

MEMÓRIA DE CÁLCULO

Ref: 270 - MC - R01

SOLICITANTE:

PREFEITURA MUNICIPAL DE PARANAGUÁ

LOCALIZAÇÃO DO IMÓVEL:

Centro - Paranaguá

WINDSOR
ENGENHARIA E CONSULTORIA

CURITIBA
13 DE JUNHO DE 2018

QUADRO DE REVISÃO

Revisão	Data	Modificação
1	30/04/2019	Ajustes nas especificações das fibras de carbono e revisão geral do texto.
2		
3		
4		



WINDSOR
ENGENHARIA E CONSULTORIA

SUMÁRIO

1	DETERMINAÇÃO DAS ARMADURAS DE FLEXÃO EXISTENTES	4
1.1	Cargas Permanentes	5
1.2	Armaduras	6
2	REFORÇO À FLEXÃO	7
2.1	Introdução.....	7
2.2	Premissas:.....	8
2.3	Dimensionamento.....	8
2.3.1	Apresentação	8
2.3.2	Etapas do dimensionamento	11
2.4	Verificações.....	14
2.5	Tensão de Cisalhamento na Resina	15
2.6	Resultados obtidos.....	17
3	REFORÇO A ESFORÇO CORTANTE	19
3.1	Resultados obtidos.....	23
4	PROCEDIMENTO DE APLICAÇÃO	25
5	CONCLUSÃO SOBRE A CAPACIDADE DE CARGA NA PONTE.....	32
6	ENCERRAMENTO	32

1 DETERMINAÇÃO DAS ARMADURAS DE FLEXÃO EXISTENTES

Devido à indisponibilidade dos projetos estruturais da ponte, é necessário determinar as armaduras existentes na viga que será reforçada. Esse processo será feito por meio dos esforços atuantes devido ao peso próprio da estrutura. A Figura 1 apresenta uma seção da ponte Antônio Jose Sant'anna Lobo, sendo que somente a viga V3 será reforçada com fibra de carbono.

Para simplificação da análise dos carregamentos na viga mencionada, a seção da laje foi dividida como mostra a Figura 2, tornando o sistema do lado direito isostático.

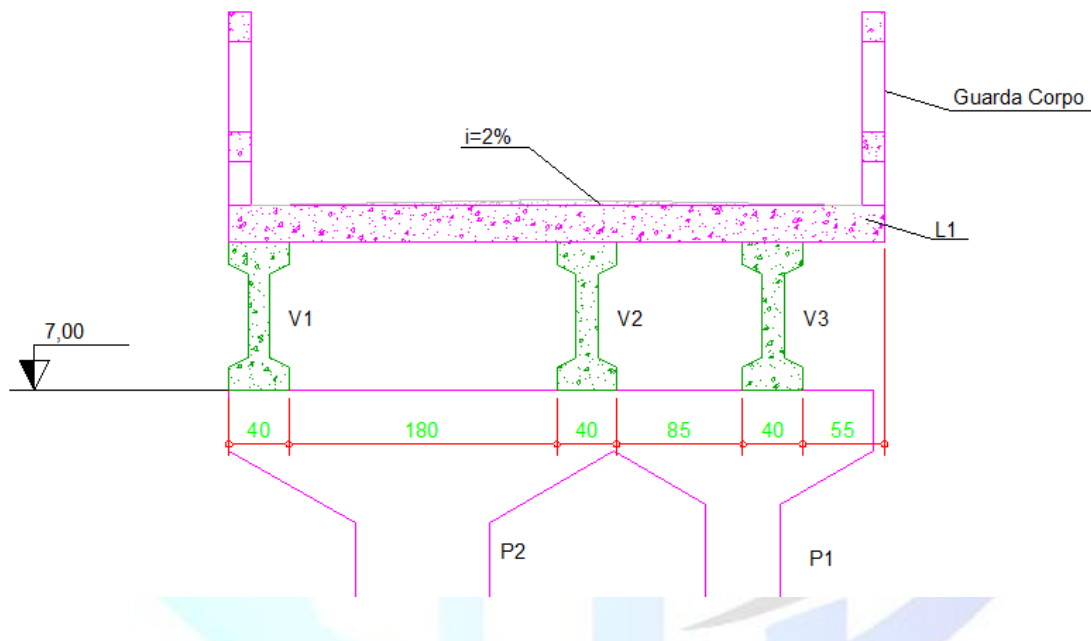
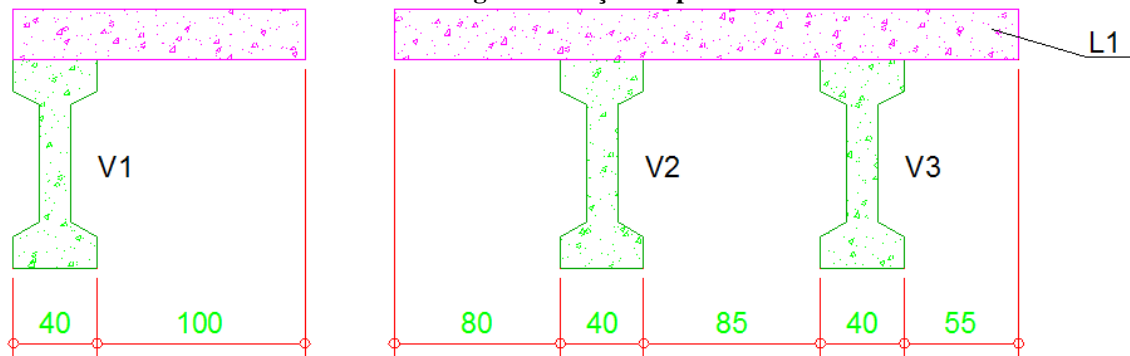


Figura 1 - Seção da ponte



1.1 Cargas Permanentes

As cargas permanentes são os pesos próprios de todos os componentes, estruturais ou não, podendo ser distribuídas ou pontuais. Nesse caso, não há cargas pontuais (transversinas, alas, cortinas) que atuem sobre o tabuleiro ou vigas. As cargas distribuídas são calculadas por metro de ponte utilizando a Equação 1. A área “A” deve ser limitada, em caso de lajes, por exemplo, a região que distribui seu peso na viga da direita.

$$PP_i = \gamma * A$$

Equação 1 - Peso próprio dos componentes

Onde:

- γ : peso próprio do material, em kN/m³
- A: área da seção transversal do elemento, em m².

