd}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fd}} \quad (11)$$

onde  $\varepsilon_{cu}$  é a deformação última do concreto à compressão.

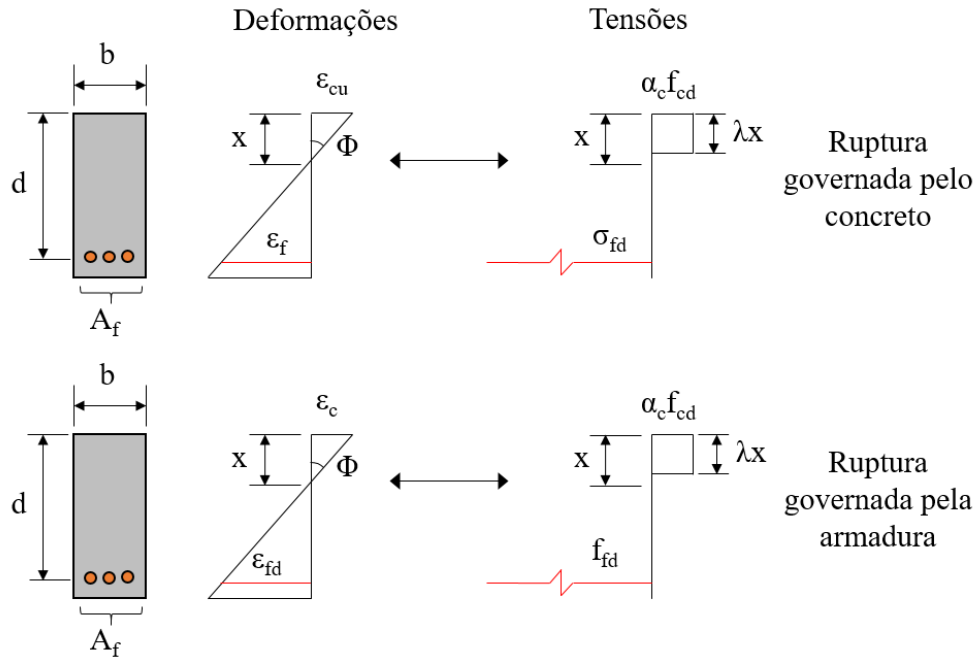


Figura 5 – Configurações na ruptura de vigas submetidas à flexão.

Para os modos de falha descritos na Figura 5, a profundidade da linha neutra pode ser obtida como:

a) Para  $\rho_f \leq \rho_{fb}$ :

$$x = \frac{f_{fd} A_f}{\lambda \alpha_c f_{cd} b} \quad (12a)$$

b) Para  $\rho_f > \rho_{fb}$ :

$$x = \frac{1}{2b} \frac{\varepsilon_{cu} A_f E_f}{\lambda \alpha_c f_{cd}} \left( -1 + \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda \alpha_c f_{cd}}{\varepsilon_{cu} A_f E_f} b d} \right) \quad ((12a)b)$$

onde  $A_f$  é a área de armadura de FRP na região de tração efetivamente contribuindo para a resistência e  $b$  é a largura da viga. E a tensão na armadura pode ser obtida como:

$$\sigma_{fd} = f_{fd} \quad \text{para } \rho \leq \rho_{fb} \quad (13a)$$

$$\sigma_{fd} = \frac{x b \alpha_c \lambda f_{cd}}{A_f} \quad \text{para } \rho > \rho_{fb} \quad ((13a)b)$$

Por fim, o momento resistente é obtido como:

$$M_{Rd} = \sigma_{fd} A_f \left( d - \frac{\lambda x}{2} \right) \quad (14)$$

Quando armaduras metálicas forem utilizadas, os domínios de ruptura da NBR 6118 podem ser considerados desde que as deformações últimas de cálculo das barras de FRP,  $\varepsilon_{fd} = f_{fd}/E_f$ , sejam superiores a 10‰.

Armaduras de compressão de FRP são permitidas, considerando as propriedades de compressão conforme definido na seção 9.3.9, e desde que estribos sejam adotados para prevenir flambagem da armadura, respeitando espaçamento semelhante ao recomendado para pilares.

