

Projeto de Dimensionamento de Lajes Mistas de Concreto com Fôrmas Permanentes de PRFV

Layane Silva Souza¹, Rodrigo de Melo Lameiras²;

¹Universidade de Brasília / Estruturas e Construção Civil / layane.scalixto@gmail.com

²Universidade de Brasília / Estruturas e Construção Civil / rmlameiras@unb.br

Resumo

Nos últimos anos os sistemas estruturais com materiais compósitos vêm ganhando espaço na construção civil com aplicações em passarelas de pedestres, pontes e outras estruturas devido à resistência à corrosão, grande capacidade de carga com baixa densidade, alta resistência a fadiga e fácil manuseio. Elementos mistos com Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) já estão sendo utilizados por pesquisadores da área em lajes e tabuleiros de pontes, porém apesar do avanço nas pesquisas experimentais, até a presente data não há códigos normativos de dimensionamento ou modelo analítico comumente aceito entre pesquisadores sobre esse tipo de estrutura. Em virtude disso, este artigo propõe um modelo analítico simplificado para a estimativa de capacidade de carga de uma laje mista de concreto com chapa de PRFV perfilada com geometria trapezoidal.

O método de dimensionamento apresentado é voltado para o dimensionamento de lajes mistas unidirecionais, de forma simplificada e utilizando o método da seção transformada de Timoshenko. Foi admitida uma compatibilidade de deformações dos elementos e o princípio do equilíbrio interno das forças. O comportamento da chapa perfilada de PRFV foi considerado como sendo elástico-linear e do concreto sendo elástico não-linear. Esta proposta de dimensionamento engloba o Estado Limite Último (ELU) e o Estado Limite de Serviço (ELS). O artigo dispõe uma proposta de metodologia de dimensionamento e apresenta exemplo de utilização.

Palavras-chave

Estrutura Mista; Estrutura Compósita; Laje mista; Plástico Reforçado com Fibras; PRFV; Fibra de Vidro;

1. Introdução

O emprego de Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) como soluções de estruturas não-metálicas vem, cada vez mais, se destacando e tomando espaço nas pesquisas e no próprio mercado de construção civil. Segundo Zoghi (2014), este aumento na utilização advém da sua resistência à corrosão, alta relação entre a resistência e peso, boa resistência à fadiga e fácil manuseio. Além destes, Ascione *et al.* (2016) lista que a baixa manutenção, baixo peso próprio, transparência eletromagnética e grande adaptabilidade para aplicação na construção civil também são benefícios associados com a utilização de PRF nos elementos estruturais.

De acordo com Zoghi (2014) diversos guias de dimensionamento e normas foram elaborados ao longo dos anos relacionando a utilização de concreto e PRF. Os guias, códigos e normas de dimensionamento existentes, como o ACI 440 (2008) - Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars e CSA-S6 (2000) - Fiber-Reinforced Structures, Canadian Highway Bridge Design Code, relacionam a produção de compósitos e alguns providenciam recomendações de dimensionamento de estruturas reforçadas com barras de polímero reforçado com fibras. Todavia não há norma de dimensionamento de fôrmas estruturalmente aderidas de PRFV, sendo esta temática parte do comitê do ACI de número 440-0J – “FRP Stay-in-Place Forms” representado pelo pesquisador canadense Amir Fam. Em virtude disso, este artigo propõe um modelo analítico simplificado baseado nas deformações longitudinais para a estimativa de capacidade de

carga de uma laje mista de concreto com fôrma permanente de PRFV como armadura principal e de geometria trapezoidal.

