

## Dimensionamento de pavimentos de concreto reforçado com fibras – PCRF

MARCO ANTONIO CARNIO - DOUTOR - <https://orcid.org/0000-0002-2005-8555>

VIVIANE VISNARDI VAZ - MESTRE - <https://orcid.org/0000-0001-7840-0221>

ISABELA DUARTE - MESTRE - <https://orcid.org/0000-0002-3802-6244> – EVOLUÇÃO Engenharia de Estruturas Ltda.

### RESUMO

**O** ARTIGO APRESENTA O DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS (PCRF), CONSIDERANDO A ANÁLISE PLÁSTICA PELO MÉTODO DAS CHARNEIRAS PLÁSTICAS (YIELD LINE) E OS PROCEDIMENTOS DA NORMA BRASILEIRA ABNT NBR 16935 (2021) E DA ABNT NBR PR 1011 (2021). SÃO DESCRITOS OS ELEMENTOS QUE COMPÕEM A ESTRUTURA DO PAVIMENTO, AS PROPRIEDADES DO CONCRETO SIMPLES E DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS (CRF), BEM COMO OS ESFORÇOS SOLICITANTES E O MODELO DE ANÁLISE ESTRUTURAL. O DIMENSIONAMENTO NO ESTADO LIMITE ÚLTIMO (ELU) É ABORDADO A PARTIR DA DEFINIÇÃO DOS MOMENTOS SOLICITANTES E RESISTENTES, ENQUANTO AS VERIFICAÇÕES NO ESTADO LIMITE DE SERVIÇO (ELS) CONTEMPLAM A FADIGA E OS DESLOCAMENTOS VERTICAIS. O TRABALHO CONSOLIDA CRITÉRIOS NORMATIVOS E FUNDAMENTOS TEÓRICOS APLICÁVEIS AO PROJETO DE PAVIMENTOS DE CRF, DESTACANDO O PAPEL DAS FIBRAS NA GARANTIA DE DUCTILIDADE, SEGURANÇA E DURABILIDADE.

**PALAVRAS-CHAVE:** PAVIMENTOS DE CONCRETO, CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS, ANÁLISE PLÁSTICA, DIMENSIONAMENTO.

### 1. INTRODUÇÃO

O emprego do concreto reforçado com fibras (CRF) consolidou-se em placas diretamente apoiadas sobre o solo (pavimentos de concreto), contexto no qual as fibras possibilitam substituir a armadura contínua sem prejuízo de segurança ou integridade estrutural. Essa evolução decorre do entendimento de que as fibras acrescentam capacidade resistente pós-fissuração e controlam a abertura de fissuras, permitindo concepções mais racionais para pisos e pavimentos (CARNIO, 1998; CARNIO, 2009).

Do ponto de vista de projeto, essas placas trabalham sobre base elástica e são verificadas com modelos consagrados de análise, incluindo a abordagem plástica por linhas de ruptura. A literatura especializada mostra a comparação entre teorias elástica e plástica e adaptações necessárias para aplicar o método ao CRF, com vistas a fornecer procedimentos práticos ao dimensionamento de placas de pavimentos (CARNIO, 1998; CARNIO, 2009).

No comportamento do material, ganhou força a aplicação de baixos teores de fibras (até 0,5% em volume) justamente por manter a moldabilidade do concreto, ao mesmo tempo em que aumenta significativamente a tenacidade do material e a ductilidade da seção — atributos decisivos para pavimentos, cuja solicitação predominante é cíclica. Assim, mesmo sem incrementos expressivos nas resistências, o CRF agrega capacidade de absorver energia e controlar a propagação de fissuras, características compatíveis com as demandas de tráfego repetitivo (CARNIO, 2009).

Além da evolução recente dos pavimentos de concreto reforçado com fibras, é fundamental destacar que existem diferentes soluções técnicas para pavimentos de concreto, cada uma com particularidades estruturais e funcionais. Os Pavimentos de Concreto Simples (PCS) correspondem às placas moldadas sem a utilização de reforço, sendo dimensionados exclusivamente com base na resistência à tração do concreto. Os Pavimentos de Concreto Reforçados constituem uma família mais ampla, na qual se enquadram: os PCRF – Pavimentos de Concreto Reforçado com Fibras, que utilizam fibras descontínuas para conferir resistência residual ao concreto; os PCA – Pavimentos de Concreto

