

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESPECIALIZAÇÃO EM DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE  
AÇO E DE CONCRETO ARMADO

**DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE UM VIADUTO EM  
VIGA MISTA E COMPARATIVO DE CUSTO COM VIGA PRÉ  
FABRICADA DE CONCRETO**

**JACKSON LOPES FERREIRA**

Belo Horizonte

2023

Jackson Lopes Ferreira

**DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE UM  
VIADUTO EM VIGA MISTA E COMPARATIVO DE CUSTO  
COM VIGA PRÉ FABRICADA DE CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do curso de Especialização em Dimensionamento de Estruturas de Aço e de Concreto Armado do Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito à obtenção do título de Especialista em Dimensionamento de Estruturas de Aço e de Concreto Armado.

Orientador: Prof. Rodrigo Barreto Caldas

Belo Horizonte

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

### ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA / TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

Aos oito dias do mês de maio de 2023, às 9h, o estudante Jackson Lopes Ferreira, matrícula 2020711626, defendeu o Trabalho intitulado “Dimensionamento Estrutural de um Viaduto em Viga Mista e Comparativo de Custo com Viga pré Fabricada de Concreto”.

Participaram da banca examinadora os abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar, assinam eletronicamente a presente ata.

Nota: 90 (noventa pontos)

Orientador(a): Prof. Rodrigo Barreto Caldas

Nota: 90 (noventa pontos)

Examinador(a): Me. Denise Aparecida Barbosa



Documento assinado eletronicamente por Rodrigo Barreto Caldas, Professor do Magistério Superior, em 20/06/2023, às 16:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Denise Aparecida Barbosa, Usuária Externa, em 29/06/2023, às 20:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador 2328365 e o código CRC F08CF918.

Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela vida e por ter me abençoado.

Aos meus pais por terem me incentivado sempre a correr atrás dos meus sonhos e me dedicar aos meus estudos.

A minha esposa, Tatiane, que sempre tem me apoiado, incentivado e me cobrado para que eu pudesse continuar melhorando a cada dia.

Ao meu colega de trabalho e amigo, Pedro Queiroz, pelo suporte e auxílio no desenvolvimento deste trabalho

Ao Professor Rodrigo Caldas pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho apresenta o dimensionamento estrutural das vigas longarinas de um viaduto rodoviário em aço e a comparação de custo com um viaduto em vigas de concreto protendido.

É comum em escritórios de projeto a dúvida em qual solução ser utilizada para as obras de artes, e um fator bem relevante nessa discussão é o custo da estrutura. Assim, será apresentado um comparativo do quantitativo de um projeto real de um viaduto em concreto protendido que será executado pela VALE com um viaduto em estrutura metálica que é objeto desse estudo.

Para o dimensionamento serão utilizadas as normas brasileiras e manuais do Centro Brasileiro da Construção em Aço – CBCA.

O quantitativo e custo final da estrutura será apresentado com base na Sistema de Custos Referenciais de Obras para o mês de setembro de 2022.

**Palavras-chave: (“viaduto rodoviário”; “vigas metálicas”; “concreto protendido”)**

## **ABSTRACT**

This work presents the structural dimensioning of the stringer beams of a metallic road viaduct and the cost comparison with a viaduct in prestressed concrete beams.

It is common in design offices to doubt which solution to use for works of art, and a very relevant factor in this discussion is the cost of the structure. Thus, a quantitative comparison of a real project of a prestressed concrete viaduct that will be executed by VALE with a metallic structure viaduct that is the object of this study will be presented.

For dimensioning, Brazilian standards and manuals from the Brazilian Center for Steel Construction – CBCA will be used.

The quantity and final cost of the structure will be presented based on the System of Reference Costs of Works for the month of September 2022.

**Key words: (“road viaduct”; “metallic beams”; “prestressed concrete”)**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Ilustração de uma viga mista de aço-concreto (FAKURY, 2016).....	9
Figura 2-2: Esquema de transferência de esforços através dos conectores (FAKURY, 2016).....	10
Figura 3-1: Perfil longitudinal do viaduto .....	11
Figura 3-2: Seção transversal do viaduto.....	11
Figura 3-3: Disposição das cargas estáticas do TB-450 (NBR 7188:2013).....	12
Figura 3-4: Graus de liberdade dos elementos frame nos sistemas de coordenadas local e global (Almeida, 2009) .....	15
Figura 3-5: Graus de liberdade de um elemento <i>shell</i> (Almeida, 2009).....	16
Figura 3-6: Perspectiva do modelo da Superestrutura.....	16
Figura 4-1: Momento Fletor antes da Cura.....	17
Figura 4-2: Momento Fletor depois da Cura. ....	18
Figura 4-3: Envoltória do momento fletor devido a carga móvel. ....	18
Figura 4-4: Momento fletor devido efeito da temperatura. ....	19
Figura 4-5: Momento fletor devido efeito da a sobrecarga de concretagem. ....	19
Figura 4-6: Esforço cortante antes da Cura. ....	20
Figura 4-7: Esforço cortante depois da Cura. ....	20
Figura 4-8: Envoltória do esforço cortante devido a carga móvel.....	21
Figura 4-9: Seção transversal do viaduto.....	38
Figura 4-10: Seção da viga aço.....	39

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 – Quantitativos para viaduto com pré fabricada de concreto.....	40
Tabela 2 – Quantitativos para viaduto com viga de aço.....	41
Tabela 3 – Peso das superestrutura.....	42

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
1.1	Objetivo.....	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1	Definições.....	8
2.2	Vigas Mistas de Aço e Concreto.....	9
2.2.1	Requisitos para ter uma viga mista.....	10
3	METODOLOGIA.....	10
3.1	Contextualização do projeto.....	10
3.2	Carregamentos.....	12
3.2.1	Carregamentos Permanentes.....	12
3.2.2	Cargas móveis.....	12
3.3	Análise estrutural.....	14
3.3.1	Modelo em elementos finitos.....	14
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	17
4.1	Dimensionamento da Longarina.....	17
4.1.1	Esforços solicitantes.....	17
4.1.2	Dimensionamento.....	22
4.2	QUANTITATIVOS.....	39
4.3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	42
5	CONCLUSÕES.....	42
6	BIBLIOGRAFIA.....	43



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Objetivo

Elaborar um estudo comparativo de custo de um viaduto em vigas pré fabricadas em concreto protendido com um viaduto em vigas metálicas.

# 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.1 Definições

Uma ponte é uma estrutura utilizada para transpor um obstáculo de diversas naturezas e dando continuidade a uma via qualquer. Os obstáculos à serem transpostos podem ser de diversas natureza, em função dessas naturezas são associadas as seguintes denominações: pontes, viadutos e passarelas.

**Ponte:** é dado esse nome quando os obstáculos são naturais, como um Rio, um Vale natural ou um braço de um mar.

**Viaduto:** é dado esse nome quando os obstáculos são uma via.

**Passarela:** é uma estrutura destinada exclusivamente para a passagem de pedestre e/ou ciclista.

A estrutura de uma ponte é dividida em três partes para o seu projeto em superestrutura, mesoestrutura e infraestrutura.

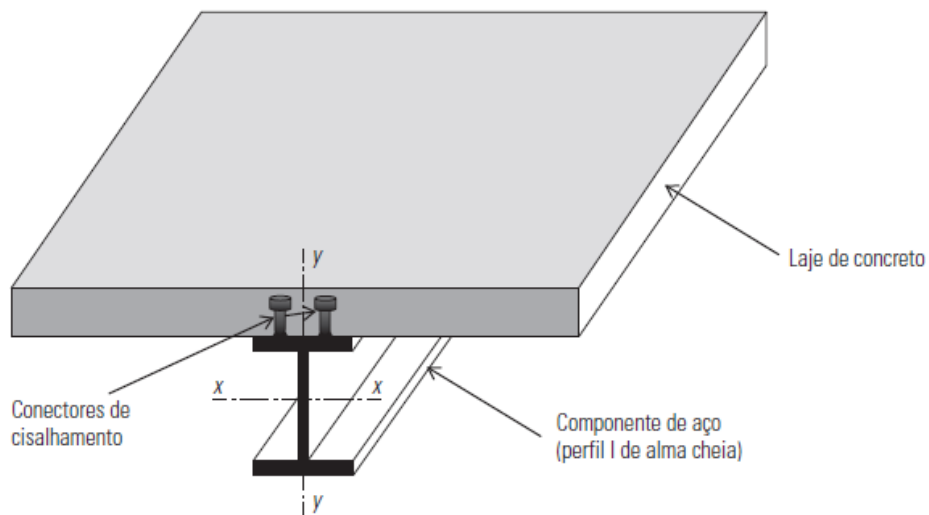
A superestrutura de uma ponte tem como objetivo receber o tráfego de veículos e pessoas assim transmitindo os esforços oriundos do tráfego para a mesoestrutura ou infraestrutura. A superestrutura em sua grande maioria é composta por tabuleiro, longarinas, transversinas e guarda rodas.

A mesoestrutura tem a finalidade de receber as cargas provenientes da superestrutura e levar até a infraestrutura, além disso, conta com estruturas de contenções nos encontros das pontes. Os elementos que compõem as mesoestruturas são as travessas, pilares, alas e cortinas.

A infraestrutura tem a finalidade de receber as cargas provenientes da superestrutura e/ou mesoestrutura e descarregar no solo. Os elementos que compõem a infraestrutura são os blocos de fundação, estacas, tubulões ou sapatas em caso de fundação diretas.

## 2.2 Vigas Mistas de Aço e Concreto

Viga mista de aço-concreto são constituídos pela ligação mecânica de uma viga metálica (alma cheia ou vazada) com uma laje de concreto.

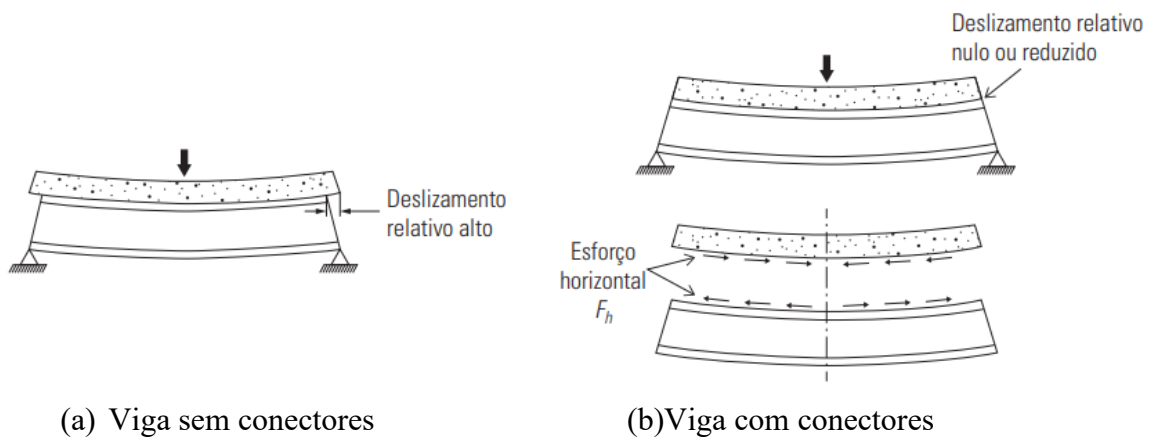


**Figura 2-1: Ilustração de uma viga mista de aço-concreto (FAKURY, 2016)**

Esse sistema estrutural dispõe de uma laje de concreto armado na região comprimida, e a viga de aço na parte tracionada (Figura 2-1). Essa organização traz benefícios para a estrutura pois o concreto é bem eficaz para combater aos esforços de compressão e a viga de aço aos esforços de tração. A união desses dois elementos traz também um aumento de rigidez para a estrutura e conseqüentemente a redução das alturas dos elementos estruturais.

A eficiência da viga mista está condicionada a resistência a compressão e a espessura da laje de concreto, perfil utilizado e ao grau de interação utilizado.

Para assegurar a viabilidade da viga mista são utilizados conectores de cisalhamento que garantem uma ligação mecânica entre a laje de concreto e o perfil metálico. Na ausência desses dispositivos não ocorre a ligação e vindo carregamento haverá um deslizamento entre o concreto e o perfil metálico, conforme mostrado na Figura 2-2.



