

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM
ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO E AÇO

COMPARAÇÃO DO PESO DE LONGARINAS DE PONTES
RODOVIÁRIAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO PARA DIFERENTES
VÃOS ESTRUTURAIS

ERMELINDO GERALDO RODRIGUES

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE
ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO E AÇO

**COMPARAÇÃO DE PESO DE DIFERENTES COMPRIMENTOS DE VÃOS
DE PONTES RODOVIÁRIAS DE CONSTRUÇÃO MISTA**

ERMELINDO GERALDO RODRIGUES

Trabalho Final apresentado ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Especialista em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço".

Orientador: Prof. Hermes Carvalho

Comissão Examinadora:

Prof. Hermes Carvalho, D.Sc.
DEES – UFMG (Orientador)

Prof. Sebastião Salvador Real Pereira, D.Sc.
DEES – UFMG

Belo Horizonte, 26 de outubro de 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pela vida e pelas oportunidades que me são concedidas diariamente.

A minha querida esposa e filhos por suportar minhas ausências, mesmo estando junto deles, no período dedicado ao curso.

A meus pais e irmãos pela confiança e respeito de sempre.

Ao professor Hermes Carvalho pelas aulas ministradas e pela gentileza em me orientar e contribuir na conclusão desse trabalho.

Aos demais professores do DEES-UFMG por suas gentilezas e disponibilidades em atender minhas solicitações de aluno.

Resumo

A evolução nas construções de pontes e seus diversos tipos corresponde à descoberta e desenvolvimento de novos materiais de engenharia. Para definição do tipo de ponte a ser construída vários fatores são considerados na sua concepção, porém a obtenção de vãos mais longos e estruturas mais leves é uma busca constante dos projetistas. A ponte mista é uma junção das vigas metálicas com o tabuleiro de concreto em que há a solidarização dos dois materiais, garantidos por elementos de ligação, denominados conectores de cisalhamento. Estruturas mistas de aço e concreto aplicadas em pontes apresentam, como principais vantagens, menor custo na fundação, uma vez que o aço é mais leve comparado ao concreto e permite atingir vãos mais longos. Este trabalho apresenta um comparativo do peso estrutural do tabuleiro de ponte bi apoiada composta de 4 vigas soldadas de alma cheia e seção mista para diferentes vãos estruturais. A metodologia para realizá-lo compreendeu o dimensionamento de 6 pontes com comprimento de vãos diferentes, e mesma largura.

Palavras-chave: ponte mista; tabuleiro; peso estrutural; vão; dimensionamento.

Abstract

The evolution in bridge constructions and their various types corresponds to the discovery and development of new engineering materials. In order to define which type of bridges to be constructed, several factors are considered in its design, however, obtaining long spans and light structures are a constant search of the designers. The mix bridge is a junction of the metal beams with the concrete tray in which there is a bonding of both materials, secured by connecting elements, called shear connectors. Mix steel structures and concrete applied to bridges have as the main advantages, lower foundation cost, since the steel is lighter compared to concrete and allows longer spans. This work presents a comparison of the structural weight of the bi-supported bridge tray composed of 4 welded full-web beams and mixed section for different structural spans. The methodology to realize it comprised the sizing of 6 bridges with different lengths of spans, and the same width.

Key Words: composite bridge; deck; structural weight; span; dimensioning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Seção transversal da ponte mista	13
Figura 3.4.5 - Esquema para formação do trem-tipo	20
Figura 3.4.7.1 - Carga móvel na viga de aço	21
Figura 3.4.7.2 - Cisalhamento máximo – carga móvel.....	21
Figura 3.4.7.3 - Momento fletor máximo – carga móvel	21

LISTA DE TABELAS, QUADROS E GRÁFICOS

Tabela 3.1- dados da ponte mista	13
Tabela 3.2- Propriedades do aço e concreto	14
Tabela 3.4.1- Recomendações para adoção do perfil metálico	15
Tabela 3.4.2 - Comprimento de flambagem por flexão e torção	15
Tabela 3.4.3- Dimensões e propriedades geométricas da seção transversal-perfil metálico.....	15
Tabela 3.4.4 - Características dos veículos	18
Tabela 3.4.5 – Trem-tipo	19
Tabela 3.4.6 - Determinação do coeficiente de impacto	20
Tabela 3.4.8 - Resumo dos esforços solicitantes de cálculo.....	22
Quadro 4.4.1 - Resumo do dimensionamento dos tabuleiros	31
Gráfico 4.4.1 - Relação entre peso das longarinas e o vão da estrutura	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVO	11
3	METODOLOGIA	12
3.1	Dados das pontes de seção mista	12
3.2	Propriedades dos materiais – vigas metálicas e laje	13
3.3	Programas computacionais	14
3.4	Dimensionamento	14
3.4.1	Escolha do perfil metálico	14
3.4.2	Dados da laje de concreto e pavimentação	16
3.4.3	Ações	16
3.4.4	Fatores de distribuição	19
3.4.5	Coeficiente de impacto vertical	20
3.4.6	Carregamento móvel sobre uma longarina	20
3.4.7	Combinações e envoltórias	21
3.4.8	Carga total na viga mista	21
4	DIMENSIONAMENTO DAS LONGARINAS	22
4.1	Verificação da viga de aço isolada	22
4.2	Verificação da seção mista	26
4.3	Verificação do estado limite de serviço - deslocamento vertical (flecha)	30
4.4	Quadro resumo do dimensionamento dos tabuleiros	30
5	CONCLUSÃO	33

1 INTRODUÇÃO

As pontes mistas com vigas principais em aço e tabuleiro em concreto armado começaram a ser construídas a partir de 1930 e incrementadas após a Segunda Guerra Mundial. Nessas pontes, as vigas metálicas são constituídas de perfil laminados, soldados ou formados a frio. Desde então os sistemas estruturais formados por elementos mistos tem sido amplamente empregados na construção civil, principalmente na construção de pontes, viadutos e edifícios. Numa estrutura mista o aço e o concreto trabalham conjuntamente, sendo o concreto geralmente armado. A combinação de perfis de aço e concreto visa aproveitar as vantagens apresentadas pelo aço e pelo concreto isoladamente e compensar suas desvantagens, tanto em termos estruturais, quanto construtivos ou econômicos. Quanto ao aspecto estrutural, os elementos de aço caracterizam-se pela elevada resistência à tração e ductilidade. Já, o concreto possui boa resistência à compressão e rigidez.

