

DIMENSIONAMENTO DE UMA PASSARELA UTILIZANDO CONCRETO COM ARMADURA NÃO METÁLICA

DESIGN OF A WALKWAY USING CONCRETE WITH NON-METALLIC REINFORCEMENT

WEIBULL, Jon Karl¹

BASTOS, Cristiane Cruxen Daemon d'Oliveira e²

OLIVEIRA, Luiz Octávio de Souza Bueno³

Resumo: Estruturas de concreto armado e aço rapidamente se tornaram os métodos construtivos mais habituais por robustez, praticidade e economia no processo construtivo. Com o crescimento urbano e de infraestrutura, a manutenção dessas construções em concreto e aço vêm se tornando impraticável e forçando a comunidade a repensar os métodos tradicionais. Estruturas de concreto com armaduras não metálicas apareceram no final do século XX como uma opção para reduzir custos de manutenção em áreas com alta agressividade ambiental e conseqüente corrosão nos metais estruturais. Entretanto, para uma adoção generalizada deste novo tipo de armadura, como os polímeros reforçados com fibra de vidro (GFRP), é necessário desenvolver especificações, criar padrões de teste normatizados e guias de projeto. Já existe uma primeira, segunda e terceira geração de diretrizes específicas de alguns países como Canadá, Japão, América e Europa (CHBDC 1996, JSCE 1997, ACI 440 2001, IGDRCS 1999 e subseqüentes revisões). Cada uma destas normas tem suas próprias especificidades, baseadas nas características de produção das armaduras em seus países. Propõe-se o dimensionamento, considerando concreto armado com barras de GFRP, de uma viga em seção transversal tipo “T” para uma passarela de pedestres real situada no Rio de Janeiro. Para tanto foi desenvolvida uma planilha de cálculo para seção qualquer que considera as recomendações da norma americana ACI 440 e as características das barras produzidas no Brasil, além de alguns limites propostos por normas brasileiras.

Palavras-chave: Passarela; Viga T; Estrutura de Concreto Armado; GFRP.

Abstract: Reinforced concrete and steel structures quickly became the most common construction methods due to robustness, practicality and economy in the construction process. With urban and infrastructure growth, the maintenance cost of these concrete and steel structures has become impractical and has been forcing the community to rethink traditional methods. Concrete structures with non-metallic reinforcements appeared in the late 20th century as an option to reduce maintenance costs in areas with high environmental aggressiveness and consequent corrosion of the structural metals. However, for widespread adoption of this new type of reinforcement, such as glass fiber reinforced polymers (GFRP), it is necessary to develop specifications, create standardized tests and design guides. There is already a first, second and third generation of specific guidelines for some countries such as Canada, Japan, America and Europe (CHBDC 1996, JSCE 1997, ACI 440 2001, IGDRCS 1999 and following revisions). Each of these standards has its own specificities, based on the production characteristics of the reinforcements in their countries. A proposition is presented for the dimensioning, considering reinforced concrete with GFRP bars, of a beam in cross section type “T” for a real pedestrian walkway located in Rio de Janeiro. For this purpose, a calculation spreadsheet was developed for any generic section considering the recommendations of the American standard ACI 440 and the characteristics of the bars produced in Brazil, in addition to some limits proposed by Brazilian standards.

Keywords: Walkway; T Beam; Reinforced Concrete Structure; GFRP.

¹ Departamento de Estruturas, Engenharia Civil - Universidade Santa Úrsula - jon.weibull@souusu.com.br

² Doutora em Engenharia Civil na área de Estruturas pela COPPE UFRJ - Universidade Santa Úrsula - cristiane.daemon@usu.edu.br

³ Doutorando em Engenharia Civil na área de Estruturas pela UERJ - Engenheiro da instituição Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - luizoctavio.uerj@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

O envelhecimento da infraestrutura urbana existente, sua manutenção e ampliação, em contrapartida a limites orçamentários cada vez mais severos, impõe à engenharia civil moderna o estímulo de sair da zona de conforto para encontrar soluções mais modernas e criativas. Tal desafio encontra-se, inclusive, como um dos catorze grandes desafios da engenharia segundo a *National Academy of Engineering, NAE* (2008). Ortenzi Junior (2007) concorda que, ao contrário da maior parte dos setores industrializados, a conservadora engenharia civil se mostra relutante em adotar novas estratégias e tecnologias, exigindo um maior tempo e consolidação das técnicas e custos envolvidos para absorver tal tecnologia, fato que agrega grande importância a publicações imparciais que busquem evidenciar as características tanto positivas quanto negativas dessas novas opções, bem como a busca da elaboração de normas consistentes para projetos.

A técnica construtiva mais habitual no Brasil é o concreto armado, em que se utilizam armaduras de aço, por não exigir qualificação da mão de obra e por sua robustez. Por outro lado, o Brasil possui grandes metrópoles com alto índice de agressividade ambiental, gás carbônico, chuva ácida e maresia, esta última, devido ao seu extenso litoral, contribuindo para a deterioração das estruturas e aumentando o gasto com manutenção. Dentre as diversas alternativas existentes para aumento da durabilidade e consequente diminuição dos custos de manutenção das estruturas encontra-se a utilização de armaduras não metálicas em estruturas de concreto, como substituição às armaduras de aço. De acordo com Oliveira, Souza e Teixeira (2018), *Fiber Reinforced Polymers*, conhecidos como FRPs, já são estudados como alternativa para armaduras em peças de concreto com exposição a alta agressividade como despejo de dejetos químicos, aplicações marítimas e aeroespaciais, desde os anos 70, mas a engenharia civil demorou até os anos 90 para começar a criar as primeiras normas construtivas e aplicações. Apesar de apresentar características mecânicas inferiores ao aço, são imunes à corrosão e possuem transparência magnética, característica secundária, mas que, em um mundo de crescente volume de sistemas operados através de radiofrequência, assume um papel cada vez mais importante. A disponibilidade de normas internacionais ampliou o espectro de utilização das armaduras de FRP nos países de origem, abrindo caminho para um número cada vez maior de novos projetos e aplicações diferentes, em alguns casos, aproveitando até mesmo suas características mais secundárias, como transparência magnética ou resiliência a altas temperaturas, mostrando assim, a importância da criação de normas nacionais na adoção de tecnologia em larga escala.

O presente texto tem como objetivo principal, através do dimensionamento em concreto armado com GFRP de uma passarela real, contribuir para ampliar e difundir as técnicas de projeto e dimensionamento de estruturas deste tipo, a fim de incentivar a elaboração de uma futura norma

brasileira. Os nomes atribuídos às FRPs dependem do tipo de fibra utilizada em sua produção. Na indústria se utilizam quatro tipos: fibra de basalto, fibra de aramida, fibra de carbono ou fibra de vidro. A última, conhecida como GFRP, *Glass Fiber Reinforced Polymer*, ou Polímero Reforçado com Fibra de Vidro, será o foco do presente artigo. Será estudado um caso real de uma passarela atravessando o Jardim de Alah, na Lagoa, bairro do Rio de Janeiro. Serão levados em consideração diversos aspectos para a solução, tais como volume de concreto, quantidade necessária de armadura de GFRP, dimensões da estrutura final e capacidade resistente. Será utilizada como base para cálculo a norma homologada americana, ACI 440.1R-15 (2015), que além de apresentar excelente didática, considera o atual estágio de desenvolvimento dessa tecnologia, propondo limites mais seguros para sua utilização, ainda que conservadores.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. GFRP – *Glass Fiber Reinforced Polymer* como armadura para concreto