**Figura 2-2: Esquema de transferência de esforços através dos conectores (FAKURY, 2016)**

### 2.2.1 Requisitos para ter uma viga mista

Segundo a NBR8800:2008 as vigas mistas de aço e concreto de alma cheia biapoiadas devem ter relação entre a altura e a espessura da alma ( $h/t_w$ ) inferior ou igual a  $5,7\sqrt{E/f_y}$ . Se ( $h/t_w$ ) for inferior ou igual a  $3,76\sqrt{E/f_y}$  essas vigas são compactas e podem ser dimensionadas usando as propriedades plásticas da seção mista. Se ( $h/t_w$ ) superar  $3,76\sqrt{E/f_y}$ , as vigas devem ser dimensionadas usando as propriedades elásticas da seção mista.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Contextualização do projeto

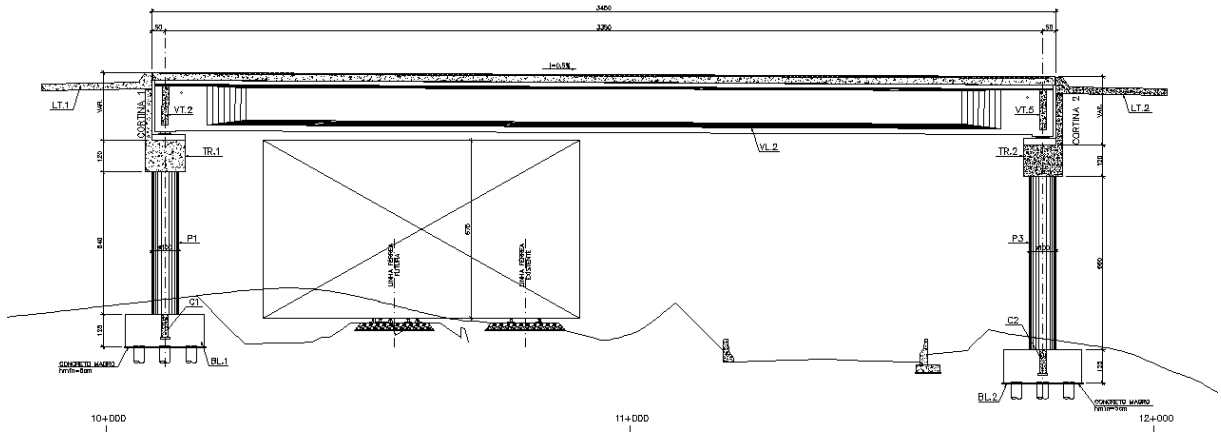
O viaduto em estudo faz parte de um pacote de projeto de obras de infraestruturas em função da duplicação de cerca de 1,0 km de uma ferrovia administrada pela VALE, no município de Santa Luzia – MG.

Em toda a extensão deste projeto denominado Pedreira-Capitão Eduardo será necessária a execução de 4 Ativos, sendo uma ponte ferroviária de 70 metros, dois viadutos rodoviários de 31,5 metros e uma passagem inferior ferroviária. Destes quatro ativos foi escolhido o viaduto rodoviário do km 81+400.

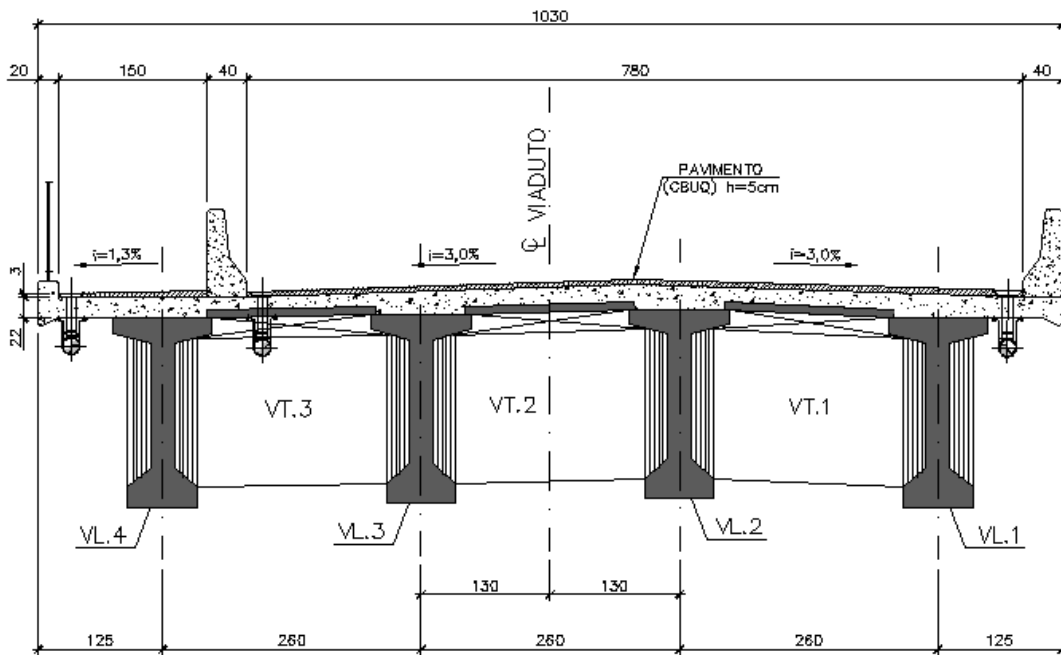
A estrutura é constituída por um vão isostático com comprimento 31,5m (Figura 3-1) e a seção transversal do tabuleiro possui 10,3m de largura e é composta por 4 vigas

longarinas pré fabricadas de concreto protendido (Figura 3-2). A superestrutura será definida como uma laje em concreto armado apoiada sobre vigas denominadas longarinas pré fabricadas.

A concretagem do tabuleiro ocorrerá sobre placas pré moldadas (pré lajes) apoiadas nas longarinas pré fabricadas, assim dispensando o uso de cimbramentos para concretagem da laje.



**Figura 3-1: Perfil longitudinal do viaduto**



**Figura 3-2: Seção transversal do viaduto.**

## 3.2 Carregamentos

### 3.2.1 Carregamentos Permanentes

Os carregamentos permanentes serão o peso próprio dos elementos estruturais, um capeamento com espessura média de 5cm sobre o tabuleiro, uma carga adicional prevendo um recapeamento futuro e o peso do guarda rodas sobre o tabuleiro.

Carregamentos que atuam antes da cura concreto:

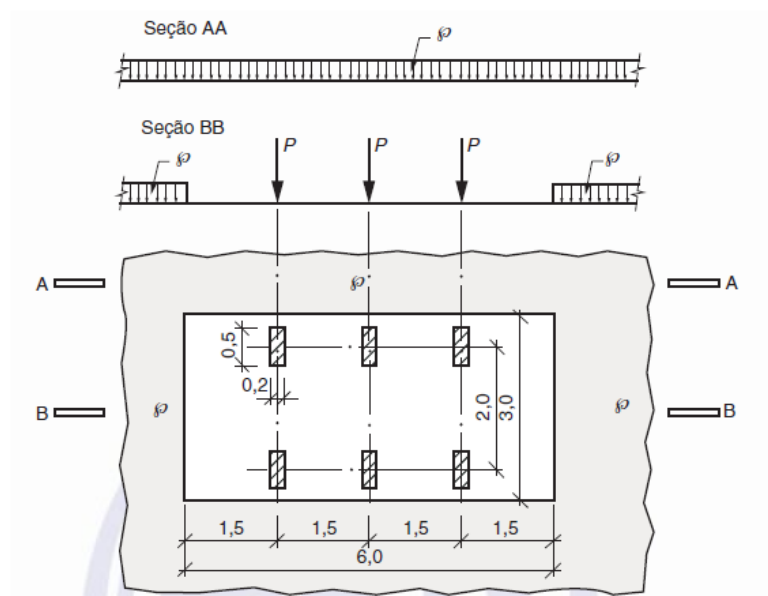
- PP (Peso Próprio): calculado de acordo com as seções atribuídas no programa CSiBridge, usado nas análises;

Carregamentos que atuam após a cura concreto:

- CAP (Capeamento):  $0,05m * 24kN/m^3 = 1,2kN/m^2$ ;
- RECAP (recapeamento):  $2,0kN/m^3$ ;
- Defesa New Jersey:  $0,232m^2 * 25kN/m^3 = 5,8kN/m$ ;
- Guarda corpo:  $1 kN/m$ .

### 3.2.2 Cargas móveis

A carga móvel vertical é representada pelo carregamento gerado pelo tráfego de veículos conforme especificado pela NBR 7188:2013 item 5.1 (pg.3 a pg.5). Foi considerado veículo tipo TB-450, que possui uma carga concentrada “P” de 75 kN por roda e carga distribuída “p” de  $5kN/m^2$  em seu entorno, conforme (Figura 3-3). Para o passeio foi considerado uma carga de  $3kN/m^2$ .



**Figura 3-3: Disposição das cargas estáticas do TB-450 (NBR 7188:2013)**

A carga móvel assume posição qualquer em toda a pista rodoviária com as rodas na posição mais desfavorável, inclusive acostamento e faixas de segurança. A carga distribuída é aplicada na posição mais desfavorável, independentemente das faixas rodoviárias.

A fim de considerar o efeito dinâmico das cargas móveis, serão calculados a seguir os coeficientes CIV, CNF e CIA conforme o item 5.1.2 da NBR 7188:2013.

#### 3.2.2.1 Coeficiente de Impacto Vertical

As cargas verticais devem ser majoradas pelo coeficiente de impacto vertical (CIV) para o dimensionamento de todos os elementos estruturais. Os valores de CIV podem ser definidos conforme descrito abaixo:

$CIV = 1,35$ , para estruturas com vão menor do que 10,0m;

$CIV = 1 + 1,06 * \left(\frac{20}{L_{iv} + 50}\right)$ , para estruturas com vão entre 10,0m e 200,0m, sendo o

$L_{iv}$  o vão da estrutura em metros.

Para estruturas com vãos acima de 200,0m é recomendado pela norma a realização de um estudo específico para a consideração da amplificação dinâmica das cargas.

#### 3.2.2.2 Coeficiente de Números de Faixas

As cargas verticais devem ser multiplicadas pelo coeficiente de números de faixa do tabuleiro (CNF), conforme apresentado abaixo:

$CNF = 1 - 0,05 * (n - 2) > 0,9$

Onde  $n$  = número de faixas rodoviárias.

#### 3.2.2.3 Coeficiente de Impacto Adicional

As cargas verticais também devem ser majoradas pelo coeficiente de impacto adicional (CIA) na região das juntas da estrutura. Todos os elementos estruturais distantes de 0m a 5,0m das juntas, devem ser dimensionados utilizando o CIA.

$CIA = 1,25$ , para obras em concreto ou mistas;

$CIA = 1,15$ , para obras em aço.

### 3.3 Análise estrutural

Dentre os diversos métodos de modelagens numéricas existentes na literatura (Métodos dos Elementos Finitos, Método dos Elementos de Contorno, Métodos das Faixas Finitas, Método dos Elementos Finitos Generalizados, etc) optou-se pelo o uso do Método dos Elementos Finitos clássico, de agora em diante denominado no presente texto como MEF. Frente esta escolha, é necessário o uso de um *software* capaz de gerar modelos de elementos finitos com facilidade de uso e confiabilidade garantida. Dentre os diversos *softwares* disponíveis no mercado optou-se pelo o uso do “CSiBridge” (versão 22.1.0).

#### 3.3.1 Modelo em elementos finitos

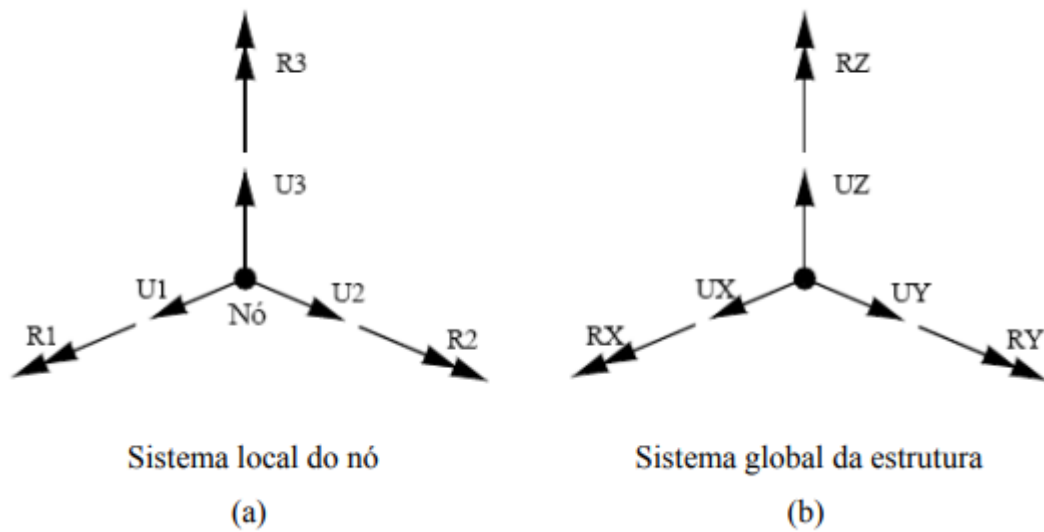
Todos os elementos estruturais foram modelados utilizando o *software* CsiBridge 22.1.0 com base na sua seção transversal utilizando elementos de *frame* e *shell* conforme descritos nos itens 3.3.1.1 e 3.3.1.2 respectivamente.

##### 3.3.1.1 Elemento *frame*

O elemento de barras (*frame*) tem incorporada uma formulação que consideram os efeitos de flexão, torção, deformação axial e esforços transversos. O *frame* é utilizado na modelagem de elementos como pilares, vigas, pórticos planos e espaciais.

A modelagem é feita com a ligação de dois nós como uma linha reta, e passando pelo centroide da seção transversal da peça. Os nós são denominados I e J e ambos possuem 6 graus de liberdade, sendo U1, U2 e U3 de translação e R1, R2, R3 de rotação, conforme mostrado na Figura 3-4.

No elemento deve ser carregado toda as informações de materiais e seção transversal.