### 13.1.2. Flexão composta

O dimensionamento seccional à flexão composta reta ou oblíqua pode ser feito com auxílio de envoltórias de resistência, considerando as hipóteses de seções planas e compatibilidade de deformações entre os materiais. Na obtenção das envoltórias de resistência, a contribuição do concreto à tração deve ser desprezada e os limites de deformação dos materiais devem ser respeitados, com a devida incorporação de coeficientes de redução de resistência e fatores redutores pertinentes.

## 13.2. ELU para Solicitações Tangenciais (Cortante e Torção)

### 13.2.1. Cortante

Para dimensionamento ao cortante, as seguintes hipóteses são consideradas:

- modelo de treliça com bielas de compressão inclinadas de  $\theta = 45$  graus (pouca adaptação plástica);
- contribuição do concreto apenas na zona comprimida (linha neutra calculada pelo estágio II): Dada a flexibilidade das armaduras longitudinal e transversal, as parcelas de força cortante transferidas por engrenamento dos agregados e efeito de pino são menores;
- estribos orientados perpendicularmente ao eixo da viga.

A verificação de falha por compressão diagonal deve ser feita determinando-se o cortante resistente  $V_{Rd2}$  segundo o Modelo I da NBR 6118. A resistência à ruptura por tração da armadura transversal deve ser determinada segundo a expressão a seguir:

$$V_{Rd3} = V_c + V_f \quad (15)$$

onde:

$$V_c = 0,6f_{ctd}bx_{II} \quad (16)$$

$$V_f = 0,9df_{fbd} \left( \frac{A_{ft}}{s} \right)_V \quad (17)$$

Nas equações acima,  $x_{II}$  é a posição da linha neutra no estágio II,  $f_{bd} = f_{bk}/\gamma_m$  é a resistência à tração do estribo considerando a redução devido à dobra (ver Seção 9.3.8) e  $(A_{ft}/s)_V$  é a área de armadura transversal por unidade de comprimento do elemento estrutural para resistência ao cortante.

Por ocasião do uso de modelo de treliça, a força de tração na armadura longitudinal deve ser devidamente corrigida. De forma conservadora, pode-se assumir decalagem do diagrama de momentos ou de força de tração de  $a_t = d$ .

### 13.2.2. Torção

Há poucos trabalhos sobre torção em elementos estruturais de concreto armado com barras de FRP. De maneira geral, recomenda-se:

- a) desprezar as torções de compatibilidade, desde que as consequências decorrentes sejam devidamente consideradas na análise estrutural;
- b) desprezar a contribuição do empenamento, admitindo que toda a torção seja resistida pela parcela de torção de Saint-Venant;
- c) em elementos de seção aberta composta por retângulos, os momentos são distribuídos entre os elementos de forma proporcional à rigidez à torção de cada um dos retângulos;

Quando houver necessidade, a verificação à torção deve ser feita considerando seção vazada equivalente e modelo de treliça espacial com bielas de compressão inclinadas de 45 graus. A determinação dos parâmetros relevantes  $h_e$  e  $A_e$  pode ser feita segundo recomendações da NBR 6118, onde  $A_e$  é a área limitada pela linha média da parede da seção vazada (incluindo a parte vazada) e  $h_e$  é a espessura equivalente da parede da seção vazada.

Seguindo a metodologia proposta pela NBR 6118 e considerando  $\theta = 45^\circ$ , a resistência à torção do elemento estrutural quanto ao modo de falha por esmagamento da biela é obtida como:

$$T_{Rd2} = 0,5\alpha_{v2}f_{cd}A_e h_e \quad (18)$$

onde  $\alpha_{v2} = 1 - f_{ck}/250$ , com  $f_{ck}$  em MPa.

E as resistências à torção correspondentes aos modos de falha associados à ruptura das armaduras transversal e longitudinal podem ser obtidas como:

$$T_{Rd3} = \left( \frac{A_{ft}}{s} \right)_T f_{fd} 2A_e \quad (19)$$

$$T_{Rd4} = \left( \frac{A_f}{u_e} \right)_T f_{fd} 2A_e \quad (20)$$

onde  $(A_{ft}/s)_T$  é a área de armadura transversal por unidade de comprimento do elemento estrutural para resistência à torção e  $(A_f/u_e)_T$  é a armadura longitudinal por unidade de comprimento distribuída no perímetro médio da seção vazada equivalente ou real para resistência à torção.