As pontes metálicas são amplamente utilizadas em projetos que requerem grandes vãos livres. Entretanto, quando se considera a estrutura como viga mista aço-concreto, os projetos de pontes metálicas conseguem concorrer com os de concreto armado ou protendido, mesmo em casos em que os vãos livres encontram-se abaixo dos 50 metros (SIDERBRÁS, 1989). Além disso, quando comparada ao sistema não misto, as vigas mistas proporcionam uma considerável economia de aço. Em relação às estruturas de concreto armado ou protendido, as vigas mistas possuem menor peso próprio, o que acarreta maior economia em projetos de pilares e fundações.

2 OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é apresentar um comparativo dos pesos obtidos para diferentes vãos de longarinas mistas de aço e concreto presentes em pontes rodoviárias bi-apoiadas, considerando ligações soldadas e perfis de alma cheia. O dimensionamento será realizado em conformidade com a norma brasileira ABTN NBR 8800:2008 e os carregamentos móveis obtidos através da norma ABNT NBR 7188:2013.

3 METODOLOGIA

Para obtenção dos resultados, ou seja, o peso da estrutura metálica dos tabuleiros, efetuam-se os dimensionamentos das pontes, avaliando os parâmetros solicitantes e resistentes de cálculo.

Inicialmente faz-se o pré-dimensionamento do tabuleiro de cada ponte, vigas e laje, e, através de critérios de projeto, obtêm-se dimensões mínimas ou recomendadas para o perfil metálico e espessura de laje. O dimensionamento e sua verificação é feito em duas fases: aço isolado e viga mista. Os esforços solicitantes de cálculo são obtidos através de ações permanentes na estrutura de aço, ações permanentes na estrutura mista, ações móveis na estrutura mista, resultados nas respectivas combinações e envoltórias de momento fletor e cisalhamento na seção longitudinal. O momento fletor resistente de cálculo e resistência ao cortante são comparados com valores solicitantes de cálculo. Adicionalmente efetua-se a verificação dos estados limites de serviço através do cálculo do deslocamento vertical máximo da viga mista.

As vigas foram dimensionadas conforme as prescrições da ABNT NBR 8800:2008.

3.1 Dados das pontes de seção mista

Como dados básicos e principais as pontes atendem às seguintes características apresentadas na tabela 3.1 e figura 3.1.

Cada ponte é composta de pista dupla, em duas faixas de tráfego de 3600mm cada, acostamentos de 3000mm cada, com largura total de 13200mm. Os comprimentos de vãos variam de 15m a 50m.

Tabela 3.1- Dados da ponte mista.

Dados da ponte mista		
Classe de projeto	I - A	
Característica de pista	Dupla - controle parcial de acesso	
Região	Plana	
Nº faixas trafego	2	
Largura faixa rolamento	3600	mm
Largura Acostamento externo	3000	mm
Largura do guarda rodas	400	mm
Largura total	13200	mm
Espaçamento entre vigas (longarinas)	3400	mm
Distancia viga externa - pista externa	1500	mm
Rampa máxima	3	%

Cada ponte é composta de 4 vigas longitudinais (longarinas) distanciadas entre si de 3400mm.

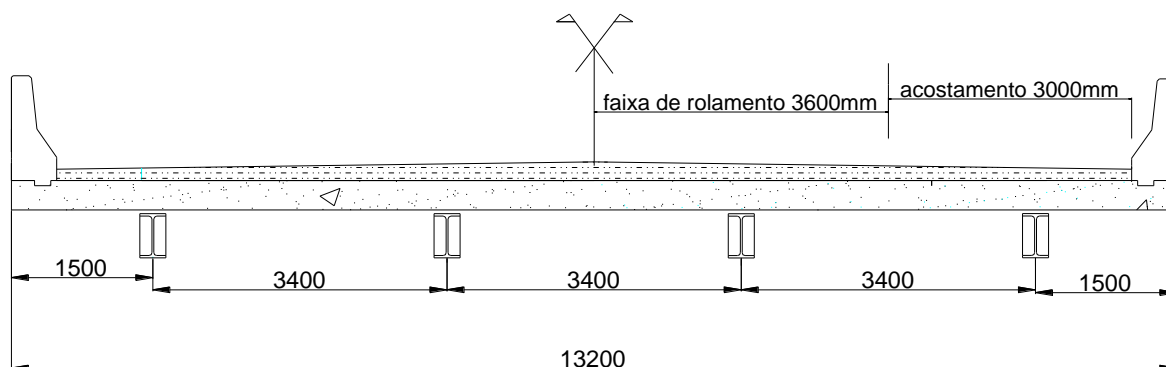


Figura 3.1 – Seção transversal da ponte mista.

3.2 Propriedades dos materiais – vigas metálicas e laje

A tabela 3.2 apresenta as propriedades do aço e do concreto consideradas no dimensionamento das pontes mistas.

Tabela 3.2- Propriedades do aço e concreto

Propriedades da viga de aço e laje de concreto			
Peso específico do aço		78,5	kN/m ³
Peso específico do concreto armado		25	kN/m ³
Peso específico da pavimentação		24	kN/m ³
Peso do recapeamento		2	kN/m ²
Fck do concreto		30	MPa
Ea		200000	MPa
Ec		26072	MPa
Aço A588 G50	fy=	35	kN/cm ²
	fu=	50	kN/cm ²

3.3 Programas computacionais

- Ftool – versão 3.2
- AutoCAD – versão 2010
- Aplicativos Microsoft office

3.4 Dimensionamento

Esse item apresenta o dimensionamento desenvolvido para a ponte com vão igual a 30000mm. A tabela 3.4.1 apresenta valores recomendados e mínimos adotados para cálculo das pontes, conforme a norma AASHTO LRFD: *Bridge Design Specifications*, Washington, 2013.