**Figura 3-4: Graus de liberdade dos elementos frame nos sistemas de coordenadas local e global (Almeida, 2009)**

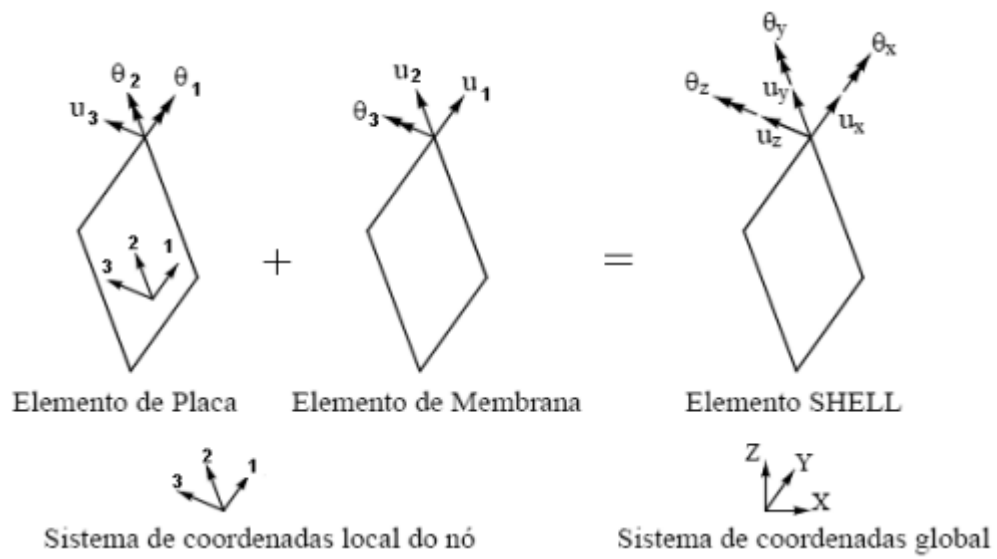
### 3.3.1.2 Elemento *shell*

O elemento de *shell* é utilizado na modelagem de placas, cascas, lajes ou algum elemento especial.

Da composição de um elemento de membrana com um elemento de placa origina-se um elemento de *shell*, conforme Figura 3-5. O elemento de membrana possui em cada nó três graus de liberdade: duas translações no plano do elemento e uma rotação em torno do eixo normal ao plano do elemento. O elemento de placa possui uma rotação em torno de cada eixo do plano do elemento e uma translação no eixo normal ao plano do elemento.

Para o elemento de placa é usada a formulação de placas finas de *Kirchhoff*, a qual despreza as deformações transversais de cisalhamento. O elemento *shell*, portanto, possui seis graus de liberdade em cada nó: três translações e três rotações (Figura 3-5).

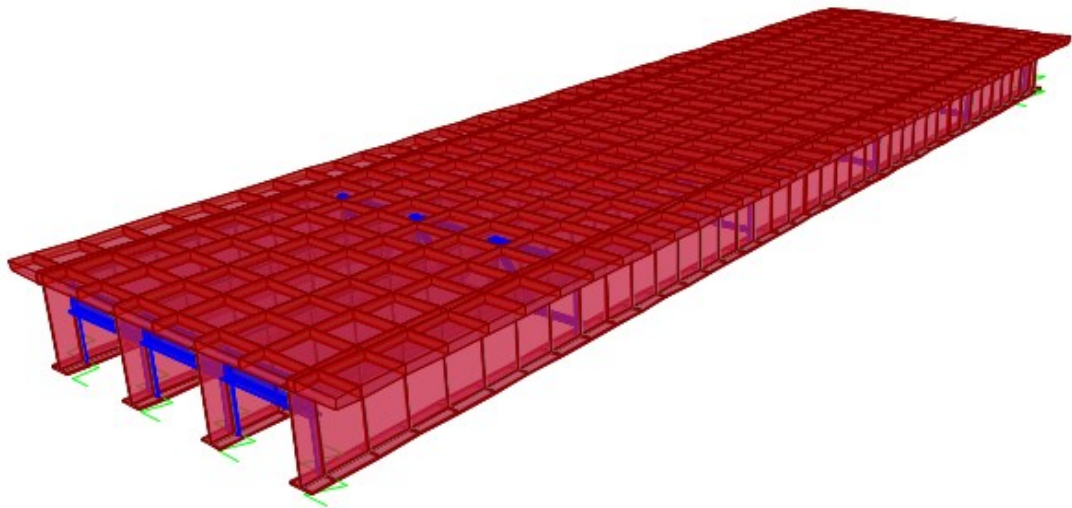




**Figura 3-5: Graus de liberdade de um elemento *shell* (Almeida, 2009)**

### 3.3.1.3 Modelo Estrutural

Será apresentado nas figuras abaixo o modelo utilizado para análise e dimensionamento do viaduto em estudo.



**Figura 3-6: Perspectiva do modelo da Superestrutura**

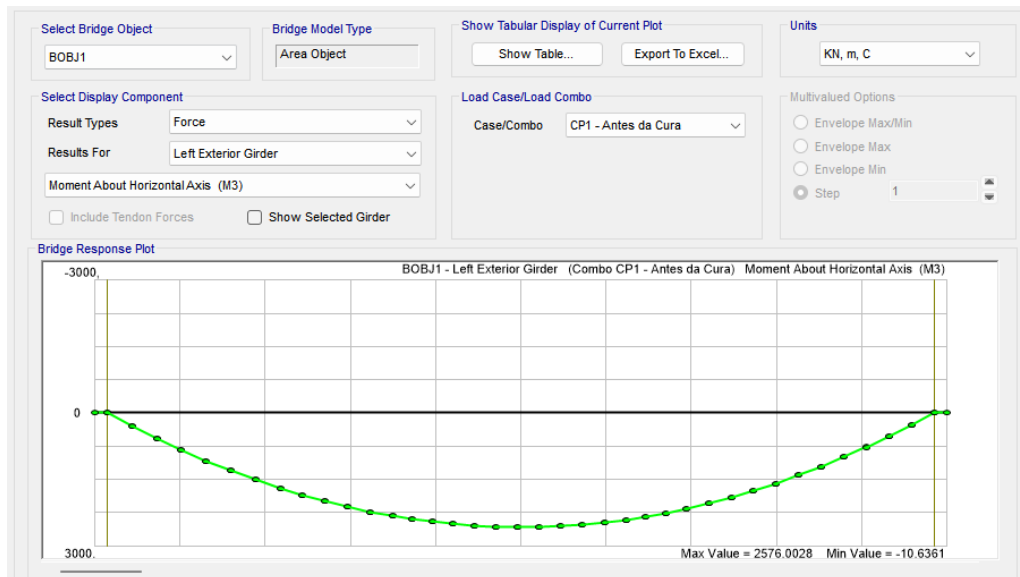
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Dimensionamento da Longarina

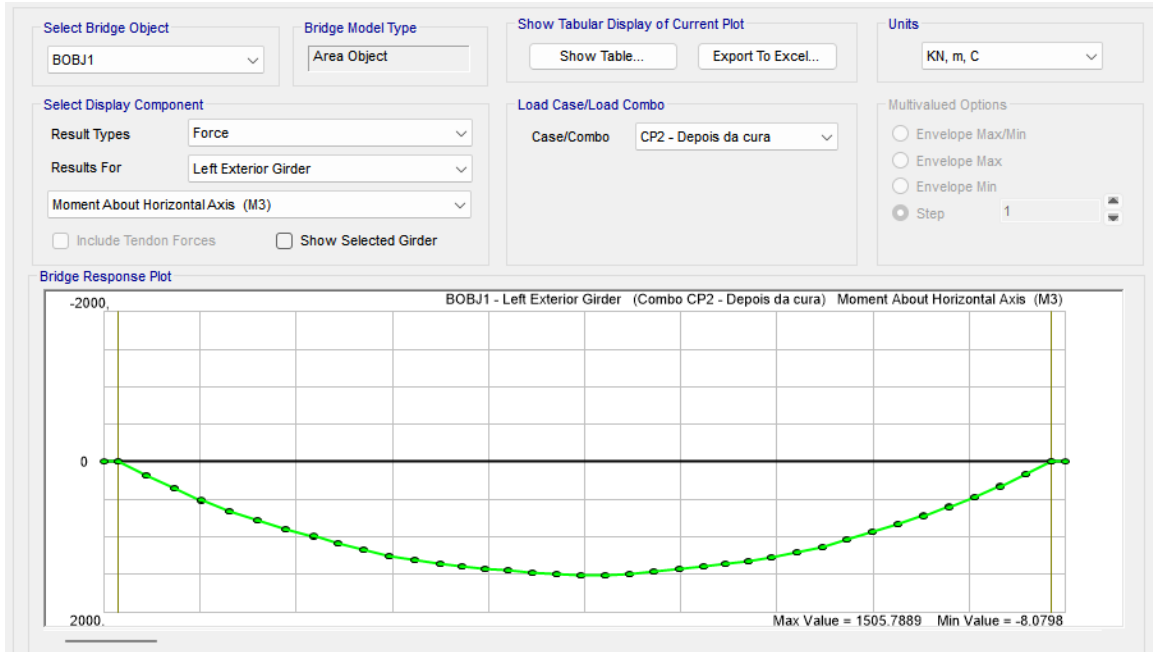
#### 4.1.1 Esforços solicitantes

Nas Figura 4-1 a Figura 4-8 serão apresentados os esforços na longarina oriundo dos carregamentos permanentes e variáveis do viaduto.

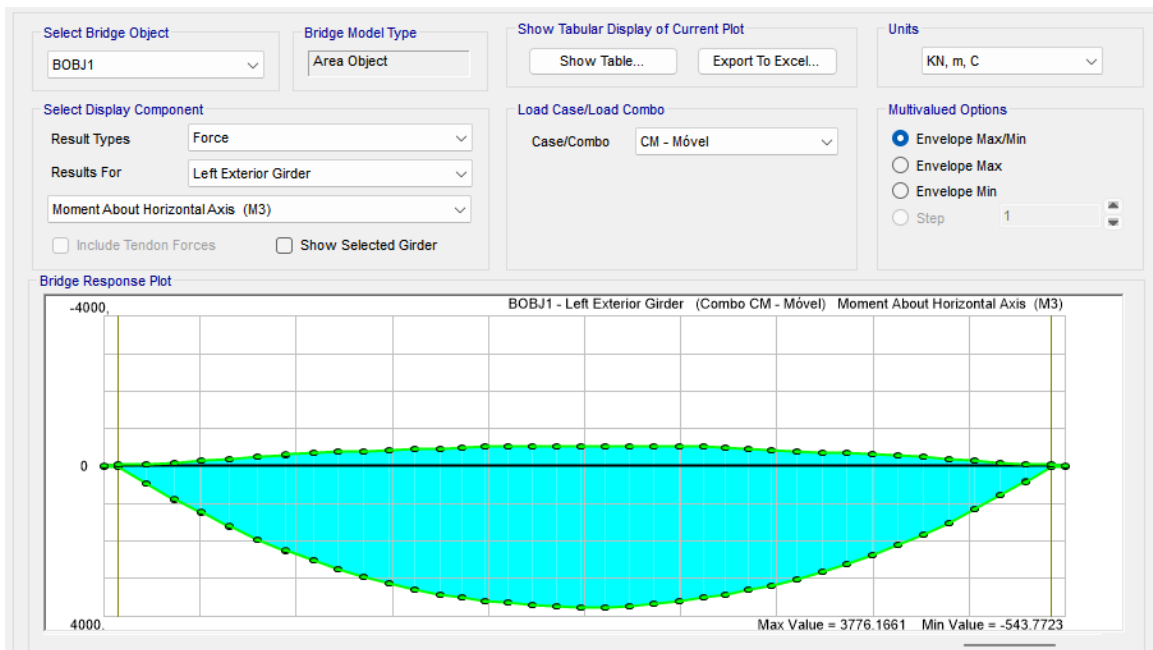
Para o dimensionamento foi gerado um modelo de cálculo desprezando a contribuição da inercia do tabuleiro para o dimensionamento da viga metálica antes da cura do concreto. E um segundo modelo com a contribuição do tabuleiro caracterizando a viga mista para o dimensionamento após a cura do concreto.