O Quadro 1 mostra os resultados dos cálculos para cada elemento e o total de carga permanente que atua por metro de laje.

Figura 2 - Seção simplificada

Elemento	Peso	
Viga	6,06	kN/m
Laje	9,00	kN/m
Guarda Corpo	1,31	kN/m
Pavimento	0,36	kN/m
Total	16,74	kN/m

Quadro 1 - Cargas Permanentes

O esquema estrutural da viga V3 com o carregamento distribuído devido ao peso próprio é mostrado na Figura 3.

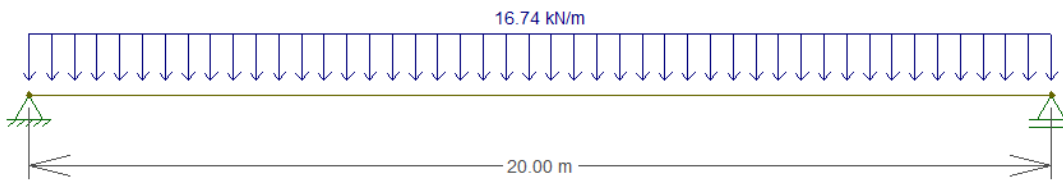


Figura 3 - Carregamento permanente

1.2 Armaduras

A Figura 4 mostra o momento máximo que atua na viga V3, em kNm, devido ao peso próprio, sem o coeficiente de segurança.

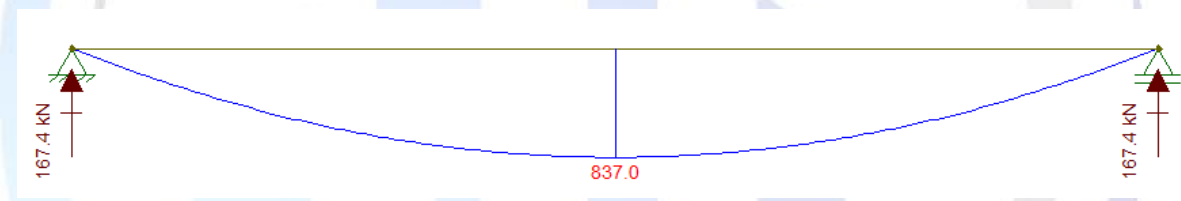


Figura 4 - Momento máximo devido ao peso próprio

Foi utilizado no dimensionamento da armadura um concreto com f_{ck} de 35 MPa, devido ao local em que se encontra a ponte (classe de agressividade ambiental entre III e IV), e aço CA-50, que possui f_{yk} de 500 MPa. O momento solicitante de 837 kNm foi majorado para 1171,8 kNm, devido ao coeficiente de segurança para situações desfavoráveis. Por meio da teoria clássica do concreto armado, considerando as características dos materiais apresentados e a geometria da seção da viga, as armaduras mínimas calculadas são:

- 7 \emptyset 20 mm na primeira camada de tração (A_s)
- 5 \emptyset 20 mm na segunda camada de tração (A_s)
- 5 \emptyset 12,5 mm na única camada de compressão ($A's$)

2 REFORÇO À FLEXÃO

2.1 Introdução

Aplica-se nas faces superior e inferior das peças (externo). As características das seções transversais originais são utilizadas no dimensionamento, sendo que o critério de Bernoulli prevalece, onde as seções planas premassem planas após os carregamentos.

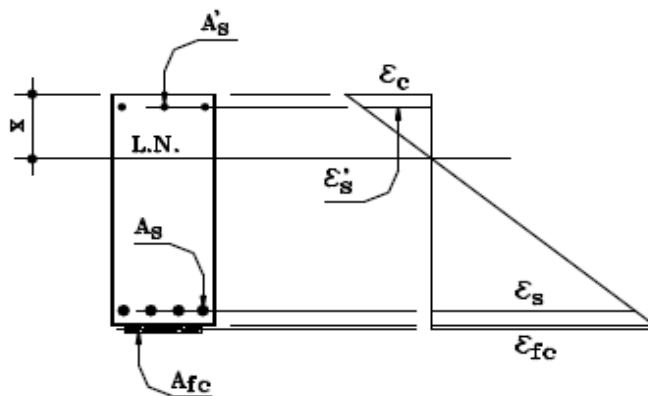


Figura 5 – Deformações na seção transversal de uma viga em concreto armado

Onde:

- $A's$: área de aço destinado à compressão
- A_s : área de aço destinado à tração
- A_{fc} : área de fibra de carbono (reforço)
- L.N: linha neutra
- X : distancia da face mais comprimida a linha neutra
- ϵ_c , ϵ'_s , ϵ_s e ϵ_{fc} : deformação específica do concreto, aço comprimido, aço tracionado e fibra de carbono, respectivamente.

2.2 Premissas:

- Despreza-se a resistência à tração do concreto
- A deformação do concreto não pode ultrapassar 3,5‰, segundo o dimensionamento pela ABNT.
- A deformação máxima permitida à armadura de tração é de 10‰, segundo o dimensionamento pela ABNT.
- Aderência entre o sistema CFC e o concreto é perfeita
- Deformação linear até a ruptura no sistema composto CFC

2.3 Dimensionamento

O dimensionamento do reforço à flexão utilizando fibras de carbono parte das teorias clássicas do concreto armado e resistência das matérias. A seguir, serão apresentados os passos e equações utilizadas para o cálculo da quantidade de fibra de carbono.

2.3.1 Apresentação

A Figura 6 apresenta uma seção transversal de uma viga bi apoiada sofrendo um esforço de flexão, onde são indicadas as tensões e forças atuantes no aço e concreto.