Armado, que utilizam barras de aço ou barras de FRP para absorver esforços de tração; os PCCA – Pavimentos de Concreto Continuamente Armado, nos quais a armadura longitudinal contínua controla a abertura de fissuras ao longo da extensão da placa; e os PCP – Pavimentos de Concreto Protendido, que utilizam a protensão para introduzir tensões prévias de compressão, reduzindo a solicitação efetiva de tração. Além dessa família, destacam-se ainda: os Pavimentos de Concreto Intertravado, compostos por peças pré-moldadas justapostas, e os Pavimentos de Concreto Permeável, projetados para permitir a infiltração da água no solo e atender requisitos de drenagem urbana sustentável, sendo ambos normalmente em concreto simples.

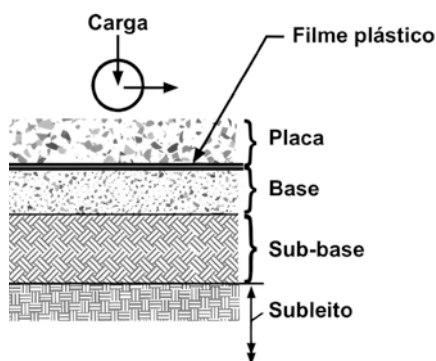
É importante ressaltar que essas designações constituem classificações técnicas de soluções construtivas, e não devem ser confundidas com a nomenclatura baseada em locais de aplicação, como “pavimento urbano”, “pavimento industrial” ou “pavimento rodoviário”. Tais termos indicam apenas o ambiente em que a solução técnica é empregada. Quando surgem denominações diferentes das apresentadas, que normalmente correspondem a designações de mercado, essas denominações não devem ser tratadas como classificações técnicas de pavimentos.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é sistematizar critérios de dimensionamento aplicáveis aos Pavimentos de Concreto Reforçado com Fibras (PCRF) a partir da análise plástica de placas apoiadas em meio elástico, baseada na teoria das charneiras plásticas, e dos procedimentos estabelecidos pela norma brasileira ABNT NBR 16935 (2021) e da ABNT PR 1011 (2021).

## 2. ESTRUTURA DO PCRF

Os PCRFs são concebidos como placas retangulares apoiadas sobre fundação elástica (Figura 1). Recomenda-se que a relação entre os lados da placa não seja superior a 1,5 para evitar configurações excessivamente alongadas, que tendem a concentrar retrações e variações volumétricas em uma única direção. Essa limitação reduz a probabilidade de fissuração diferencial e contribui para uma distribuição mais uniforme dos esforços e deslocamentos ao longo da placa. As vinculações entre placas adjacentes podem ser consideradas de três formas: borda livre, quando não há transferência de esforços; borda com fibras, considerando a atuação das fibras como ponte de transferência de tensões, garantindo parte da continuidade; e borda com barras, quando há utilização de dispositivos de transferência de carga (barras de transferência). A espessura das placas pode ser usualmente definida entre 8 cm e 25 cm, a depender da aplicação, devendo ser confirmada no dimensionamento. O desempenho estrutural resulta da combinação das propriedades do concreto simples e da contribuição das fibras (resistência residual).

O suporte do pavimento é composto por três elementos principais: subleito, sub-base e interface placa-fundação. O subleito corresponde à camada de solo que recebe diretamente os esforços transmitidos pela placa, sendo caracterizado pelo módulo de reação de Westergaard ou coeficiente de recalque ( $k$ ), que relaciona



**FIGURA 1**

ESTRUTURA DO PAVIMENTO DE CONCRETO

FONTE: ABNT PR 1011 (2021)

a pressão aplicada ao deslocamento resultante. A sub-base exerce função complementar, elevando a capacidade de suporte da fundação, uniformizando o comportamento mecânico ao longo da estrutura e reduzindo a possibilidade de bombeamento de finos do solo. Já, a interface entre a placa e a fundação desempenha papel relevante no tratamento dos efeitos da retração do concreto, pois o atrito nesta região condiciona a intensidade das tensões de origem volumétrica. A correta definição dessas condições de suporte é decisiva para garantir a estabilidade do pavimento, influenciando diretamente os esforços solicitantes considerados no dimensionamento (ABNT PR 1011, 2021).

### 2.1 Materiais

No dimensionamento do PCRF, é necessário definir previamente as propriedades mecânicas dos materiais empregados.