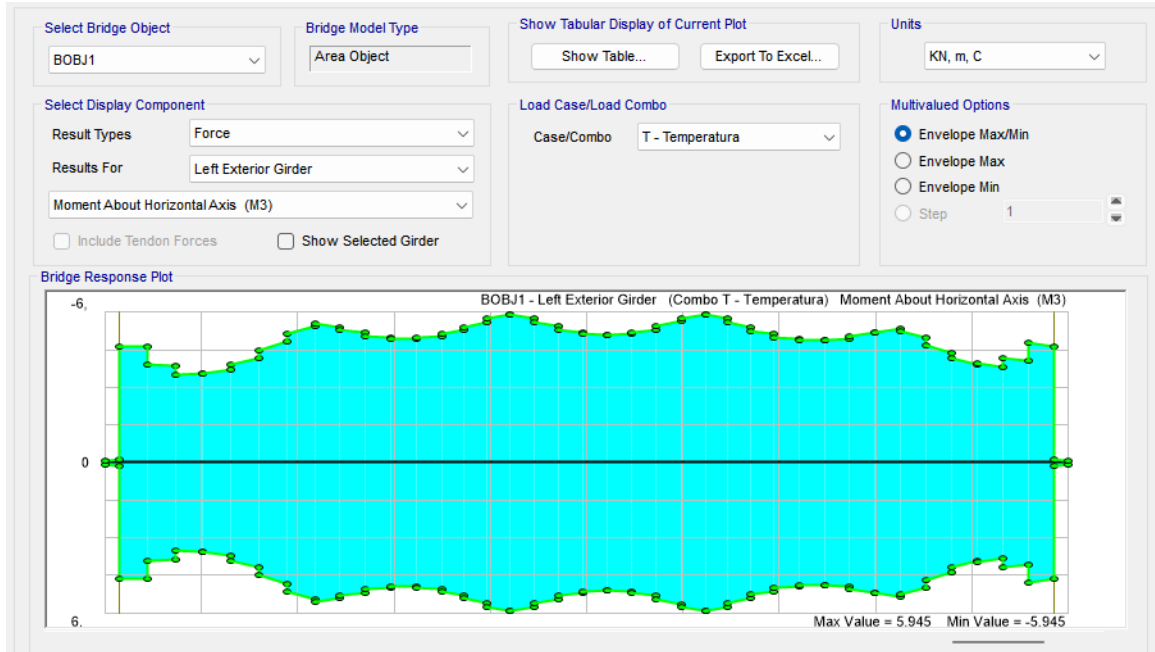
**Figura 4-1: Momento Fletor antes da Cura.**



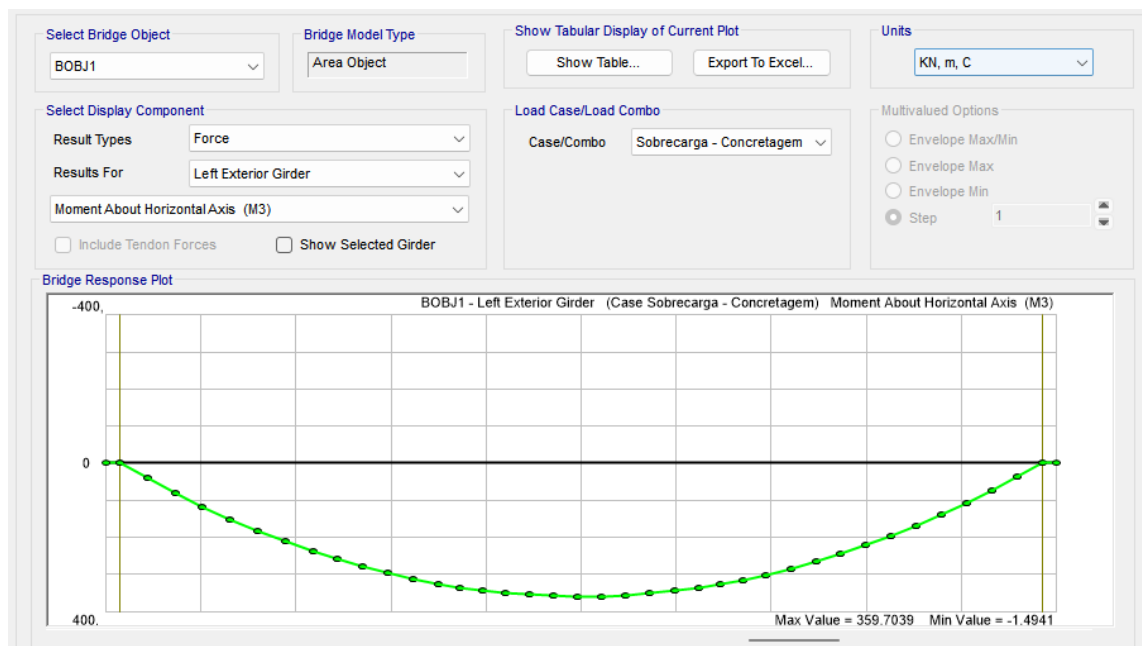
**Figura 4-2: Momento Fletor depois da Cura.**



**Figura 4-3: Envoltória do momento fletor devido a carga móvel.**



**Figura 4-4: Momento fletor devido efeito da temperatura.**



**Figura 4-5: Momento fletor devido efeito da a sobrecarga de concretagem.**

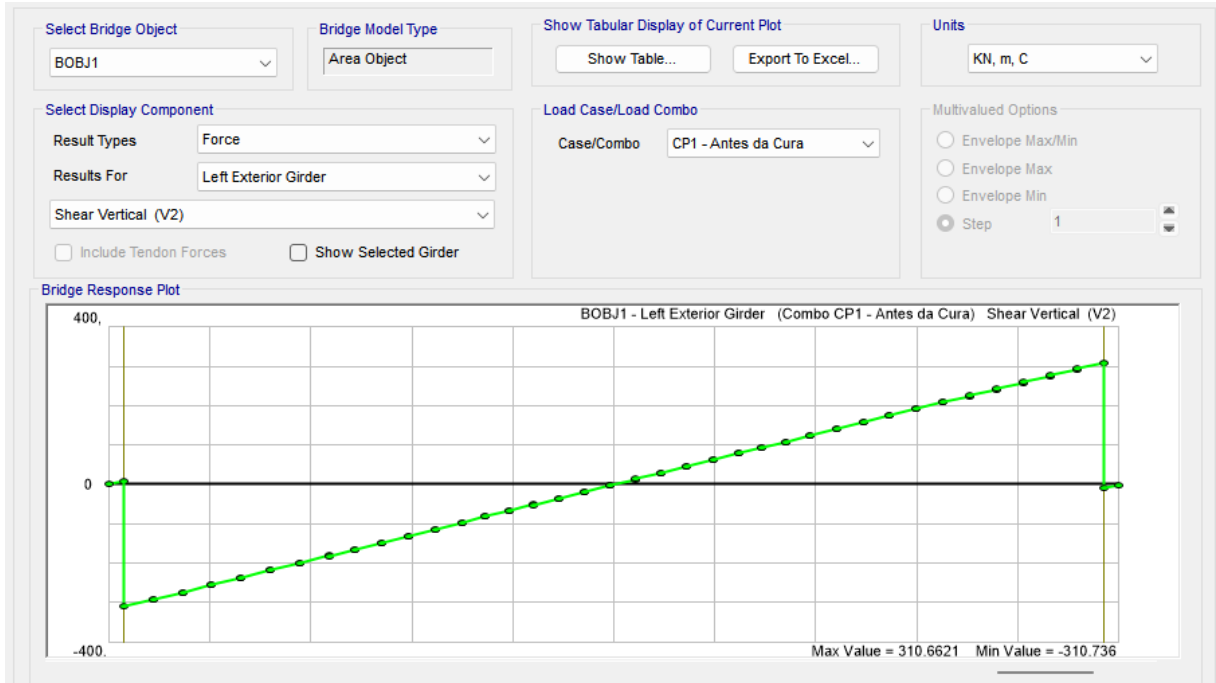


Figura 4-6: Esforço cortante antes da Cura.

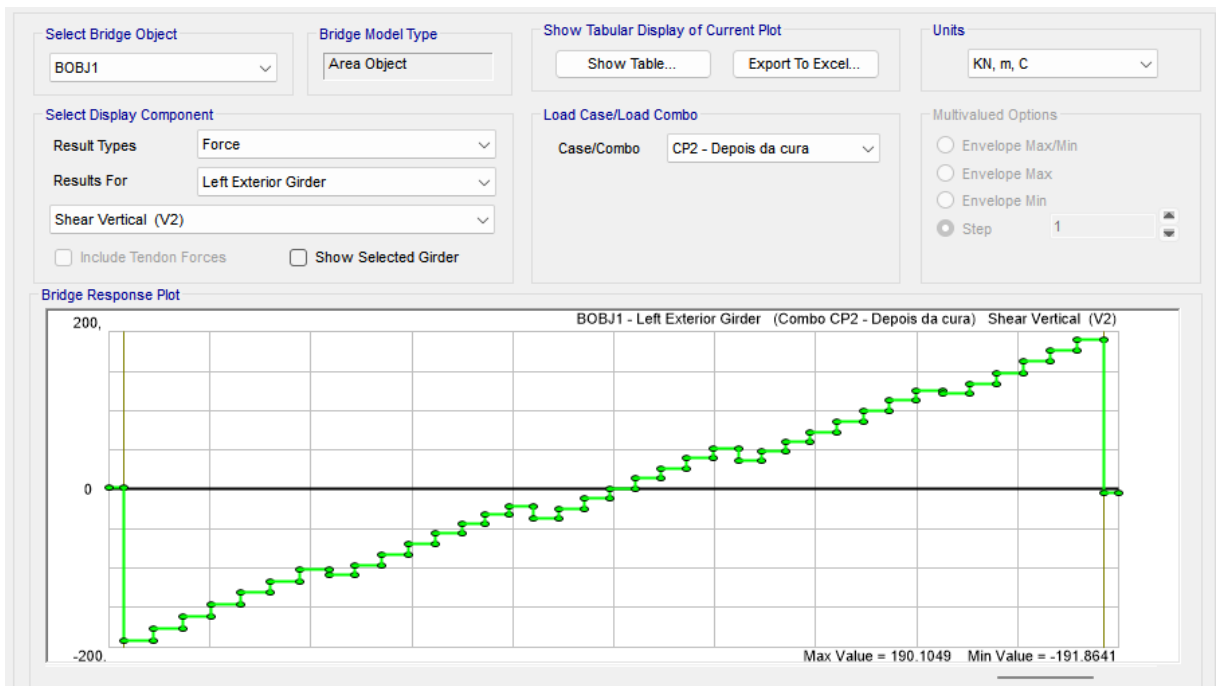
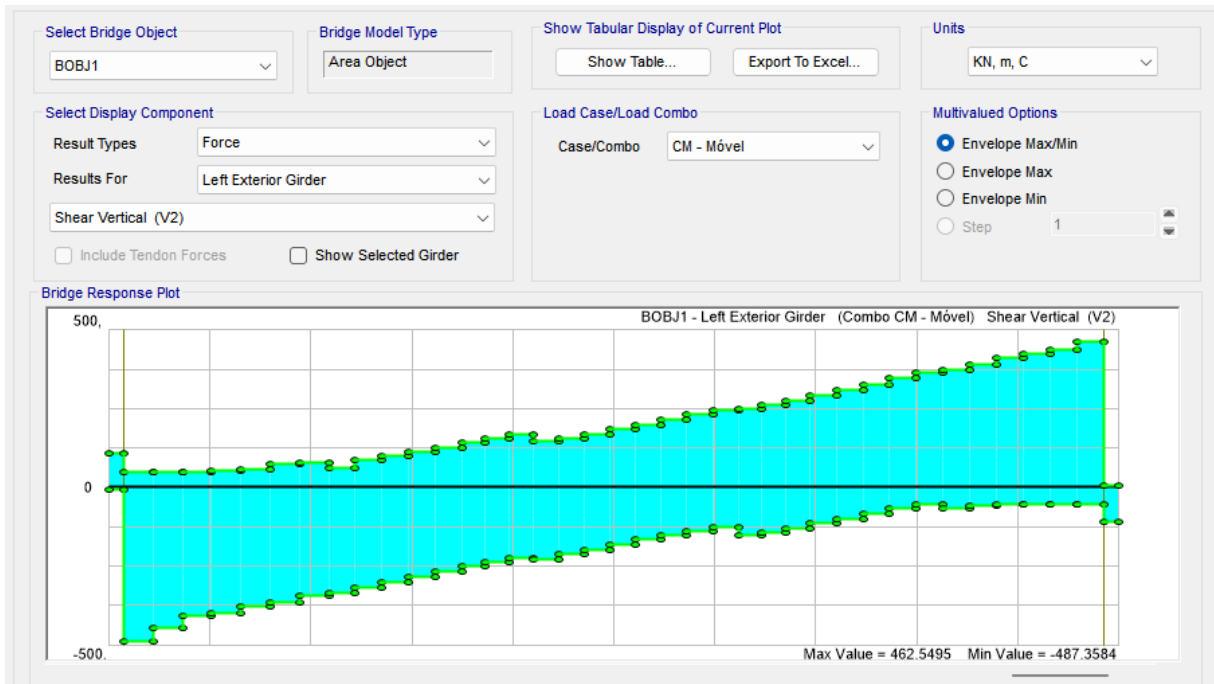


Figura 4-7: Esforço cortante depois da Cura.



**Figura 4-8: Envoltória do esforço cortante devido a carga móvel.**

#### 4.1.2 Dimensionamento

Abaixo será apresentada o material, geometria e todo o dimensionamento da viga de aço para o viaduto em estudo.