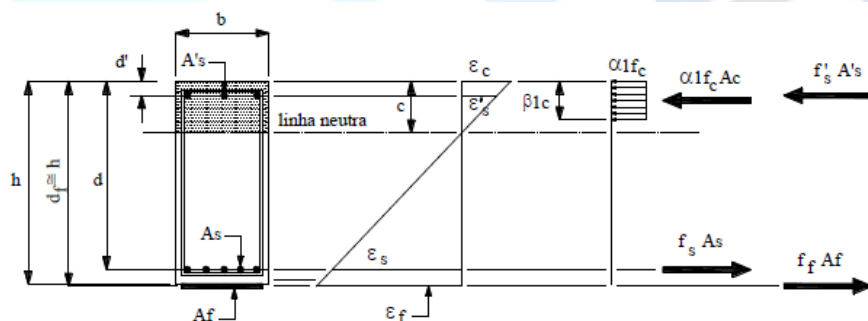


Figura 6 - Seção transversal solicitada

Onde:

b: base, em cm;

d: altura útil, da face mais comprimida ao centroide das armaduras de tração, em cm;

c : profundidade da linha neutra, em cm;

Sabendo o momento atuante na estrutura, as dimensões b e d e a classe de resistência do concreto utilizado, pode-se calcular o coeficiente k_c , por meio da Equação 2 - Coeficiente k_c :

$$k_c = \frac{M d_i}{b d^2 f_{cd}}$$

Equação 2 - Coeficiente k_c

Onde o f_{cd} é a resistência de cálculo do concreto, em kgf/cm², calculado pela Equação 3. O valor de γ_c , coeficiente de segurança para o concreto, é igual a 1,4 para o ELU (estado limite último), segundo a NBR 6118-2014.

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

Equação 3 - f_{cd}

Com o coeficiente k_c , calcula-se o coeficiente k_x por meio da Equação 4:

$$k_x = 1,25 - \sqrt{1,5625 - \frac{k_c}{0,272}}$$

Equação 4 - Coeficiente k_x

A altura da linha neutra, c , é calculada por meio da Equação 5:

$$c = k_x * d$$

Equação 5 - Profundidade da linha neutra

Por meio da linha neutra, encontra-se o valor de z : distância entre o centroide do concreto e o centroide das armaduras de tração.

$$z = d - \frac{\beta c}{2}$$

Equação 6 - Distância entre os centroides

O coeficiente β é utilizado para simplificar o estudo da área de distribuição dos esforços de compressão do concreto, sendo encontrado da seguinte forma:

- $\beta=0,8$, para concretos de classe até 50 MPa
- $\beta = 0,8 - \frac{fck-50}{400}$, para concretos de classe entre 50 MPa e 90 MPa.

A partir dos parâmetros mostrados acima, encontra-se os esforços no concreto e aço. A Equação 7 mostra como calcular a força resultante de projeto do concreto.

$$f_c = \alpha_1 * f_{cd} * \beta * c * b$$

Equação 7 - Força resultante do concreto

Onde α_1 , para peças retangulares, é dado por:

- $\alpha_1 = 0,85$, para concretos de até 50 MPa
- $\alpha_1 = 0,85 * \left(1 - \frac{fck-50}{200}\right)$, para concretos entre 50 MPa e 90 MPa

A Equação 8 e Equação 9, respectivamente, calculam a força resultante de projeto do aço para tração e compressão, respectivamente.

$$f_s = f_{yd} * A_s$$

Equação 8 - Força resultante do aço tracionado

$$f_{s'} = f_{yd} * A_{s'}$$

Equação 9 - Força resultante do aço comprimido

O valor de f_{yd} é entrado por meio da Equação 10, onde $\gamma_s = 1,15$, sendo o coeficiente para o aço para o ELU.

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$$

Equação 10 - Tensão de cálculo do aço

A força resultante do aço tracionado, f_s , também pode ser calculada em função do momento solicitante de cálculo inicial, M_{di} . Para isso, utiliza-se a

$$f_s = \frac{M_{di}}{z}$$

Equação 11 - Força resultante do aço tracionado em função de M_{di}

As tensões normais nos materiais podem ser calculadas por meio da Equação 12.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Equação 12 - Tensão normal

As deformações, quando em regime elásticas, podem ser calculadas segundo a Lei de Hooke, Equação 13, onde o E representa o módulo de elasticidade longitudinal que determina a rigidez de um material.

$$\sigma = E * \epsilon$$

Equação 13 - Lei de Hooke

2.3.2 Etapas do dimensionamento

Calculam-se, com as equações apresentadas no item anterior, os seguintes termos:

- k_c
- k_x
- c
- z
- f_s (pela Equação 11)

- σ_{fs}
- ϵ_s

A deformação ϵ_s será considerada como a deformação inicial da viga, sob a condição de carregamento anterior ao reforço, e será utilizada mais ao final do dimensionamento como ϵ_{bi} .

Para dimensionar o reforço a seguinte premissa será estabelecida: a viga está, inicialmente, no domínio 2, onde o concreto está com uma deformação de 3,5‰ e o aço com 10‰. A partir disso, por meio da Equação 14, calcula-se a posição da linha neutra. Visto que esse é um processo iterativo, novos valores são dados a linha neutra para utilizar por completo a capacidade do concreto.

$$\frac{c}{3,5\text{‰}} = \frac{d}{(3,5\text{‰} + 10\text{‰})}$$

Equação 14 - Posição da linha neutra por meio das deformações

Com a linha neutra encontrada, calcula-se R_{cd} , R_{sd} e $R_{s'd}$. O próximo passo é descobrir qual o momento solicitante de projeto, por meio da Equação 15, onde γ é o coeficiente de segurança para esforços em situações desfavoráveis, possuindo o valor de 1,4.

$$M_d = M_k * \gamma$$

Equação 15 - Momento de cálculo

Agora, aplicam-se três equações abaixo. Em cada uma delas, será encontrado um valor para f_f , a força resultante na fibra de carbono. O maior valor de f_f será utilizado para as etapas seguinte de dimensionamento.

$$M_d \leq \sum M_{fc}$$

Equação 16 - Momento em torno de f_c

$$M_d \leq \sum M_{fs}$$

Equação 17 - Momento em torno de f_s

$$Md \leq \sum Mf's$$

Equação 18 - Momento em torno de f's

A deformação da fibra de carbono, ϵ_b , pelo carregamento máximo é calculada por meio da Equação 19, onde a é a distancia entre o centroide das armaduras tracionadas até a fibra de carbono.

$$\frac{(d - c)}{10\%_o} = \frac{(d - c + a)}{\epsilon_b}$$

Equação 19 - Deformação máxima

A deformação final, ϵ_{fc} , é calculada pela Equação 20.

