

Fundamentos de Dimensionamento e Simulação de Aplicação de Reforço Estrutural por Compósito de Fibra de Carbono das Vigas Principais de Uma Ponte Antiga.

**Fabio Santos Cerbino¹,
Ricardo Valeriano Alves², Mayra Soares Pereira Lima Perlingeiro³**

¹UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro (fscerbino@yahoo.com.br)

²UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro (valeriano@poli.ufrj.br)

³UFF – Universidade Federal Fluminense (mayraperlingeiro@id.uff.br)

Resumo

A malha viária brasileira apresenta um número expressivo de pontes projetadas há mais de 50 anos, sob vigência das Normas Técnicas NB-1:1960, NB-2:1961, NB-6:1960 e EB-3:1967. Estas normas eram baseadas no dimensionamento no estágio II, concreto com resistência de até 22 MPa e armadura de aço CA-T50 ($f_{yk} = 500$ MPa). Diferentemente, as atuais Normas Técnicas NBR-6118:2014, NBR-7187:2003, NBR-7188:2013 e NBR-7480:2007 consideram o dimensionamento no estágio III, verificações no estágio II, concreto de até 90 MPa e armadura de aço CA-50 ($f_{yk} = 500$ MPa). A necessidade de enquadrar essas estruturas em conformidade com as normas técnicas atuais motivou o desenvolvimento do trabalho. Este trabalho trata dos aspectos de dimensionamento de reforço estrutural por compósito de fibra de carbono, em um caso hipotético de adequação de uma ponte construída na década de 1960, com o objetivo de atender as prescrições de dimensionamento geométrico e estrutural das normas técnicas atuais. Para dimensionar o reforço estrutural deve-se conhecer a geometria, as armaduras e as propriedades dos materiais componentes. A falta deste conhecimento pleno pode ser suprida, razoavelmente, com elementos obtidos por retroanálise, observando os critérios das antigas normas técnicas. Com os modelos de análise numérica elaborados no *software* SAP-2000, foram simuladas situações de carregamentos antigos e atuais, permitindo a comparação entre os diferentes critérios normativos. Foram desenvolvidas rotinas de cálculo para o dimensionamento do reforço por colagem de compósito de fibra de carbono. Na análise da interação dos materiais do reforço estrutural com o material original, foram consideradas as eventuais não conformidades de execução ou falhas que pudessem comprometer a eficiência do conjunto. Procurou-se, portanto, apresentar os fundamentos de dimensionamento e demonstrar as suas aplicações com o objetivo de ampliar o debate sobre a pesquisa, o desenvolvimento e a normatização das técnicas de reforço estrutural na construção civil.

Palavras-Chave

Reforço Estrutural; Ponte Antiga; Fibra de Carbono; Concreto Armado; Normas Técnicas.

Introdução

O modo de transporte rodoviário brasileiro tem participação predominante na matriz de transportes do país. Devido à sua extensão territorial e às diferentes épocas de construção das rodovias, são diversos os casos de pontes antigas que se encontram em mau estado de conservação e que apresentam deficiências de funcionalidade viária e de segurança estrutural.

Diante deste cenário, ao considerarmos a evolução das características dos veículos e as recentes revisões normativas, observa-se a real necessidade de intervenções estruturais para a adequação de pontes antigas, com o objetivo de atender aos atuais critérios normativos de capacidade de tráfego e de suporte de carga.

Para prolongar a vida útil técnico-operacional das pontes e com vistas à economicidade e ao aproveitamento das estruturas, são frequentemente empregados os recursos das diversas técnicas de reforço estrutural. Os reforços estruturais mais comuns são realizados nas longarinas e em determinadas regiões da laje do tabuleiro, que compõem a superestrutura da ponte.