### 13.3. ELU para Esforços Combinados

Quando da combinação de cortante e torção ou flexão e torção, as armaduras determinadas independentemente para cada um dos esforços solicitantes devem ser somadas. Ademais, no caso da combinação entre torção e cortante, a seguinte condição deve ser atendida:

$$\frac{V_d}{V_{Rd2}} + \frac{T_d}{T_{Rd2}} \leq 1,0 \quad (21)$$

### 13.4. ELU de Fadiga

Para a verificação à fadiga, os esforços de cálculo devem ser determinados para a combinação frequente de ações definida na NBR 6118.

As tensões no concreto e nas barras de FRP tanto para flexão quanto para força cortante podem ser feitas segundo metodologia proposta pela NBR 6118 pode ser adotada. No caso de flexão, as tensões de cálculo devem ser determinadas no estágio II, desprezando-se a contribuição do concreto à tração.

A resistência à fadiga do concreto pode ser determinada conforme NBR 6118.

A resistência de cálculo à fadiga das barras de FRP deve ser obtida a partir da adequada redução da resistência característica determinada conforme Seção 9.3.10 em função do número de ciclos. Para coeficientes de redução, ver seção 10.2.



### 13.5. ELU de Fluência

Para evitar ruptura por fluência da armadura, as tensões na armadura determinadas no estágio II para combinação quase-permanente de ações devem ser limitadas a  $0,3C_{Efd}$ . Recomenda-se que as tensões no concreto no estágio II para a combinação supracitada também sejam limitadas a  $0,4f_{cd}$ .

### 13.6. Verificações no ELS

#### 13.6.1. ELS de Deformação Excessiva

A flecha imediata de vigas de concreto armado com barras de FRP pode ser determinada considerando rigidez equivalente a partir de fórmula de Branson modificada:

$$(EI)_{eq,t0} = E_{cs} \left\{ \left( \frac{M_r}{M_a} \right)^3 \beta_d I_c + \left[ 1 - \left( \frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \leq E_{cs} I_c \quad (22)$$

onde  $M_r$  é o momento de fissuração na seção crítica determinado conforme NBR 6118,  $M_a$  é o momento solicitante na seção crítica,  $I_c$  é o momento de inércia da seção bruta de concreto,  $I_{II}$  é o momento de inércia no estágio II e  $\beta_d$  é um coeficiente redutor tomado como:

$$\beta_d = \frac{1}{5} \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \leq 1,0 \quad (23)$$

onde  $\rho_f$  e  $\rho_{fb}$  são as taxas de armadura adotada e balanceada (ver seção 13.1.1) na seção crítica, respectivamente.

Para o caso de vigas contínuas, o cálculo da flecha deve ser feito considerando a rigidez da viga a partir de média ponderada das rigidezes dos trechos de momento positivo e negativo.

Para cálculo da flecha diferida no tempo, a parcela de flecha devido às ações de longa duração deve ser multiplicada por coeficiente  $\alpha$  dado por:

$$\alpha(t) = \alpha_{f,f}(t) \alpha_{f,c}(t) \quad (24)$$

$$\alpha_{f,f} = \frac{E_f}{E_{f,t}(t)} \quad (25)$$

$$\alpha_{f,c} = \xi(t) - \xi(t_0) \quad (26)$$

Onde  $E_f$  e  $E_{f,t}$  são os módulos de elasticidade do FRP nos tempos 0 e t, respectivamente, e  $\xi$  é um coeficiente determinado em função do tempo, conforme definido na NBR 6118 para cálculo diferida.

### 13.6.2. ELS de Fissuração

A abertura de fissura característica em vigas de concreto armado com barras de FRP pode ser determinada considerando a equação abaixo, que segue o Model Code 2010.

$$w_k = \frac{4}{E_f} \left[ 1,5c_{nom} + \frac{1}{4} \frac{f_{ctm}}{\tau_b} \frac{\phi}{\rho_{ef}} \right] \left[ \sigma_f - \frac{1}{2} \frac{f_{ctm}}{\rho_{ef}} \left( 1 + \frac{E_f}{E_{cs}} \rho_{ef} \right) \right] \quad (27)$$