$$\epsilon_{fc} = (\epsilon_b - \epsilon_{bi}) \leq \epsilon_{fu}$$

Equação 20 - Deformação na fibra de carbono

Onde:

- ϵ_{bi} : deformação pré-existente à instalação do reforço de fibra de carbono
- ϵ_{fu} : deformação máxima permitida para as fibras de carbono

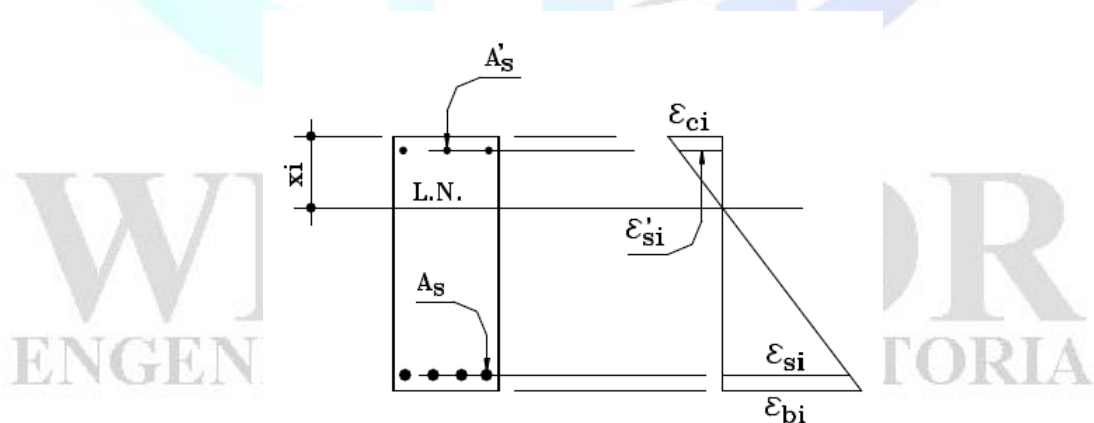


Figura 7 - Deformações

A tensão na fibra de carbono é calculada por meio da Equação 21.

$$\sigma_{fc} = E_{fc} * \epsilon_{fc}$$

Equação 21 - Tensão na fibra de carbono

A área necessária de fibra de carbono é calculada por meio da Equação 22.

$$A_{fc} = \frac{f_f}{\sigma_{fc}}$$

Equação 22 - Área de fibra de carbono

A largura da faixa de fibra de carbono pode ser encontrada pela Equação 23, onde e é a espessura da faixa.

$$l = \frac{A_{fc}}{e}$$

Equação 23 - Largura da faixa

A quantidade de faixas é calculada pela Equação 24.

$$n = \frac{l}{b}$$

Equação 24 - Quantidade de faixas

2.4 Verificações

Devem ser verificados os seguintes aspectos da fibra de carbono:

- Tensão máxima permitida;
- Deformação limite;
- Descolamento das laminas;

O primeiro item é verificado por meio de comparação entre os cálculos de tensão e a tensão fornecida pelo fabricante. Para verificar a deformação do sistema e descolamento, deve-

se calcular o coeficiente k_m , que deverá multiplicar a deformação última da fibra de carbono, estabelecendo um limite.

$$k_m = \frac{1}{60 * \epsilon_{fc}} \left(1 - \frac{n * E_{fc} * t_{fc}}{360000} \right) \leq 0,90 \quad \text{para } n * E_{fc} * t_{fc} \leq 180000$$

Equação 25 - Coeficiente k_m (a)

$$k_m = \frac{1}{60 * \epsilon_{fc}} \left(\frac{90000}{n * E_{fc} * t_{fc}} \right) \leq 0,90 \quad \text{para } n * E_{fc} * t_{fc} > 180000$$

Equação 26 - Coeficiente k_m (b)

Onde:

- N: número de camadas de reforço
- t: espessura de uma camada de reforço (mm)

2.5 Tensão de Cisalhamento na Resina

Para calcular a tensão de cisalhamento que atuara na resina, primeiramente deve-se calcular os centros de gravidade dos esforços de compressão (f_c e f'_s) e de tração (f_s e f_f). Essa calcula é feito pela Equação 27 e Equação 28, respectivamente.

$$y' = \frac{f_c * c + f'_s * d'}{f_c + f'_s}$$

Equação 27 - Centroide das forças de compressão

Onde:

- c é a distância do centro da força de compressão do concreto a face mais comprimida da viga

$$y = \frac{f_s * (h - d) + f_f * d_f}{f_s + f_f}$$

Equação 28 - Centroide das forças de tração

Onde:

- h-d: distância entre a faixa mais tracionada da viga e o centro da armadura de tração
- d_f: distância entre a faixa mais tracionada da viga e o centro da fibra de carbono.

Sabendo a posição desses centroides, calcula-se a distância entre eles por meio da Equação 29.

$$v = h - y' - y$$

Equação 29 - Distância entre centroides

O valor da tensão de cisalhamento na cola é encontrada pela Equação 30.

$$\tau_c = \tau_0 \left(\frac{f_f}{f_f + f_s} \right)$$

Equação 30 - Tensão de cisalhamento na cola

Onde:

$$\tau_0 = \frac{Q}{b * v}$$

Equação 31 - Tensão de cisalhamento na seção

Onde:

- Q: força cortante de calculo para o reforço.

2.6 Resultados obtidos

Para a flexão, o laminado escolhido, S&P Laminates CFK 150 /2000, apresenta as seguintes características:

- $E=168$ MPa;
- Força de tração de cálculo: 1300 MPa;
- Alongamento de cálculo máximo: 0,8%;
- Dimensões: 12 cm de largura e 0,14 cm de espessura.

Por uma questão de caráter construtivo, o laminado pode ser utilizado em somente uma camada. Como ela possui 12 cm de largura, é possível aplicar 3 faixas justapostas de fibra na face inferior da viga, deixando 2 cm de cada lado. Considerando essa quantidade de fibra de carbono e a armadura encontrada no item 1.2, o processo iterativo suporta um momento solicitante novo (M_{dn}) de 1821,8 kNm, com a linha neutra posicionada a 29 cm da faixa mais comprimida. Descontando o momento devido ao peso próprio (M_{pd}) de 1171,8 (com o coeficiente de segurança), o momento novo permitido devido a um carregamento externo (M_{qd}) é de 650 kNm.