A mesoestrutura e a infraestrutura, geralmente, possuem reservas de capacidade de suporte de carga, sendo capazes de resistir ao acréscimo de esforços solicitantes devido ao eventual alargamento do tabuleiro ou à atuação das cargas móveis cada vez mais elevadas. Porém, nestes casos, ocorre a redução dos níveis de segurança da estrutura, estando em não conformidade com o preconizado pelas normas técnicas de engenharia. Recomendam-se, portanto, intervenções estruturais como o aumento da seção transversal dos pilares ou o seu encamisamento com materiais de maior resistência estrutural, bem como o alargamento dos blocos de fundação para a introdução de novas estacas.

As maiores condicionantes para o dimensionamento e a execução do reforço estrutural são a escassez de dados referentes ao projeto original e ao cadastro das situações das pontes; os seus níveis avançados de degradação e a inexistência de documentação normativa referente ao emprego dos materiais de reforço estrutural.

No caso da aplicação de compósitos de fibra de carbono, o princípio de dimensionamento consiste em um método matemático iterativo que considera as tensões e deformações do concreto, da armadura de aço e do laminado de fibra de carbono, além das principais falhas de execução que possam comprometer a eficiência do conjunto.

Considerações Iniciais

Em determinados casos, as consequências das principais diferenças entre as prescrições normativas da época de projeto/construção e as prescrições normativas atuais traduzem-se na necessidade de intervenção. Dentre elas, há o aumento da largura da seção transversal do tabuleiro, a fim de comportar o atual fluxo de veículos, e a necessidade de reforço dos elementos estruturais devido aos novos critérios de dimensionamento e de considerações dos valores de carga.

Caso a intervenção para enquadramento da estrutura torne-se financeiramente inviável, opta-se pela construção de uma nova ponte, paralela à existente, ou pela demolição total da ponte existente para a construção de uma nova ponte, substituindo-a.

Na Tabela 1, são apresentados os principais aspectos considerados para a adequação da ponte antiga do presente trabalho com o objetivo de atender às necessidades atuais referentes ao fluxo de veículos e à capacidade estrutural de carga.

Tabela 1 – Critérios de dimensionamento das pontes rodoviárias.

Ano de Construção	Seção Transversal		Cargas Móveis	
	Pistas (m)	Total (m)	Pontual (kN)	Distribuída (kN/m ²)
Entre 1960 e 1975	8,20	10,00	360	300 e 500
Depois de 1985	12,00	12,80	450	500

As Figuras 1 e 2 ilustram as seções transversais típicas de pontes construídas entre 1960 e 1975 e de pontes construídas depois de 1985, respectivamente.

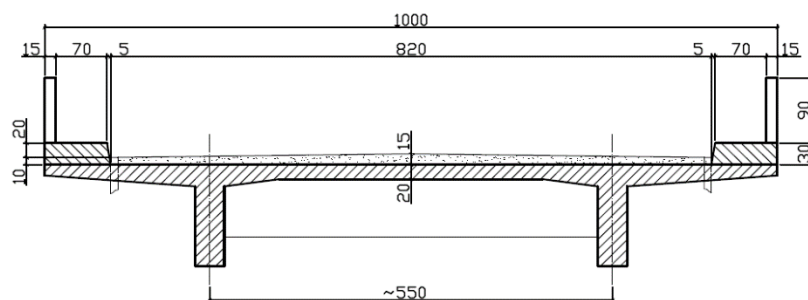


Figura 1 – Seção transversal típica, com 10,00 m de largura (entre 1960 e 1975).

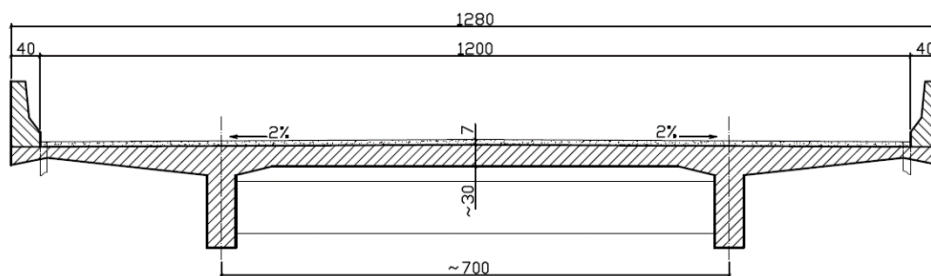


Figura 2 – Seção transversal típica, com 12,80 m de largura (depois de 1985).