Barras de FRP (*Fiber Reinforced Polymer* ou Polímero Reforçado com Fibra) é, segundo ACI 440.1R-15 (2015), “material compósito produzido em uma forma estrutural longa e delgada, adequada para o reforço interno de concreto e, consistindo principalmente de fibras unidirecionais, longitudinais, ligadas e moldadas por resina polimérica rígida”. Barras de GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer* ou Polímero Reforçado com Fibra de Vidro), podem ser produzidas utilizando-se diferentes resinas, tipos de fibras de vidro, métodos de entrelaçamento e impregnação das fibras. Cada combinação gera GFRPs com características distintas de resistência mecânica e química. Para barras de GFRP a serem utilizadas como armaduras em concreto (figura 1), é importante a escolha do tipo de resina e fibra de vidro mais resistentes, tanto mecanicamente, quanto quimicamente, principalmente à alta alcalinidade do concreto, de forma a garantir uma vida útil ótima da estrutura. Tavares (2006) citando Bakis et al. (2002) apresenta detalhadamente cada finalidade para as GFRPs e o processo de fabricação que garante as características mecânicas desejadas. No caso específico das barras de GFRP para armaduras de concreto armado, o método utilizado é o da pultrusão, figura 2, que oferece excelente consistência e economia, além de produzir barras de tamanho ilimitado.

Barras de GFRP possuem características importantes quando aplicadas como armaduras a serem contidas em concreto, quais sejam: não sofrem corrosão, apresentam baixo peso próprio, possuem excelente isolamento térmico e magnético, além de excelente resistência à tração. No entanto, não tem resistência à compressão consistente e, teoricamente, sofrem reações de desgaste em meios alcalinos como o concreto, importante objeto de pesquisas quando desta redação. Para proteger

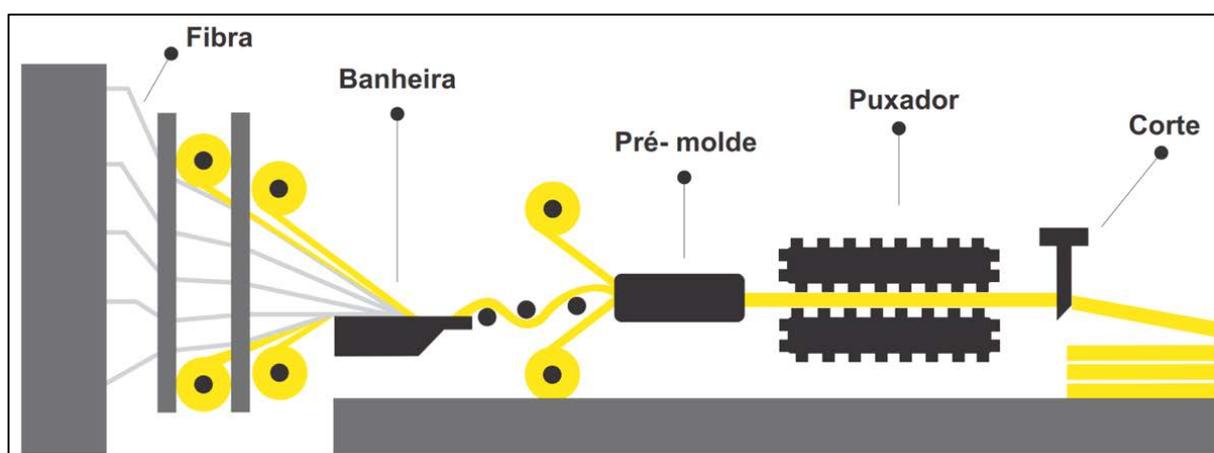
as fibras do ataque químico, é importante a escolha da matriz polimérica adequada, ou a utilização de fibras de vidro AR, *alkali resistant*, de custo mais elevado, ao se produzir a GFRP.

Figura 1 - Barras de GFRP à esquerda e Armadura de GRFP à direita



Fonte: Antop Global e ATP, respectivamente.

Figura 2 - Processo de Pultrusão



Fonte: Catálogo da empresa Stratus.

É característica conhecida das GFRPs o comportamento tensão vs. deformação linear e elástico até a ruptura, além de possuírem cerca de 25% do módulo de elasticidade quando comparadas ao aço. O processo industrial de fabricação por pultrusão e subsequente polimerização conferem, ao mesmo tempo, excelente resistência a tração longitudinal e uma certa fragilidade transversal às fibras. Tal característica impede que sejam dobradas após sua moldagem e, portanto, as armaduras não podem ser confeccionadas *in loco*, conquanto devem vir pré-moldadas de fábrica.

Os estudos mais atuais tentam antever a vida útil das armaduras de GFRP quando expostas às diversas agressividades ambientais a que se propõe auxiliar. Zoghi (2013) expõe um capítulo inteiro ao estado da arte destas armaduras. Sempre esclarecendo que ainda existe muita polêmica sobre os métodos de ensaios acelerados para durabilidade de GFRPs, especialmente em soluções aquosas. Resumidamente, ensaios acelerados mostram que barras GFRP diretamente mergulhadas em água, com ou sem salinidade, retém ao menos 70% da resistência mesmo após 100 anos de serviço. Numa tentativa mais próxima da real exposição destas armaduras, um experimento no Canadá retirou

GFRPs de estruturas de concreto após 8 anos em serviço, e elas não apresentaram descamações ou prejuízos estruturais significativos às barras. Assim, ainda que de forma não conclusiva, é possível que barras GFRP não reajam em meio alcalino da maneira como se imaginava quando contidas em concreto, visto que, experimentos com barras GFRP mergulhadas em soluções alcalinas podem não corresponder à realidade quando se trata de confinamento das armaduras. Existem novos estudos sobre concreto produzido com água do mar e, em Bertola, Canonico e Nanni (2017), expõe-se um projeto real com o referido concreto, levando ao extremo as características favoráveis da GFRP (figura 3).

Figura 3 – Vergalhões de GFRP pré-moldados para concreto utilizando água do mar e agregados impregnados com sal



Fonte: Bertola, Canonico e Nanni (2017).

2.2. Breve Histórico

A adoção de FRPs como opção construtiva em engenharia civil ganhou força a partir dos anos 90 no cenário internacional, se desdobrando em diversas normas e guias construtivos para produção, projeto e execução de obras envolvendo essas resinas reforçadas. As aplicações são as mais variadas e valem uma leitura mais extensa, como por exemplo, em Ortenzi Junior (2007) ou Zoghi (2013), que resumem e reúnem estudos e exemplos práticos compilados de diversas autoridades internacionais em FRPs. Por possuírem propriedades mecânicas menos desejáveis quando comparadas ao aço, as FRPs se mostram mais úteis quanto maior a agressividade do ambiente a que as estruturas estão sujeitas e, não à toa, surgem inicialmente como opção de reforço estrutural, manutenção ou projeto de estruturas viárias novas, especialmente quando expostas a sais de degelo, comum no hemisfério norte. As normas viárias, indiretamente, impulsionaram normas mais amplas e criaram com isso uma padronização, mas não somente isso, geraram também uma segurança normativa para utilização da tecnologia, facilitando a absorção mais ampla da mesma.