O momento M_{qk} é calculado por meio da Equação 32, sendo o 1,5 o coeficiente de segurança para cargas variáveis no estado desfavorável. O possível carregamento móvel que gera esse esforço M_{qk} na ponte é mostrado na Figura 8 - Trem tipo utilizado.

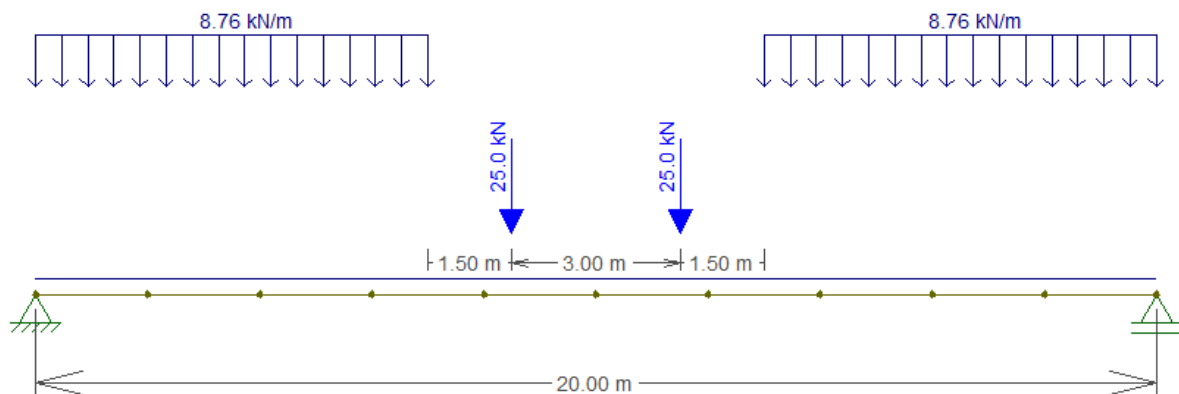


Figura 8 - Trem tipo utilizado

$$M_{kq} = \frac{M_{qk}}{\gamma_v} = \frac{650}{1,5} = 433,33 \text{ kNm}$$

Equação 32 - Momento característico para a carga variável

As cargas pontuais de 25 kN e a distribuída de 8,76 kNm são obtidas multiplicando uma dada carga pelos coeficientes de impacto vertical (CIV) e numero de faixas (CNF), apresentados na NBR 7188:2013 e calculados pela Equação 33 e Equação 34, respectivamente.

$$CIV = 1 + 1,06 * \left(\frac{20}{l + 50} \right) = 1,30 \rightarrow \text{para estruturas com } l = 20 \text{ m}$$

Equação 33 - CIV

$$CNF = 1 - 0,05 * (N - 2) \geq 0,9 = 1,05$$

Equação 34 - CNF

Onde “n” é o numero de faixas igual a 1, visto as dimensões do tabuleiro.

Então, as cargas sem CIV e CNF são de 18,3 kN e 6,4 kN/m. A Figura 9 apresenta a linha de influência para a viga V3. Posicionando a carga ao extremo direito e evitando colocar cargas na parte negativa, é possível calcular o máximo efeito que o veiculo causa na viga que será reforçada. Multiplica-se o valor da carga pontual pela sua ordenada, como mostra a Equação 35 - Carga pontual, e multiplica-se a carga distribuída pela área positiva da linha de influência, de acordo com a Equação 36. Desse processo que se encontra os valores de 18,3 kN e 6,4 kN/m, já mencionados.

$$P_f = 11,4 * 1,6 + 11,4 * 0 = 18,3 \text{ kN}$$

Equação 35 - Carga pontual

$$D_f = 1,6 * 4 = 6,4 \text{ kN/m}$$

Equação 36 - Carga distribuída

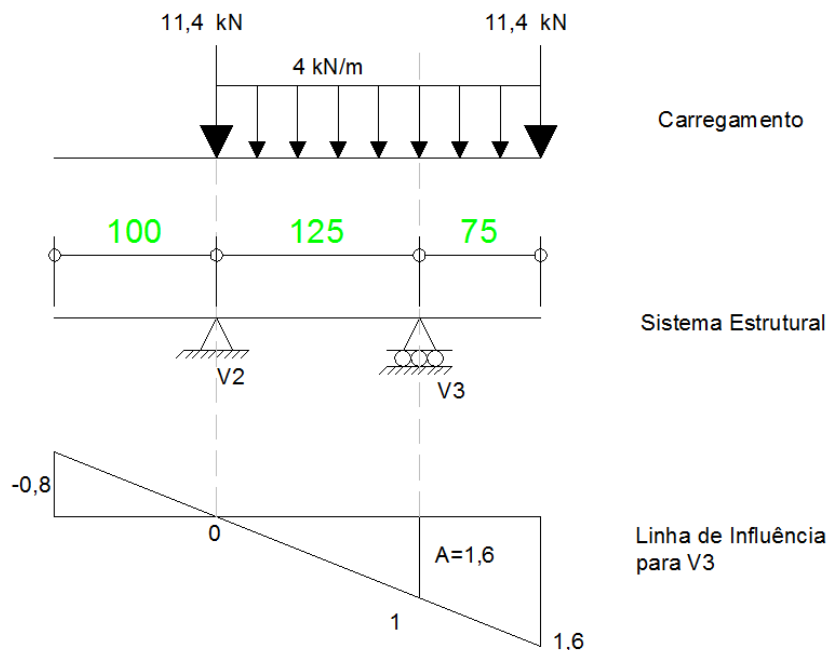


Figura 9 - Linha de influência para V3

Todo esse processo foi feito para estimar o peso máximo de algum veículo que trafega pela ponte. Esse valor é calculado multiplicando uma carga pontual de 11,4 kN por 4, estimando que o veículo possua 4 rodas. Portanto, a viga reforçada suporta, com a quantidade de fibra especificada, veículos de até 4,6 toneladas, além de 400 kg por m² de tabuleiro.