Não há diferença entre as geometrias dos veículos dos trens-tipo antigo e atual, utilizados no dimensionamento das pontes de ambos os períodos supracitados, conforme representado na Figura 3.

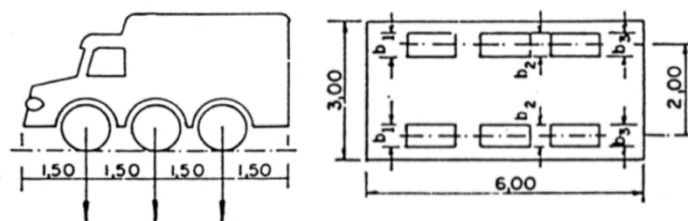


Figura 3 – Veículo dos trens-tipo antigo e atual. (NB-6:1960 e NBR-7188:2013)

No entanto, as disposições das cargas de multidão dos trens-tipo antigo e atual, utilizados no dimensionamento das pontes de ambos os períodos supracitados, diferem-se quanto a sua distribuição sobre o tabuleiro da ponte em relação ao veículo, conforme representado, respectivamente, nas Figuras 4 e 5.

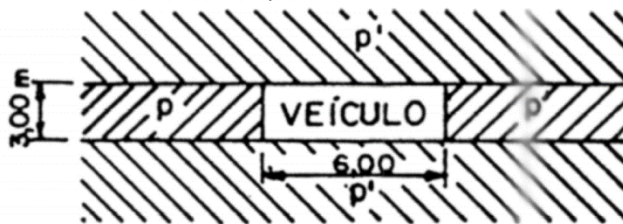


Figura 4 – Antiga disposição das cargas de multidão. (NB-6:1960)

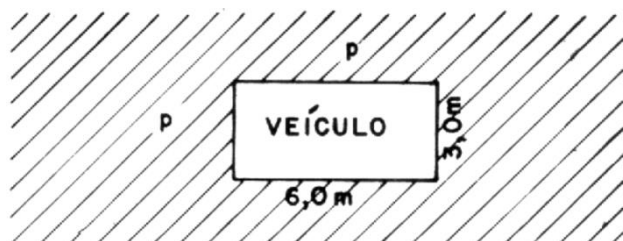


Figura 5 – Atual disposição das cargas de multidão. (NBR-7188:2013)

As expressões para o cálculo dos coeficientes de impacto das cargas móveis também sofreram revisões. A NB-2:1961 define as seguintes expressões:

$$\varphi_v = 1,4 - (0,007 L_v) \geq 1, \text{ para os vãos.} \quad (1)$$

$$\varphi_b = 1,4 - (2 \times 0,007 L_b) \geq 1, \text{ para os balanços.} \quad (2)$$

onde:

L_v : comprimento médio dos vãos;

L_b : comprimento do balanço.

Por outro lado, a NBR-7188:2013 define as seguintes expressões para o cálculo do coeficiente de impacto:

$$\varphi = CIV \cdot CNF \cdot CIA \quad (3)$$

$$CIV = 1 + 1,06 \left(\frac{20}{L_{iv} + 50} \right) \quad (4)$$

$$CNF = 1 - 0,05 (n - 2) > 0,9 \quad (5)$$

$$CIA = 1,25, \text{ para obras de concreto ou mistas.} \quad (6)$$

onde:

CIV : coeficiente de impacto vertical;

L_{iv} : comprimento médio dos vãos, para vãos contínuos e comprimento total do balanço, para o balanço;

CNF : coeficiente de número de faixas;

n : número de faixas;

CIA : coeficiente de impacto adicional.

Além das diferenças normativas, no tocante à geometria e às considerações de carregamento, ressaltam-se as diferenças das propriedades dos materiais de construção e dos critérios de dimensionamento dos elementos estruturais.