3.4.1 Escolha do perfil metálico

A escolha do perfil metálico para dimensionamento foi feita aplicando recomendações, para posterior verificação, conforme apresentado na tabela 3.4.1.

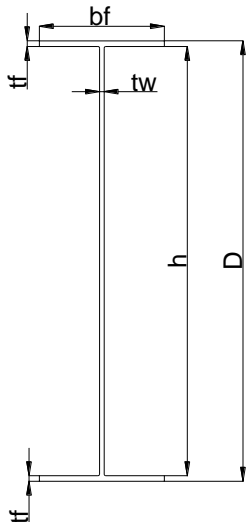
Tabela 3.4.1- Recomendações para adoção do perfil metálico

Recomendações aplicadas /Adotadas para o dimensionamento				
Vão da ponte	L		30000	mm
Altura da Viga	D	$0,033 \times L$	990	mm
Altura total (viga + laje)	D+ts	$0,04 \times L$	1200	mm
Espessura da laje	Ts	(D+ts)-D	240	mm
Espessura da alma	Tw	$D/tw \leq 150$ (80 a 100 mm)	22	mm
Espessura da mesa	tf	$\geq 1,1 \times tw$	25	mm
Largura da mesa	bf	$\geq D/6$	550	mm
	bf/2tf	≤ 12	11	Ok!

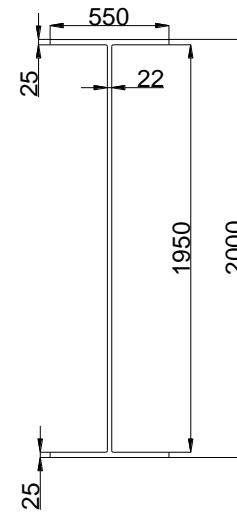
Tabela 3.4.2 - Comprimento de flambagem por flexão e torção

Distancia para talas de contraventamento		400	mm
Longarina	KxLx	30	m
	KzLz	4,3	m
	KyLy	4,3	m
	Lb	4,3	m

Tabela 3.4.3- Dimensões e propriedades geométricas da seção transversal do perfil metálico.



Perfil Adotado		
D	2000	mm
bf	550	mm
tf	25	mm
tw	22	mm
h	1950	mm
Área perfil	704	cm ²
Peso próprio	5,4	kN/m
I _x	4041216,67	cm ⁴
I _y	69500,38	cm ⁴
c _w	0,03941	m ⁶
W _x =I _x /(D/2)	0,00404122	m ³
W _y =I _y /(bf/2)	0,00252729	m ³



3.4.2 Dados da laje de concreto e pavimentação

Espessura laje	ts: 240mm
Largura efetiva da laje	bef: 3400mm
Resistência à compressão do concreto	Fck: 30 MPa
Peso específico do concreto armado	γ : 25 kN/m ³
Peso específico pavimentação	γ_1 : 24 kN/m ³

3.4.3 Ações

Ações permanentes na estrutura de aço

- Carregamento antes da cura – C1

FGK Viga de aço

$$78,5\text{kN/m}^3 \times 0,0704\text{m}^2 = 5,40 \text{ kN/m}$$

FGK Formas

$$0,75\text{kN/m}^2 \times 3,4\text{m} = 2,55 \text{ kN/m}$$

FQK Sobrecarga de concretagem

$$1,0 \text{ kN/m}^2 \times 3,4\text{m} = 3,4 \text{ kN/m}$$

FQK Laje de concreto

$$25\text{kN/m}^3 \times 0,24\text{m} = 6,00\text{kN/m}^2$$

$$6,00\text{kN/m}^2 \times 13,2\text{m} = 79,2 \text{ kN}$$

$$\text{Carregamento por longarina} = 19,8 \text{ kN/m}$$

$$C1 = 1,4 \cdot \text{FGK} + 1,5 \cdot \text{FQK} =$$

$$C1 = 1,4 \times (5,4 + 2,55) + 1,5 \times (3,4 + 19,8) = 45,93 \text{ kN/m} \quad \text{- Carga total}$$

$$V_{sd} = q \cdot l / 2 = 45,93 \times 30 / 2 = 689,50 \text{ kN}$$

$$M_{sd} = q \cdot l^2 / 8 = 45,93 \times (30)^2 / 8 = 5171,28 \text{ kN.m}$$

Ações permanentes na estrutura mista

- Carregamento após a cura - C2

F_{GK} - Viga de aço

$$78,5\text{kN/m}^3 \times 0,0704\text{m}^2 = 5,5 \text{ kN/m}$$

F_{GK} - Laje de concreto

$$25\text{kN/m}^3 \times 0,24\text{m} = 6,0 \text{ kN/m}^2$$

$$6,0 \text{ kN/m}^2 \times 13,2\text{m} = 79,2 \text{ Kn}$$

Carregamento por longarina 19,8 kN/m

F_{GK} - Pavimentação

$$24\text{kN/m}^2 \times 0,08\text{m} = 1,92\text{kN/m}^2$$

$$1,92\text{kN/m}^2 \times 13,2\text{m} = 25,34\text{kN/m}$$

$$25,34\text{kN/m} : 4 = 6,34 \text{ kN/m}$$

F_{GK} - Recapeamento

$$2\text{kN/m}^2 \times 13,2\text{m} = 26,4\text{kN/m}$$

Carregamento por longarina 6,6 kN/m

F_{GK} - Guarda-rodas

$$0,216\text{m}^2 \times 25\text{kN/m}^2 = 5,4\text{kN} \quad 6,0 \text{ kN/m}$$

$$\Sigma F_{GK} \quad \mathbf{44,3 \text{ kN/m}}$$

Cortante: $1,4 \times V_{CP}$

$$\Sigma F_{GK} = 44,3\text{kN/m} = 1,4 \times 44,3 = 61,97\text{kN}$$

$$V_{CP} = qL/2 = 44,3 \times 30 / 2 = 664,5\text{kN}$$

$$\text{Cortante: } 1,4 \times 664,5\text{kN} = 929,51 \text{ kN/m}$$

Momento: $1,4 \times M_{CP}$

$$M_{CP} = qL^2/8 = 44,3 \times (30)^2 / 8 = 4983,75 \text{ kN.m}$$

Momento: $1,4 \times 4983,75 \text{ kN.m} = 6971,33 \text{ kN.m}$

Carga móvel = $1,5 \times \text{FMK}$ - (cálculo nas páginas seguintes)

Ações móveis na estrutura mista

A carga móvel rodoviária tipo 45 é definida por um veículo tipo de 450kN com 6 rodas, 75kN por roda, 3 eixos de carga afastados entre si de 1,5m. Com área de ocupação de $18,0\text{m}^2$, circundado por uma carga uniformemente distribuída constante $P = 5\text{kN/m}^2$, conforme tabelas 3.4.4 e 3.4.5.