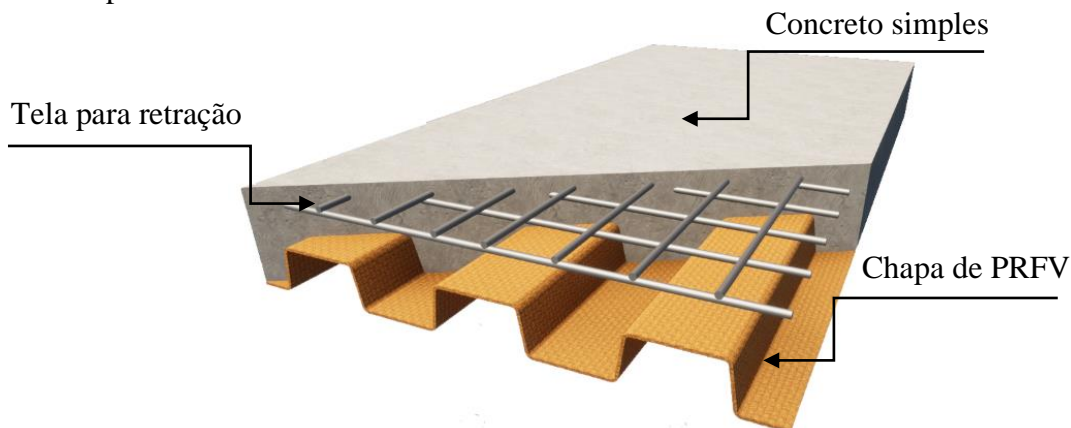


Figura 1 - Geometria da laje mista com fôrma permanente estudada

2. Constituição dos materiais compósitos

Um material compósito é constituído, em sua maioria, por duas fases. Uma das fases é chamada de fase descontínua ou reforço e fica embebida na fase denominada matriz. O reforço que será considerado neste trabalho são as fibras. Segundo Mazumdar (2022), nos materiais compósitos as fibras resistem entre 70 a 90% das cargas, além de serem responsáveis pela rigidez, resistência, estabilidade térmica e demais propriedades estruturais do compósito. As fibras podem ser naturais ou sintéticas, no entanto as mais utilizadas comercialmente são as fibras sintéticas de vidro, carbono e aramida (ACI COMMITTEE 440R-07, 2007). Em geral as fibras podem ser classificadas em contínuas e alinhadas, descontínuas e alinhadas, assim como curtas e aleatórias. O foco neste estudo será na fibra contínua e alinhada, todavia o produto deste artigo poderá ser aplicado para qualquer compósito desde que sejam obtidas as propriedades de resistência última à tração e módulo de elasticidade desses materiais.

A matriz cumpre diversas funções em uma estrutura compósita, sendo vital para o desempenho da estrutura (MAZUMDAR, 2002). Ela pode ser classificada em natural ou sintética e serve para juntar as camadas de reforço, transferir carregamentos, funciona como uma barreira às intempéries, possui uma grande influência no cisalhamento e na resistência à compressão de um compósito (ZOGHI, 2014). As matrizes podem ser compostas por metais, polímeros e cerâmicas. Neste trabalho será utilizada a matriz polimérica.

3. Comportamento estrutural

De acordo com o ACI 440R-07 (2007) lajes mistas de concreto e PRF com fôrma estrutural aderida maximaliza as vantagens de ambos os materiais, simplifica o processo construtivo e reduz o tempo de execução. O comportamento do PRFV no concreto é caracterizado como linear e elástico até a ruptura com deformações específicas de mais de 20‰ e baixo módulo de elasticidade, gerando um aumento significativo das deformações após fissurações do concreto e diminuindo a rigidez da estrutura (WEIBULL, BASTOS e OLIVEIRA, 2021). Em virtude disso o dimensionamento de membros estruturais de PRFV são governados pela rigidez e o estado limite de serviço, portanto o comportamento global do membro de PRFV é de interesse primordial (ZOGHI, 2014).

Devido ao comportamento elástico-linear até a ruptura durante a concepção estrutural das lajes mistas alguns autores como Gonilha, Correia e Branco (2014) deram preferência para dois tipos de falha: uma ruptura pseudodúctil ou a garantia que mesmo sem perda de rigidez, as deflexões a beira do colapso sejam suficientemente grandes indicando a falha na estrutura, ou seja, admite-se que a carga última gere uma ruptura frágil desde que durante a ação desse carregamento a estrutura se deforme de tal maneira que evidencie o mal funcionamento do sistema e colapso iminente.

Durante o dimensionamento é preciso considerar o posicionamento da linha neutra de forma que o concreto esteja comprimido e a chapa de PRFV tracionada, otimizando a característica de cada material. Além deste, é importante levar em consideração fatores relacionados à durabilidade da estrutura. De acordo com Karbhari *et al.* (2003) ao levar em consideração a degradação e tolerância de danos por soluções alcalinas e umidade, adicionado a ausência de parâmetros de dimensionamento, é preciso garantir que o nível de tensão no compósito seja menos de 25% da capacidade de suporte de projeto da estrutura mista de PRFV.

4. Metodologia para o dimensionamento

O objeto de estudo desta pesquisa é a laje mista de concreto com fôrma permanente de polímero reforçado com fibra de vidro. A possibilidade de utilização dos painéis como fôrmas permanentes é explorada ao longo deste trabalho.

A laje mista será analisada teoricamente considerando o modelo estrutural unidirecional, de forma simplificada e utilizando o método da seção transformada de Timoshenko. Foi considerada uma compatibilidade de deformações dos elementos e o princípio do equilíbrio interno das forças, com o comportamento da chapa perfilada de PRFV como elástico-linear e do concreto sendo elástico não-linear.

Devido à ausência de norma técnica específica para dimensionamento de elementos mistos de concreto e chapa perfilada de PRFV optou-se em utilizar como base no dimensionamento a norma ABNT NBR 8.800:2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, utilizada comumente no dimensionamento do *steel deck* e a norma americana ACI Committee 440.2R-17 – *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. As verificações dos estados limites serão realizadas pela NBR 8.800 (ABNT, 2008), a qual divide as verificações dos estados limites últimos e de serviço em duas etapas: fase inicial e final.