Onde  $\sigma_f$  é a tensão na armadura no estágio II para combinação frequente de ações,  $f_{ctm}$  é a resistência à tração média do concreto,  $c_{nom}$  é o cobrimento nominal da armadura,  $\phi$  é o diâmetro da armadura longitudinal,  $\tau_b$  é a tensão de aderência nominal, que pode ser tomada como 1,3 vezes a resistência de aderência característica  $f_{bk}$  (Eq. (5)),  $\rho_{ef} = A_f/(b h_{ef})$  é a taxa de armadura efetiva, determinada como a razão entre a área de armadura na zona tracionada,  $A_f$ , e a área de concreto efetiva circundante,  $b \cdot h_{ef}$ , conforme mostrado na Figura 6, com  $h_{ef}$  obtido como o menor valor dentre  $2,5d'$  e  $(h - x_{II})/3$ .

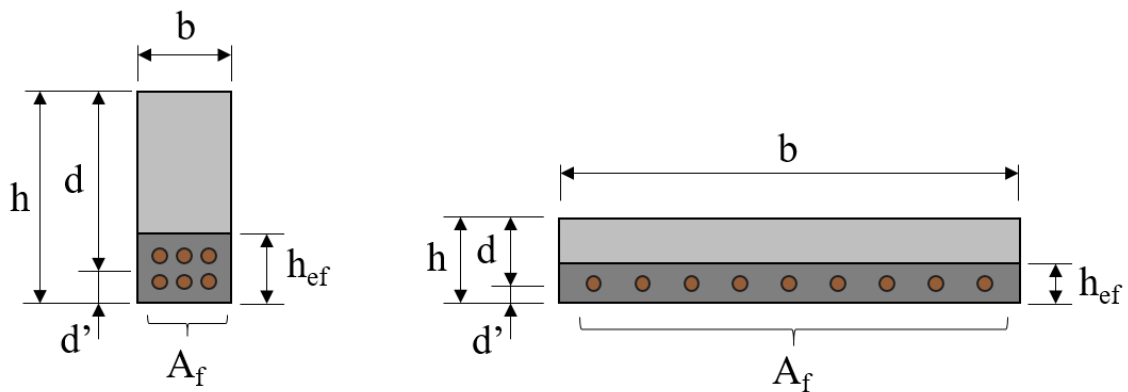


Figura 6 – Área de concreto circundante efetiva para cálculo da taxa de armadura efetiva.

O uso de fibras para controle de fissuração é permitido e sua consideração na verificação da fissuração deve ser feita através da substituição de  $f_{ctm}$  por  $(f_{ctm} - f_{ctr})$  na Eq. (27), onde  $f_{ctr}$  corresponde à resistência residual à tração do concreto com fibras para uma abertura CMOD (*crack mouth opening displacement*) de 0,5 mm obtida no ensaio de flexão em prisma com entalhe.

## 13.7. Armaduras Mínimas e Máximas

### 13.7.1. Elementos Sujeitos à Flexão

A armadura longitudinal mínima na zona tracionada de elementos submetidos à flexão deve ser determinada de modo que o mesmo resista a um momento solicitante mínimo de cálculo igual a:

$$M_{d,min} = 1,5 \frac{I_c}{y_t} f_{ctk,sup} \quad (28)$$

onde  $y_t$  é a distância da linha neutra da seção bruta à fibra mais tracionada e  $f_{ctk,sup}$  é a resistência à tração característica superior do concreto.

A armadura longitudinal máxima na zona tracionada deve ser limitada a 4%, considerando seções fora das emendas.

Em elementos com restrição de deformação, armaduras adequadas devem ser previstas para controle de fissuras oriundas de retração, fluência e temperatura.

Nos elementos sujeitos à flexão, recomenda-se que as armaduras longitudinais tracionadas tenham diâmetro nominal igual ou superior a 8 mm e inferior a 1/8 da largura da seção. Para armaduras comprimidas com função resistente, as recomendações devem seguir as dispostas na Seção 13.7.5.

### 13.7.2. Armadura de Pele

Em vigas com altura maior que 60 cm, armadura de pele deve ser disposta ao longo das faces tracionadas da alma do elemento estrutural, com área total não inferior a 0,2% da área da alma da seção bruta de concreto em cada uma das faces da viga. Recomenda-se uso de barras de pequeno diâmetro (inferiores ao da armadura principal) e que a distância entre elas seja igual ou inferior a 10 cm, para melhor controle das fissuras de convergência.