Tabela 3.4.4 – Características dos veículos (ABNT NBR 7188:2013)

	Unidade	Tipo 45	Tipo 30	Tipo 12
Quantidade de eixos	Eixo	3	3	2
Peso total de veículo	kN-tf	450-45	300-3	120-2
Peso de cada roda dianteira	kN-tf	75-7,5	50-5	20-2
Peso de cada roda traseira	kN-tf	75-7,5	50-5	40-4
Peso de cada roda intermediária	kN-tf	75-7,5	50-5	-
Largura de contato b_1 de cada roda dianteira	m	0,50	0,40	0,20
Largura de contato b_3 de cada roda dianteira	m	0,50	0,40	0,30
Largura de contato b_2 de cada roda dianteira	m	0,50	0,40	-
Comprimento de contato de cada roda	m	0,20	0,20	0,20
Área de contato de cada roda	m^2	0,20xb	0,20xb	0,20xb
Distância entre os eixos	m	1,50	1,50	3,00
Distância entre os centros de roda de cada eixo	m	2,00	2,00	2,00

Tabela 3.4.5 – Trem-tipo (ABNT NBR 7188:2013)

	Trem tipo	
	Tipo	45
	Classe da ponte	45
	Peso total	450kN
	Carga por roda	75kN
	P(carga distribuída)	5kN/m ² (carga multidão)

3.4.4 Fatores de distribuição

Como o sistema estrutural é composto por uma grelha espacial faz-se necessário a consideração de fatores de distribuição para os estados limites últimos e de serviço, baseados em equações empíricas, conforme item 4.6.2.2.2 – AASHTO.

Para obtenção dos fatores de distribuição das vigas externas é necessário avaliar várias situações, e aquela que tiver o maior valor dominará o dimensionamento. Nesse trabalho o cálculo foi desenvolvido aplicando o método da regra da alavanca, conforme especificado na tabela 4.6.2.2.2d-1 da AASHTO. A regra da alavanca assume que o tabuleiro é rotulado na primeira viga interior, isto é, considera que o somatório de momento na primeira viga interna seja nulo. O veículo deve ser disposto de maneira que um dos seus eixos ou rodas fique o mais perto possível da parte interna da barreira de proteção. A reação calculada na viga externa deve ser multiplicada pelo fator de presença para uma faixa carregada, para obter o valor final do fator de distribuição.

Para a seção transversal considerada, o coeficiente de distribuição de momentos e de esforços cortantes mais crítico foi igual a 1,058, e adotado o mesmo para as vigas internas e externas.

3.4.5 Coeficiente de impacto vertical

Os coeficientes aplicados nos cálculos estão conforme a ABNT NBR 7188:2013, itens 5.1.2.1 a 5.1.2.3.

Tabela 3.4.6 – Determinação do coeficiente de impacto

Coeficiente	Descrição	Fórmula	Valor
CIV	Coeficiente Impacto Vertical	$1+1,06[20/(liv+50)]$	1,27
CNF	Coeficiente Números Faixas	-	1,00
CIA	Coeficiente Impacto Adicional	-	1,25

Esquema para formação do trem-tipo

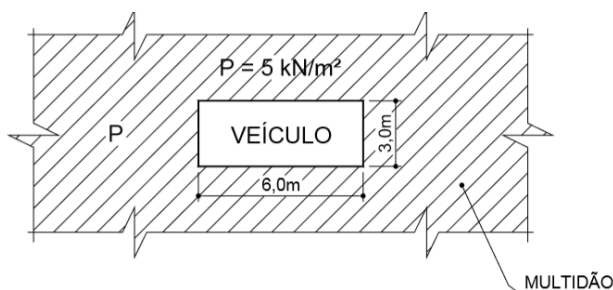


Figura 3.4.5 – Esquema para formação do trem-tipo

3.4.6 Carregamento móvel sobre uma longarina

Carregamento distribuído (multidão)	carga mult. x S	$5 \times 3,4 = 17,0$	kN/m
Carga P trem-tipo para carga distribuída	L do TT x Carreg dist.	$6 \times 17 = 102$	kN
Carga P distribuída para 3 eixos veículo	Carga P TT / 3	$102:3 = 34$	kN

- Carregamento viga - momento fletor

Fator de distribuição (FD) - momento fletor		1,058	kN
Carga P Norma x FD	$(150-34) \times 1,058 =$	122,73	kN
Carga P x coeficiente de Impacto	$122,73 \times 1,27 =$	155,87	kN
Carga de multidão x FD	$17 \times 1,058 =$	18,00	kN
(Carga de multidão x FD) x coeficiente de impacto	$18 \times 1,27 =$	22,86	kN/m