Para o cálculo foi estabelecido: seções transversais permanecem planas após a deformação; no ELU despreza-se obrigatoriamente a resistência do concreto à tração e do PRFV à compressão; a deformação máxima da chapa de PRFV é dada através do cálculo da deformação efetiva e posteriormente minorada, devido à ausência de escoamento do material; a distribuição de tensões de compressão no concreto é feita através do diagrama de tensão-deformação retangular simplificado do diagrama parábola-retângulo, com profundidade igual a “a”; a deformação devido ao cisalhamento na camada adesiva é desprezada devido a espessura do material, com baixa variação de espessura e o comportamento do PRFV é linear elástico até a ruptura.

4.1. Das considerações acerca dos materiais utilizados

4.1.1. Ponderação da resistência do PRFV devido fatores ambientais

De acordo com o ACI 440.2R-17 (2017) a exposição à longo prazo à intempéries pode reduzir as propriedades de tração, fluência e fadiga dos PRF. Em virtude disso, as propriedades dos materiais devem ser reduzidas utilizando um coeficiente ambiental C_E , através da Equação 1, baseado no material e na condição de exposição do elemento.

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad \text{Equação 1}$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad \text{Equação 2}$$

$$E_f = f_{fu} / \varepsilon_{fu} \quad \text{Equação 3}$$

Sendo: C_E = coeficiente de redução ambiental, sendo 0,75 para PRFV; f_{fu}^* = resistência última à tração em MPa; ε_{fu}^* = deformação última de ruptura (mm/mm); E_f = módulo de elasticidade do PRFV em MPa.

4.1.2. Ponderação da resistência do PRFV devido às formas de ruptura à flexão

Para a estrutura proposta são assumidas três possíveis formas de rupturas, associadas às deformações limites dos materiais: destacamento da chapa em relação ao seu substrato, esmagamento do concreto e ruptura da chapa perfilada de PRFV.

O destacamento da chapa perfilada da matriz de concreto pode ser gerado através das fissuras intermediárias do mesmo. Para prevenir estas fissuras que podem induzir o destacamento da chapa a norma ACI 440.2R-17 (2017) limita a deformação do PRFV de acordo com a seguinte inequação:

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f_{ck}}{nE_f t_f}} \leq 0,9\varepsilon_{fu} \quad \text{Equação 4}$$

Sendo: ε_{fd} = deformação de destacamento do PRFV (mm/mm); ε_{fu} = deformação de ruptura de projeto do PRFV (mm/mm); f_{ck} = resistência específica à compressão do concreto em MPa; t_f = espessura nominal da chapa de PRFV (mm); E_f = módulo de elasticidade em MPa; n = número de chapas.

É necessário determinar uma deformação efetiva de projeto para o PRFV devido seu comportamento linear elástico. A menor deformação irá governar a forma de ruptura, seja pelo esmagamento do concreto, ruptura da chapa ou destacamento da chapa perfilada do substrato de concreto. Essa deformação efetiva é determinada pela seguinte inequação:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_f - x}{x} \right) \leq \varepsilon_{fd} \quad \text{Equação 5}$$

Sendo: ε_{fe} = deformação efetiva da chapa de PRFV atrelada ao modo de ruptura (mm/mm); ε_{cu} = deformação última do concreto, admitido como 3‰; d_f = distância efetiva da chapa de PRFV (mm); x = distância da fibra mais comprimida para a linha neutra (mm).

Se o cálculo de ε_{fe} for menor, o concreto controla o modo de ruptura, se ε_{fd} for menor, a falha do PRFV controla o modo de ruptura da seção.

Dessa forma, a tensão máxima de tração adotada antes da falha da estrutura será determinada através da Equação 6:

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad \text{Equação 6}$$

4.1.3. Ponderação da resistência do PRFV devido à redução de aderência

De acordo com o ACI 440.2R-17 (2017) a tensão de ligação entre a chapa de PRFV e o concreto deve ser analisada e ponderada em virtude da frequência do destacamento da chapa, diminuindo a tensão máxima resistente à tração no cisalhamento. Este coeficiente leva em consideração uma deformação efetiva ponderada por um coeficiente de redução de aderência κ_v , obtido através da Equação 7:

$$\kappa_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11,900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75 \quad \text{Equação 7}$$

$$L_e = \frac{23,300}{(n t_f E_f)^{0,58}} \quad \text{Equação 8}$$

$$k_1 = \left(\frac{f_{ck}}{27} \right)^{2/3} \quad \text{Equação 9}$$

$$k_2 = \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} \quad \text{Equação 10}$$

Sendo: κ_v = coeficiente de redução de aderência ao cisalhamento; k_1 = fator de modificação em relação à resistência do concreto; k_2 = fator de modificação em relação ao tipo de envoltória da chapa; L_e = comprimento ativo de aderência da chapa de PRFV (mm); d_{fv} = distância efetiva da chapa de PRFV – no cisalhamento (mm).