Na década de 1960, utilizavam-se concreto de até 22 MPa de resistência e aço CA-T50 de 500 MPa de resistência, em conformidade com os critérios da NB-1:1960,

NB-2:1961, NB-6:1960, com dimensionamento no estágio II e sem consideração à fadiga das armaduras, conceito este introduzido pela EB-3:1967.

Nas condições atuais, utilizam-se concreto de até 90 MPa de resistência e aço CA-50 de até 500 MPa de resistência, em conformidade com os critérios da NBR-6118:2014, NBR-7187:2003, NBR-7188:2013 e NBR-7480:2007, com dimensionamento no estágio III e com consideração à fadiga das armaduras.

Estudo de Caso

Trata-se de uma ponte de 23,00 m de comprimento total, composta por um vão central de 15,00 m e dois balanços extremos de 4,00 m, cujo perfil longitudinal é demonstrado na Figura 6.

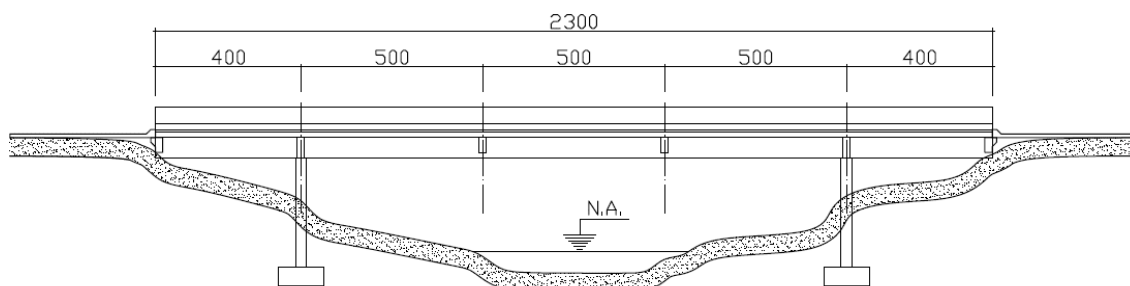


Figura 6 – Esquema longitudinal, em vista, da estrutura da ponte.

A seção transversal considerada para a ponte original corresponde à apresentada na Figura 1, com 10,00 m de largura. Foi desenvolvido o seu modelo computacional utilizando-se elementos de barras, para representar metade da seção transversal do tabuleiro e as transversinas, e elementos de placas, para representar as lajes. A Figura 7 ilustra o modelo computacional elaborado.

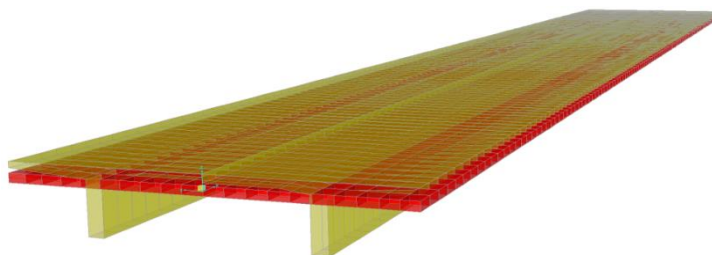


Figura 7 – Ilustração do modelo computacional.

Ainda na Figura 7, nota-se que há duplicidade na representação da laje. Para que não ocorresse tal influência na obtenção dos esforços das vigas principais, os elementos de placas tiveram as suas propriedades modificadas, como a anulação de seu peso próprio e de suas rigidezes transversal e longitudinal.

Portanto, os elementos de placas servem, apenas, para aplicação das cargas móveis conforme o trem-tipo e o coeficiente de impacto definidos em norma, e, consequentemente, para a transferência dos esforços aos elementos de barras.

Após a modelagem computacional da ponte original, a aplicação das cargas móveis conforme a NB-6:1960, a aplicação do coeficiente de impacto conforme a NB-

2:1961 e o dimensionamento estrutural conforme a NB-1:1960, obteve-se os resultados demonstrados na Tabela 2.