3.4.7 Combinações e envoltórias

- Envoltórias de momento fletor – seção longitudinal

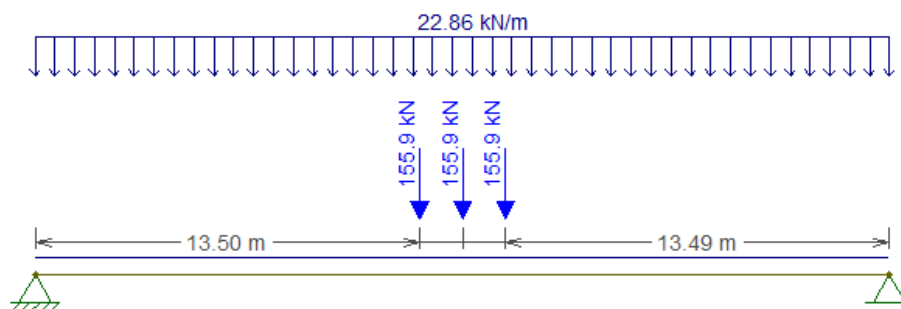


Figura 3.4.7.1 - Carga móvel na viga de aço

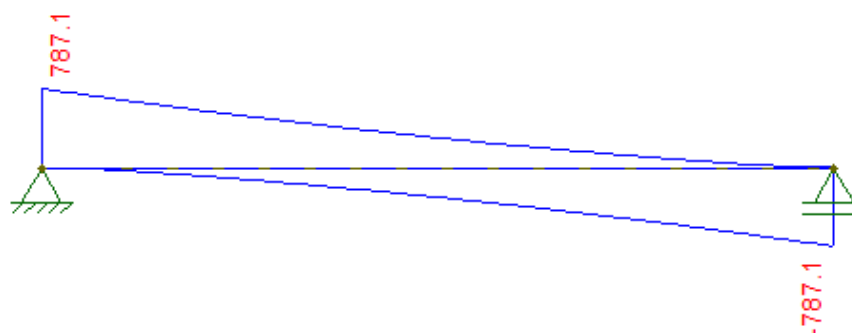


Figura 3.4.7.2 - Cisalhamento máximo – carga móvel

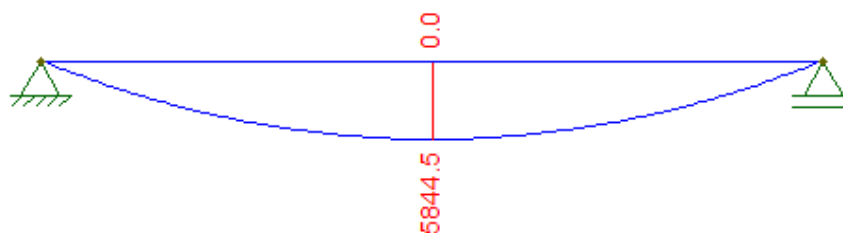


Figura 3.4.7.3 - Momento fletor máximo – carga móvel

3.4.8 Carga total na viga mista

- Cálculo de C2 - carga total na viga mista – M_{SD}

Carga permanente FGK : 4983,75 kN.m

Carga móvel FMK : 5844,5 kN.m

$$C2 = 1,4 \text{ FGK} + 1,5 \text{ FMK}$$

$$\text{Cortante:} \quad C2 = 1,4 (664,5) + 1,5 (787,1) = 2110,9 \text{ kN}$$

$$\text{Momento:} \quad C2 = 1,4 (4983,75) + 1,5 (5844,5) = 15737,9 \text{ kN.m}$$

$$M_{sd} \text{ (viga mista)} = 15737,9 \text{ kN.m}$$

$$V_{sd} \text{ (viga mista)} = 2110,9 \text{ kN}$$

A tabela a seguir apresenta o resumo de todos os esforços solicitantes máximos adotados para o dimensionamento das longarinas da ponte mista de aço e concreto.

Tabela 3.4.8 - Resumo dos esforços solicitantes de cálculo.

C1 cargas permanentes (total) na estrutura de aço - Antes da cura -	q	44,3	kN/m
	$V_{sd} \text{ (cort)}$	664,5	kN
	M_{sd}	4983,75	kN.m
C2 cargas permanentes (total) na viga mista - Após a cura -	$V_{sd} \text{ (cort)}$	$1,4V_{CP} + 1,5V_{CM} = 1,4(664,5) + 1,5(787,1) = 2110,9$	kN
	M_{sd}	15737,9	kN.m

4 DIMENSIONAMENTO DAS LONGARINAS

4.1 Verificação da viga de aço isolada

Cálculo de resistência à flexão eixo y

$$\sigma_r = 30\% \cdot f_y = 0,3 \times 3500 = 1035 \text{ kg/cm}^2$$

$$W = I_x / (0,5D) = 0,03339 / (0,5 \times 1,9) = 0,04041 \text{ m}^3$$

$$Z = 0,04807 \text{ m}^3$$

$$M_{pl} = Z \cdot F_y = (0,04807 \times 35) \times 10^3 = 16584,15 \text{ kN.m}$$

Estados limites últimos (ELU) – Perfil isolado

Flambagem lateral com torção – FLT

$$I_z = \frac{bxh^3}{12} (\text{alma}) + 2x \frac{hxb^3}{12} (\text{mesa})$$

$$I_z = \frac{1,95 \times 0,022^3}{12} + 2x \frac{0,025 \times 0,55^3}{12} = 6,95E-04 \text{ m}^4$$

$$r_z = \left(\frac{I_z}{A}\right)^{0,5} = \left(\frac{6,95E-04}{704}\right)^{0,5} = 0,994 \text{ m}$$

$$r_y = \left(\frac{I_y}{A}\right)^{0,5} = \left(\frac{69500,38}{704}\right)^{0,5} = 0,7577 \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{lb}{r_z} = \frac{4,3}{0,0993} = 43,28$$

$$\lambda_p = 1,76 \times \left(\frac{E}{f_y}\right)^{0,5} = 1,76 \times \left(\frac{20000}{35}\right)^{0,5} = 42,07$$

$$b_1 = \left(\frac{f_y - \sigma_r}{E_j}\right) W_y = 3,91 \text{ /m}$$

$$(f_y - \sigma_r) = 0,7f_y = 0,7 \times 350 \times 10^6 = 245 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

$$\lambda_r = 120,85$$

$$M_r = (f_y - \sigma_r) \times W = (0,7 \times 350) \times 40,41 = 9900,9 \text{ kN.m}$$

$$C_b = 1$$

$$M_{pl} = Z \cdot f_y = 0,04807 \times (35 \times 10^4) = 16824,5 \text{ kN.m}$$

$$\lambda_p = 42,07 < \lambda = 43,28 < \lambda_r = 120,85 \quad \text{Calcula-se MRk}$$