A deformação efetiva ao cisalhamento é calculada através da Equação 11.

$$\varepsilon_{fe,v} = \kappa_v \cdot \varepsilon_{fu} \leq 0,004 \quad \text{Equação 11}$$

Dessa forma, determina-se a tensão máxima à tração no cisalhamento de acordo com a Equação 12.

$$f_{fe,v} = E_f \cdot \varepsilon_{fe,v} \quad \text{Equação 12}$$

4.2. Seção transversal geométrica e efetiva

Devido à possibilidade de ocorrência do fenômeno de instabilidade local a seção transversal pode ter áreas que não contribuem efetivamente para a capacidade resistente da chapa. Em virtude disso, é importante definir a área da seção transversal efetiva que irá resistir esses esforços. Neste trabalho os autores se basearam na NBR 14.762 (ABNT, 2010), adaptada para os dados pré-determinados para a chapa de PRFV.

4.3. Das considerações das ações

As ações estimadas para a estrutura precisam ser ponderadas para garantir a segurança do sistema estrutural, dessa forma sugere-se que todos os valores adotados sigam o tópico “4.7.6. Coeficientes de ponderação das ações” da NBR 8.800 (ABNT, 2008). Este item leva em consideração a variação das ações, a possibilidade de ocorrência simultânea e erros que possam ocorrer na avaliação os efeitos dessas ações, tanto no estado limite último, quanto o estado limite de serviço, conforme Equação 13.

$$\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f2} \cdot \gamma_{f3} \quad \text{Equação 13}$$

Sendo: γ_{f1} = coeficiente que considera a variação das ações; γ_{f2} = parcela para a simultaneidade de atuação das ações; γ_{f3} = coeficiente que considera erros de avaliação dos efeitos das ações de valor igual ou superior a 1,10.

Em geral o produto do coeficiente de variação e erros de avaliação é representado por $\gamma_g = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f3}$ e a parcela para a simultaneidade de atuação das ações (γ_{f2}) é calculada através da combinação de fatores de redução (Ψ_0), para as situações de estado limite último e estado limite de serviço.

De acordo com a NBR 8.800 (ABNT, 2008) as combinações últimas de ações são classificadas em normal, especial, de construção e excepcional.

4.3.1. Combinações últimas normais

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j} F_{Qj,k}) \quad \text{Equação 14}$$

Sendo: $F_{Gi,k}$ = ações permanentes; $F_{Q1,k}$ = ações variáveis; $F_{Qj,k}$ = ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável principal.

4.3.2. Combinações últimas de construção

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j} F_{Q_cons}) \quad \text{Equação 15}$$

4.3.3. Combinações de ações de serviço

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=2}^n (\psi_{2j} F_{Qj,k}) \quad \text{Equação 16}$$

4.4. Verificação da laje mista

As resistências últimas das lajes foram calculadas levando em consideração o ACI 318 (2022), o ACI 440.2R-17 (2017) e o item Q.3.1. da NBR 8.800 (ABNT, 2008). Tendo em vista que não há normalização nacional ou internacional da utilização de chapas perfiladas de polímero reforçado com fibras foram realizadas adaptações para a análise, partindo do princípio da compatibilidade de deformações e equilíbrio interno de das forças.

Para a combinação de serviço será realizada uma combinação utilizando o peso próprio da chapa de PRFV, peso próprio do concreto no estado endurecido, sobrecarga de utilização e revestimento. O deslocamento vertical máximo admissível é de $L_t/250$.

4.4.1. Determinação do momento fletor resistente

A formulação dos esforços internos resistentes é realizada com base no equilíbrio de forças normais à seção transversal e dos momentos fletores, satisfazendo a compatibilização de deformações e considerando o modo de ruptura. O somatório desses esforços internos na seção transversal deve ser nulo, sendo N_{cf} a força de compressão do concreto e N_{frp} a força de tração na fôrma, que geram um binário oposto ao momento solicitante, proporcionando o dimensionamento da seção transversal. Os cálculos para as forças das seções foram realizados de acordo com as Equação 17 a Equação 19.

$$N_{cf} = 0,85 \cdot b \cdot t_c \cdot f_{ck} \text{ para } x \geq t_c \quad \text{Equação 17}$$

$$N_{cf,II} = 0,85 \cdot b \cdot x_i \cdot f_{ck} \text{ para } x < t_c \quad \text{Equação 18}$$

$$N_{frp} = A_{ef,t} \cdot f_{fe} \quad \text{Equação 19}$$

Sendo: N_{cf} = força de compressão no concreto; f_{ck} = resistência do concreto à compressão; b = largura unitária da laje, tomada igual a 1000 mm; t_c = altura da laje de concreto acima do topo da fôrma; N_{frp} = força de tração na fôrma de PRFV; $A_{ef,t}$ = área da seção efetiva da fôrma (correspondente a largura de 1000 mm).

O cálculo do momento resistente da seção irá variar de acordo com a posição da linha neutra (LNP), dessa forma, o momento fletor resistente M_{rd} é determinado pela Equação 20.

$$M_{rd,i} = N_{cf} \cdot y_i \quad \text{Equação 20}$$

Sendo: M_{rd} = momento resistente da estrutura; y_i = distância entre as forças resistentes, variando de acordo com a posição da linha neutra.

Nas configurações em que a posição da linha neutra estiver acima da fôrma (Figura 2) ou no alinhamento da mesma (Figura 3) a distância entre as forças resistentes será calculada de acordo com a Equação 21.