### 13.7.3. Elementos Sujeitos a Força Cortante

A armadura transversal composta por estribos de FRP em elementos sujeitos a cortante deve ser superior ao seguinte valor mínimo:

$$\left(\frac{A_{ft}}{s}\right)_{v,min} = 0,2 \frac{f_{ctm}}{0,004E_f} \quad (29)$$

A armadura transversal deve ter diâmetro igual ou superior a 5 mm e inferior a 1/10 da largura da seção.

#### 13.7.4. Elementos Sujeitos a Torção

As armaduras transversal e longitudinal de FRP em elementos sujeitos a torção devem ser superiores ao seguinte valor mínimo:

$$\left(\frac{A_{ft}}{s}\right)_{T,\min} = \left(\frac{A_f}{u_e}\right)_{T,\min} = 0,2 \frac{f_{ctm}}{0,004E_f} \quad (30)$$

Os diâmetros mínimos e máximos a serem utilizados para as armaduras longitudinal e transversal devem respeitar os valores descritos nas seções 13.7.1 e 13.7.3.

#### 13.7.5. Elementos Sujeitos a Compressão

A taxa de armadura longitudinal total de elementos solicitados axialmente deve ser superior a 0,5% e inferior a 4%, considerando seções fora das emendas.

Quando barras de FRP longitudinais forem usadas com função resistente à compressão, seu diâmetro deve ser superior a 10 mm. Além disso, as armaduras transversais devem ter diâmetro mínimo de 6 mm.

#### 13.7.6. Uso de Concreto com Fibras

A adoção de concreto com fibras discretas pode substituir a necessidade de armaduras transversais mínimas ou, ainda, podem complementar a resistência provida pelas armaduras transversais. Em ambos os casos, o desempenho deve ser comprovado a partir de dados técnicos da literatura, modelos matemáticos adequados ou ensaios experimentais.

### **13.8. Aspectos do Detalhamento e Regiões Especiais**

O detalhamento de elementos lineares deve ser realizado considerando as práticas usuais do concreto armado e os seguintes aspectos:

- a) Disposições construtivas: os espaçamentos máximo e mínimo entre barras longitudinais na seção transversal de elementos lineares devem seguir as recomendações constantes na NBR 6118. Além disso, o projeto deve ser concebido levando-se em conta que as barras de FRP não podem ser dobradas no local;

- b) Comprimento de barras longitudinais e pontos de corte: em vigas, as barras longitudinais devem ser dispostas levando-se em conta decalagem da força de tração na armadura e ancoragem das armaduras nos apoios intermediários e extremos, de forma semelhante ao prescrito na NBR 6118. Além disso, é importante garantir prolongamento de pelo menos  $1/3$  da armadura de tração positiva até os apoios. Para ancoragem das armaduras, ver Seção 15.
- c) Armaduras transversais de vigas: as armaduras transversais de vigas devem ter um espaçamento máximo de  $d/2$  na direção paralela ao eixo da viga, onde  $d$  é a altura útil. Na direção perpendicular ao eixo da viga, os ramos da armadura devem ter espaçamento inferior a 30 cm. A armadura transversal deve ter ancoragem compatível com sua função dentro do elemento estrutural.
- d) Armaduras transversais para regiões comprimidas: quando as barras de FRP tiverem função resistente dentro do elemento estrutural, as armaduras transversais devem ter um espaçamento na direção paralela ao eixo do elemento estrutural não superior a 10 vezes o diâmetro da armadura longitudinal. Além disso, na direção perpendicular ao eixo do elemento, os ramos da armadura devem ter espaçamento não superior a 10 vezes o diâmetro da armadura longitudinal. Quando necessário, devem ser previstos grampos para prevenção da flambagem.
- e) Regiões especiais: em vigas-parede, consoles e blocos (ver NBR 6118 para definição) ou em regiões com descontinuidade estática ou geométrica (*e.g.* aberturas, nós de pórtico, mudanças de direção, ligações mesa-alma e forças concentradas), modelos de bielas e tirantes adequados devem ser utilizados para auxílio ao detalhamento. Dada a natureza frágil das barras de FRP, recomenda-se que os modelos sejam desenvolvidos respeitando-se as trajetórias elásticas de tensões e que os coeficientes parciais propostos na Tabela 5 sejam majorados em 50% nas análises.