3 REFORÇO A ESFORÇO CORTANTE

As formas mais comuns de aplicar as fibras de carbono para reforço ao cisalhamento são nas laterais da viga ou nas laterais e embaixo, formando uma espécie de “U”, sendo a solução mais recomendada. O processo de cálculo considera a resistência atual do concreto e aço nas bielas comprimidas e tracionadas (Treliça de Morsche), aplicando a sobrecarga à fibra de carbono. Primeiramente, deve ser verificado, pela Equação 37, se a biela comprimida suporta o novo carregamento:

$$Qd \leq 0,27 * \alpha v^2 * fcd * b * d$$

Equação 37 - Verificação inicial do concreto

Onde:

- $Qd = Qk * 1,4$, sendo Qk a nova solicitação cortante da viga;
- $\alpha v2 = 1 - \frac{fck}{250}$, em que fck é em MPa;
- fcd em kgf/cm^2 .

Se o resultado da Equação 37 não for verdadeiro, a viga não suporta a nova solicitação, visto que o concreto rompe por compressão. Caso contrário, o dimensionamento pode continuar.

Calcula-se a área de aço destinado ao cisalhamento que existe na viga, por meio da Equação 38.

$$A_{sw} = \frac{100}{s} * se * \frac{\pi * \phi^2}{4}$$

Equação 38 - Área de aço ao cisalhamento

Onde:

- S : espaçamento dos estribos;
- ϕ : diâmetro dos estribos;
- se : quantidade de ramos do estribo.

A força suportada por essa quantidade de aço é calculada por meio da Equação 39:

$$V_{sw} = \frac{A_{sw} * 0,9 * d * f_{ywd}}{100}$$

Equação 39 - Força no aço de cisalhamento

Onde:

- f_{ywd} : resistência de cálculo do aço destinado ao cisalhamento.

O esforço de cisalhamento suportado pelo concreto é calculado pela Equação 40.

$$V_{co} = 0,6 * f_{ctd} * b * d$$

Equação 40 - Força do concreto à tração

$$f_{ctd}: \frac{0,21 * \sqrt[3]{f_{ck}^2}}{1,4}$$

Equação 41 - Resistência de cálculo do concreto à tração

Onde o fck deve ser em MPa, mas o resultado da Equação 41 deve ser aplicado em kgf/cm² na Equação 40.

A força total que as bielas tracionadas suportam é encontrada pela Equação 42.

$$V_{rd3} = V_{co} + V_{sw}$$

Equação 42 - Força total à tração

A quantidade de sobrecarga que deve ser direcionada as fibras de carbono é calculada por meio da Equação 43.

$$\Delta V_d = \frac{Q_d - V_{rd3}}{0,85}$$

Equação 43 - Força de tração destinada a fibra de carbono

Agora, calcula-se o comprimento de aderência das fibras de carbono, pela Equação 44.

$$L_0 = \frac{2500}{(e_{fc} * E_{fc})^{0,58}}$$

Equação 44 - Comprimento de aderência

O comprimento efetivo de aderência é calculado por meio da Equação 45.

$$L_e = \frac{1}{\sqrt{n}} * L_0$$

Equação 45 - Comprimento efetivo de aderência

Onde:

- n: número de camadas de fibra de carbono

A etapa seguinte é calcular os coeficientes K1 e K2, por meio da Equação 46 e Equação 47, respectivamente.

$$K1 = \left(\frac{fcd}{27}\right)^{\frac{2}{3}}$$

Equação 46 - K1

Onde:

- fcd em MPa

$$K2 = \frac{dfe}{df}$$

Equação 47 - K2

Onde:

- $df = d - hf$, em que hf é a altura da laje;
- $dfe = df - Le$, para aplicação em “U”;
- $dfe = df - 2 * Le$, para aplicação somente nas laterais da viga.

Com os coeficientes K1 e K2, calcula-se por meio da Equação 48 um fator de redução para à tensão última na fibra de carbono:

$$R = \frac{K1 * K2 * Le}{11900 * \epsilon_{fc}} \leq \frac{0,005}{\epsilon_{fc}}$$

Equação 48 - Fator de redução

Onde:

- ϵ_{fc} : deformação última das fibras de carbono, fornecida pelo fabricante.

A tensão máxima de cálculo suportada pela fibra é encontrada pela Equação 49.

$$\sigma_{fc} = R * \sigma_{ufc}$$

Equação 49 – Tensão limite de cálculo

Onde:

- σ_{ufc} : tensão última da fibra de carbono, fornecida pelo fabricante.

Agora, calcula-se a relação entre largura da faixa de fibra de carbono e espaçamento das faixas, pela Equação 50.

$$\frac{w_{fc}}{s_{fc}} = \frac{\Delta v d}{2 * n * e_{fc} * \sigma_{fc} * d_f}$$

Equação 50 – Relação entre largura e espaçamento

Nessa etapa, a seguinte análise é feita:

- Se $\frac{w_{fc}}{s_{fc}} < 1,0$: podem ser usadas camadas de fibra de carbono com largura determinada para manter o espaçamento maior ou igual a $\frac{w_{fc}}{s_{fc}}$
- Se $\frac{w_{fc}}{s_{fc}} = 1$: devem ser usadas camadas de fibra de carbono contínuas, ou seja, $w_{fc} = s_{fc}$.
- Se $\frac{w_{fc}}{s_{fc}} > 1$: uma camada de fibra de carbono não é suficiente.

Uma vez escolhido a quantidade camadas e a largura da faixa, encontra-se, ainda pela Equação 50, o espaçamento s_{fc} das faixas de fibra de carbono.

3.1 Resultados obtidos

As características do tecido de fibra de carbono utilizado no dimensionamento do reforço ao cisalhamento são:

- Tensão máxima: 3800 MPa
- Deformação Máxima: 1,2%
- Módulo de elasticidade longitudinal: 240 MPa
- Espessura: 0,234 mm