Ressalta-se que a NB-1:1960 considera as tensões admissíveis nos materiais, o dimensionamento no estágio II e não prevê os efeitos de fadiga das armaduras.

Tabela 2 – Resultado do dimensionamento estrutural da ponte original.

Seção	Momento Fletor Positivo (kN·m)	Resistência do Concreto (MPa)		Resistência do Aço (MPa)		Armadura Inferior Original (cm ²)
		f_{ck}	f_{cd}	f_{yk}	f_{yd}	
Meio do Vão de 15,00 m	2727	22	8,8	500	300	61,66

A seção transversal considerada para a ponte adequada ao fluxo de tráfego atual é apresentada na Figura 8, com 12,80 m de largura, obtida com a execução do aumento dos balanços laterais da seção transversal original do tabuleiro.

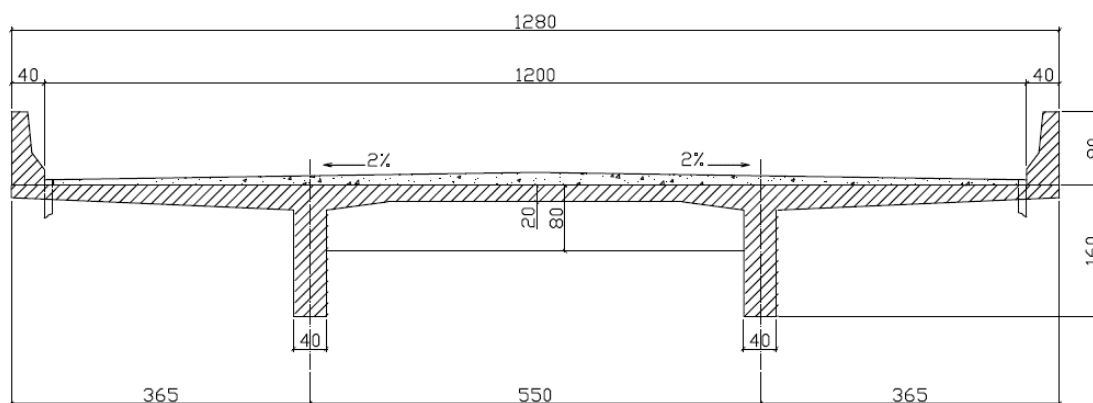


Figura 8 – Seção transversal alargada, com 12,80 m de largura.

De forma análoga, após a modelagem computacional da ponte alargada, a aplicação das cargas móveis e do coeficiente de impacto conforme NBR-7188:2013 e o dimensionamento estrutural conforme a NBR-6118:2014, obteve-se os resultados demonstrados na Tabela 3.

Ressalta-se que a NBR-6118:2014 considera o Estado Limite Último dos materiais, o dimensionamento no estágio III e prevê os efeitos de fadiga das armaduras.

Ademais, devido aos efeitos reológicos do concreto e na ausência de extração de corpos de prova para exames laboratoriais, considerou-se o aumento da resistência do concreto em um período de 55 anos, conforme prevê a NBR-6118:2014.

Tabela 3 – Resultado do dimensionamento estrutural da ponte alargada.

Seção	Momento Fletor Positivo (kN·m)	Resistência do Concreto (MPa)		Resistência do Aço (MPa)		Armadura Inferior Necessária (cm ²)
		f_{ck}	f_{cd}	f_{yk}	f_{yd}	
Meio do Vão de 15,00 m	4324	27,4	19,6	500	435	64,45

Ao comparar os resultados da armadura da ponte original, indicados na Tabela 3, com os resultados da armadura necessária para o caso da ponte alargada, indicados na Tabela 4, nota-se que há deficiência de armadura à flexão, indicando, portanto, a necessidade de reforço estrutural das vigas do tabuleiro na seção de cálculo.

Dimensionamento do Reforço Estrutural

A simulação do reforço estrutural das vigas do tabuleiro consistiu na aplicação de laminados de fibra de carbono nas faces inferiores das vigas, na seção de cálculo, com o objetivo de aumentar a sua resistência à flexão.