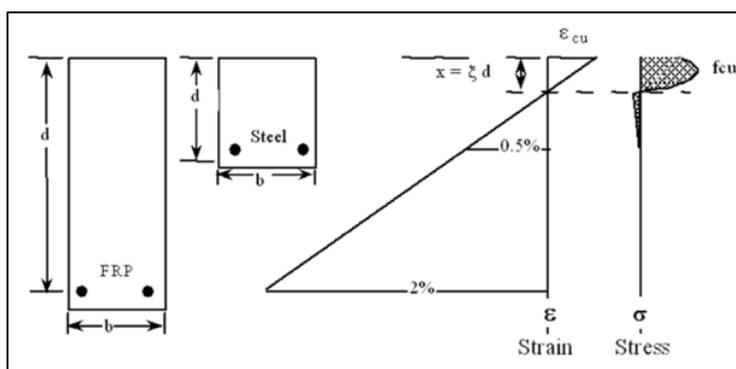
No Brasil, estudos em FRPs começaram a surgir a partir de 2006 iniciados por Tavares (2006) e sua dissertação sobre flexão em vigas mistas, armadas longitudinalmente com GFRPs, importadas dos Estados Unidos, e transversalmente com aço CA-50. O projeto se baseou nos estados limites último e de serviço, fazendo uso das diversas normas internacionais disponíveis. Foram realizados experimentos seguindo essas mesmas normas e apresentando resultados compatíveis com as expectativas de projeto, produzindo assim, uma primeira validação para utilização confiável de armaduras GFRP no Brasil a partir das normas internacionais. O estudo pioneiro abriu caminho para uma série de novas pesquisas que visaram preencher as lacunas que se abriram com o projeto. Estudos de aderência entre o concreto e as barras de GFRP em Cunha (2019), ensaios de tração para barras GFRP por Oliveira (2019), entre outros.

Oliveira, Souza e Teixeira (2018) realizaram estudo com GFRP de produção nacional, em que foram confeccionadas vigas de concreto armadas com barras, longitudinal e transversal, exclusivamente de GFRP. Como nas pesquisas que antecedem, foram utilizadas as normas internacionais americana, canadense e italiana para analisar as vigas quanto a flexão e cisalhamento, através de ensaios de flexão em quatro pontos, flexão pura. O estudo apresenta um comparativo do esforço resistente ao cortante calculado utilizando-se cada norma e opta pela mais conservadora, que se mostrou a norma americana. Dois grupos de vigas foram produzidos: O primeiro possuía menor quantidade de armadura longitudinal, apenas três barras e maior espaçamento na armadura transversal. O segundo grupo possuía mais armadura longitudinal, cinco barras, e a transversal, menor espaçamento. O resultado experimental mostrou que as vigas do primeiro grupo tiveram rompimento precoce devido à ação do esforço cortante, enquanto as do segundo grupo tiveram rompimento no esmagamento do concreto sem danos às barras, cenário ideal. O estudo demonstra a fragilidade da armadura transversal na região das dobras, a baixa resistência transversal das próprias barras e o grande deslocamento vertical, devido ao efeito negativo do baixo módulo de elasticidade das barras de GFRP. O ensaio expõe a fragilidade do material devido a sua característica anisotrópica, reforçando assim a necessidade conservadora e atenção no dimensionamento das armaduras, em especial a transversal. Por outro lado, comparando as taxas de armadura adotadas e as taxas sugeridas pelas normas, foi verificado que as rupturas ocorreram da forma relatada por estas normas para as configurações de projeto utilizadas, com a norma americana apresentando uma maior precisão para os esforços resistentes esperados. Importante notar que a norma americana foi mais precisa apesar de utilizadas GFRPs nacionais no lugar das importadas, nas quais as normas baseiam seus coeficientes.

2.3. Embasamento teórico

Como as barras de GFRP não possuem a ductilidade do aço, em outras palavras, não possuem propriedade de escoamento, quando seções de concreto com armadura de GFRP sofrem ruptura à flexão e ela se dá por falha da armadura tracionada, o mecanismo de ruína é “repentino” e “catastrófico” e, nesse caso, a ACI 440.1R-15 (2015) aumenta de maneira conservadora, o coeficiente de segurança utilizado. Segundo Nanni (1993), é preferível que o colapso se dê por compressão no concreto, já que este apresenta comportamento plástico por consequência de certa ductilidade ao longo do processo de ruína. Por sua vez, a área comprimida da seção de concreto tende a ser reduzida em função da grande capacidade de alongamento das barras de GFRP. Pilakoutas (2002) mostra um diagrama de distribuição de tensões numa seção retangular armada com GFRP comparando a altura útil com a de uma seção armada com aço, figura 4. Para se ter uma zona comprimida de concreto similar entre as duas, é necessário que a altura útil da seção com GFRP seja bem maior que a de uma seção armada com aço. Nota-se que a linha neutra para a ruína balanceada da estrutura, que se refere à ruína conjunta do concreto e da armadura, com GFRP encontra-se muito próxima da superfície comprimida, enquanto a mesma armada com aço tende ao centro da seção.

Figura 4 – Distribuição das deformações para uma armadura de GFRP



Fonte: Pilakoutas (2002).

O dimensionamento das estruturas de concreto com armaduras não metálicas pela ACI 440.1R-15 (2015), segue os mesmos preceitos das armaduras metálicas convencionais, ou seja, parte das hipóteses de equilíbrio de esforços internos e compatibilidade de deformações. Para facilitar, seguem as simplificações necessárias para um dimensionamento:

- Pela falta de grande quantidade de pesquisas experimentais com vigas de seção qualquer, a ACI 440.1R-15 (2015) garante a validade das premissas somente para seções retangulares com a armadura longitudinal disposta em uma camada.

- b) As barras de GFRP possuem excelente resistência à tração, mas não possuem resistência consistente à compressão, dessa forma, as barras comprimidas não são consideradas no dimensionamento da seção transversal;
- c) Deformações no concreto e na armadura de FRP são proporcionais a distância à linha neutra (hipótese das seções planas);
- d) A deformação de compressão do concreto deve ser limitada a um valor máximo, da ordem de 3,5%, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014);
- e) A resistência à tração do concreto é ignorada no estado limite último;
- f) Existe aderência perfeita entre concreto e armadura.

2.3.1.1 *Estado Limite Último - ELU*

Como pode ser visto em Carvalho e Figueiredo Filho (2019), o método dos estados limites pressupõe que as cargas solicitantes majoradas devem ser menores do que a capacidade resistente minorada para assegurar o dimensionamento seguro da estrutura. Em função das diversas diferenças físicas entre o aço e FRP, a ACI 440.1R-15 (2015) apresenta a conhecida equação de equilíbrio de esforços em limite último com um fator de segurança adicional, equação (1):

$$\phi M_n \geq M_u \quad (1)$$

sendo,

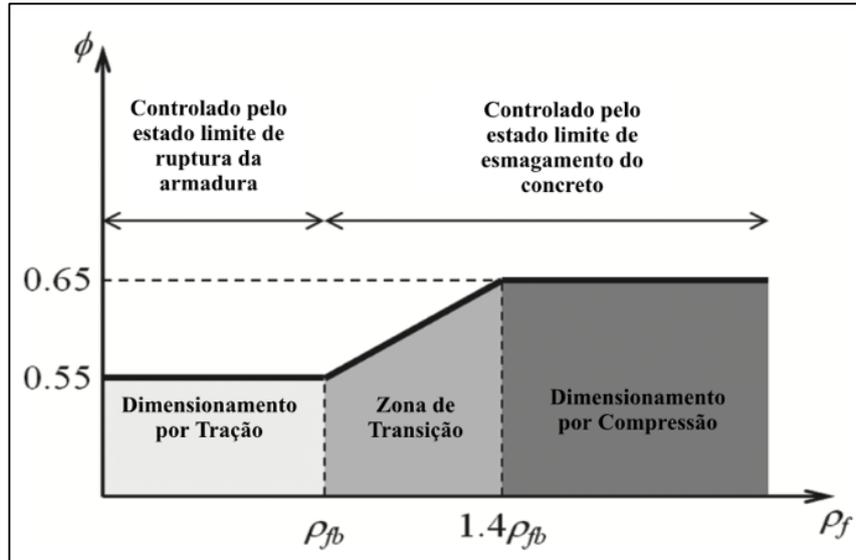
M_u – Momento calculado pelas solicitações majoradas;