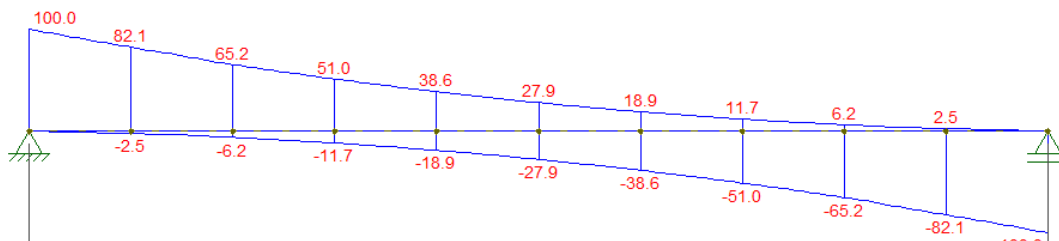


Figura 11 - Envoltória do esforço cortante da carga móvel

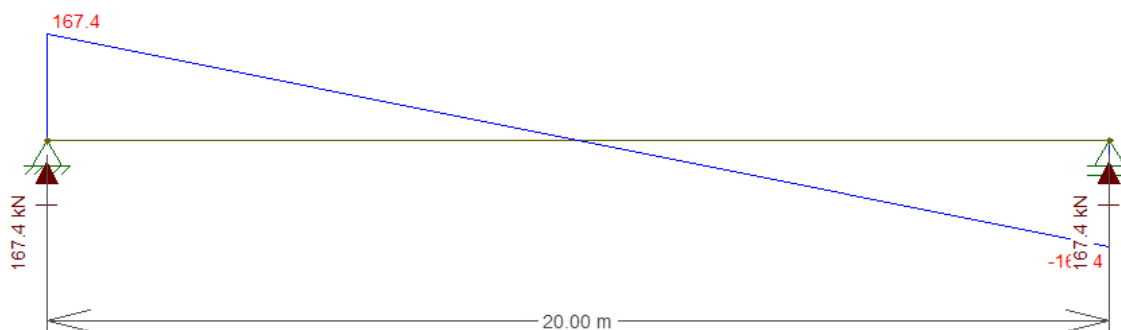


Figura 10 - Esforço cortante da carga permanente

Devido à falta dos projetos estruturais da ponte e das fissuras de cisalhamento presentes na viga V3, a armadura transversal da viga foi considerada como inexistente. Portanto, todo o esforço cortante provocado pelo carregamento móvel (deduzido no dimensionamento a flexão) e o peso próprio da ponte foi aplicado na fibra de carbono.

A Figura 11 e Figura 10 apresentam, respectivamente, os esforços de cisalhamento para carga permanente e carga móvel.

Por meio da Equação 51, foi calculado o esforço cortante de projeto, 376 kN, usado no dimensionamento da fibra de carbono.

$$Vd = 1,35 * Vp + 1,5 * Vv$$

Equação 51 - Esforço cortante de projeto

Onde:

- 1,35 é o coeficiente para cargas permanentes em situações desfavoráveis;
- 1,5 é o coeficiente para cargas variáveis em situações desfavoráveis;
- V_p : máximo esforço cortante devido a carga permanente, encontrado na Figura 10, sendo de 167,4 kN.
- V_v : máximo esforço cortante devido à carga variável (carga móvel), devido na Figura 10, sendo de 100 kN.

Foi definido que as faixas de fibra devem ter 15 cm de largura com 4 camadas. Dessa forma, o dimensionamento apresentado anteriormente resultou em um espaçamento de 28 cm entre os centros das faixas, sendo a melhor configuração encontrada entre as variações de largura, espaçamento e número de camadas.

4 PROCEDIMENTO DE APLICAÇÃO

1. Execução de reparos estruturais:

Aplicação de argamassa polimérica estrutural, com as especificações técnicas mostradas na Figura 12, em todos os pontos que apresentem corrosão ou deslocamento da superfície do concreto.

Teste	Método BASF	Especificação	Unidade
Resistência à compressão – 24 horas	TM 233	maior que 24	MPa
Resistência à compressão – 07 dias	TM 233	maior que 50	MPa
Resistência à compressão – 28 dias	TM 233	maior que 60	MPa
Retração por secagem	ASTMC596	28	dias 0,09%
Permeabilidade	ASTMC1212	250	Coulombs
Coefficiente de expansão térmica	ASTMC531	11,4x10-6	cm/cm°C
Resistência a sulfatos	ASTM 1012	28	semanas, menos de 10%
Densidade	ASTM C 905	2,16	g/cm3

Figura 12 – Características técnicas da argamassa

2. Preparo da base de concreto:

Realizar o desbaste por meio de um disco diamantado, assim retirando a camada superficial do concreto e expondo a superfície porosa. Esse processo é essencial para obtenção de uma ligação, pois garante uma melhor penetração da resina e maior aderência entre a fibra de carbono e o concreto.

3. Correção de pequenas irregularidades:

Utilizar argamassa polimérica estrutural para corrigir pequenas imperfeições geradas após o processo 2. Pode ser escolhida a Emaco S88 – Basf ou similares técnicos (Figura 12).

4. Aplicação de primer:

Aplicar no substrato de concreto o primer S&P Resin 50.

5. Aplicação de resina:

Aplicar resina epoxídica saturante Resin 55 (Figura 13) para as regiões de reforço ao cisalhamento e o S&P Resin 220 (Figura 14) para o reforço a flexão.

Densidade	1,11 kg/l
Relação de mistura em peso	2:1 (Resina: Endurecedor)
Temperatura de aplicação	+ 8 °C — + 35 °C
Tempo de trabalhabilidade	3 horas (+ 10 °C) 45 minutos (+ 20 °C) 30 minutos (+ 30 °C)
Seco ao tacto após	4 horas
Tempo de endurecimento	7 dias
Temperatura de transição vítrea (Tg) EMPA 461'427/2	+ 44° C (EN 12614)
Resistência à tracção ISO 527-2:1993 (E) EMPA 461'427	35,8 N/mm ² (14 dias)
Alongamento à rotura ISO 527-2:1993 (E) EMPA 461'427	2,3% (14 dias)
Módulo de elasticidade estático ISO 7500-1:2004-11 (EMPA 461'427)	2 581,8 N/mm ² (14 dias)
Módulo de elasticidade dinâmico EMPA 461'427/2	2 515 N/mm ² (+20 °C, 14 dias) 2 989 N/mm ² (-20 °C, 14 dias)
Tensão de aderência em betão Ensaio em obra	Rotura no betão
Tensão de aderência em aço Ensaio laboratoriais	> 15 N/mm ²
Classe de toxicidade	9 (Comp. A) 8 (Comp. B)
Classe de transporte/ UN-Nr	III / 3082 (Comp. A) II / 2735 (Comp. B)