$$M_{RK}^{(FLT)} = 16718,5 \text{ kN.m}$$

Flambagem local da mesa - FLM

$$\lambda = b/t = 550/2 \times 25 = 11,0$$

$$\lambda_p = 0,38 \times \left(\frac{E}{f_y}\right)^{0,5} = 0,38 \times \left(\frac{20000}{35}\right)^{0,5} = 9,08$$

$$K_c = 4 : \left(\frac{h}{t_w}\right)^{0,5} = 4 : \left(\frac{1950}{22}\right)^{0,5} = 0,425$$

$$\lambda_r = 0,95 \times \left(\frac{E \cdot K_c}{0,7 f_y}\right)^{0,5} = 0,95 \times \left(\frac{20000 \times 0,424}{0,7 \times 35}\right)^{0,5} = 17,69$$

$$\lambda_p = 9,08 < \lambda = 11,00 < \lambda_r = 17,69 \quad \text{Calcula-se MRk}$$

$$M_{RK}^{(FLM)} = 15283,3 \text{ kN.m}$$

Flambagem local da alma – FLA

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{1950}{22} = 88,64$$

$$\lambda_p = 3,76 \times \left(\frac{E}{f_y}\right)^{0,5} = 3,76 \times \left(\frac{20000}{35}\right)^{0,5} = 89,88$$

$$\lambda_r = 5,7 \times \left(\frac{E}{0,7 f_y}\right)^{0,5} = 5,7 \times \left(\frac{20000}{0,7 \times 35}\right)^{0,5} = 136,26$$

$$\lambda_p = 89,88 > \lambda = 88,64 \quad \text{- calcula-se então } M_{rk} = M_{pl}$$

$$M_{pl} = Z \cdot f_y = 0,04807 \times 350 \times 10^6 = 16.824,00 \text{ kN.m}$$

$$M_{rk} \text{ (FLA)} = M_{pl} = 16.824,50 \text{ kN.m}$$

$$M_{rk} \text{ (característico - FLM)} = 15.283,30 \text{ kN.m}$$

$$M_{yrd} = \frac{M_{rk}}{1,1} = \frac{15283,32}{1,1} = 13.893,92 \text{ kN.m}$$

ANÁLISE DOS RESULTADOS

$$\frac{M_{ysd}}{M_{yrd}} < 1,0 = \frac{5171,3}{13893,92} = 0,37 \quad \text{OK!}$$

Conclusão: A seção (perfil I de aço - isolado) atende

Cálculo resistência à cortante (eixo Z)

$$\lambda = \frac{h}{t} = \frac{1950}{22} = 88,636$$

$$K_v = \text{coef. flamb. local por cisalhamento} = 5$$

$$\lambda_p = 1,1 \times \left(\frac{K_v E}{f_y} \right)^{0,5} = 1,1 \times \left(\frac{5.20000}{35} \right)^{0,5} = 58,797$$

$$\lambda_r = 1,37 \times \left(\frac{K_v E}{f_y} \right)^{0,5} = 1,37 \times \left(\frac{5.20000}{35} \right)^{0,5} = 73,230$$

$$A_w = D \times t_w = 1,9 \times 0,02 = 0,044 \text{ m}^2$$

$$V_{pl} = 0,6 A_w \times f_y = 0,6 \times 0,038 \times 35 \times 10^4 = 9240,000 \text{ kN}$$

$$V_{rk} = 1,24 \times V_{pl} \times (l_p/l)^2 = 1,24 \times 9240 \times \left(\frac{58,79}{92,60} \right)^2 = 5041,817 \text{ kN}$$

$$V_{zrd} = \frac{V_{rk}}{1,1} = \frac{5041,82}{1,1} = 4593,5 \text{ kN}$$

Análise das cargas

$$V_{sd} = 689,5 \text{ kN}$$

$$V_{rd} = 4593,5 \text{ kN} \quad V_{sd} < V_{rd} \quad \text{OK!}$$

$$\frac{V_{sd}}{V_{rd}} < 1,0 = \frac{689,5}{4593,5} = 0,15 \quad \text{OK!}$$

CONCLUSÃO: A seção (perfil I de aço - isolado) atende

4.2 Verificação da seção mista

Critérios, conforme NBR ABNT 8800:2008

$$\lambda = \frac{h}{tw} = \frac{1950}{22} = 88,63$$

$$\lambda_{\text{lim inf}} = 3,76 \times \left(\frac{E}{f_y}\right)^{0,5} = 3,76 \times \left(\frac{20000}{35}\right)^{0,5} = 89,88$$

$\lambda_{\text{lim inf}} > h/tw$, O cálculo será feito usando propriedades plásticas da seção mista.

$$88,63 < 89,88 \quad \text{Ok!}$$

Largura efetiva da laje (bef)

bef: 3400m

Conector de cisalhamento

Quantidade, espaçamento e disposição construtiva dos conectores

Conector : Ø22 x132mm - tipo MB

dcs= 22mm > 19mm – OK!

hcs=132mm

$$Acs = 0,785 \times (2,2)^2 = 3,8\text{cm}^2$$

fucs =415 MPa

$$Ec = 0,85 \times 5600 \sqrt{f_{ck}} = 26071,6 \text{ Mpa} = 2607,2 \text{ kN/cm}^2$$

- Determinação de QRd

QRd (força resistente de cálculo de um conector) é o menor valor de:

$$QRd = \frac{Acs \cdot (f_{ck} \cdot Ec)^{0,5}}{2gcs} = \frac{3,8 \cdot (3 \times 2607,2)^{0,5}}{2 \times (1,25)} = 134,4 \text{ kN}$$

$$QRd = \frac{Rg \cdot Rp \cdot Acs \cdot fucs}{gcs} = \frac{1 \times 1 \times 3,8 \times 41,5}{1,25} = 126,16 \text{ kN}$$

$$QRd = 126,16 \text{ kN}$$

Coeficientes:

Rg=1 (coeficiente para consideração do efeito de atuação de grupo de conectores).

Rp=1 (coeficiente para consideração da posição do conector).

$g_{a1} = 1,1$ (coeficiente de ponderação da resistência do aço ao escoamento).