## **14. VERIFICAÇÕES E DETALHAMENTO DE ELEMENTOS DE SUPERFÍCIE**

### **14.1. ELU de Flexão**

A determinação dos momentos resistentes por unidade de largura nas direções principais dos elementos de superfície deve seguir as prescrições apresentadas na Seção 13.1, considerando largura unitária nas expressões. Em lajes, a contribuição das armaduras na região comprimida deve ser desprezada.

### **14.2. ELU de Cortante**

Em elementos de superfície, a armadura transversal pode ser dispensada desde que a capacidade de transferência de forças transversais seja garantida através de mecanismos complementares ou ação de membrana. Quando modelos teóricos ou dados de experimentos que comprovem essas ações não estiverem disponíveis, a Eq. (15) pode ser utilizada, considerando-se largura unitária e  $V_f = 0$ . A mesma equação pode ser adotada para a determinação da armadura transversal, caso seja necessário.

### **14.3. Solicitações Gerais**

Quando elementos de superfície estiverem sujeitos a momentos fletores, momentos volventes, forças axiais e forças cortantes, pode-se recorrer a modelos do tipo sanduíche para determinação das forças locais a serem resistidas pelas ‘faces’ superior e inferior e pelo ‘núcleo’. Após isso, devem ser comparadas com as resistências das faces e do núcleo, determinadas de forma análoga ao proposto na Seção 13 para elementos lineares.

### **14.4. ELU de Punção**

Há pouco registro na literatura técnica sobre punção em lajes de concreto armado com barras de FRP. Assim, quando necessário, modelos matemáticos adequados devem ser considerados no dimensionamento. Alternativamente, o desempenho pode ser comprovado a partir de ensaios experimentais. Dada a natureza frágil das barras de FRP, recomenda-se que os modelos sejam desenvolvidos respeitando-se as trajetórias elásticas de tensões e que os coeficientes parciais propostos na Tabela 5 sejam majorados em 50% nas análises.

### **14.5. ELU de Fluência e ELU de Fadiga**

As verificações devem seguir as recomendações apresentadas para elementos lineares.

#### **14.6. Verificações no ELS**

As verificações no ELS devem seguir as recomendações apresentadas para elementos lineares.

#### **14.7. Armaduras Mínimas e Máximas**

As armaduras longitudinais mínimas e máximas em lajes devem seguir as recomendações prescritas na seção 13.7.1, sem diferenciação entre direções principal e secundária. Podem ser utilizadas armaduras compostas por telas ou barras com diâmetro igual ou superior a 4 mm e inferior a  $h/8$ , onde  $h$  é a espessura da laje.

Quando armadura de cisalhamento não for adotada, recomenda-se que a taxa de armadura à flexão seja superior a 0,01.

Deve ser avaliada a necessidade de armadura adequada para resistir aos esforços decorrentes da retração e de deformações impostas.

#### **14.8. Aspectos do Detalhamento e Regiões Especiais**

O detalhamento de elementos de superfície deve ser realizado considerando as práticas usuais do concreto armado e os seguintes aspectos:

- a) Disposições construtivas: os espaçamentos máximo e mínimo entre as barras das armaduras devem seguir as recomendações constantes na NBR 6118. Além disso, o projeto deve ser concebido levando-se em conta que as barras de FRP não podem ser dobradas no local;
- b) Comprimento de barras e pontos de corte: as barras devem ser dispostas levando-se em conta decalagem da força de tração na armadura e ancoragem das armaduras nos apoios intermediários e extremos, de forma semelhante ao prescrito na NBR 6118. Além disso, é importante garantir prolongamento de pelo menos  $1/3$  da armadura de tração positiva até os apoios. Para ancoragem das armaduras, ver Seção 15.
- c) Armaduras transversais: quando necessário, os ramos das armaduras transversais devem ter um espaçamento máximo de  $d/2$  nas direções principais do elemento estrutural. Essas armaduras devem ter ancoragem compatível com sua função dentro do elemento estrutural.

- d) Armaduras transversais para regiões comprimidas: da mesma forma que em vigas, as barras de FRP que tiverem função resistente à compressão dentro do elemento estrutural deverão ser devidamente protegidas com relação à flambagem.
- e) Regiões especiais: na presença de aberturas ou em regiões com descontinuidade estática ou geométrica, modelos de bielas e tirantes adequados devem ser utilizados para auxílio ao detalhamento, seguindo as disposições da Seção 13.8.