Nas configurações em que a posição da linha neutra estiver dentro da fôrma (Figura 4), a altura do bloco de compressão está condicionada à tensão máxima efetiva admissível da chapa de PRFV, não sendo maior que a espessura da capa de concreto, podendo ser calculada através da Equação 22.

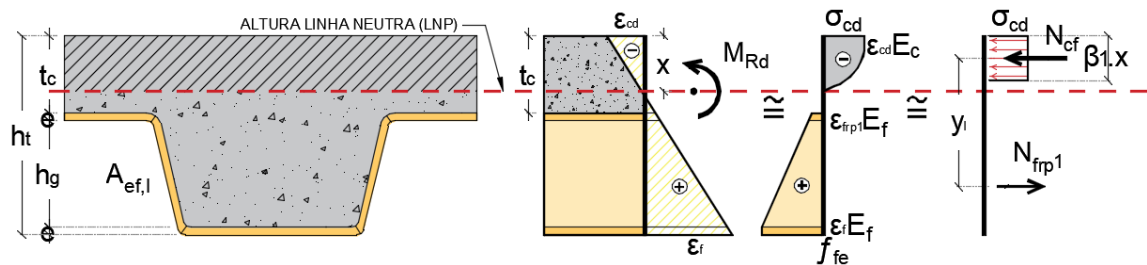


Figura 2 - Esforços internos com a linha neutra acima da fôrma

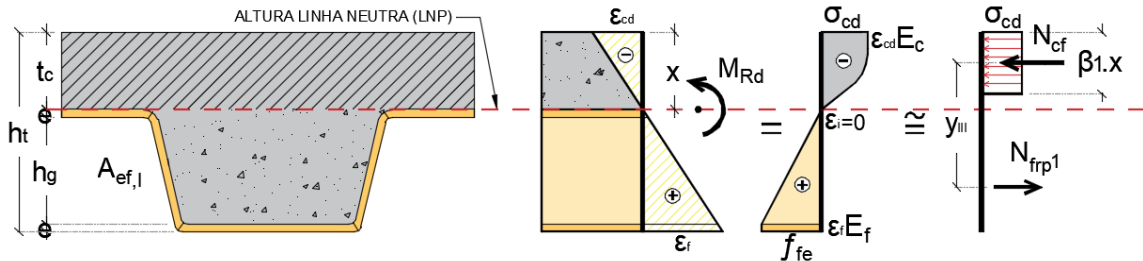


Figura 3 - Esforços internos com a linha neutra no alinhamento da fôrma

$$y_I = d_{f,I} - \beta_1 \cdot x \cdot 0,5$$

Equação 21

Sendo: y_I = distância entre as forças resistentes quando a LNP está acima da fôrma; x = altura da linha neutra; $d_{f,I}$ = distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva resistente da fôrma.

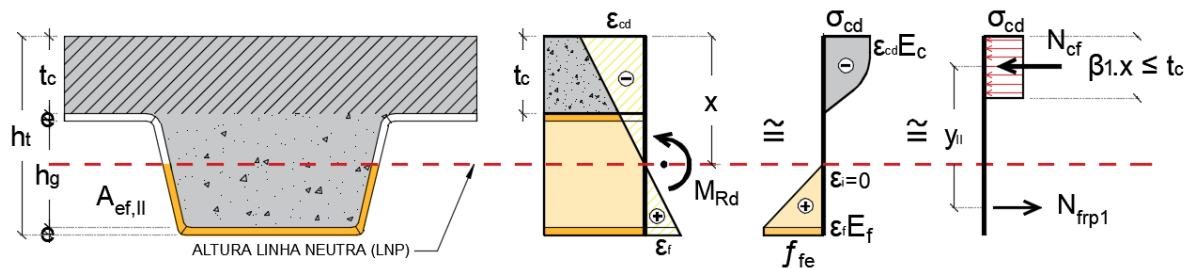


Figura 4 - Esforços internos com a linha neutra abaixo da fôrma

$$y_{II} = d_{f,II} - \beta_1 \cdot x_{II} \cdot 0,5 \quad \text{onde:} \quad \beta_1 \cdot x_{II} \leq t_c$$

Equação 22

Sendo: y_{II} = distância entre as forças resistentes quando a LNP está abaixo da fôrma; a = altura do bloco de compressão do concreto; $d_{f,II}$ = distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva resistente da fôrma.

Para concreto com resistência à compressão entre 28 a 56 MPa, β_1 pode ser calculado através da Equação 23.

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 \cdot \frac{f_{cd} - 28 \text{ MPa}}{7 \text{ MPa}}$$

Equação 23

Para determinar a linha neutra da estrutura é realizado o equilíbrio entre as forças internas N_{cf} e N_{frp} , resultando na Equação 24.

$$x_i = \frac{A_{ef,i} \cdot f_{fe,d}}{0,85 \cdot b \cdot f_{cd}}$$

Equação 24

Sendo: $A_{ef,i}$ = área da seção efetiva resistente abaixo da linha neutra.