M_n – Momento nominal da seção calculada pelas equações de equilíbrio e a compatibilidade de deformações;

ϕ – Coeficiente de redução dos esforços resistentes à flexão - Como armaduras de FRP não apresentam comportamento dúctil, um fator conservador de redução da força deve ser adotado para fornecer uma maior segurança. O coeficiente varia em função do tipo de ruptura para o qual se deseja dimensionar, ou seja, por compressão no concreto ou por tração nas armaduras, como pode ser visto na figura 5.

A ACI 440.1R-15 (2015) define três possíveis zonas de dimensionamento em função da taxa balanceada de armadura (ρ_{fb}), ou seja, a taxa de armadura (ρ_f) para qual, teoricamente, concreto e armadura sofrerão ruptura simultânea no estado limite último. A zona de transição da figura 6 reflete incertezas de execução, uma maior deformação de compressão última no concreto do que previsto, o que, neste caso, pode levar a peça estrutural a uma ruína indesejada por ruptura da armadura e não por esmagamento do concreto.

Figura 5 – Coeficiente de redução ϕ em função da taxa da armadura ρ_f



Fonte: Adaptado de ACI 440.1R-15 (2015).

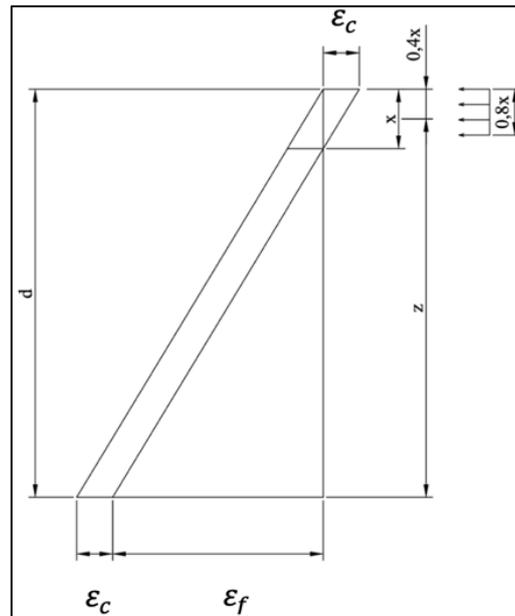
Para garantir as premissas de projeto, uma taxa de armadura longitudinal $\rho_f \geq 1,4\rho_{fb}$ é proposta pela ACI 440.1R-15 (2015) para que o dimensionamento seja controlado pelo estado limite de esmagamento do concreto. Valores possíveis para o coeficiente ϕ devem ser calculados segundo a equação (2), abaixo:

$$\phi = \begin{cases} 0,55 & \text{para } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0,3 + 0,25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} & \text{para } \rho_{fb} < \rho_f < 1,4\rho_{fb} \\ 0,65 & \text{para } \rho_f \geq 1,4\rho_{fb} \end{cases} \quad (2)$$

Assim como em dimensionamentos de concreto com armaduras metálicas, por compatibilidade de deformações é possível relacionar a posição da linha neutra e a altura útil da seção como mostra a figura 2.6.

A relação foi desenhada propositalmente em escala para mostrar como a maior capacidade de deformação das barras de GFRP aumenta a altura da linha neutra reduzindo a região comprimida. Com uma simples relação de triângulos podemos tirar da figura 2.7 as igualdades apresentadas nas equações (3) e (4):

Figura 6 – Compatibilidade de deformações e relação entre a linha neutra e a altura útil



Fonte: Adaptado de Carvalho e Figueiredo Filho (2019).

$$\frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_f} \quad (3)$$

$$z = d - 0,4x \quad (4)$$

Sendo,

$\frac{x}{d}$ – Relação entre a linha neutra e a altura útil;

ε_c – Deformação do concreto;

ε_f – Deformação das barras de GFRP;

z – Braço de alavanca.

A distribuição de tensões no concreto no ELU pode ser considerada como um diagrama parabólico-retangular, como definido na norma NBR 6118 (ABNT, 2014), seção 8.2.10.1, e assim, a tensão máxima será de 0,85 da resistência de projeto do concreto, f_{cd} . É válida, também, a simplificação através de um bloco retangular de tensões com altura igual a $0,8x$, e dessa forma, a resultante no concreto e o momento resistente podem ser calculados utilizando as equações (5) e (6), a seguir:

$$R_c = (0,8x)(0,85f_{cd})b_w \quad (5)$$

$$M_{rd} = \phi(zR_c) \quad (6)$$

Sendo,

R_c – Resistência à compressão no concreto;

M_{rd} – Momento resistente de projeto.

Para uma taxa de armadura balanceada e por compatibilidade de esforços, supondo ainda a perfeita aderência entre o concreto e a armadura, pode-se afirmar que o módulo dos esforços de

compressão, resistido pelo concreto, e de tração, resistido pela armadura no ELU, é o mesmo, e portanto $|R_c| = |R_f|$. Partindo da definição básica de tensão, força sobre área, é possível calcular a área mínima de armadura necessária como na equação (7).

$$A_f = \frac{F}{\sigma} = \frac{R_f}{E_f \varepsilon_f} \quad (7)$$

Sendo,

A_f – Área de armadura longitudinal;

R_f – Resistência a tração na armadura.

Além do coeficiente de segurança para a equação de equilíbrio de esforços em estado último, mencionado acima, a ACI 440.1R-15 (2015) apresenta também um coeficiente de redução ambiental para as propriedades mecânicas das barras de GFRP, baseando-se na volatilidade dessas resistências mecânicas ao longo do tempo, dependendo do tipo de exposição ao ambiente. Dessa forma, tanto a tensão de ruptura F_{fu} quanto a deformação de ruptura ε_{fu} devem ser reduzidos pelo coeficiente C_E conforme as equações (8) e (9):

$$F_{fu} = C_E F_{fu}^* \quad (8)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (9)$$

Sendo,

F_{fu}^* – Tensão de ruptura fornecida pelo fabricante ou obtida através de ensaios;

ε_{fu}^* – Deformação de ruptura fornecidas pelo fabricante ou obtidas através de ensaios;

C_E – Coeficiente de redução por exposição ambiental, tabela 1.

Tabela 1 – Fator de redução ambiental para fibras e condições de exposição

Condição de exposição	Tipo de fibra	Fator de redução ambiental C_E
Sem exposição ao solo ou clima	Carbono	1,0
	Vidro	0,8
	Aramida	0,9
Com exposição ao solo ou clima	Carbono	0,9
	Vidro	0,7
	Aramida	0,8

Fonte: Adaptado de ACI 440.1R-15 (2015).