## 15. ANCORAGEM E EMENDA DE BARRAS

### 15.1. Ancoragem de Barras de FRP

No presente documento são considerados os casos de barras de FRP com ancoragem por aderência por meio de comprimento reto ou com uso de gancho. Dispositivos mecânicos podem ser utilizados para ancoragem desde que sua resistência seja adequadamente comprovada a partir de ensaios, conforme estabelecido na NBR 6118.

#### 15.1.1. Barras Tracionadas

O comprimento necessário para ancoragem por aderência de barras tracionadas pode ser determinado como:

$$\ell_{b,nec} = \alpha \ell_b \frac{A_{f,calc}}{A_{f,ef}} \geq \ell_{b,min} \quad (31)$$

onde:

$\ell_b$  é o comprimento de ancoragem básico definido como:

$$\ell_b = \frac{\phi f_{fd}}{4 f_{bd}} \quad (32)$$

$\phi$  é o diâmetro nominal da barra;

$\alpha = 1,0$  para barras sem gancho e  $0,7$  para barras com gancho com cobrimento no plano normal ao do gancho  $\geq 3\phi$ ;

$A_{f,calc}$  é a área de FRP referente à força total a ser ancorada;

$A_{f,ef}$  é a área de FRP efetivamente ancorada, necessariamente maior ou igual a  $A_{f,calc}$ .

$\ell_{b,min}$  é o comprimento de ancoragem mínimo definido como o maior valor dentre  $12\phi$  e  $150$  mm.

#### 15.1.2. Barras Comprimidas

Em regiões comprimidas, as barras de FRP devem ser ancoradas sem gancho. A Eq. (32) pode ser adotada para determinação do comprimento de ancoragem necessário.

#### 15.1.3. Armadura Transversal na Ancoragem

A armadura transversal pode ser dispensada nas ancoragens sobre apoios diretos ou nos casos em que o cobrimento da barra ancorada e a distância entre centros de barras

ancoradas forem superiores a 3 vezes o diâmetro da barra ancorada. Nos demais casos, para evitar ruptura por fendilhamento, as ancoragens por aderência devem ser confinadas por armadura transversal. Essa armadura deve ser capaz de resistir a uma força total de tração equivalente a 25% da resistência da barra de maior diâmetro ancorada e deve ser distribuída ao longo do comprimento de ancoragem, sendo capaz ainda de costurar os planos potenciais de fendilhamento. No caso de ancoragem de barras comprimidas, ao menos uma barra transversal deve ainda ser disposta a uma distância de  $4\phi$  a  $5\phi$  da extremidade da barra ancorada.

#### 15.1.4. Recomendações Construtivas

Para fins dessa norma, o raio de dobra das barras,  $r_b$ , não pode ser inferior a  $3\phi$ . Além disso, a ponta reta da barra ao fim do trecho curvo não deve ter comprimento inferior a  $12\phi$ . Essas recomendações são válidas, ainda, para ancoragens de ramos de estribos.

### 15.2. Emenda de Barras de FRP

No presente documento são considerados os casos de barras de FRP com emendas por traspasse. Dispositivos mecânicos podem ser utilizados para emenda desde que sua resistência seja adequadamente comprovada a partir de ensaios.

#### 15.2.1. Barras Tracionadas

Diante da carência de dados experimentais disponíveis na literatura, recomenda-se que o comprimento de emenda de barras tracionadas seja computado de acordo com a equação abaixo, para qualquer emenda tracionada.

$$\ell_{0t} = 1,5\ell_b \quad (33)$$

#### 15.2.2. Barras Comprimidas

Diante da carência de dados experimentais disponíveis na literatura, recomenda-se que o comprimento de emenda de barras comprimidas seja calculado de acordo com a equação abaixo.

$$\ell_{0c} = 1,2\ell_b \quad (34)$$

### 15.2.3. Armadura Transversal na Emenda

Para cálculo das armaduras transversais nas regiões de emenda de barras tracionadas ou comprimidas, as recomendações constantes na NBR 6118 devem ser seguidas.

### **15.3. Ancoragem e Emenda de Barras de Aço**

As recomendações constantes na NBR 6118 devem ser respeitadas para ancoragem e emenda de barras de aço.