O processo de equilíbrio das forças normais à seção transversal, dos momentos fletores e a compatibilização de deformações é realizado através de um processo iterativo, o qual determina-se

inicialmente uma posição para a linha neutra e a partir disso refina-se o cálculo até o ponto de convergência aceitável.

4.4.2. Determinação da resistência ao cisalhamento

A resistência nominal ao cisalhamento da laje com chapa perfilada de PRFV pode ser determinada somando a contribuição da resistência do concreto com a resistência da chapa. No somatório da resistência da chapa utilizou-se um coeficiente de redução relacionado ao fator de envelopamento da seção Ψ_f de 0,85 de acordo com o ACI 440.1R-15 (2015), devendo o somatório ponderado ser menor ou igual ao cisalhamento solicitante, conforme a Equação 25.

Equação 25

$$\phi V_n = \phi (V_c + \Psi_f \cdot V_{frp}) \leq V_{max}$$

Sendo: ϕ = coeficiente de redução de resistência; V_n = resistência nominal ao cisalhamento da estrutura; V_c = resistência ao cisalhamento do concreto; V_{frp} = resistência ao cisalhamento do PRFV; V_u = esforço solicitante último do cisalhamento; Ψ_f = coeficiente de redução em função do envelopamento da seção.

A resistência ao cisalhamento do concreto, expressa em Newton (N), relativa à largura de 1000 mm, pode ser calculada através da Equação 26, adaptada da norma NBR 8.800 (ABNT, 2008).

$$V_c = \frac{63 \cdot \eta \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2 \cdot k \cdot A_v}}{\gamma_c \cdot b_n}$$

Equação 26

Sendo: A_v = área resistente do concreto em milímetros quadrados, indicada na Figura 5; b_n = largura entre duas nervuras consecutivas, em milímetros; $\eta = 0,3 + 0,7(\rho_c/2400)$; ρ_c = massa específica do concreto, não maior que 2400 kg/m³; $k = (1,6 - d/1000) \geq 1,0$ caso haja armadura longitudinal de tração que se estenda a não menos de $d + l_{b,sec}$ além da seção considerada e 1,0 nos outros casos.

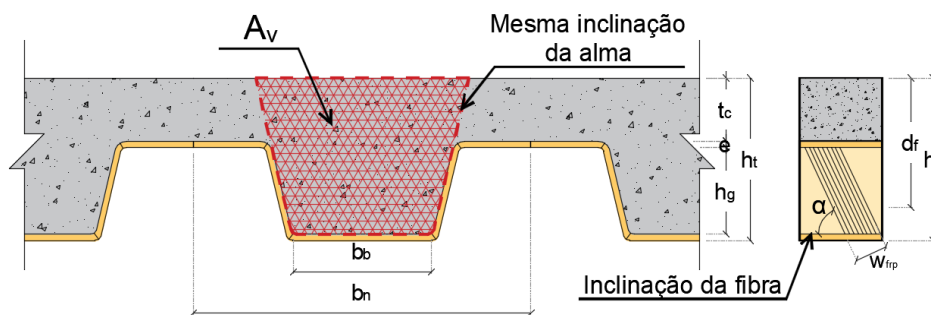


Figura 5 – Área resistente do concreto (hachurada)

O limite da força cortante, expresso em Newton e para uma largura de 1000mm é calculado através da Equação 27.

Equação 27

$$V_{cMAX} = \frac{1000 \cdot 0,25 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot A_v}{b_n}$$

Assumindo uma fissura crítica de cisalhamento à 45°, pode-se calcular a força cortante resistente da chapa de PRFV através da Equação 28, adaptada do ACI 440.2R-17 (2017).

$$V_{frp} = 2 \cdot f_{fe,v} \cdot e \cdot w_{frp} \cdot h_g \cdot (\sen \alpha + \cos \alpha)$$

Equação 28

Sendo: e = espessura da chapa perfilada de PRFV; w_{frp} = comprimento da chapa perfilada de PRFV; h_g = altura da chapa perfilada de PRFV; α = ângulo da orientação da fibra da chapa.

4.4.3. Cálculo deflexão e determinação do vão máximo

Na fase inicial (durante a construção), a chapa perfilada de PRFV está sujeita às cargas construtivas referente ao peso próprio da chapa perfilada de PRFV, peso próprio do concreto no estado fresco e peso dos equipamentos e operários durante a construção (sobrecarga de construção). De acordo com a NBR 8.800 (ABNT, 2008), o peso da chapa perfilada e o peso do concreto fresco não devem exceder $L_f/180$ ou 20mm, o que for menor, sendo L_f o vão teórico da forma na direção das nervuras.

Na fase final (com o concreto endurecido), o deslocamento vertical da laje ($\delta_{m\acute{a}x}$) não deve ser maior que $L_f/350$ considerando apenas o efeito das ações variáveis, e $L_f/250$ para o carregamento no estado limite de serviço, determinado através da Equação 29 e Equação 30.