Apesar dos coeficientes de segurança mais conservadores e os valores nominais específicos de tensão e deformação das barras GFRP, bem diferentes dos conhecidos para o aço, como pode ser visto em Oliveira (2019), o roteiro para o dimensionamento no estado limite último para armaduras de GFRP não difere daquele para armaduras de aço exposto na NBR 6118:2014. Neste caso, a compatibilidade de deformações entre concreto e armadura será o guia para determinar a taxa balanceada de armadura e que determinará todo o dimensionamento para o estado limite último. As cargas e ações solicitantes as quais o dimensionamento deve resistir precisam seguir o estipulado pelas normas brasileiras para passarelas, NBR 7188 (ABNT, 2013) e NBR 8681 (ABNT, 2003).

O esforço cortante resistente de uma viga inteiramente armada com GFRP é consideravelmente menor que uma equivalente, armada com aço. Este efeito ocorre por três razões: o módulo de elasticidade das barras de GFRP é relativamente baixo; possuem baixa resistência ao cisalhamento transversal; possuem uma alta resistência à tração sem nenhuma zona de escoamento. Após a fissuração, uma seção transversal usando armadura GFRP tem uma profundidade menor da linha neutra devido ao menor módulo de elasticidade. A região comprimida da seção transversal é reduzida e a abertura das fissuras é maior. Como resultado, a resistência ao cisalhamento fornecida pela zona não fissurada é menor. O engrenamento dos agregados também é reduzido, já que o efeito ocorre para as zonas não fissuradas e, como dito anteriormente, é esperado fissuras maiores, enfraquecendo o dito efeito. E por último, o efeito de pino precisa ser estudado melhor, mas por certo é muito reduzido devido à baixa resistência ao cisalhamento das barras de GFRP e, para todos os efeitos, deve ser considerado negligenciável. O método para o cálculo da resistência ao cisalhamento apresentado pela ACI 440.1R-15 (2015) segue a sequência das equações interdependentes (10) até (16):

$$\phi V_n \geq V_u \quad (10)$$

$$V_n = V_c + V_f \quad (11)$$

$$V_c = \frac{2}{5} (kd)(b_w)\sqrt{f_{ck}} \quad (12)$$

$$V_f = \frac{A_{fv}}{S} f_{fv} d \quad (13)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (14)$$

$$n_f = \frac{E_f}{E_{cs}} \quad (15)$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{b_w d} \quad (16)$$

Sendo,

V_u – Esforço cortante calculado pelas solicitações majoradas;

V_n – Esforço cortante nominal;

$\phi = 0,75$ – Coeficiente de redução dos esforços resistentes ao cortante, ACI 318 (2019);

V_c – Parcela do esforço cisalhante resistida pelo concreto;

V_f – Parcela do esforço cisalhante resistida pela armadura transversal;

k – Profundidade relativa da linha neutra;

n_f – Relação entre o módulo de elasticidade do FRP e do concreto;

ρ_f – Taxa geométrica de armadura longitudinal em FRP;

A_f – Área de armadura longitudinal em FRP;

b_w – Largura da seção transversal;

d – Altura útil da seção;

f_{ck} – Resistência a compressão característica do concreto;

A_{fv} – Área de armadura transversal

S – Espaçamento da armadura transversal;

f_{fv} – Resistência à tração para fins de resistência ao cortante.

Ensaaios mostram que a resistência à tração de barras de GFRP são consideravelmente menores quando possuem dobras e, é tão menor quanto menor a razão entre raio da dobra e diâmetro da barra. Por isso a ACI440.1R-15 limita a resistência dos estribos ao valor de f_{fb} , devido à existência de dobras, de acordo com a equação (18) abaixo, não podendo ela ser superior à tensão correspondente a uma deformação ε_f de 4‰, como pode ser visto na equação (17).

$$f_{fv} = \varepsilon_f E_f \leq f_{fb} \quad | \quad \varepsilon_f = 4\text{‰} \quad (17)$$

$$f_{fb} = (0,05 \frac{r_b}{d_b} + 0,3) f_{fu} \leq f_{fu} \quad (18)$$

Sendo,

E_f – Módulo de elasticidade das barras de GFRP;

f_{fb} – Resistência a tração das barras de GFRP nas suas dobras;

f_{fu} – Resistência a tração de ruptura para as barras de GFRP;

$\frac{r_b}{d_b}$ – Razão entre raio de curvatura nas dobras e o diâmetro das barras de GFRP.

2.3.1.2 Estado Limite de Serviço

A ACI 440.1R-15 (2015) explica que devido à baixa rigidez da estrutura de concreto armada com FRP, após a fissuração há um aumento significativo das deformações, quando comparadas a elementos equivalentes armados com aço. Ao analisar com mais cuidado as barras de GFRP, nota-se que seu módulo de elasticidade é aproximadamente 25% do módulo de elasticidade do aço, porém seu alongamento máximo é, em média 24‰, cerca de 2,4 vezes maior do que alongamento máximo para o dimensionamento com aço de 10‰ segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014). O alongamento mais intenso do conjunto de concreto e GFRP, tende a ocasionar fissuras de maior tamanho e profundidade no concreto, que perde rigidez e potencializa os deslocamentos verticais e vibrações. Essas situações de serviço devem ser verificadas e podem assumir papel de maior destaque quando se dimensiona com armaduras de FRP no lugar de armaduras de aço. Além do exposto, a norma prevê uma fissuração

máxima para garantir conforto estético e durabilidade para o concreto. Como existe grande diferença entre o comportamento em serviço do concreto armado com aço e armado com FRP, a ACI 440.1R-15 (2015) tem equações específicas para cálculo de abertura de fissuras e dois métodos para o cálculo do deslocamento vertical. Esses métodos, indireto e direto, são abordagens que constam do ACI 318 (2019), norma de concreto com armaduras metálicas americana, e que foram trazidas, como adaptação, para o ACI 440.1R-15 (2015). Cabe ainda frisar que a ACI 440.1R-15 (2015) não recomenda a utilização do método indireto, e destaca a importância da determinação de fato dos deslocamentos verticais.

2.3.2.1 Estado Limite de Deformações Excessivas (ELS-DEF)

O método direto, assim como para armaduras metálicas envolve estimar o momento de inércia equivalente (I_e) da seção transversal de concreto no estágio II, em que a rigidez equivalente $E_c I_e$ da peça estará entre $E_c I$, para a peça íntegra e $E_c I_{cr}$, quando completamente fissurada. Conforme ocorre a fissuração, a linha neutra rapidamente sobe ao longo da seção transversal, reduzindo a região comprimida e aumentando a região tracionada. O momento de inércia fissurado e o momento de fissuração associado podem ser estimados pelas equações (19) e (20):

$$I_{cr} = \frac{b_w d^3}{3} k^3 + n A_f d^2 (1 - k)^2 \quad (19)$$

$$M_{cr} = \frac{\alpha f_{ct} I}{y_t} \quad (20)$$

Sendo,

b_w – Largura da seção transversal;

d – Altura útil da seção;

k – Posição da linha neutra, como já visto para o cálculo de armadura transversal;

M_{cr} – Momento de fissuração;

α – “Fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta”, NBR 6118 (ABNT, 2014), seção 17.3.1. Para seções T ou duplo T, $\alpha = 1,2$;

f_{ct} – Resistência média do concreto à tração, NBR 6118 (ABNT, 2014), seção 8.2.5;

I – Momento de Inércia da seção íntegra;

y_t – Distância do centro de gravidade à fibra mais tracionada.