Figura 13 - S&P Resin 55

Densidade	1.7 – 1.8 g/cm ³ (23 °C)
Relação de mistura A:B	4 : 1 (em peso) 4 : 1 (em volume)
Temperatura de aplicação	+ 8 °C — + 35 °C
Tempo de trabalhabilidade EN ISO 9514:2005	Aprox. 25 minutos (+ 23 °C)
Resistência à compressão EN 1504-4 (EN 12190)	> 70 N/mm ²
Módulo de elasticidade DIN EN ISO 178	> 7 100 N/mm ²
Resistência ao corte DIN EN 12615	> 26 N/mm ²
Dureza Shore-D DIN EN 53505-D/EN ISO 868	87 - 93
Tensão de aderência DIN EN 13892-8	> 3 N/mm ² (em betão; 3 dias; a 20 °C) > 2 N/mm ² (com S&P Resin 230) > 3 N/mm ² (S&P C-Laminate) > 14 N/mm ² (aço/ aço – sem primário)

Figura 14 - S&P Resin 220

6. Aplicação das mantas:

a. Para a flexão das vigas, S&P Laminates CFK 150/2000 que possui as seguintes características:

- i. E=168 kN/mm²;
- ii. Dimensões: 120 mm de largura x 1,4 mm de espessura;
- iii. Resistência à tração: 2800 MPa;
- iv. Três faixas justapostas (única camada) por toda a viga;

b. Para a flexão da laje, S&P C-Sheet 240 que possui as seguintes características:

- i. Gramagem de 300 g/m²;
- ii. E=168 kN/mm;
- iii. Dimensões: 150 mm de largura x 1600 mm de comprimento;
- iv. E=240 kN/mm²;
- v. Resistência a tração: 3800 MPa;
- vi. Espessura: 0.176 mm;
- vii. Uma faixa a cada 30 cm.

c. Para o cisalhamento, faixas principais de S&P C-Sheet 240 na vertical e uma faixa de S&P Laminates CFK 150/2000 na horizontal (faixa auxiliar), que possuem, respectivamente, as seguintes características:

i. Faixas Verticais Principais: S&P C-Sheet 240

1. Gramagem de 300 g/m²;
2. E=240 kN/mm²;
3. Resistência a tração: 3800 MPa;
4. Espessura: 0,176 mm;
5. Aplicar as 4 camadas com largura de 15 cm. O espaçamento entre cada conjunto deve ser de 28 cm (centro à centro das faixas) por toda a viga, nas duas laterais e nas mísulas inferiores.

ii. Faixa Horizontal Auxiliar: S&P Laminates CFK 150/2000

1. Uma camada de 100 mm de largura por toda a viga, de ambos os lados;
2. Espessura: 1,2 mm;
3. E=168 kN/mm²;
4. Resistência à tração: 2800 MPa.

7. Retirada das bolhas:

Por meio de um rolo específico deve-se retirar as bolhas de ar da fibra de carbono ainda saturada.

8. Aplicação da segunda camada de resina:

Aplicar a resina epoxídica saturante S&P Resin 55 e Resin 220, com forme o que está descrito no item 5. Esse processo deve ser feito para todas as camadas de fibra que houver.

9. Acabamento e retirada de bolhas:

Ainda com a fibra saturada, retirar as bolhas de ar por meio de um rolo específico.

10. Lixamento:

Após 48 horas de saturação da fibra, realizar o preparo da superfície por meio de lixamento superficial com lixa número 150 ou 200, deixando a camada de epóxi levemente opaca.

11. Limpeza:

Limpar a superfície com um pano limpo umedecido com diluente 400 da linha Advance ou similares técnicos, de acordo com a Figura 15 e Figura 16.

Estado físico:	Líquido
Cor:	Incolor
Odor:	Característico de Xilol
pH:	Não disponível
Ponto de fusão/ponto de congelamento:	Não disponível
Ponto de ebulição (°C):	Aproximadamente 143 a 156
Ponto de fulgor:	31°C Vaso fechado (Ref. ao xilol)
Taxa de evaporação:	0,80 (acetato de butila=1)
Inflamabilidade:	Não disponível
Limites de explosividade no ar:	Superior: 7,0% / Inferior 1,0%
Pressão de vapor (mmHg):	6,6 (Ref. ao xilol)
Densidade de vapor (ar=1):	>1 (Mais pesado que o ar)
Densidade:	Mín. 0,89 g/cm ³ (água=1)
Solubilidade em água:	Insolúvel
Coefficiente de partição:	Não disponível
Temperatura de alto ignição:	Não disponível
Temperatura de decomposição:	Não disponível
Viscosidade:	Não disponível

Figura 15 - Propriedades físicas e químicas do diluente

Ingrediente	Faixa de Concentração %
Hidrocarboneto Aromático	35 - 55
Xileno	30 - 50
Acetato de Etil Glicol	10 - 30

Figura 16 - Composição do diluente

12. Proteção

Aplicar o sistema de proteção com tinta de poliuretano acrílico alifático, da linha Adpoly 7990 – Advance ou similar técnico, conforme a Figura 17. Espessura mínima de 60 micrômetros.

							Intervalo de Rep. a 25°C					
Tipo	Nome	Cor	Espessura Teórica	Diluyente	%	Sec.Toque	Minimo	Maximo	Mistura	S.V%	Rendimento	Aspecto
Acab.	Adpoly 7990	Todas	50	400	20	60'	08'	48'	7x1	62%	44,6m ² /GL	Brilhante

Figura 17 - Tinta de proteção

5 CONCLUSÃO SOBRE A CAPACIDADE DE CARGA NA PONTE

Devido à falta de informações sobre os projetos e execução da mesoestrutura (pilares e blocos) e infraestrutura (fundações) existente, e considerando que este reforço contempla as lajes e as vigas longarinas, A utilização da ponte é válida apenas para passagem de pedestres e, em casos esporádicos e emergenciais, de veículos com no máximo 4,6 toneladas de peso bruto total, desenvolvendo velocidade máxima de 20km/h, pois não é conhecida a capacidade de carga atual da estrutura não reforçada. Limitar as faixas de tráfego, somente sobre as vigas longarinas principais, conforme delimitação da faixa de tráfego a ser definida pela prefeitura. (depois do 20 km/h).

6 ENCERRAMENTO

Este engenheiro coloca-se a disposição para quaisquer esclarecimentos adicionais que se fizerem necessários.

Curitiba/PR, 08 de maio de 2018.

Alan Polucha
 Eng. Civil - CREA 124864/D-PR