Equação 29

$$\delta = \frac{5}{48} \cdot \varphi_1 \cdot L_f^2$$

Equação 30

$$\varphi_1 = \frac{M}{EI} = \frac{F_s \cdot L_f^2}{EI}$$

Sendo: F_s = somatória dos esforços no estado limite de serviço; L_f = vão efetivo da laje; EI = momento de inércia da laje.

Ainda de acordo com Honickman (2008) a equação de deflexão subestima a deflexão na flexão em 18%, em virtude disso foi admitido um coeficiente de 1,18 nos valores obtidos, dessa forma, o vão efetivo máximo admissível será dado pela Equação 31.

Equação 31

$$L_{f,m\acute{a}x} = \sqrt[3]{\frac{192}{875 \cdot 1,18} \cdot \frac{EI}{F_s}}$$

4.5. Determinação da quantidade necessária de fibras de vidro

Segundo You *et al.* (2017) a lei das misturas é o método mais utilizado para estimar a resistência à tração dos polímeros reforçados com fibras, prevendo o adequado módulo de elasticidade do compósito, baseando nas hipóteses de que a fibra e a matriz são homogêneas, linear-elásticas e não há vazios no compósito, estando a fibra e matriz perfeitamente aderidas. As estimativas de taxa de fibra e módulo de elasticidade são realizadas de acordo com a Equação 32 a Equação 34.

$$V_f = \frac{v_f}{v_{mc}} ; V_m = \frac{v_m}{v_{mc}} ; \text{sendo: } V_f + V_m = 1$$

Equação 32

Sendo: V_f = taxa de fibra; v_{mc} = volume do compósito; v_f = volume de fibra; V_m = taxa de matriz; v_m = volume de matriz.

$$E_{cl} = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m$$

Equação 33

Sendo: E_{cl} = módulo de elasticidade de um compósito de fibras contínuas e alinhadas, na direção do alinhamento; E_f = módulo de elasticidade da fibra; E_m = módulo de elasticidade da matriz;

Equação 34

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f \cdot V_f}{E_m \cdot V_m}$$

Sendo: F_f = carga suportada pelas fibras; F_m = carga suportada pela matriz.

5. Resultados para o dimensionamento proposto

As equações propostas foram aplicadas no dimensionamento de uma laje mista corrugada de 75 mm de altura x 5 mm de espessura (Figura 6), para vãos de 2,5 e 1,8 m, com uma capa de concreto de 30 MPa com 50 mm.

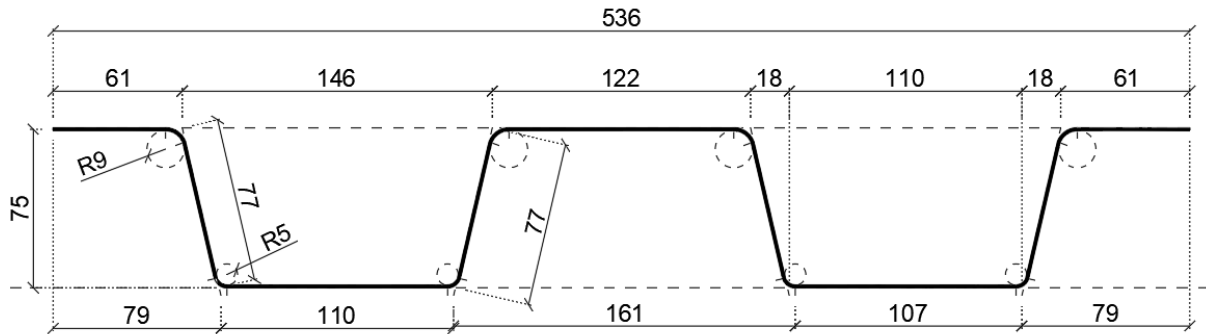


Figura 6 - Geometria da laje mista com fôrma permanente analisada (em milímetros)

Para determinação do esforço solicitante foi desprezado o peso próprio da chapa corrugada, considerado 24 kN/m^3 de densidade típica para o concreto e o peso próprio de elementos construtivos de acordo com a NBR 6120 (ABNT, 2019), sendo $1,0 \text{ kN/m}^2$ para revestimento de pisos edifícios residenciais e $0,25 \text{ kN/m}^2$ para forro de gesso acartonado, com estrutura de suporte. A sobrecarga utilizada foi dividida em sobrecarga de construção, de acordo com a NBR 8.800 (ABNT, 2008), adotada aquela de efeito mais nocivo dos seguintes valores: carga uniformemente distribuída com no mínimo 1 kN/m^2 ou carga linear de $2,2 \text{ kN/m}$ perpendicular à direção das nervuras da fôrma, na posição mais desfavorável, somente para verificação do momento fletor. A sobrecarga de uso foi considerada para fins residenciais de acordo com a NBR 6.120 (ABNT, 2019), para dormitórios e salas com $1,5 \text{ kN/m}^2$. Os esforços resistentes e solicitantes encontrados são dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Esforços na Estrutura (Resistente x Solicitante)