Para o cálculo do momento de inércia equivalente (I_e), no lugar de usar a mesma equação proposta por Branson e adotada pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para estruturas armadas com aço, a ACI 440.1R-15 (2015) sugere a equação proposta por Bischoff, que leva a estimativas mais razoáveis

para estruturas armadas com FRP. O coeficiente γ , que segue, é dependente da geometria, do apoio e do tipo de carregamento. A forma aqui apresentada, tal como na ACI 440.1R-15 (2015), foi estimada exclusivamente para uma viga reta, biapoiada e com carregamento uniformemente distribuído, equações (21) e (22).

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2 \left[1 - \frac{I_{cr}}{I}\right]} \leq I \mid M_a \geq M_{cr} \quad (21)$$

$$\gamma = 1,72 - 0,72 \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right) \quad (22)$$

Sendo,

I_e – Momento de inércia equivalente da seção transversal;

γ – Coeficiente que compensa a variação de rigidez ao longo do comprimento da peça;

$M_a = M_{k,g} + \Psi_2 M_{k,q}$ – Momento na seção mais solicitada, combinação em serviço. A NBR 8681 (ABNT, 2003) define $\Psi_2 = 0,3$ para pontes e passarelas.

O cálculo do deslocamento vertical, ou flecha imediata, depende de uma análise estática da estrutura. Para o caso específico de uma viga biapoiada com carga uniformemente distribuída, é facilmente encontrado na literatura de resistência de materiais e teoria das estruturas na forma da equação (23):

$$\delta = \frac{5}{384 E_{cs} I_e} q l^4 = \frac{5}{48 E_{cs} I_e} \left(\frac{q l^2}{8}\right) l^2 = \left[\frac{5}{48 E_{cs} I_e} M_a l^2\right] \quad (23)$$

Sendo,

E_{cs} – Módulo de Elasticidade Secante do concreto;

l – Comprimento total da viga.

A flecha diferida, função de fluência e relaxação, ainda depende de ensaios específicos para estruturas de concreto armadas com FRPs. Estudos, sobretudo de fluência em armaduras de FRP, estão atualmente em andamento, mas levam bastante tempo para concluir. Enquanto resultados sólidos não se apresentam, a ACI 440.1R-15 (2015) propõe um limite máximo para esforços de tração nas armaduras para prevenir possível ruptura por fluência da armadura, equação (24). O cálculo deve ser feito para a seção fissurada e comparado com uma fração conservadora da resistência a tração de ruptura da armadura de FRP (f_{fu}), tabela 2.

$$f_{fs,sus} = M_{s,sus} \frac{n_f d(1 - k)}{I_{cr}} \leq f_{fs,sus,lim} \quad (24)$$

Sendo,

$f_{fs,sus}$ – Esforço de tração solicitante na armadura;

$M_{s,sus}$ – Momento solicitante, combinação de carregamentos permanentes não majorados.

Tabela 2 – Tensões limite para ruptura por fluência em armaduras FRP

Tipo de fibra	GFRP	AFRP	CFRP
Tensões limite para ruptura por fluência, $f_{fs,sus,lim}$	$0,20f_{fu}$	$0,30f_{fu}$	$0,55f_{fu}$

Fonte: Adaptado de ACI 440.1R-15 (2015).

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), seção 13.3, a flecha máxima δ , permitida para um elemento estrutural é de $\frac{l}{250}$, para aceitabilidade visual, e $\frac{l}{350}$ para limitar sensibilidade a vibrações sob cargas acidentais. É importante ressaltar, em primeiro lugar, que o limite de sensibilidade acima é necessário, mas não suficiente. É necessário fazer a verificação do estado limite de vibrações excessivas mesmo para os casos em que o limite de deformações foi atendido. A abordagem para vibrações é baseada em análise modal e dinâmica, enquanto aqui, trata-se apenas de deformações. Em segundo lugar, a NBR 6118 (ABNT, 2014) permite que se aplique uma contraflecha, de no máximo $\frac{l}{350}$, para compensar o peso próprio da estrutura.

2.3.1.2 Estado Limite de Vibrações Excessivas (ELS-VE)

A NBR 6118 (ABNT, 2014), seção 23.3, permite uma avaliação inicial simplificada para vibrações. Através da análise modal da estrutura é possível determinar a frequência natural ou frequência própria da estrutura (f), que deve ser pelo menos 1,2 vezes maior do que uma frequência crítica (f_{crit}), originada do destino em serviço da estrutura.

$$f \geq 1,2f_{crit} \quad (25)$$

Para o caso de passarelas de pedestre a frequência crítica está definida na referida norma (tabela 23.1) como 4,5 Hz, ou seja, segundo a equação (25), a frequência natural da estrutura deve ser no mínimo de 5,4 Hz. Para casos em que tal análise simplificada não possa ser atendida, a NBR 6118 (ABNT, 2014) determina que uma análise dinâmica mais detalhada deve ser implementada seguindo as normas internacionais vigentes.

O Bulletin 209 do CEB (1991) é mais específico no que tange as frequências críticas para passarelas de pedestres, determinando faixas críticas nos intervalos entre 1,65 e 2,35 Hz e entre 3,5 e 4,5 Hz, dentro das quais uma análise dinâmica mais acurada deve ser implementada.

2.4. Dimensionamento

A passarela analisada, figura 7, tem atualmente 2,45 metros de largura e deve vencer um vão de 29 metros sobre um canal. O canal é via de tráfego de balsas e, portanto, não pode apresentar pilares no meio do vão, além de impor uma restrição a altura da passagem e conseqüentemente a altura máxima da peça estrutural, que não deve passar de 1,80 metros. Para tais restrições, especialmente com um vão longo a ser transposto, optou-se por experimentar uma viga estrutural do tipo duplo T, biapoiada, com ruptura por esmagamento do concreto como sugerido pela ACI 440.1R-15 (2015). Optou-se também por duas simplificações para facilitar os cálculos sem prejuízo da capacidade resistente final. Primeiro foi realizado o dimensionamento considerando que apenas a mesa estará comprimida, ou seja, a linha neutra estará na mesa. Segundo, fazendo uso da simetria, os cálculos foram realizados para metade da seção, aplicando-se os índices e coeficientes adequados, quando necessário. As solicitações acidentais foram embasadas nas recomendações feitas pela NBR 7188 (ABNT, 2013) e as combinações para os estados limites segundo a NBR 8681 (ABNT, 2003).

Figura 7 – À direita, passarela atual condenada e detalhe da corrosão na estrutura



Fonte: Acervo pessoal da professora Cristiane Cruxen Daemon.

Seguindo a praxe para projetos utilizando estados limites, iniciou-se pelo dimensionamento no estado limite último, e em seguida, as verificações do comportamento em serviço e os ajustes de dimensionamento necessários para preservar as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014), já detalhadas anteriormente. Como poderá ser visto mais adiante, o estado limite último não se mostrou o fator determinante no dimensionamento, visto que a capacidade resistente da viga, após as adequações para o atendimento dos estados limites de serviço, se mostrou quase o dobro dos esforços solicitantes. O dimensionamento geométrico e as áreas de armadura conseqüentemente necessárias foram determinadas durante a minimização do deslocamento vertical máximo e vibrações em estado de serviço.