##### Dimensionamento de longarinas - Seção I com alma esbelta

A) Materiais:

Resistência ao escoamento do aço.....  $f_y := 345 \text{ MPa}$

Resistência a ruptura do aço.....  $f_u := 450 \text{ MPa}$

Módulo de elasticidade do aço.....  $E := 200 \text{ GPa}$

Resistência a compressão do concreto.....  $f_{ck} := 40 \text{ MPa}$

Módulo de elasticidade do concreto.....  $E_{cs} := 0.81 \cdot 5600 \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 28688.183 \text{ MPa}$

Resistência à ruptura do conector de cisalhamento.....  $f_{ucs} := 415 \text{ MPa}$

B) Dimensões e propriedades geométricas:

Seção I - Monossimétrica:

B.1) Propriedades da seção de aço isolada

$$A := b_s \cdot t_s + b_i \cdot t_i + h \cdot t_w = 494.354 \text{ cm}^2$$

$$CG := \frac{b_s \cdot t_s \cdot \left(d - \frac{t_s}{2}\right) + h \cdot t_w \cdot \left(\frac{h}{2} + t_i\right) + b_i \cdot t_i \cdot \left(\frac{t_i}{2}\right)}{A} = 725.377 \text{ mm}$$

$$h_c := (d - t_s - CG) \cdot 2 = 2417.245 \text{ mm}$$

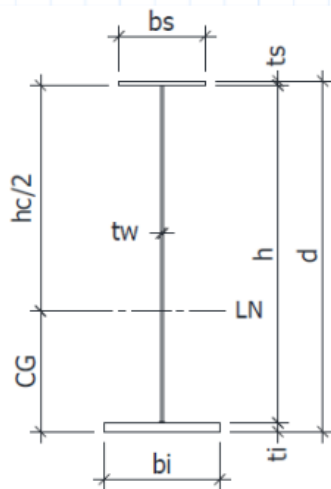
$$I_x := \frac{(b_s \cdot t_s^3 + b_i \cdot t_i^3 + t_w \cdot h^3)}{12} + \left(d - CG - \frac{t_s}{2}\right)^2 \cdot t_s \cdot b_s + \left(CG - \frac{t_i}{2}\right)^2 \cdot t_i \cdot b_i + \left(\frac{h}{2} + t_i - CG\right)^2 \cdot h \cdot t_w$$

$$I_x = 2754819.341 \text{ cm}^4$$

$$W_s := \frac{I_x}{(d - CG)} = 22495.25 \text{ cm}^3 \quad W_i := \frac{I_x}{CG} = 37977.743 \text{ cm}^3 \quad R_x := \sqrt{\frac{I_x}{A}} = 746.496 \text{ mm}$$

$$I_y := \frac{(t_s \cdot b_s^3 + t_i \cdot b_i^3 + h \cdot t_w^3)}{12} = 64948.734 \text{ cm}^4$$

## Seção I - Monossimétrica:



$$d := 1950 \text{ mm}$$

$$b_{.min} := \frac{d}{6} = 325 \text{ mm}$$

$$b_s := 380 \text{ mm}$$

$$b_i := 600 \text{ mm}$$

$$t_w := 12.7 \text{ mm}$$

$$t_{s.min} := \max\left(\frac{b_s}{2 \cdot 12}, 1.1 t_w\right) = 15.833 \text{ mm}$$

$$t_s := 16 \text{ mm}$$

$$t_{i.min} := \frac{b_i}{2 \cdot 12} = 25 \text{ mm}$$

$$t_i := 32 \text{ mm}$$

$$h := d - (t_i + t_s) = 1.902 \text{ m}$$

Há necessidade de enrijecedores longitudinais?

$$\frac{h}{t_w} = 149.764$$

$$\text{Enrij.} := \begin{cases} \text{if } \frac{h}{t_w} \leq 150 \\ \quad \text{"Sem enrij. longitudinal"} \\ \text{else} \\ \quad \text{"Com enrij. longitudinal"} \end{cases} = \text{"Sem enrij. longitudinal"}$$

$$W_y := \frac{I_y}{\frac{b_i}{2}} = 2164.958 \text{ cm}^3 \quad R_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 114.622 \text{ mm}$$

$$W_{bi} := \frac{t_i \cdot b_i^2}{6} = 1920 \text{ cm}^3 \quad I_{yc} := \frac{t_s \cdot b_s^3}{12} = 7316.267 \text{ cm}^4 \quad I_{yt} := \frac{t_i \cdot b_i^3}{12} = 57600 \text{ cm}^4$$

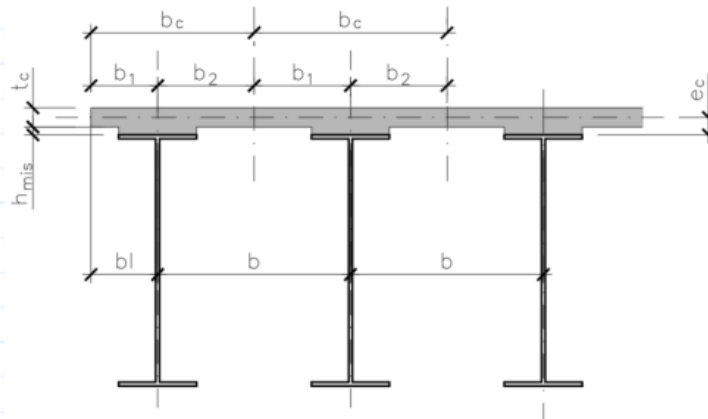
$$\alpha_y := \frac{I_{yc}}{I_{yt}} = 0.127 \quad \frac{b_s \cdot t_s + h \cdot t_w}{b_i \cdot t_i} = 1.575 \quad \frac{h \cdot t_w}{b_s \cdot t_s} = 3.973$$

Atende ao Anexo H da NBR 8800:2008?

$$\text{ANEXO H} := \begin{cases} \text{if } \frac{h_c}{t_w} \geq 5.76 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \wedge \frac{1}{9} \leq \alpha_y \leq 9 \wedge \frac{b_s \cdot t_s + h \cdot t_w}{b_i \cdot t_i} \geq 1 \wedge \frac{h \cdot t_w}{b_s \cdot t_s} \leq 10 \\ \quad \text{"OK"} \\ \text{else} \\ \quad \text{"Não OK"} \end{cases} = \text{"OK"}$$



## B.2) Propriedades da seção mista de aço e concreto



$$L := 33.50 \text{ m}$$

(Vão teórico da longarina)

$$t_c := 15 \text{ cm}$$

$$b := 260 \text{ cm}$$

(distância entre longarinas)

$$h_{mis} := 7 \text{ cm}$$

$$b_1 := 125 \text{ cm}$$

(esquerda)

$$b_2 := \frac{b}{2} = 1.3 \text{ m}$$

(direita)

$$b_c := \min\left(b_1 + b_2, \frac{L}{4}\right) = 2550 \text{ mm}$$

(largura da mesa colaborante de concreto)

$$e_c := h_{mis} + \frac{t_c}{2} = 14.5 \text{ cm}$$

(cg da laje em relação à mesa superior)

$$n := \text{ceil}\left(\frac{E}{E_{cs}}\right) = 7$$

$$N_1 := n = 7$$

(coeficiente de transformação para cargas de curta duração)

$$N_2 := 3 \cdot n$$

(coeficiente de transformação para cargas de longa duração)

Propriedades da seção mista para cargas de curta duração:

$$YM := \frac{\frac{b_c}{N_1} \cdot t_c \cdot (e_c + d) + A \cdot CG}{\frac{b_c}{N_1} \cdot t_c + A} = 144.445 \text{ cm}$$

(posição da linha neutra)

A linha neutra está na alma do perfil?

$$LN := \begin{cases} \text{if } YM \leq (d - t_s) \\ \quad \text{"OK"} \\ \text{else} \\ \quad \text{"Não OK"} \end{cases} = \text{"OK"}$$

$$IM := I_x + A \cdot (YM - CG)^2 + \frac{b_c \cdot t_c^3}{N_1} + \frac{b_c}{N_1} \cdot t_c \cdot (e_c + d - YM)^2$$

$$IM = 7633768.25 \text{ cm}^4 \quad (\text{momento de inércia})$$

$$WSM := \frac{IM}{(d - YM)} = 151000.035 \text{ cm}^3 \quad (\text{módulo elástico fibra superior})$$

$$WIM := \frac{IM}{YM} = 52848.868 \text{ cm}^3 \quad (\text{módulo elástico fibra inferior})$$

$$WC := \frac{IM \cdot N_1}{\left(d + e_c + \frac{t_c}{2} - YM\right)} = 736497.354 \text{ cm}^3 \quad (\text{módulo elástico topo da laje})$$

Propriedades da seção mista para cargas de longa duração:

$$YMF := \frac{\frac{b_c}{N_2} \cdot t_c \cdot (e_c + d) + A \cdot CG}{\frac{b_c}{N_2} \cdot t_c + A} = 109.414 \text{ cm} \quad \text{A linha neutra está na alma do perfil?}$$

(posição da linha neutra)

$$LN := \begin{cases} \text{if } YMF \leq (d - t_s) \\ \quad \text{"OK"} \\ \text{else} \\ \quad \text{"Não OK"} \end{cases} = \text{"OK"}$$

$$IMF := I_x + A \cdot (YMF - CG)^2 + \frac{b_c \cdot t_c^3}{N_2} + \frac{b_c}{N_2} \cdot t_c \cdot (e_c + d - YMF)^2$$

$$IMF = 5255049.084 \text{ cm}^4 \quad (\text{momento de inércia})$$

$$WSMF := \frac{IMF}{(d - YMF)} = 61400.823 \text{ cm}^3 \quad (\text{módulo elástico fibra superior})$$

$$WIMF := \frac{IMF}{YMF} = 48029.025 \text{ cm}^3 \quad (\text{módulo elástico fibra inferior})$$

$$WCF := \frac{IMF \cdot N_2}{\left(d + e_c + \frac{t_c}{2} - YMF\right)} = 1025747.407 \text{ cm}^3 \quad (\text{módulo elástico topo da laje})$$

C) Esforços solicitantes:

Parcelas de carregamentos na longarina

CP1 - Esforços devido a cargas permanentes antes da cura do concreto

CP2 - Esforços devidos a cargas permanentes após a cura do concreto

Q - Esforços devido à sobrecarga durante a concretagem da laje

CM - Envoltória dos esforços devidos à carga móvel com CIV

W - Envoltória dos esforços devidos ao vento

T - Envoltória dos esforços devidos à variação de temperatura

C.1) Momentos (caso favorável considerar nulo)

$M_{CP1}$ ( $kN \cdot m$ )	$M_{CP2}$ ( $kN \cdot m$ )	$M_{CM}$ ( $kN \cdot m$ )	$M_W$ ( $kN \cdot m$ )	$M_T$ ( $kN \cdot m$ )	$M_Q$ ( $kN \cdot m$ )	$M_{W,LAT}$ ( $kN \cdot m$ )
2576.0	1505.8	3776.1	0	5.9	39.75	13.01

$Q_{CP1}$ ( $kN$ )	$Q_{CP2}$ ( $kN$ )	$Q_{CM}$ ( $kN$ )	$Q_W$ ( $kN$ )	$Q_T$ ( $kN$ )
310.73	190.10	62.54	0	0
222.54	135.10	387.29	0	0

D) Verificação da seção de aço isolada antes da cura do concreto (NBR 8800:2008)

$$M_{pSd} := 1.2 M_{CP1} + 1.25 M_Q = 3140.888 \text{ kN} \cdot m$$

D.1) Escoamento da mesa tracionada:

$$M_{Rd} := \frac{W_i \cdot f_y}{1.10} = 11911.201 \text{ kN} \cdot m$$

$$k := \frac{M_{pSd}}{M_{Rd}} = 0.264$$

Verificação de cálculo

$$Ver. := \begin{cases} \text{if } k \leq 1 \\ \quad \text{"OK"} \\ \text{else} \\ \quad \text{"Não OK"} \end{cases} = \text{"OK"}$$

## D.2) Flambagem lateral com torção:

$$d_{diaf} := 700 \text{ cm}$$

$$L_b := d_{diaf} = 700 \text{ cm}$$

$$C_b := 1$$

$$r_{yT} := \frac{b_s}{\sqrt{12 \cdot \left(1 + \frac{h_c \cdot t_w}{6 \cdot t_s \cdot b_s}\right)}} = 80.836 \text{ mm}$$

$$\lambda := \frac{L_b}{r_{yT}} = 86.595$$

$$\lambda_p := 1.1 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 26.485$$

$$\lambda_r := \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{0.7 \cdot f_y}} = 90.408$$

$$a_r := \frac{h \cdot t_w}{b_s \cdot t_s} = 3.973$$

$$k_{pg} := \min\left(1 - \frac{a_r}{1200 + 300 \cdot a_r} \cdot \left(\frac{h_c}{t_w} - 5.7 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}\right), 1\right) = 0.912$$

$$M_{Rd} := \begin{cases} \text{if } \lambda \leq \lambda_p & \left| \frac{k_{pg} \cdot W_s \cdot f_y}{1.1} \right| \\ \text{if } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r & \left| \min\left(\frac{C_b \cdot k_{pg}}{1.1} \cdot \left(1 - 0.3 \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}\right) \cdot W_s \cdot f_y, \frac{k_{pg} \cdot W_s \cdot f_y}{1.1}\right) \right| \\ \text{if } \lambda_p > \lambda_r & \left| \min\left(\frac{C_b \cdot k_{pg} \cdot \pi^2 \cdot E \cdot W_s}{1.1 \cdot \lambda^2}, \frac{k_{pg} \cdot W_s \cdot f_y}{1.1}\right) \right| \end{cases} = 4618.289 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

## Verificação de cálculo

$$k := \frac{M_{pSd}}{M_{Rd}} = 0.68$$

$$Ver. := \begin{cases} \text{if } k \leq 1 & \left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \\ \text{else} \\ \text{"Não OK"} \end{array} \right| \end{cases} = \text{"OK"}$$

## D.3) Flambagem local da mesa:

$$k_{c.inf} := \max\left(\frac{4}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}}, 0.35\right) = 0.35$$

$$k_c := \min(k_{c.inf}, 0.76) = 0.35$$

$$\lambda := \frac{b_s}{2 \cdot t_s} = 11.875 \quad \lambda_p := 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 9.149 \quad \lambda_r := 0.95 \cdot \sqrt{\frac{k_c \cdot E}{0.7 \cdot f_y}} = 16.174$$

$$M_{Rd} := \left\| \begin{array}{l} \text{if } \lambda \leq \lambda_p \\ \left\| \frac{k_{pg} \cdot W_s \cdot f_y}{1.1} \right\| \\ \text{if } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \\ \left\| \min \left( \frac{k_{pg}}{1.1} \cdot \left( 1 - 0.3 \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \cdot W_s \cdot f_y \right) \right\| \\ \text{if } \lambda_p > \lambda_r \\ \left\| \min \left( \frac{0.9 \cdot k_{pg} \cdot k_c \cdot E \cdot W_s}{1.1 \cdot \lambda^2} \right) \right\| \end{array} \right\| = 5684.261 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Verificação de cálculo

$$k := \frac{M_{pSd}}{M_{Rd}} = 0.553$$

$$Ver. := \left\| \begin{array}{l} \text{if } k \leq 1 \\ \left\| \text{"OK"} \right\| \\ \text{else} \\ \left\| \text{"Não OK"} \right\| \end{array} \right\| = \text{"OK"}$$