Para o concreto simples, a resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) é determinada por meio de ensaio de compressão axial em corpos de prova cilíndricos (ABNT NBR 5739, 2018). A resistência característica à tração ( $f_{ct,fl}$  ou  $f_{ctM,k}$ ) é obtida por ensaio de tração na flexão de corpos prismáticos de seção quadrada (ABNT NBR 12142, 2010). O módulo de elasticidade utilizado nas análises elásticas, tanto para a determinação dos esforços solicitantes quanto para a verificação dos estados limites de serviço, corresponde ao módulo de elasticidade inicial ( $E_c$ ), calculado conforme a ABNT NBR 6118 (2023).

No caso do CRF, a propriedade essencial é a resistência residual, obtida a partir da carga remanescente após a ruptura da matriz de concreto em ensaio de tração na flexão de corpos prismáticos até um deslocamento vertical estabelecido em norma (ABNT NBR 16940, 2021). Os valores dessas resistências são classificados em classes de projeto, de acordo com o *fib* Model Code (2020), em função da razão entre  $f_{R3m}$  e  $f_{R1m}$ . A classificação compreende cinco intervalos, conforme Tabela 1.

Como exemplo, a classe CRF 2b corresponde a um valor de  $f_{R1m}$  igual ou superior a 2,00 MPa e um valor de  $f_{R3m}$  entre 1,40 MPa e 1,80 MPa.

Adicionalmente, deve-se considerar que o concreto é um meio alcalino, o que

exige atenção quanto à estabilidade química das fibras nele incorporadas. Assim, a seleção do tipo de fibra deve sempre observar as especificações normativas aplicáveis. No caso das fibras de aço, a ABNT NBR 15530 (2019) estabelece os requisitos geométricos, mecânicos e de durabilidade, e a própria natureza do material — produzido com teor de carbono adequado — garante a formação de uma camada de óxidos passivantes que o torna estável em meio alcalino. Já, as fibras poliméricas devem atender à ABNT NBR 16942 (2021); para assegurar a estabilidade, é obrigatória a avaliação da resistência em meio alcalino conforme o Anexo A dessa norma, admitindo-se uma perda máxima de massa de 5% após ensaio acelerado. Por fim, as fibras de vidro devem atender à ABNT NBR 16941 (2021), devem ser do tipo álcali-resistente (AR), com teor mínimo de 16% de dióxido de zircônia ( $ZrO_2$ ), de modo a garantir estabilidade frente ao meio alcalino do concreto.

## 3. ESFORÇOS SOLICITANTES E ANÁLISE ESTRUTURAL

O desempenho estrutural dos PCRFs é condicionado às ações a que as placas estão submetidas durante a vida útil. Essas ações podem ser classificadas em permanentes e variáveis. As permanentes correspondem aos efeitos indiretos da retração do concreto, enquanto as variáveis abrangem tanto os carregamentos diretos como as cargas de veículos, quanto os efeitos indiretos, como variações termo-higrométricas e a fadiga decorrente da repetição de solicitações. A verificação da segurança deve considerar as combinações possíveis, ponderadas por seus respectivos coeficientes, de modo a contemplar as condições mais desfavoráveis de solicitação (ABNT PR 1011, 2021).

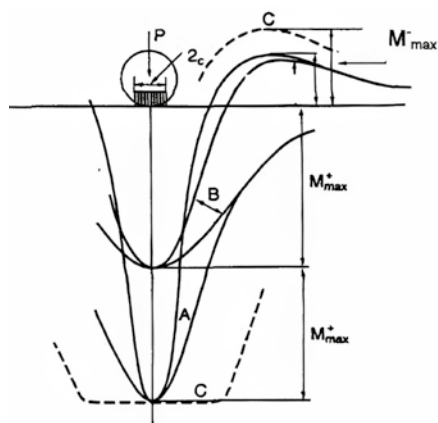
As cargas concentradas provenientes do tráfego de veículos configuram os