O dimensionamento da viga se deu por experimentação de várias almas, mesas, diâmetros de barras de armadura, espaçamentos, dentre outras muitas variáveis possíveis. Como contribuição e

produto deste trabalho, foi desenvolvida uma planilha eletrônica como ferramenta para dimensionar seções de concreto com armaduras não metálicas (anexo A1). A planilha apresenta os resultados para o dimensionamento geométrico, cálculo de todas as taxas geométricas de armaduras pelo estado limite último, verificações para os estados limite de deformações excessivas e de vibrações. Neste caso específico, a planilha foi ajustada para os parâmetros específicos de barras de GFRP, mas pode ser adaptada para outras armaduras não metálicas. Para facilitar, a tabela 3 apresenta de forma enxuta os requisitos de projeto utilizados para o dimensionamento da viga.

Tabela 3 – Requisitos de projeto para o dimensionamento da viga duplo T

Vão Livre	Largura da Mesa	Res. Comp. Carac., f_{ck}	Along. Máx. GFRP, ε_f	Módulo de Elast. GFRP, E_f	Coef. Amb., C_e
29 m	2,45 m	30 MPa	24 ‰	48.000 MPa	0,7

Fonte: Próprio autor.

Ao realizar o dimensionamento geométrico para atender ao estado limite último obteve-se uma viga com altura total de 107 centímetros, conforme mostrado na tabela 2.4. Apesar de atender às solicitações majoradas para o limite último, nota-se que a viga apresentou uma deformação de 361 milímetros, aproximadamente 314% acima do limite máximo, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) para passarelas de pedestres. Mesmo aplicando-se a contraflecha máxima permitida de $\frac{L}{350}$ (83 milímetros), o deslocamento vertical máximo aceitável na viga seria de 198 milímetros, de modo que descontada a contraflecha, o deslocamento máximo mediria, em teoria, exatamente os 115 milímetros permitidos por norma. Ainda assim, muito aquém dos 361 milímetros estimados para a viga como mostra a tabela 4. Com esses resultados, o dimensionamento passa a ser regido pela minimização da flecha que, por sua vez, é bastante dependente da altura da viga. Dessa forma, o desafio se tornou manter a flecha estimada bem abaixo de 198 milímetros e, ao mesmo tempo, manter a altura da viga a menor possível, para reduzir o peso próprio e minimizar a quantidade de armadura de tração necessária. Este fato ilustra como o dimensionamento em estado de serviço pode ganhar excepcional destaque, especialmente para estruturas armadas com GFRP.

Tabela 4 – Dimensionamento mínimo para Estado Limite Último

Dimensionamento Geométrico ELU (Altura de 107 centímetros)							
Largura Mesa	Altura Mesa	Largura alma	Altura Alma	Altura base	Largura base	Armadura Longitudinal	Armadura Transversal
245 cm	14 cm	20 cm	69 cm	12 cm	61 cm	8 Feixes c/ 2x25mm	13 mm c/10cm
Resultados das Análises nos Estados Limites							
Momento Solicitante	Momento Resistente	Cortante Solicitante	Cortante Resistente	Flecha Máxima $\frac{L}{250}$		Flecha Viga	
2.624 kNm	2674 kNm	361 kN	433 kN	115 mm		361mm	

Fonte: Próprio autor.

Para atender ao dimensionamento por estado limite de deformações excessivas foi necessário projetar uma nova geometria, mais robusta, para o qual o estado limite último deixa de fazer sentido como limitante de projeto. A viga passa de 107 centímetros de altura total para 155 centímetros, um acréscimo de 45% em relação ao primeiro dimensionamento. Recebe também, um considerável acréscimo de 50% no número de barras de armadura de tração. A tabela 5 mostra os principais resultados do dimensionamento final para a viga. Já a figura 8, ilustra, de forma simplificada, a geometria da seção transversal da viga, mostrando as armaduras longitudinal, transversal, de pele, primária e secundária da laje.

Analisando os dados da tabela 5, uma característica marcante se encontra no momento resistente da estrutura para estado limite último, que assume um valor 76% maior do que o momento solicitante. Já para o estado limite de deformações excessivas, a flecha estimada para a estrutura continua acima do limite máximo permitido pela NBR 6118 (ABNT, 2014), mas agora, aplicada uma contraflecha de $\frac{l}{500}$ (58 milímetros), a estrutura é levada a um deslocamento vertical máximo de 80 milímetros, o que atende a norma para sensibilidade visual.

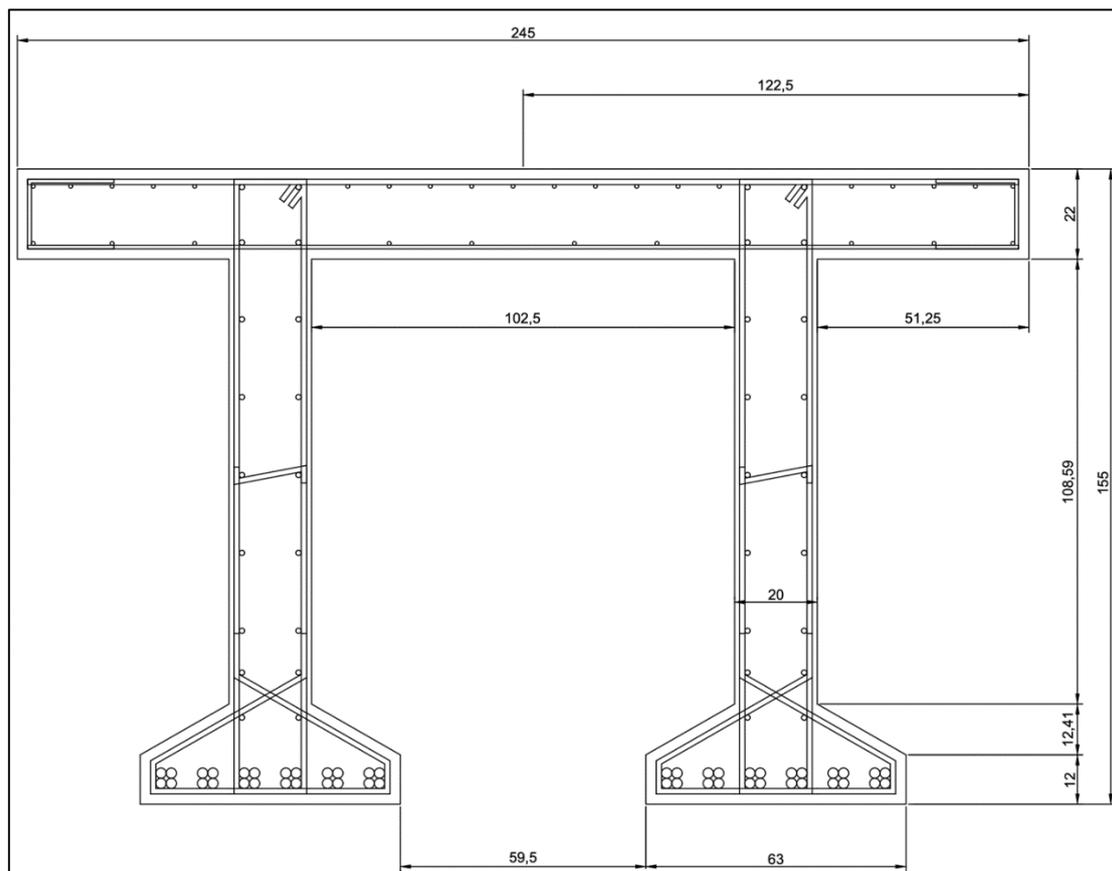
Tabela 5 – Dimensionamento mínimo para Estado Limite de Deformação Excessiva

Dimensionamento Geométrico ELS-DEF (Altura de 155 centímetros)							
Largura Mesa	Altura Mesa	Largura alma	Altura Alma	Altura base	Largura base	Armadura Longitudinal	Armadura Transversal
245 cm	22 cm	20 cm	108,6 cm	12 cm	63 cm	6 Feixes c/ 4x25mm	13 mm c/10cm
Resultados das Análises nos Estados Limites							
Momento Solicitante	Momento Resistente	Cortante Solicitante	Cortante Resistente	Flecha Máxima $\frac{L}{250}$		Flecha Viga	
3.274 kNm	5765 kNm	452 kN	637 kN	115 mm		140 mm	

Fonte: Próprio autor.