Com este tipo de reforço, considera-se que as forças de compressão são resistidas pela faixa superior do concreto comprimido e pela armadura superior comprimida, e que as forças de tração são resistidas pela armadura inferior tracionada e em conjunto com os elementos de laminados de fibra de carbono fixados na face inferior da viga.

O princípio de dimensionamento é baseado em sucessivos métodos iterativos e em verificações de equilíbrio dos esforços nos materiais componentes da seção de cálculo. As análises das deformações e das forças atuantes nos materiais componentes da seção são realizadas, respectivamente, com base na hipótese de Bernoulli e na Lei de Hooke.

A Figura 9 representa o equilíbrio de forças para o dimensionamento da seção.

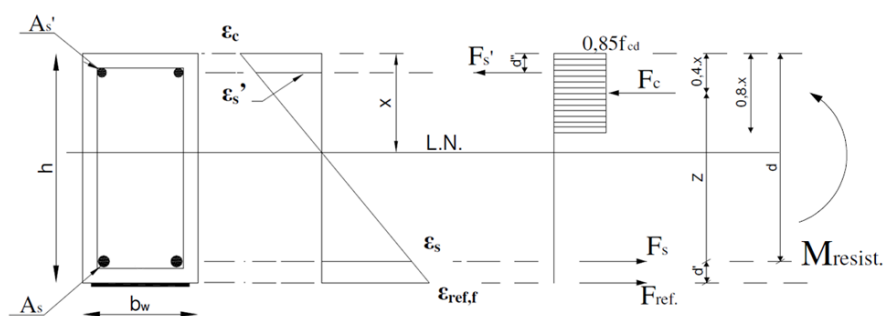


Figura 9 – Diagrama simplificado de equilíbrio da seção transversal reforçada.

Na primeira iteração de verificação de equilíbrio entre as forças de compressão e de tração, foram arbitrados os valores iniciais de 3,50 ‰ para a deformação específica do concreto e de 10,00 ‰ para a deformação específica do aço tracionado, correspondente a uma seção normalmente armada. Com isso, determinou-se a posição da linha neutra da seção transversal e as forças resistentes de compressão e de tração.

Não tendo ocorrido o equilíbrio das forças resistentes da seção transversal, procederam-se novos processos iterativos, arbitrando-se valores, então, para a posição da linha neutra e para a deformação específica do aço, até que fosse alcançado o equilíbrio das forças resistentes na seção, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Iterações para verificação do equilíbrio de forças na seção.

Iteração	Deformação Específica (‰)		Posição da Linha Neutra (cm)	Forças de Compressão (kN)		Forças de Tração (kN)	Equilíbrio de Forças (kN)
	ϵ_c	ϵ_s	X	F_c	$F_{s'}$	F_s	ΣF
1	3,500	10,000	40,704	11243	213	2681	8776
n	0,727	10,000	10,639	2634	47	2681	Zero

Alcançado o equilíbrio das forças resistentes, verificou-se que o momento fletor resistente da seção de cálculo é inferior ao momento fletor máximo atuante obtido na simulação computacional da ponte alargada, apresentado na Tabela 4. Esta comparação é apresentada na Tabela 5, o que indica a necessidade de aplicação de reforço estrutural.

Tabela 5 – Comparação entre os momentos fletores atuante e resistente da seção.

Forças de Compressão (kN)		Forças de Tração (kN)	Equilíbrio de Forças (kN)	Momento Fletor Resistente (kN·m)	Momento Fletor Atuante (kN·m)	Equilíbrio de Momentos Fletores (kN·m)
F_c	F_s'	F_s	ΣF	M_R	M_F	ΣM
2634	47	2681	Zero	4096	4324	- 228

Para o dimensionamento do reforço estrutural, foi necessário determinar a deformação específica inicial da face inferior da viga onde será aplicado o substrato, sem atuação das cargas móveis, isto é, somente devido à atuação do peso próprio. Esta situação representa a condição no momento da aplicação dos laminados de fibra de carbono, na qual a armadura passiva inferior de flexão já encontra-se deformada.