**TABELA 1**  
CLASSES DO CRF

Classes	Intervalos de resistências
a	$0,5 \leq f_{R3m}/f_{R1m} < 0,7$
b	$0,7 \leq f_{R3m}/f_{R1m} < 0,9$
c	$0,9 \leq f_{R3m}/f_{R1m} < 1,1$
d	$1,1 \leq f_{R3m}/f_{R1m} < 1,3$
e	$f_{R3m}/f_{R1m} \geq 1,3$

esforços predominantes em pavimentos. A análise é conduzida a partir da teoria das charneiras plásticas (Yield Line), admitindo comportamento rígido-plástico ou elastoplástico para os materiais. Essa abordagem, baseada nos trabalhos de Losberg (1961) e Meyerhof (1962) *apud* Carnio (2009), permite avaliar situações de carregamento aplicadas no interior da placa (Caso I), em suas bordas (Caso II) ou em seus cantos (Caso III), que representam as condições críticas de solicitação. A Figura 2 mostra a distribuição de momentos devido a uma carga concentrada no interior de uma placa de concreto sobre base elástica.

Na Tabela 2 são apresentadas as equações para o cálculo dos momentos fletores solicitantes devido às cargas concentradas. O cálculo da pressão de contato leva em conta a carga transmitida pela roda (P, em kN), a pressão de enchimento dos pneus (p, em MPa), o coeficiente de impacto dinâmico ( $\phi$ ) e o raio de rigidez relativo da placa apoiada sobre fundação elástica (l), sendo o raio da área de contato da carga determinado com a Equação 1 e o raio de rigidez relativo determinado com a Equação 2, onde o  $E_{ci}$  é o módulo de elasticidade tangente inicial do concreto (em MPa),  $\nu$  é coeficiente de Poisson e  $k$  é o módulo de reação vertical do sistema subleito/sub-base (em N/mm<sup>2</sup>).



**FIGURA 2**

DISTRIBUIÇÃO DE MOMENTOS DEVIDO A UMA CARGA CONCENTRADA NO INTERIOR DE UMA PLACA DE CONCRETO SOBRE BASE ELÁSTICA

FONTE: LOSBERG (1961) *apud* CARNIO (1998)

**TABELA 2**

EQUAÇÕES PARA CÁLCULO DOS MOMENTOS FLETORES SOLICITANTES DEVIDO ÀS CARGAS CONCENTRADAS

	Caso I - Interior	Caso II - Borda	Caso III - Canto
$\frac{a}{l} = 0$	$(m + m') = \frac{P}{2 \cdot \pi}$	$(m + m') = \frac{P}{\left(\frac{\pi}{2} + 2\right)}$	$m' = \frac{P}{2}$
$\frac{a}{l} > 0,2$	$(m + m') = \frac{P \cdot \left(1 - \frac{a}{3 \cdot l}\right)}{(4 \cdot \pi)}$	$(m + m') = \frac{P \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot a}{3 \cdot l}\right)}{(\pi + 4)}$	$m' = \frac{P \cdot \left(1 - \frac{a}{l}\right)}{4}$

Obs.: INTERPOLAR LINEARMENTE PARA VALORES INTERMEDIÁRIOS ENTRE 0 E 0,2

[1]  $a = \sqrt{\frac{\phi \cdot P}{\pi \cdot p}}$

[2]  $l = \sqrt[4]{\frac{E_{ci} \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot k}}$

Os efeitos de retração são tratados como ações permanentes indiretas. A consideração desse fenômeno é feita por meio de análise linear, admitindo-se comportamento elástico-linear para os materiais. As tensões resultantes variam conforme a posição considerada — centro, borda ou canto da placa — e dependem do módulo de elasticidade secante do concreto ( $E_{cs}$ , em MPa), do coeficiente de fluência do concreto com fibras ( $\phi_f$ ), do fator de restrição associado ao atrito na interface com a fundação ( $\psi$ ) e da deformação por retração ( $\epsilon_R$ ). Na Tabela 3, são apresentadas as equações para o cálculo das tensões devido à retração. Essa avaliação é importante porque a retração pode contribuir para a fissuração precoce, comprometendo a durabilidade do pavimento (TR34, 2014). Usando a superposição de efeitos como estratégia de dimensionamento, as tensões de retração podem ser tratadas como momentos fletores equivalentes que as provocam, conforme é apresentado na Tabela 3.

As variações termo-higrométricas também geram tensões adicionais, resultantes do gradiente de temperatura e umidade entre as faces superior e inferior da placa. Esse desequilíbrio provoca empenamento diferencial, que deve ser considerado por análise linear, onde a tensão pode ser determinada com a Equação 3 e o momento equivalente que as provocam com a Equação 4, em função do módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$ ), do coeficiente de fluência do concreto com fibras ( $\phi_f$ ), da diferença de deformações ( $\Delta \epsilon$ ) e do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). A superposição desses esforços com as cargas de tráfego pode agravar as condições de solicitação e antecipar manifestações patológicas (TR34, 2014).