A deformação vertical máxima, para reduzir sensibilidade a vibrações sob carga acidental, foi baixa (da ordem de 12 milímetros), cerca de 15% do limite imposto pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

Figura 8 – Seção transversal, duplo T armado com GFRP



Fonte: Próprio autor.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As barras de GFRP não possuem as qualidades mecânicas excepcionais do aço e, portanto, em condições normais, não são substitutas para armaduras convencionais. No entanto, para cenários de alta agressividade ambiental, a manutenção das estruturas de concreto com aço se torna muito dispendiosa a longo prazo, e as armaduras não metálicas se mostram uma boa opção. Como exemplo, inúmeros tabuleiros, vigas de pontes e viadutos poderiam ter manutenção reduzida e facilitada utilizando armaduras não corrosivas, especialmente por serem as peças estruturais mais expostas às agressividades. Inúmeras passarelas metálicas e de alvenaria demonstram problemas de corrosão, onde a falta de manutenção põe em risco os usuários das estruturas.

Os estudos acerca das estruturas de concreto com armadura não metálica ainda são muito recentes e muitas pesquisas sobre durabilidade e efeitos ao longo do tempo ainda estão em desenvolvimento. Ainda assim, aos poucos estão se consolidando como uma alternativa viável, técnica e economicamente, para estruturas viárias em países como Canadá e Estados Unidos, tanto para projeto, quanto para manutenção. A ACI 440.1R-15 (2015) cita mais de duzentas pontes construídas com a tecnologia, somente no Canadá, e que estão completando vinte anos de serviço. As

soluções se mostraram econômicas a longo prazo, mesmo quando utilizadas apenas para recuperação e reforço externo de estruturas onde já há o desgaste do aço por processo de corrosão.

A normatização das metodologias e guias de projeto, em conjunto com a padronização da produção das armaduras, traz segurança na aplicação da tecnologia e é fundamental para promover sua adoção. O desenvolvimento de pesquisas com casos de uso baseados em problemas reais contribui, dando teor técnico e experimental, para o estudo da utilização de armaduras de FRP produzidas no Brasil em estruturas de concreto. É importante gerar fatores de segurança consistentes com a realidade e ter amplitude de geometrias, para a criação de um guia que permita ao projetista realizar seu trabalho, sem a necessidade de pesquisar inúmeros textos científicos em busca da melhor opção de desenvolvimento.

O detalhamento aqui apresentado buscou utilizar mais do que apenas os recursos básicos para problemas simples. Ao dimensionar uma passarela com um vão livre de 29 metros utilizando armadura passiva, foi necessário empregar recursos um pouco menos usuais, como feixes de armaduras, por exemplo. Da mesma forma, foi possível demonstrar a necessidade das verificações em estado limite de serviço e como elas podem assumir papel principal num dimensionamento com armaduras de FRP. A seguir se encontram algumas sugestões para a continuidade deste trabalho, quais sejam: Verificação da abertura máxima de fissuras; Análise modal da estrutura para determinação das frequências naturais e, caso necessário, a realização da análise dinâmica; Realização de ensaios em laboratório para determinar a eficiência de armaduras de FRP em feixes, uma vez que a premissa do diâmetro equivalente foi extraída de uma norma para armaduras de aço.

REFERÊNCIAS

ACI COMMITTEE 440. *Guide for the Design and Construction of structural concrete reinforced with Fiber Reinforced Polymer (FRP) bars (ACI 440.1 R-15)*. 2015.

ACI COMMITTEE 318. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-19)*. 2019.

Antop Global. *Glass Fiber Reinforced Polymer Reinforcement*. Disponível em <http://m.antopgrfp.com/fibre-polymer-rebar/glass-fibre-polymer-rebar/glass-fiber-composite-polymer-composite.html>, acesso em: 14 de maio de 2020.

ATP. *GFRP Rebar*. Disponível em http://www.atp-frp.com/html/gfrp_rebar.html, acesso em 14 de maio de 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7188: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas*. ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas – Procedimentos*. ABNT, 2003.

BAKIS, C. E. et al. (2002). *Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction – State-of-the-Art Review*. Journal of Composites for Construction, v. 06, n. 2. Maio 2002.

BERTOLA, Federica; CANONICO, Fulvio; NANNI, Antonio. *SEACON Project: sustainable concrete using seawater, salt-contaminated aggregates, and non-corrosive reinforcement*. In: XIV DBMC-14th International Conference on Durability of Building Materials and Components. 2017. Ghent University, Bélgica. Disponível em <http://www.atp-frp.com/html/publications.html>, acesso em 9 de maio de 2020.

COMMITÉ EUROPEAN DU BÉTON. *Vibration problems in structures. Practical guidelines*. Bulletin D'information N° 209. CEB, 1991.

CUNHA, Déborah Rebouças da. *Estudo da aderência de barras poliméricas reforçadas com fibras de vidro (GFRP) ao concreto*. 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

NANNI, Antonio. *Flexural behavior and design of RC members using FRP reinforcement*. Journal of structural engineering, v. 119, n. 11, p. 3344-3359, 1993.

National Academy of Engineering, NAE. *Annual Report 2008*. Disponível em: <https://www.nae.edu/43352/NAE-Annual-Report-2008>, acesso em: 8 de Abril de 2020.

OLIVEIRA, Luiz Octávio de Souza Bueno. *Ensaio de tração em armaduras de GFRP*. Rio de Janeiro: UERJ, 2019, 21p. (LEC relatório técnico, 1).

OLIVEIRA, L. O. S. B.; SOUZA, R. H. F.; TEIXEIRA, B. A. C.. *Utilização de armaduras não metálicas no Brasil*. In: X Congresso Nacional de Pontes e Estruturas. 2018. Rio de Janeiro. Disponível em: <http://abpe.org.br/trabalhos2018.htm>, acesso em: 21 de Abril de 2020.

ORTENZI JUNIOR, Altibano. *A fibra de vidro em matrizes poliméricas e cimentícias e seu uso estrutural em construção civil: o estado-da-arte*. 2007. 205 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) da UFSCAR – São Carlos.

PILAKOUTAS, K.; NEOCLEOUS, K.; GUADAGNINI, M. (2002). *Design Philosophy Issues of Fiber Reinforced Polymer Reinforced Concrete Structures*. Journal of Composites for Construction, vol. 06, n. 3. Agosto 2002.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. *Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado: segundo a NBR 6118*. 2014. 4ª ed. São Carlos: Edufscar, 2019. 415 p.

TAVARES, Danusa Haick. *Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de GFRP*. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Teixeira, Bruna de Almeida Carvalho. *Avaliação do comportamento de vigas de concreto armadas com barras de fibra de vidro – um estudo experimental*. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

ZOGHI, Manoochehr. *The international handbook of FRP composites in civil engineering*. CRC Press, 2013.