De maneira análoga, foram realizados sucessivos processos iterativos, arbitrando-se valores para a posição da linha neutra e para a deformação específica do aço tracionado, observando-se, porém, o equilíbrio das forças e, também, dos momentos fletores na seção de cálculo. Este processo é resumido e apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Iterações para determinação da deformação específica do substrato.

Iteração	Deformação Específica (%)		Posição da Linha Neutra (cm)	Forças Internas da Seção (kN)		Momento Fletor Resistente (kN·m)	Momento Fletor Atuante (kN·m)	Deformação Específica do Substrato (%)
	ϵ_c	ϵ_s	x	F_C	F_T	M_R	M_F	ϵ_i
1	0,189	1,000	25,000	1733	1295	-	-	-
n	0,067	0,426	21,222	552	552	828	828	0,434

Em seguida, obteve-se o valor da força de tração que será resistida pelo reforço, a fim de satisfazer a condição de equilíbrio da seção entre as forças de tração e de compressão, alcançando-se, também, o equilíbrio entre os momentos fletores resistente e atuante. Durante as iterações foram arbitrados os valores para a posição da linha neutra e para a deformação específica do aço, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Iterações para determinação da força resistida pelo reforço estrutural.

Iteração	Deformação Específica (%)		Posição da Linha Neutra (cm)	Forças Internas da Seção (kN)		Momento Fletor Resistente (kN·m)	Força de Tração no Reforço (kN)
	ϵ_c	ϵ_s	x	F_C	F_T	M_R	$F_{ref.}$
1	2,869	10,000	35,000	9088	2681	-	-
n	0,286	1,000	34,928	2929	1126	4324	1803

Por fim, calculou-se a deformação específica final da face inferior da viga, referente ao momento fletor máximo de dimensionamento. A Tabela 8 apresenta a deformação específica real dos laminados de fibra de carbono, correspondente à diferença entre os valores das deformações específicas final e inicial da face da viga.

Tabela 8 – Iterações para determinação da deformação específica real do reforço.

Momento Fletor de Cálculo (kN·m)	Força de Tração no Reforço (kN)	Deformação Específica Final (%)	Deformação Específica Inicial (%)	Deformação Específica Real (%)
M_{Fd}	$F_{ref.}$	ϵ_f	ϵ_i	$\epsilon_{ref.}$
4324	1803	1,025	0,434	0,590

Conhecidos os valores da parcela da força de tração a ser resistida pelo reforço, da sua deformação específica real e do módulo de elasticidade do material a ser utilizado, foi possível determinar a área necessária de seção transversal de laminados de fibra de carbono, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Determinação da área da seção transversal do reforço.

Deformação Específica Real (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão de Tração (MPa)	Força de Tração (kN)	Área de Seção Transversal (cm ²)	Espessura Total (mm)
$\epsilon_{ref.}$	$E_{ref.}$	$f_{ref.}$	$F_{ref.}$	$A_{ref.}$	$e_{ref.}$
0,590	300	177	1803	102	25

Por fim, na Figura 10, é apresentado o resultado do dimensionamento do reforço estrutural a ser executado com a fixação de unidades de laminados de fibra de carbono na superfície da face inferior das vigas do tabuleiro.

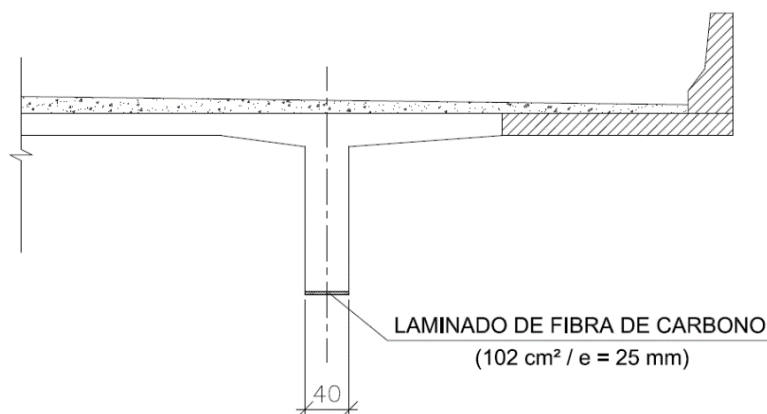


Figura 10 – Representação do reforço da viga longitudinal.