E) Verificação da seção mista após a cura do concreto

Mesa inferior -  
Tracionada

$$f_{bi} := \frac{1.30 \cdot M_{CP1}}{W_i} + \frac{1.35 \cdot M_{CP2}}{WIMF} + \frac{1.5 \cdot M_{CM} + 0.84 \cdot M_W + 0.72 \cdot M_T}{WIM} + \frac{M_{W.LAT}}{W_{bi}} = 24.454 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$f_{Rd} := \frac{f_y}{1.1} = 31.364 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Verificação de cálculo

$$k := \frac{f_{bi}}{f_{Rd}} = 0.78$$

$$Ver. := \left\| \begin{array}{l} \text{if } k \leq 1 \\ \left\| \text{"OK"} \right\| \\ \text{else} \\ \left\| \text{"Não OK"} \right\| \end{array} \right\| = \text{"OK"}$$

Mesa superior - Comprimida:

$$f_{bs} := \frac{1.30 \cdot M_{CP1}}{W_s} + \frac{1.35 \cdot M_{CP2}}{WSMF} + \frac{1.5 \cdot M_{CM} + 0.84 \cdot M_W + 0.72 \cdot M_T}{WSM} = 21.951 \frac{kN}{cm^2}$$

Tensões resistentes:

$$f_{Rd} := \frac{f_y}{1.1} = 31.364 \frac{kN}{cm^2}$$

Verificação de cálculo

$$k := \frac{f_{bs}}{f_{Rd}} = 0.7$$

$$Ver. := \begin{cases} \text{if } k \leq 1 \\ \quad \text{"OK"} \\ \text{else} \\ \quad \text{"Não OK"} \end{cases} = \text{"OK"}$$

Laje de concreto:

$$f_c := \frac{1.35 \cdot M_{CP2}}{WCF} + \frac{1.5 \cdot M_{CM} + 0.84 \cdot M_W + 0.72 \cdot M_T}{WC} = 0.968 \frac{kN}{cm^2}$$

Verificação de cálculo

$$k := \frac{\frac{f_c}{f_{ck}}}{1.4} = 0.339$$

$$Ver. := \begin{cases} \text{if } k \leq 1 \\ \quad \text{"OK"} \\ \text{else} \\ \quad \text{"Não OK"} \end{cases} = \text{"OK"}$$

F) Verificação da seção para cisalhamento (NBR 8800:2008)

Entre o apoio e o primeiro diafragma:

$$V_{Sd.apoio} := 1.30 \cdot Q_{CP1_0} + 1.35 \cdot Q_{CP2_0} + 1.5 \cdot 1.25 \cdot Q_{CM_0} + 0.84 \cdot Q_{W_0} + 0.72 \cdot Q_{T_0} = 777.847 \text{ kN}$$

$$V_{Sd.apoio} = 777.847 \text{ kN}$$

$$a := \frac{d_{diaf}}{4} = 1.75 \text{ m} \quad (\text{distância do primeiro enrijecedor})$$

$$\frac{a}{h} = 0.92 \quad k_v := \begin{cases} \text{if } \frac{a}{h} > 3 \oplus \frac{a}{h} > \left(\frac{260}{\frac{h}{t_w}}\right)^2 \\ 5 \\ \text{else} \\ 5 + \frac{5}{\left(\frac{a}{h}\right)^2} \end{cases} = 10.906$$

$$V_{pl} := 0.60 \cdot f_y \cdot h \cdot t_w = 5000.168 \text{ kN}$$

$$\lambda := \frac{h}{t_w} = 149.764 \quad \lambda_p := 1.10 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_v}{f_y}} \quad \lambda_r := 1.37 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_v}{f_y}}$$

$$V_{Rd} := \begin{cases} \text{if } \lambda \leq \lambda_p \\ \frac{V_{pl}}{1.1} \\ \text{if } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \\ \frac{\lambda_p \cdot V_{pl}}{\lambda \cdot 1.1} \\ \text{if } \lambda > \lambda_r \\ 1.24 \cdot \left(\frac{\lambda_p}{\lambda}\right)^2 \cdot \frac{V_{pl}}{1.1} \end{cases} = 1922.531 \text{ kN}$$

Verificação de cálculo

$$k := \frac{V_{Sd.apoio}}{V_{Rd}} = 0.405$$

$$Ver. := \begin{cases} \text{if } k \leq 1 \\ \text{"OK"} \\ \text{else} \\ \text{"Não OK"} \end{cases} = \text{"OK"}$$

Entre o primeiro e o segundo apoio:

$$V_{Sd.vao} := 1.30 \cdot Q_{CP1} + 1.35 \cdot Q_{CP2} + 1.5 \cdot Q_{CM1} + 0.84 \cdot Q_{W1} + 0.72 \cdot Q_{T1} = 1052.622 \text{ kN}$$

$$a := \frac{d_{diaf}}{2} = 3.5 \text{ m} \quad (\text{distância do primeiro enrijecedor})$$

$$\frac{a}{h} = 1.84 \quad k_v := \begin{cases} \text{if } \frac{a}{h} > 3 \oplus \frac{a}{h} > \left(\frac{260}{\frac{h}{t_w}}\right)^2 \\ 5 \\ \text{else} \\ 5 + \frac{5}{\left(\frac{a}{h}\right)^2} \end{cases} = 6.477$$

$$V_{pl} := 0.60 \cdot f_y \cdot h \cdot t_w = 5000.168 \text{ kN}$$

$$\lambda := \frac{h}{t_w} = 149.764 \qquad \lambda_p := 1.10 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_v}{f_y}} \qquad \lambda_r := 1.37 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_v}{f_y}}$$

$$V_{Rd} := \left\| \begin{array}{l} \text{if } \lambda \leq \lambda_p \\ \left\| \frac{V_{pl}}{1.1} \right\| \\ \text{if } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \\ \left\| \frac{\lambda_p \cdot V_{pl}}{\lambda \cdot 1.1} \right\| \\ \text{if } \lambda > \lambda_r \\ \left\| 1.24 \cdot \left( \frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{V_{pl}}{1.1} \right\| \end{array} \right\| = 1141.672 \text{ kN}$$

Verificação de cálculo

$$k := \frac{V_{Sd.vao}}{V_{Rd}} = 0.922$$

$$Ver. := \left\| \begin{array}{l} \text{if } k \leq 1 \\ \left\| \text{"OK"} \right\| \\ \text{else} \\ \left\| \text{"Não OK"} \right\| \end{array} \right\| = \text{"OK"}$$

Dimensionamento do enrijecedor transversal intermediário (NBR 8800:2008):

$$a := \frac{d_{diaf}}{3} = 2.333 \text{ m}$$

$$t_e := 12.7 \text{ mm}$$

$$b_{e.min} := \max\left(5 \text{ cm} + \frac{h}{30}, \frac{b_s}{4}\right) = 113.4 \text{ mm} \qquad b_{e.max} := \min\left(16 \cdot t_e, \frac{b_s - t_w}{2}\right) = 183.65 \text{ mm}$$

$$b_e := 180 \text{ mm}$$

$$I_e := \frac{t_e \cdot b_e^3}{3} = 2468.88 \text{ cm}^4$$

$$J := \max\left(\frac{2.5}{\left(\frac{a}{h}\right)^2} - 2, 0.5\right) = 0.5$$

$$I_{e.min} := a \cdot t_w^3 \cdot J = 238.978 \text{ cm}^4$$

Verificação de cálculo

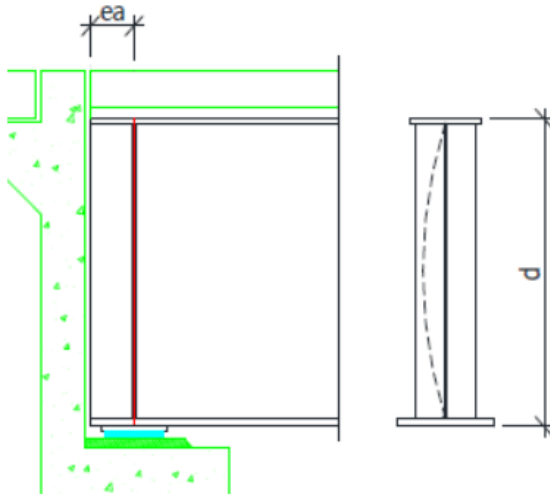
$$k := \frac{I_e}{I_{e.min}} = 10.331$$

$$Ver. := \left\| \begin{array}{l} \text{if } k \geq 1 \\ \left\| \text{"OK"} \right\| \\ \text{else} \\ \left\| \text{"Não OK"} \right\| \end{array} \right\| = \text{"OK"}$$



## F) Dimensionamento do enrijecedor de apoio

$$R_{Sd} := V_{Sd.apoio} = 777.847 \text{ kN}$$



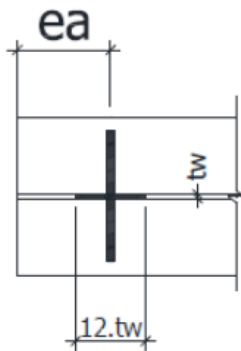
Largura do enrijecedor:

$$b_{sa.max} := \frac{b_s}{2} - \frac{t_w}{2} = 183.65 \text{ mm}$$

$$b_{sa} := 180 \text{ mm}$$

$$t_{sa.min} := \frac{b_{sa}}{0.48 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}} = 15.575 \text{ mm}$$

$$t_{sa} := 16 \text{ mm}$$



$$A_{sa} := b_{sa} \cdot t_{sa} \cdot 2 + (12 \cdot t_w) \cdot t_w = 76.955 \text{ cm}^2$$

$$I_{sa} := \frac{12 \cdot t_w \cdot t_w^3 + t_{sa} \cdot (2 \cdot b_{sa})^3}{12} = 6223.401 \text{ cm}^4$$

$$r_{sa} := \sqrt{\frac{I_{sa}}{A_{sa}}} = 8.993 \text{ cm}$$

Verificação do esmagamento:

$$Re_{Rd} := \frac{1.8 \cdot t_{sa} \cdot 2 \cdot (b_{sa} - 3 \cdot t_w) \cdot f_y}{1.35} = 2088.768 \text{ kN}$$

$$k := \frac{R_{Sd}}{Re_{Rd}} = 0.372$$

Verificação de cálculo

$$Ver. := \begin{cases} \text{if } k \leq 1 \\ \quad \text{"OK"} \\ \text{else} \\ \quad \text{"Não OK"} \end{cases} = \text{"OK"}$$

Verificação da Resistência à compressão:

$$\lambda := \frac{d}{r_{sa}} = 21.684 \quad N_e := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{d^2} = 337156.243 \text{ kN} \quad \lambda_0 := \sqrt{\frac{(A_{sa} \cdot f_y)}{N_e}} = 0.089$$

$$\chi := \begin{cases} \text{if } \lambda_0 \leq 1.5 \\ \quad \left| \frac{0.658 \lambda_0^2}{\lambda_0^2} \right| \\ \text{if } \lambda_0 > 1.5 \\ \quad \left| \frac{0.877}{\lambda_0^2} \right| \end{cases} = 0.997 \quad Q := 1 \quad R_{cRd} := \frac{(\chi \cdot Q \cdot A_{sa} \cdot f_y)}{1.1} = 2405.641 \text{ kN}$$

Verificação de cálculo

$$k := \frac{R_{Sd}}{R_{cRd}} = 0.323$$

$$\text{Ver.} := \begin{cases} \text{if } k \leq 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \\ \text{else} \\ \text{"Não OK"} \end{array} \right| \end{cases} = \text{"OK"}$$

G) Solda de composição e emendas de perfis:

Soldas de composição:

$$M_{e.mesa} := \max \left( b_s \cdot t_s \cdot \left( |d - CG| - \frac{t_s}{2} \right), b_i \cdot t_i \cdot \left( CG - \frac{t_i}{2} \right) \right) = 13620.045 \text{ cm}^3$$

$$f_{v.Sd} := V_{Sd.apoio} \cdot \frac{M_{e.mesa}}{I_x} = 384.573 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (\text{fluxo de cisalhamento na emenda})$$

$$a_w := \min \left( \text{Round} \left( \frac{3}{4} \cdot t_w, 1 \text{ mm} \right), 8 \text{ mm} \right) = 8 \text{ mm} \quad (\text{solda de filete adotada de cada lado da alma})$$

$$d_w := 0.707 \cdot a_w = 5.656 \text{ mm}$$

$$f_w := 485 \text{ MPa} \quad (\text{eletrodo E70XX})$$

$$f_{v.Rd} := \frac{0.6 \cdot f_w \cdot d_w}{1.35} = 1219.182 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Verificação de cálculo

$$k := \frac{f_{v.Sd}}{f_{v.Rd}} = 0.315$$

$$\text{Ver.} := \begin{cases} \text{if } k \leq 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{"OK"} \\ \text{else} \\ \text{"Não OK"} \end{array} \right| \end{cases} = \text{"OK"}$$