$g_c = 1,4$ (coeficiente de ponderação da resistência do concreto).

$g_{cs} = 1,25$ (coeficiente de ponderação da resistência do conector).

- Determinação F_{hd}

F_{hd} = esforço cortante longitudinal. Deve o menor entre R_{cd} e R_{td} .

Laje comprimida – (R_{cd})

$$R_{cd} = \frac{0,85 \cdot f_{ck} \cdot b \cdot t_c}{1,4} = \frac{0,85 \times 3000000 \times 3,95 \times 0,024}{1,4} = 14862,9 \text{ kN}$$

Viga de aço à tração - R_{td}

$$R_{td} = \frac{A_a \cdot f_y}{1,1} = \frac{(704 \times 10^{-4}) \times (350 \times 10^3)}{1,1} = 22.400,0 \text{ kN}$$

$$F_{hrd} = 14862,9 \text{ kN}$$

Será calculado considerando interação completa:

$$\sum Q_{rd} \geq F_{hd}$$

$$Q_{rd} = F_{hd} = 14862,9 \text{ kN}$$

- Determinação (n) número de conectores

Número de conectores de cisalhamento (stud bolt)

n = quantidade de conectores

$$n \geq \frac{F_{hd}}{Q_{Rd}} = \frac{14862,9}{126,16} = 136,87 \text{ conectores (entre o apoio e o ponto de } M_{\max})$$

- Verificação da distribuição dos conectores

1 linha de conectores: 137 unidades

Avaliação para disposição dos conectores em filas duplas ou triplas:

Altura do conector: $L_{\min} = 4\emptyset = 4 \times 22 = 88 \text{ mm}$

OK!

Cobrimento mín. superior do concreto: $t_c - 10 = 240 - 10 > h_{cs} = 132 \text{ mm}$ OK!
 Espaçamento long. máximo entre linhas centro: $8 \cdot t_c = 8 \times 240 = 1920 \text{ mm}$ OK!
 Espaçamento long. mínimo entre linhas centro: $6 \cdot d_{cs} = 6 \times 22 = 132 \text{ mm}$ OK!
 Espaçamento transversal mínimo: $4 d_{cs} = 4 \times 22 = 88 \text{ mm}$ OK!
 Cobrimento lateral do concreto: $\geq 2,5 \text{ mm}$ OK!
 Diâmetro do conector: $d_{cs} \leq 2,5 t_f - 22 \leq 2,5 \times 24$ OK!
 Espessura da mesa superior: $t_f \geq d_{cs} / 2,5 - 25 > 22 / 2,5 = 8,8$ OK!

- Posição da linha neutra plástica (LNP)

$$R_{cd} = 14862 \text{ kN}$$

$$R_{td} = 22.080 \text{ kN}$$

Como $R_{td} > R_{cd}$ a LNP está no perfil.

$(A - A_f) \cdot (f_y / 1,1) \leq A_f \cdot f_y / 1,1 + 0,85 f_{ck} \cdot b \cdot t_c / 1,4$ - LNP corta a mesa superior

$$[704 - (55 \times 2,5)] \cdot (35 : 1,1) \leq [55 \times 2,5] \times (35 : 1,1) + (0,85 \times 30 \times 10^3 \times 0,24) : 1,4$$

$$18025 \text{ kN} \leq 19237,86 \text{ kN}$$

Por equilíbrio:

$$\frac{0,85 \cdot f_{ck} \cdot b \cdot t_c}{1,4} + \frac{b_f \cdot X_2 \cdot f_y}{1,1} = \frac{b_f \cdot (t_f - X_2) \cdot f_y}{1,1} + \frac{(A - A_f) \cdot f_y}{1,1}$$

$$X_2 = 2,15$$

F_{id} = força de cálculo no centro do elemento retangular i de aço ou concreto.

$$M_{pl,Rd} = \sum F_{id} \cdot y_i = 24122,7 \text{ kN.m}$$

y_i = distancia F_{id} até a LNP.

$$M_{pl,Rd} = 24122,7 \text{ kN.m}$$

$$M_{sd} = 15740,0 \text{ kN.m}$$

$$M_{sd} : M_{Rd} \leq 1,0 = 15740,0 : 24122,7 = 0,65 \quad - \text{OK!}$$

- Verificação à força cortante

$$\lambda = \frac{h}{t} = \frac{1950}{24} = 88,73$$

$K_v =$ coeficiente de flambagem local por cisalhamento		5
$\lambda_p = 1,1 \times \left(\frac{K_v \cdot E}{f_y}\right)^{0,5} =$	$1,1 \times \left(\frac{5 \cdot 20000}{35}\right)^{0,5} =$	58,797
$\lambda_r = 1,37 \times \left(\frac{K_v \cdot E}{f_y}\right)^{0,5} =$	$1,37 \times \left(\frac{5 \cdot 20000}{35}\right)^{0,5} =$	73,23
$A_w = D \times t_w =$	$1,95 \times 0,022 =$	0,044 m ²
$V_{pl} = 0,6 A_w \times f_y =$	$(0,6 \times 0,044 \times 35 \times 10^4) =$	9240 kN
$V_{Rk} = 1,24 (\lambda_p / \lambda)^2 \times V_{pl} =$	$1,24 (58,8 / 73,23)^2 \times 9240 =$	5042,2 kN

$$V_{Rd} = V_{Rk} / 1,1 = 4583,47 \text{ kN}$$

$$V_{sd} \leq V_{Rd} = 2110,0 \text{ kN} < 4583,47 \text{ kN} \quad \text{OK!}$$

Determinação da inércia da viga mista

$$E_c = 26071 \text{ Mpa}$$

Ações de longa duração

$$\text{Razão modular: } n = 3E_a/E_c$$

$$n = 3 \times 200000 / 26071 = 23,01$$

$$b_{ef} = 3400 \text{ mm}$$

$$b_{tr} = 3400 / 23,01 = 147,7 \text{ mm}$$

Supondo LNE passando pela alma:

b_{tr} – largura transformada

$$w = d/2 + t_c = 2000/2 + 240 = 1240 \text{ mm} = 124 \text{ cm}$$

$$a = [(A_2 + 2b_{tr}A_1 \cdot w)^{0,5} - A_1] / b_{tr} = [(7042 + 2 \times 14,77 \times 704 \times 124)^{0,5} - 704] / 14,77 = 71,04$$