Orientações Técnicas e de Execução

O reforço estrutural com o uso de compósitos de fibra de carbono apresenta diversas vantagens, como a pequena interferência na arquitetura, o baixo acréscimo de

peso próprio, a facilidade de aplicação, a maior relação entre resistência e rigidez, a resistência aos efeitos de fadiga e às intempéries e o rápido retorno em uso da estrutura.

Para o máximo proveito da capacidade do conjunto reforçado, procede-se com o prévio alívio da atuação das cargas variáveis sobre o tabuleiro antes da aplicação do reforço, o que garante que o reforço seja solicitado pela atuação das cargas de serviço.

Devido ao elevado módulo de elasticidade do compósito de fibra de carbono, é possível evitar a ocorrência de uma deformação elevada da estrutura para que seja mobilizada a resistência do reforço.

No entanto, toda a funcionalidade do conjunto estrutural está diretamente relacionada à adequada transferência de esforços entre a peça original e o reforço, garantida pelas orientações do fabricante e pela qualidade da execução do serviço.

Na região de aplicação do reforço, por exemplo, deve ser reconstituído o concreto deteriorado e a superfície deve ser limpa e regularizada, de modo que o *primer*, ao ser aplicado, possa penetrar nos poros do concreto e criar a ponte de aderência necessária entre os materiais da estrutura original e do reforço.

Problemas de transmissão das forças ao longo da interface de colagem também podem ser atenuados ao se utilizar adesivos com adequada resistência ao cisalhamento, com atenção ao limite de resistência do concreto da superfície de aplicação.

O descolamento do reforço também pode ocorrer quando houver um carregamento muito rápido ou em situações de grande impacto, o que pode levar à alteração do modo de ruptura previsto na fase de dimensionamento do reforço. Em determinados casos, recomenda-se a instalação de sistemas de ancoragem nas extremidades e ao longo do reforço, de modo a garantir o seu comprimento de ancoragem e a evitar o início de seu processo de descolamento da superfície da estrutura.

Considerações Finais

Devido ao histórico de construção das pontes brasileiras e à evolução dos critérios normativos, a manutenção das pontes torna-se uma ação fundamental para a extensão de sua vida útil técnico-operacional e para a garantia de segurança aos usuários.

Dentre as opções de reabilitação dessas estruturas, encontram-se as técnicas de reforço estrutural, tendo sido abordada a simulação do emprego de laminados de fibra de carbono. No entanto, demais técnicas devem continuar sendo objeto de pesquisa e disseminação, com vistas à elaboração de normativas que orientem e assegurem o projetista na escolha pela técnica de reforço estrutural mais adequada para cada caso.

A continuidade do desenvolvimento de pesquisas neste campo contribui para a sua maior empregabilidade, a redução de custos, e a composição de ementas de cursos de engenharia em temas relacionados à patologia, recuperação e reforço das estruturas.

Referências Bibliográficas

- ARAÚJO, C.M. Reforço de Vigas de Concreto à Flexão e ao Cisalhamento com Tecidos de Fibra de Carbono, Dissertação de M.Sc., UFRJ, 2002.
- BEBER, A.J. Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Fibra de Carbono, Tese de D.Sc., UFRGS, 2003.
- MENDES, P.T.C. Contribuições para um Modelo de Gestão de Pontes de Concreto Aplicado à Rede de Rodovias Brasileiras, Tese de D.Sc., USP, 2009.
- REIS, L.S.N. Sobre a Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto Armado, Dissertação de M.Sc., UFMG, 2001.