Emenda (solda de penetração total):

Esforço Normal:

$$f_{n.Sd} := \max \left( \frac{M_{pSd}}{W_i}, f_{bi} \right) = 24.454 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad (\text{máxima tensão de tração na seção})$$

$$f_{n_{Rd}} := \frac{f_y}{1.1} = 31.364 \frac{kN}{cm^2} \quad (\text{verificação no metal base})$$

Verificação de cálculo

$$k := \frac{f_{n_{Sd}}}{f_{n_{Rd}}} = 0.78$$

$$Ver. := \begin{cases} \text{if } k \leq 1 \\ \quad \text{"OK"} \\ \text{else} \\ \quad \text{"Não OK"} \end{cases} = \text{"OK"}$$

Cisalhamento:

$$A_w := t_w \cdot h = 241.554 \text{ cm}^2$$

$$f_{v_{Sd}} := \frac{V_{Sd.apoio}}{A_w} = 3.22 \frac{kN}{cm^2}$$

$$f_{v_{Rd}} := \frac{0.6 \cdot f_y}{1.1} = 18.818 \frac{kN}{cm^2} \quad (\text{resistência ao cisalhamento do metal base})$$

Verificação de cálculo

$$k := \frac{f_{v_{Sd}}}{f_{v_{Rd}}} = 0.171$$

$$Ver. := \begin{cases} \text{if } k \leq 1 \\ \quad \text{"OK"} \\ \text{else} \\ \quad \text{"Não OK"} \end{cases} = \text{"OK"}$$

Solicitações combinadas:

$$f_{.Sd} := (f_{n_{Sd}}^2 + 3 \cdot f_{v_{Sd}}^2)^{0.5} = 25.082 \frac{kN}{cm^2}$$

$$f_{Rd} := \min\left(\frac{f_y}{1.1}\right) = 31.364 \frac{kN}{cm^2}$$

$$k := \frac{f_{.Sd}}{f_{Rd}} = 0.8$$

$$Ver. := \begin{cases} \text{if } k \leq 1 \\ \quad \text{"OK"} \\ \text{else} \\ \quad \text{"Não OK"} \end{cases} = \text{"OK"}$$

Obs.: As soldas foram verificadas para os esforços máximos. Não ocorre nessa viga cisalhamento máximo + momento máximo na mesma seção.

H) Conectores de cisalhamento:

$$F_{hd} := \min \left( A \cdot f_y, 0.85 \cdot t_c \cdot b_c \cdot \frac{f_{ck}}{1.4} \right) = 9289.286 \text{ kN} \quad R_g := 1 \quad R_p := 1$$

$$d_{sb} := 22 \text{ mm} \quad A_{sb} := \frac{\pi \cdot d_{sb}^2}{4} = 3.801 \text{ cm}^2 \quad f_{ubs} := 415 \text{ MPa}$$

$$Q_{Rd} := \min \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{A_{sb} \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cs}}}{1.25}, \frac{R_g \cdot R_p \cdot A_{sb} \cdot f_{ubs}}{1.25} \right) = 126.204 \text{ kN}$$

$$f_{Sd} := \left( \frac{V_{Sd.apoio} \cdot \frac{t_c \cdot b_c}{n} \cdot (d + e_c - YM)}{IM} \right) = 362.216 \frac{1}{m} \cdot \text{kN} \quad (\text{fluxo de cisalhamento máximo})$$

$$n_t := \frac{\max(F_{hd}, f_{Sd} \cdot L)}{Q_{Rd}} = 96.148 \quad \text{Conectores por linha: } n_c := 2$$

$$L = 33.5 \text{ m} \quad s_{calc} := \frac{L}{\left( \frac{n_t}{n_c} \right)} = 69.684 \text{ cm} \quad s_{min} := 6 \cdot d_{sb} = 13.2 \text{ cm}$$

$$s_{max} := 8 \cdot t_c = 120 \text{ cm}$$

Tabela A.1 - Seção 9.1 - Fadiga no conector de cisalhamento

$$V_d := 0.5 \cdot Q_{CM_0} = 31.27 \text{ kN}$$

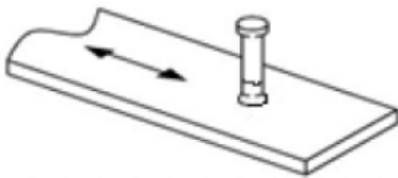
Categoria C'

$$C_f := 3.9 \cdot 10^8 \quad N := 3.5 \cdot 10^6$$

$$\sigma_{TH} := 69 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SR} := \max \left( (239 - 29.5 \log(N)) \text{ MPa}, \sigma_{TH} \right) = 69 \text{ MPa}$$

$$Z_r := \sigma_{SR} \cdot d_{sb}^2 = 33.396 \text{ kN}$$



Espaçamento entre linhas conectores de cisalhamento

$$s_{conec} := \min \left( \frac{100 \text{ cm}}{\left( \frac{V_d \cdot \frac{t_c \cdot b_c}{n} \cdot (d + e_c - YM)}{IM} \right) \cdot 100 \text{ cm}}, s_{calc} \right) = 69.684 \text{ cm}$$

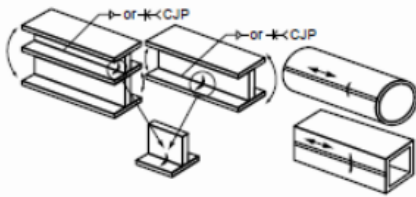
$$\frac{100 \text{ cm}}{n_c \cdot Z_r}$$

I) Fadiga nos elementos da longarina (NBR 16694:2020):

Momento Negativo:

$$\sigma_S := \frac{0.5 \cdot M_{CM}}{WIM} = 35.725 \text{ MPa} \quad \text{VUP} = 75 \text{ anos} \quad N := 3.5 \cdot 10^6 \quad (\text{Manual CBCA})$$

Tabela A.1 - Seção 3.1 - Solda de composição dos perfis soldados



Categoria B

$$C_f := 120 \cdot 10^8$$

$$\sigma_{TH} := 110 \text{ MPa}$$

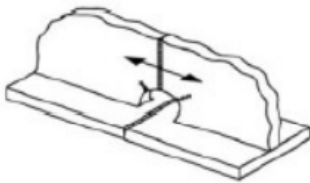
$$\sigma_{SR} := \max \left( \left( \frac{327 \cdot C_f}{N} \right)^{0.333} \text{ MPa}, \sigma_{TH} \right) = 110 \text{ MPa}$$

Verificação de cálculo

$$k := \frac{\sigma_S}{\sigma_{SR}} = 0.325$$

$$\text{Ver.} := \begin{cases} \text{if } k \leq 1 \\ \quad \text{“OK”} \\ \text{else} \\ \quad \text{“Não OK”} \end{cases} = \text{“OK”}$$

Tabela A.1 - Seção 3.3 - Nas extremidades das soldas longitudinais nas aberturas de acesso



Categoria D

$$C_f := 22 \cdot 10^8$$

$$\sigma_{TH} := 48 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{SR} := \max \left( \left( \frac{327 \cdot C_f}{N} \right)^{0.333} \text{ MPa}, \sigma_{TH} \right) = 58.776 \text{ MPa}$$

Verificação de cálculo

$$k := \frac{\sigma_S}{\sigma_{SR}} = 0.608$$

$$\text{Ver.} := \begin{cases} \text{if } k \leq 1 \\ \quad \text{“OK”} \\ \text{else} \\ \quad \text{“Não OK”} \end{cases} = \text{“OK”}$$

Tabela A.1 - Seção 4.1 - No pé da solda de enrijecedores transversais

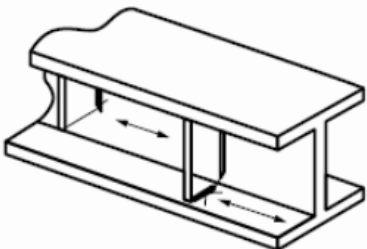
	<p>Categoria C</p> $C_f := 44 \cdot 10^8$ $\sigma_{TH} := 83 \text{ MPa}$ $\sigma_{SR} := \max \left( \left( \frac{327 \cdot C_f}{N} \right)^{0.333} \text{ MPa}, \sigma_{TH} \right) = 83 \text{ MPa}$
$k := \frac{\sigma_S}{\sigma_{SR}} = 0.43$	<p>Verificação de cálculo</p> $\text{Ver.} := \begin{cases} \text{if } k \leq 1 \\ \quad \text{"OK"} \\ \text{else} \\ \quad \text{"Não OK"} \end{cases} = \text{"OK"}$

Tabela A.1 - Seção 5.1 - Na emenda de topo das mesas

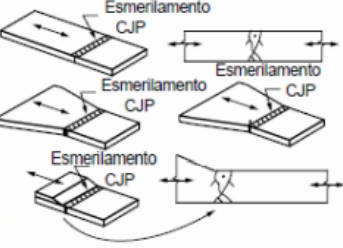
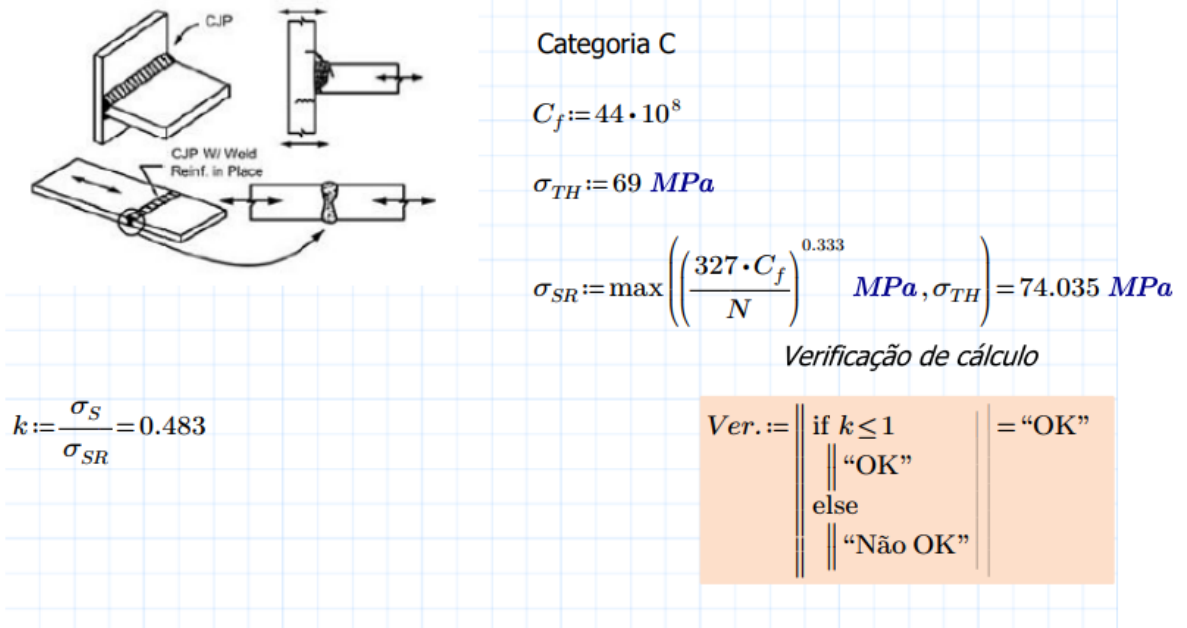
	<p>Categoria B</p> $C_f := 120 \cdot 10^8$ $\sigma_{TH} := 110 \text{ MPa}$ $\sigma_{SR} := \max \left( \left( \frac{327 \cdot C_f}{N} \right)^{0.333} \text{ MPa}, \sigma_{TH} \right) = 110 \text{ MPa}$
$k := \frac{\sigma_S}{\sigma_{SR}} = 0.325$	<p>Verificação de cálculo</p> $\text{Ver.} := \begin{cases} \text{if } k \leq 1 \\ \quad \text{"OK"} \\ \text{else} \\ \quad \text{"Não OK"} \end{cases} = \text{"OK"}$

Tabela A.1 - Seção 5.3 - Nas soldas de composição dos perfis



Com o dimensionamento apresentado a seção transversal do viaduto em viga de aço ficaria conforme mostrado na Figura 4-9 e Figura 4-10.