[3]  $\sigma_E = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \frac{E_{cs}}{(1 + \phi_f)} \cdot \left(\frac{\Delta \epsilon}{1 - \nu}\right)$

[4]  $m_E = \frac{\sigma_E \cdot b \cdot h^2}{6}$

No âmbito da análise estrutural plástica, a ABNT NBR 16935 (2021) estabelece que a carga última das placas deve ser avaliada pela soma de dois momentos máximos: o momento fletor negativo ( $M_n$ ), dado pelo momento radial, e o momento fletor positivo ( $M_p$ ), associado ao momento tangencial e dependente da plastificação

**TABELA 3**

EQUAÇÕES PARA CÁLCULO DOS MOMENTOS FLETORES EQUIVALENTES DEVIDO À RETRAÇÃO

	Caso I - Interior	Caso II - Borda	Caso III - Canto
Tensão	$\sigma_{Rcentro} = \Psi \cdot \frac{E_{cs}}{(1 + \phi_f)} \cdot \epsilon_R$	$\sigma_{Rborda} = \frac{\sigma_{Rcentro}}{2}$	$\sigma_{Rcanto} = 0$
Momento equivalente	$m_{Rcentro} = \frac{\sigma_R \cdot b \cdot h^2}{6}$	$m_{Rborda} = \frac{m_{Rcentro}}{2}$	$m_{Rcanto} = 0$

promovida pelo teor de fibras incorporadas ao concreto. Tendo como referências limites o momento fletor elástico ( $M_e$ ) e o momento fletor com a contribuição das fibras ( $M_f$ ), quando a soma dos momentos ( $M_p + M_n$ ) for inferior a  $M_e$ , a placa se comporta como concreto simples, apresentando ruptura frágil. A utilização das fibras torna-se então necessária para conferir ductilidade à seção, garantindo níveis adequados de segurança ao pavimento. Quando a soma ( $M_p + M_n$ ) supera o valor de  $M_e$ , o momento fletor positivo deve ser levado à plastificação, resultando na expressão ( $M_p + M_n$ ) =  $M_e + M_f$  (ABNT NBR 16935, 2021).

Por fim, a transferência de esforços entre placas desempenha papel crucial no desempenho global do pavimento. A continuidade estrutural é dependente do tipo de vinculação considerado: borda livre, borda com fibras ou borda com barras de transferência. Para cada situação, adota-se um coeficiente redutor aplicado aos momentos fletores, que representa a eficiência da transferência de cargas nas juntas. Esse fator é determinante para reduzir concentrações de tensões e distribuir os esforços entre as placas, contribuindo para o aumento da vida útil da estrutura.

#### 4. DIMENSIONAMENTO NO ESTADO LIMITE ÚLTIMO (ELU)

O dimensionamento no Estado Limite Último (ELU) tem como finalidade garantir que as placas de CRF apresentem segurança à ruína sob as combinações de esforços mais desfavoráveis. Para isso, o modelo adotado considera a análise plástica do pavimento, conforme a teoria das charneiras plásticas, que admite o comportamento do CRF como material rígido-plástico ou elastoplástico. Essa abordagem é coerente com os trabalhos de Losberg e Meyerhof, amplamente utilizados em placas sobre fundações elásticas, e foi incorporada à norma brasileira ABNT NBR 16935 (2021).

No cálculo, o momento solicitante ( $M_{sd}$ ) resulta da combinação ponderada das cargas móveis de tráfego, dos efeitos de retração e das variações termo-higrométricas, aplicando-se os respectivos coeficientes de ponderação para ações permanentes e variáveis (Equação 5).

$$[5] \quad M_{sd} = \gamma_{Q,dir} \cdot (m + m') + \gamma_{Q,ind} \cdot m_E + \gamma_{G,ind} \cdot m_R$$

Onde:

$m$  e  $m'$  representam os momentos fletores decorrentes das cargas móveis;

$m_E$  corresponde ao momento associado às variações termo-higrométricas e;

$m_R$  ao momento devido à retração.