Vão Teórico	Momento Fletor (kN.m)				Cisalhamento (kN)			
	M_{rd}	M_{sd} , (ELU-N)	M_{sd} , (ELU-C)	M_{sd} , (ELS)	V_{rd}	V_{sd} , (ELU-N)	V_{sd} , (ELU-C)	V_{sd} , (ELS)
2,50	44,12	3,00	1,58	2,12	77,27	4,81	2,52	3,39
1,80	44,12	1,56	0,82	1,10	77,27	3,46	1,82	2,44

Devido a sua configuração de fôrma permanente, para a determinação das deflexões da laje foi considerada uma fase inicial, durante a construção, e na fase final, com a sobrecarga de uso. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados do Cálculo da deflexão no Estado Limite de Serviço

Vão Teórico	Fase Inicial ($L_f/180$)			Fase Final ($L_f/250$)		
	$\delta_{máx,i}$ (mm)	δ_i (mm)	L_f máx (m)	$\delta_{máx,f}$ (mm)	δ_f (mm)	L_f máx (m)
2,50	13,89	7,71	2,76	10,00	10,35	2,47
1,80	10,00	2,07		7,20	2,78	

Através dos dados obtidos é possível utilizar a lei das misturas para quantificar os materiais que serão utilizados para o compósito. Considerando um percentual de 50% de fibras e 50% de resina poliéster e densidades de 2.550 kg/m^3 e 1.180 kg/m^3 é possível estimar a utilização de $14,91 \text{ kg}$ de fibra unidirecional e $6,90 \text{ kg}$ de resina poliéster para fabricar a laje em estudo com um vão teórico de 2,50

metros e 10,73 kg de fibra unidirecional e 4,97 kg de resina poliéster para fabricar a laje em estudo com um vão teórico de 1,80 metros. Faz-se necessário lembrar ainda que este quantitativo deve ser aferido através de produção e ensaio de tração dos compósitos devido o tipo de fabricação, dentre eles laminação manual, infusão a vácuo e pultrusão, que variam as proporções dos materiais e até mesmo o tipo de resina e fibra que serão utilizados.

6. Considerações finais

O dimensionamento aqui apresentado através de um método simplificado baseando-se em referências bibliográficas das normas do American Concrete Institute (ACI) e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), buscou colaborar com a difusão de conhecimento acerca de chapas de PRFV e sua utilização como fôrma permanente, ainda pouco explorado no Brasil e no mundo. Para isso foi apresentado os resultados obtidos através dos cálculos para duas lajes mistas unidirecionais com vãos teóricos de 2,50 e 1,80 metros.

Através do método de dimensionamento proposto possibilita-se a determinação das características de uma laje mista com fôrma permanente de PRFV, viabilizando o *kickstart* do processo iterativo do dimensionamento de novas estruturas, contribuindo com a disseminação do método construtivo e das características mecânicas de seus materiais. Sugere-se para trabalhos posteriores sua verificação em programas experimentais utilizando a produção das lajes com as características determinadas através da metodologia apresentada, verificação de seu comportamento no ensaio de flexão à quatro pontos e posteriormente a construção de um modelo de elementos finitos englobando todos os dados levantados.

Referências Bibliográficas

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE. ACI 318. Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) reinforcement for concrete structures. Farmington Hills: 2022.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE. ACI 440R-07. Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) reinforcement for concrete structures. Farmington Hills: 2007.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE. ACI 440.1R-15. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. Farmington Hills: 2015.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE. ACI 440.2R-17. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Farmington Hills: 2017.
- ASCIONE, Luigi *et al.* Prospect For New Guidance In The Design Of FRP. Italy: 2016. Disponível em: <https://ec.europa.eu/jrc>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800 - Projeto e execução de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: [s. n.], 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14.762 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro: [s. n.], 2010.
- GONILHA, José A.; CORREIA, João R.; BRANCO, Fernando A. Structural behaviour of a GFRP-concrete hybrid footbridge prototype: Experimental tests and numerical and analytical simulations. *Engineering Structures*, v. 60, p. 11–22, 2014.
- HONICKMAN, H. N. Pultruded GFRP Sections as Stay-in-Place Structural Open Formwork for Concrete Slabs and Girders. Thesis of master of science (engineering). Queen's University. Kingston, Ontario, Canada. 2008.
- KARBHARI, V. M. *et al.* Durability gap analysis for fiber-reinforced polymer composites in civil infrastructure. *Journal of Composites for Construction*, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 238–247, 2003.
- MAZUMDAR, Sanjay K. Composites manufacturing: materials, product, and process engineering. Florida: CRC Press Ilc, 2002. v. 1
- WEIBULL, J. K., BASTOS, C. C. D. O., OLIVEIRA, L. O. S. B. Análise Modal e Dimensionamento de uma Passarela de Concreto com GFRP. *Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas*, v. XII, p. 1–11, 2021.

YOU, Y.J. et al (2017). Modification of Rule of Mixtures for Tensile Strength Estimation of Circular GFRP Rebars. *Polymers* 2017, 9, 682; doi:10.3390/polym9120682

ZOGHI, Manoochehr. *The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2014.