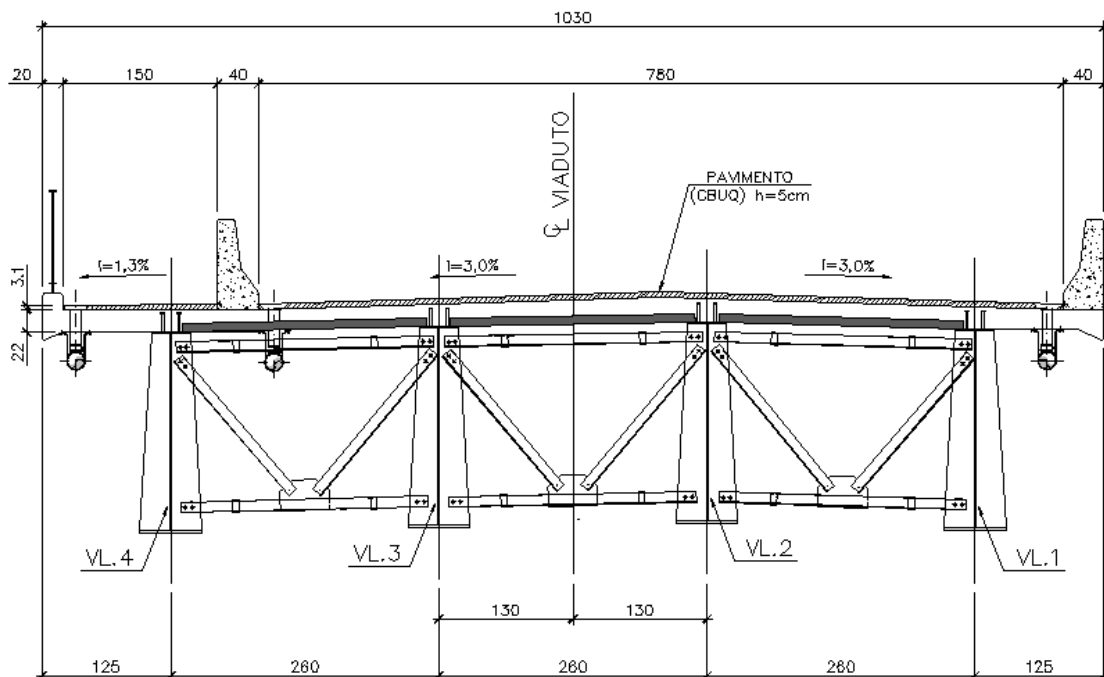
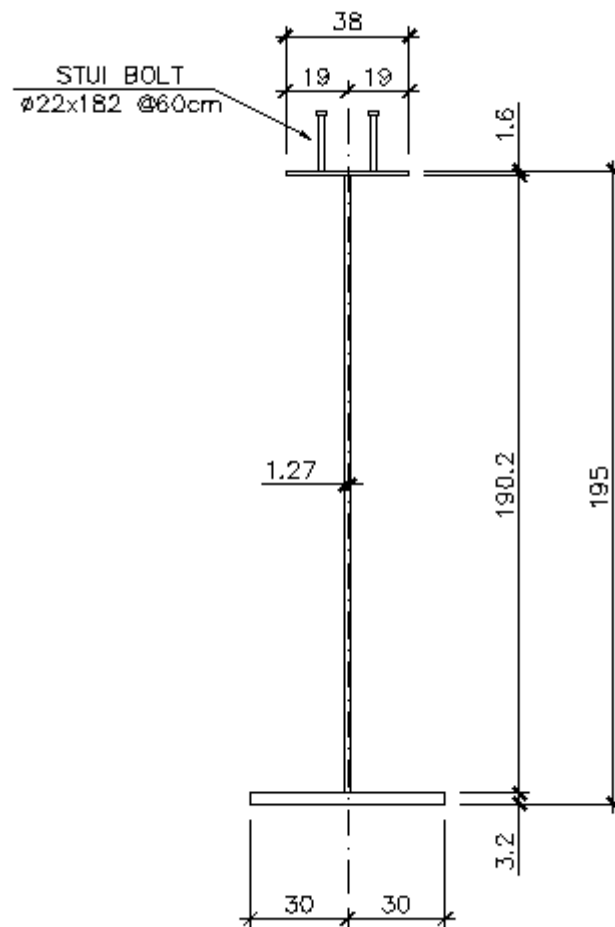


Figura 4-9: Seção transversal do viaduto



**Figura 4-10: Seção da viga aço**

## 4.2 QUANTITATIVOS

Abaixo nas Tabelas 1 e 2 será apresentado os quantitativos para a superestrutura do viaduto com base no projeto original em vigas pré fabricadas de concreto protendido e da superestrutura utilizando viga de aço conforme item 4.1.2.



QUADRO DE QUANTIDADES							
ITEM	CÓDIGO	DISCRIMINAÇÃO	ORIGEM PREÇO	UNID.	QUANTIDADES TOTAL	PREÇO UN.	PREÇO TOTAL
<b>VIADUTO - CONCRETO</b>							
<b>1</b>	<b>SUPERESTRUTURA</b>						
1.1	3108011	Formas de compensado plastificado 12 mm - uso geral - utilização de 1 vez - confecção, instalação e retirada	SICRO	m <sup>2</sup>	703,43	R\$ 140,81	R\$ 99.049,42
1.2	1116266	Concreto para bombeamento fck = 40 MPa - confecção em central dosadora de 40 m <sup>3</sup> /h - areia e brita comerciais	SICRO	m <sup>3</sup>	204,92	R\$ 478,35	R\$ 98.021,09
1.3	1107860	Lançamento mecânico de concreto com bomba lança sobre chassi com capacidade de 50 m <sup>3</sup> /h - confecção em central	SICRO	m <sup>3</sup>	204,92	R\$ 58,25	R\$ 11.936,30
1.4	1100657	Adensamento de Concreto por Vibrador de Imersão	SICRO	m <sup>3</sup>	204,92	R\$ 3,27	R\$ 670,07
1.5	0407819	Armação em aço CA-50 - fornecimento, preparo e colocação	SICRO	kg	33137,00	R\$ 11,94	R\$ 395.655,78
1.6	0407818	Armação em aço CA-25 - fornecimento, preparo e colocação	SICRO	kg	1215,00	R\$ 12,61	R\$ 15.321,15
1.7	3806426	Lançamento de pré-laje com utilização de guindaste	SICRO	t	33,87	R\$ 68,35	R\$ 2.314,93
1.8	4507956	Cordoalha CP 190 RB D = 12,7 mm - fornecimento e instalação	SICRO	kg	5508,80	R\$ 13,93	R\$ 76.737,58
1.9	3806421	Lançamento de viga pré moldada de até 500 kN ate 750 kN com utilização de guindaste	SICRO	un.	4,00	R\$ 4.597,37	R\$ 18.389,48
1.10	4507835	Bainha metálica redonda D = 65 mm para 12 cordoalhas D = 12,7 mm - fornecimento, instalação e injeção de nata de cimento	SICRO	m	577,60	R\$ 83,96	R\$ 48.495,30
1.11	4507755	Ancoragem ativa com 12 cordoalhas aderentes D = 12,7 mm - fornecimento e instalação	SICRO	un.	32,00	R\$ 1.139,09	R\$ 36.450,88
1.12	0307733	Junta de dilatação em elastômero e perfil VV - L = 20 mm e H = 40 mm - fornecimento e instalação	SICRO	m	17,20	R\$ 395,21	R\$ 6.797,61
1.13	0307084	Lábios poliméricos em junta de pavimento de concreto - L = 20 mm e H = 40 mm - confecção e assentamento	SICRO	m	34,40	R\$ 28,72	R\$ 987,97
<b>TOTAL</b>						<b>R\$</b>	<b>810.827,56</b>

**Tabela 1 – Quantitativos para viaduto com pré fabricada de concreto**

QUADRO DE QUANTIDADES							
ITEM	CÓDIGO	DISCRIMINAÇÃO	ORIGEM PREÇO	UNID.	QUANTIDADES TOTAL	PREÇO UN.	PREÇO TOTAL
<b>VIADUTO - METÁLICA</b>							
<b>1</b>	<b>SUPERESTRUTURA</b>						
1.1	3108011	Formas de compensado plastificado 12 mm - uso geral - utilização de 1 vez - confecção, instalação e retirada	SICRO	m <sup>2</sup>	98,99	R\$ 140,81	R\$ 13.938,78
1.2	1116266	Concreto para bombeamento fck = 40 MPa - confecção em central dosadora de 40 m³/h - areia e brita comerciais	SICRO	m³	95,64	R\$ 478,35	R\$ 45.749,39
1.3	1107860	Lançamento mecânico de concreto com bomba lança sobre chassi com capacidade de 50 m³/h - confecção em central	SICRO	m³	95,64	R\$ 58,25	R\$ 5.571,03
1.4	1100657	Adensamento de Concreto por Vibrador de Imersão	SICRO	m³	95,64	R\$ 3,27	R\$ 312,74
1.5	0407819	Armação em aço CA-50 - fornecimento, preparo e colocação	SICRO	kg	16974,00	R\$ 11,94	R\$ 202.669,56
1.6	3806426	Lançamento de pré-laje com utilização de guindaste	SICRO	t	33,87	R\$ 68,35	R\$ 2.314,93
1.7	4507956	Cordoalha CP 190 RB D = 12,7 mm - fornecimento e instalação	SICRO	kg	429,60	R\$ 13,93	R\$ 5.984,33
1.8	100764	Viga metálica em perfil laminado ou soldado em aço estrutural, com conexões soldadas, incluso mão de obra, transporte e içamento utilizando guindaste -	SINAPI	kg	58556,96	R\$ 15,71	R\$ 919.929,84
1.9	100729	Pintura com tinta epoxidica de acabamento pulverizada sobre perfil metálico executado em fábrica (por demão). AF_01/2020_PE	SINAPI	m²	890,00	R\$ 19,85	R\$ 17.666,50
1.10	040825	Fornecimento e montagem de "stud bolt's" aplicado estrutura aço	SBC	kg	252,00	R\$ 18,72	R\$ 4.717,37
1.11	0307733	Junta de dilatação em elastômero e perfil VV - L = 20 mm e H = 40 mm - fornecimento e instalação	SICRO	m	17,20	R\$ 395,21	R\$ 6.797,61
1.12	0307084	Lábios poliméricos em junta de pavimento de concreto - L = 20 mm e H = 40 mm - confecção e assentamento	SICRO	m	34,40	R\$ 28,72	R\$ 987,97
<b>TOTAL</b>						<b>R\$</b>	<b>1.226.640,06</b>

Tabela 2 – Quantitativos para viaduto com viga de aço

PESO DA SUPERESTRUTURA	
Viga pré fabricada	550 tf
Viga metálica	315 tf

**Tabela 3 – Peso das superestrutura**

### 4.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir dos dados apresentados nas Tabelas 1 e 2, observa-se que o projeto em estruturas de vigas pré fabricadas em concreto protendido comparado com o projeto em vigas de aço é uma alternativa mais viável em relação a custo benefício, pois a superestrutura do viaduto em vigas pré fabricadas tem um valor de R\$ 810.827,56 e em vigas de aço o valor é de R\$ 1.226.640,06, sendo a opção em vigas pré fabricadas um equivalente a 66,1% da opção em vigas de aço.

O peso apresentado na Tabela 3 para a superestrutura em vigas pré fabricadas e vigas de aço mostra que o peso da estrutura de aço é de 57% da estrutura com vigas pré fabricadas.

## 5 CONCLUSÕES

A partir da discussão dos resultados, podemos concluir que o projeto em vigas pré fabricadas é o mais econômico, pois apresenta uma economia na ordem de R\$ 416 mil. A economia apresentada para o projeto em viga pré fabricada era o esperado, devido a grande maioria dos viadutos projetados e construídos com geometria similar serem em vigas pré fabricadas, justamente pelo fato de serem de menor custo.

Contudo, apenas com os dados e valores apresentados não se pode optar por uma solução ou outra. Ainda existe diversos fatores que podem influenciar na decisão do projeto, como: tempo de execução, tamanho do vão, disponibilidade de material na região, arquitetura da estrutura, sistema de montagem adotado dentre outros.

Todavia, o projeto com vigas de aço apresenta um peso bem inferior comparado com a viga pré fabricada. Essa redução de peso na ordem de 240tf leva a uma economia considerável na mesoestrutura e infraestrutura do viaduto e portanto o custo total da obra deve ser analisado.

Para trabalhos futuros, podem-se sugerir estudos da análise da diferença de custos para mesoestrutura e infraestrutura deste viaduto estudado.

## 6 BIBLIOGRAFIA

ABNT NBR 8800 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. - Rio de Janeiro, Rio de Janeiro : Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.

ABNT NBR 7187 – Projeto de pontes, viadutos e passarelas de concreto. - Rio de Janeiro, Rio de Janeiro : Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021.

ABNT NBR 7188 – Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. - Rio de Janeiro, Rio de Janeiro : Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.

ABNT NBR 16694 – Projeto de pontes rodoviárias de aço e mistas de aço e concreto. - Rio de Janeiro, Rio de Janeiro : Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020.

KIRCHHOF, Larissa Degliuomini. **Uma contribuição ao estudo de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas em temperatura ambiente e em situação de incêndio.** 2004. Dissertação - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

ALMEIDA, Daniel Gomes Cabral de. **Análise comparativa de deslocamentos e esforços solicitantes de um edifício alto através de modelos estruturais distintos pelo MEF.** 2009 - Dissertação - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

FAKURI, Ricardo Hallal; SILVA, Ana Lydia R. de C. e; CALDAS, Rodrigo Barreto; **Dimensionamento de Elementos Estruturais de Aço e Mistos Aço e Concreto.** 1. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

BRASIL, Caixa Econômica Federal. Preços de Insumos e Custos de Composições: Sistema Nacional de Custos e Índices de Construção Civil – SINAPI. Minas Gerais: Caixa, 2022. Disponível em: [https://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-a-partir-jul-2009-mg/SINAPI\\_ref\\_Insumos\\_Composicoes\\_MG\\_102022\\_Desonerado.zip](https://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-a-partir-jul-2009-mg/SINAPI_ref_Insumos_Composicoes_MG_102022_Desonerado.zip). Acesso em: 10 dez. 2022.

BRASIL, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT. Preços de Insumos e Custos de Composições: Sistema de Custos Rodoviários – SICRO. Minas Gerais: DNIT, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro/sudeste/minas-gerais/2022/julho/mg-07-2022.zip>. Acesso em: 10 dez. 2022.