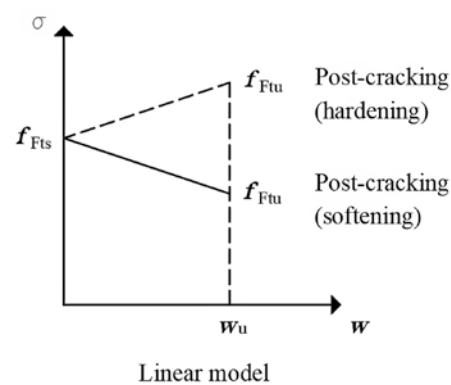
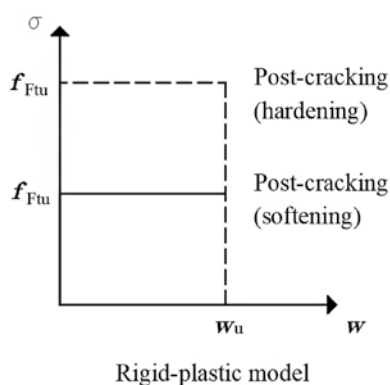
A resistência da seção é avaliada pela soma da contribuição do concreto simples e do concreto reforçado com fibras. O momento resistente  $M_{Rd}$  (Equação 6) é definido como a soma entre o momento fornecido pelo concreto simples  $M_{ed}$  (Equação 7), relacionado à resistência à tração do material (Equação 8), e o momento adicional devido às fibras  $M_{fd}$  (Equações 9 e 11). No caso do CRF, a norma ABNT NBR 16935 (2021) e o *fib* Model Code 2020 permitem duas formas de representação do diagrama tensão-abertura de fissura: o modelo rígido-plástico e o modelo linear (Figura 3). O primeiro utiliza diretamente o valor último da resistência residual  $f_{Ftu}$  (Equação 10), enquanto o segundo considera a média ponderada entre valores iniciais e finais de pós-fissuração (Equações 12 e 13), representando de forma mais gradual o comportamento resistente.

$$[6] \quad M_{Rd} = M_{ed} + M_{fd}$$

$$[7] \quad M_{ed} = \frac{\sigma_{ct,d} \cdot b \cdot h^2}{6}$$

$$[8] \quad \sigma_{ct,d} = \frac{f_{ct,fl}}{\gamma_{crf,t}}$$

$$[9] \quad M_{fd} = \frac{f_{Ftum}}{\gamma_{crf}} \cdot \frac{b \cdot h^2}{2}$$



**FIGURA 3**

LEIS CONSTITUTIVAS DE PÓS-FISSURAÇÃO DO CRF

FONTE: ABNT NBR 16935 (2021)

$$[10] \quad f_{Ftum} = \frac{f_{R3}}{3}$$

$$[11] \quad M_{fd} = \frac{\frac{f_{Ftsm} + f_{Ftum}}{2} \cdot b \cdot h^2}{\gamma_{crf}} \cdot \frac{b \cdot h^2}{2}$$

$$[12] \quad f_{Ftum} = (0,5 \cdot f_{R3m} - 0,2 \cdot f_{R1m})$$

$$[13] \quad f_{Ftsm} = 0,45 \cdot f_{R1m}$$

Por fim, a ABNT NBR 16935 (2021) estabelece coeficientes de ponderação específicos para os parâmetros resistentes:  $\gamma_c=1,4$  para a resistência à compressão do CRF,  $\gamma_{crf,t}=1,5$  para a resistência à tração direta e  $\gamma_{crf}=1,5$  para as resistências residuais.

#### 5. VERIFICAÇÕES NO ESTADO LIMITE DE SERVIÇO (ELS)

As verificações no Estado Limite de Serviço (ELS) são fundamentais para assegurar que o PCRF mantenha desempenho adequado durante sua vida útil, evitando deformações excessivas e controlando a evolução de fissuras. Nesse contexto, dois aspectos principais devem ser avaliados: a fadiga e o deslocamento vertical da placa.

A fadiga está associada à repetição de solicitações ao longo do tempo, que pode comprometer a resistência residual do concreto reforçado com fibras. A ABNT PR 1011 (2021) recomenda a adoção do modelo proposto por Nayar (2014), no qual a capacidade resistente é ajustada em função dos parâmetros

$f_{R1m}$  e  $f_{R3m}$ , calculados segundo o *fib* Model Code 2020 (2023). O momento resistente de cálculo ( $M_{Rd}$ ), conforme Equação 14, passa a incluir fatores de minoração X e Y, que representam a redução da capacidade tanto para a seção não fissurada (concreto simples) quanto para a fase pós-fissuração (CRF). Esses coeficientes variam conforme o tipo de tráfego e o tipo e dosagem de fibras, podendo ser determinados a partir de estudos experimentais, como os de Carnio (2009). Dessa forma, a verificação de fadiga associada à expectativa de vida útil de projeto, pode garantir que o pavimento suporte um número elevado de ciclos de carga sem apresentar falhas.

$$[14] \quad M_{Rd} = \left[ X \cdot f_{ct,fl} + 3 \cdot Y \cdot \left( \frac{f_{ftsm} + f_{ftum}}{2} \right) \right] \cdot \frac{h^2}{6}$$

O deslocamento vertical da placa corresponde à avaliação das deformações em serviço. Essa verificação é realizada pela comparação entre o deslocamento calculado e um valor limite prescrito (Equação 15). O deslocamento é estimado com base na teoria da elasticidade de

Westergaard (1924) *apud* Carnio (2009), considerando placas sem vínculos e carregadas por forças concentradas, conforme Equação 16, onde c assume os valores de 0,125 para o caso I, 0,442 para o caso II e para o caso III deve ser calculado com a Equação 17. O valor máximo admissível depende do tipo de pavimento, mas uma referência possível é a limitação em L/600, conforme estabelecido na ABNT NBR 6118 (2023), onde L representa o menor lado da placa. Essa restrição tem como objetivo prevenir desconforto operacional e possíveis danos à estrutura, assegurando o desempenho funcional do pavimento.

$$[15] \quad DV \leq DV_{max}$$

$$[16] \quad DV = c \cdot \left( \frac{P}{k \cdot l^2} \right)$$

$$[17] \quad c = \left[ 1,1 - 1,24 \cdot \left( \frac{a}{l} \right) \right]$$

Portanto, as verificações no ELS complementam o dimensionamento realizado no ELU, garantindo que os PCRFs atendam não apenas aos critérios de segurança estrutural, mas também aos requisitos

de durabilidade e de utilização ao longo de sua vida útil.

## 6. CONCLUSÕES

O dimensionamento de PCRFs, fundamentado na teoria das charneiras plásticas e nos procedimentos da ABNT NBR 16935 e da ABNT PR 1011, permite projetar pavimentos seguros, duráveis e compatíveis com as condições reais de solicitação. A análise plástica oferece um modelo adequado para a determinação da carga última, enquanto as contribuições das resistências residuais do CRF asseguram maior ductilidade e controle da fissuração. As verificações no Estado Limite de Serviço, em especial fadiga e deslocamento vertical, complementam o dimensionamento ao garantir desempenho funcional e conforto em serviço. Os critérios apresentados consolidam uma base de dimensionamento que pode apoiar a difusão do uso do CRF em pavimentos, fortalecendo a prática do dimensionamento normativo no Brasil. Dessa forma, o uso do CRF em pavimentos representa uma alternativa eficiente e racional, combinando simplificação construtiva com ganhos de desempenho estrutural e durabilidade. ☺

## ► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2023.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15530: Fibras de aço para concreto — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16935: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16940: Concreto reforçado com fibras — Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16941: Fibras de vidro álcali-resistentes (AR) para concreto e argamassa — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16942: Fibras poliméricas para concreto — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Prática Recomendada: ABNT PR 1011: Projeto de pavimentos urbanos em concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- [8] CEN - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *Eurocode 2: Design of concrete structures*. EN 1992-1-1:2004. Brussels, 2004.
- [9] CARNIO, M. A. Análise em regime plástico de placas de concreto reforçado com fibras de aço sobre base elástica. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, 1998.
- [10] CARNIO, M. A. Propagação de trinca por fadiga do concreto reforçado com baixos teores de fibra. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2009.
- [10] *FIB - INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE*. *fib* Model Code 2020. Lausanne, Switzerland, 2020.
- [12] NAYAR, S. K., GETTU, R. A. *Comprehensive Methodology for the Design of Fiber Reinforced Concrete Pavement*. ACI - *fib* Internacional Workshop, 2014.
- [13] THE CONCRETE SOCIETY. TR 34: Concrete Industrial Ground Floors - A guide to design and construction. Camberley: The Concrete Society, 2014.