$a = 71,04 > t_c = 24$ laje totalmente comprimida!

$$A_i (\text{laje}) = b_{tr} \times t_c = 14,77 \times 24 = 354,6$$

$$y_i = 24 + 100 = 124 \text{ cm}$$

Propriedades elásticas

Elemento	A _i	y _i	A _i y _i	A _i y _i ²	I _o
Laje	411,24	101,2	41617,49	4211689	19768,32
Perfil	704,00	0	0	0	4041216
soma	1115,84	--	41617,49	4211689	4060984

$$y_0 = \sum A_i y_i / \sum y_i = 41617,49 / 1115,84 = y_0 = 37,29 \text{ cm}$$

$$I_{tr} = \sum A_i y_i^2 + \sum I_{ox} - \sum A_i y_0^2 = 4211689 + 4060984 - (1115,84 \times 37,29^2) = 6721048,6 \text{ cm}^4$$

4.3 Verificação do estado limite de serviço - deslocamento vertical (flecha)

$$\text{Flecha admissível } (\delta_{adm}): L/800 = 30000/800 = 37,5 \text{ mm} = \delta_{adm} = 3,75 \text{ cm}$$

- Antes da cura do concreto: $q = 44,3 \text{ kN/m}$

$$\delta_{\max}: \frac{5ql^4}{384EI} = \frac{5 \cdot 44,3 \cdot 30^4}{384 \cdot 200 \times 10^6 \cdot 0,0404} = 0,0576 \text{ m} = 5,8 \text{ cm}$$

- Contra flecha a aplicar

Após a cura do concreto

$$q = 22,86 \text{ kN/m}$$

$$P = 155,87 \text{ kN}$$

$$I_{tr} = 6721048,6 \text{ cm}^4$$

$$\delta_{\max} = \frac{5ql^4}{384EI} + \frac{PL^3}{48EI} + \frac{Pa(3L^2 - 4a^2)}{24EI} = 4,5$$

$$\delta_{adm} = 3,75 \text{ cm}$$

$$\sum \delta = 5,8 \text{ cm} + 4,5 \text{ cm} = 10,3 \text{ cm}$$

Deverá ser aplicada contra flecha igual a 7 cm, pois $\sum \delta$ é maior δ_{adm} .

4.4 Quadro resumo do dimensionamento dos tabuleiros

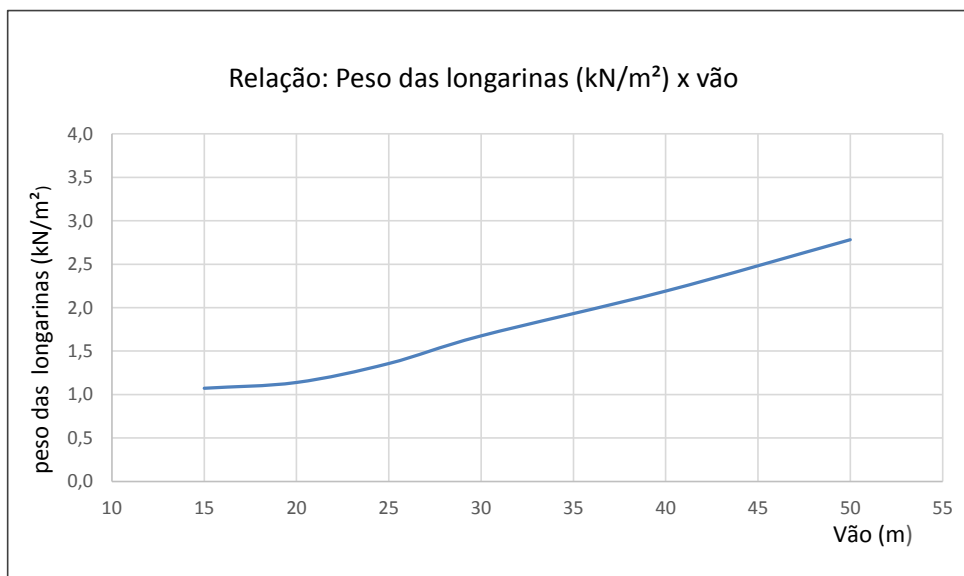
A tabela a seguir apresenta um resumo de todas as variáveis determinadas no dimensionamento das pontes mistas para os diferentes vãos analisados.

Quadro 4.4.1 – Resumo do dimensionamento dos tabuleiros.

Vão (m)		15	20	25	30	40	50	
Propriedades geométricas do perfil aço	d (mm)	1480,00	1500,00	1800,00	2000,00	2350,00	2700,00	
	bf (mm)	480,00	480,00	500,00	550,00	580,00	610,00	
	tf (mm)	20,00	21,00	22,00	25,00	28,00	31,00	
	tw (mm)	18,00	19,00	20,00	22,00	26,00	30,00	
	h (mm)	1440,00	1458,00	1756,00	1950,00	2294,00	2638,00	
espessura da laje	ts (mm)	180,00	190,00	215,00	240,00	270,00	300,00	
Ações permanentes e ações móveis na estrutura	Antes da cura	F _{GK} - viga aço (kN/m)	3,44	3,66	4,38	5,43	7,13	9,08
		F _{GK} - formas (kN/m)	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55
		F _{QK} operação (kN/m)	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40
		F _{QK} - laje concreto (kN/m)	14,85	15,68	17,74	19,80	22,28	24,75
		C1-1,4*F _{GK} +1,5*F _{QK}	35,76	37,30	41,41	45,97	52,07	58,51
		V _{sd} (kN)	268,23	373,03	517,67	689,50	1041,34	1462,72
	M _{sd} (kN.m)	1005,85	1865,13	3235,45	5171,28	10413,39	18284,03	
	após a cura	F _{GK} - viga aço (kN/m)	3,54	3,76	4,48	5,53	7,23	9,18
		F _{GK} laje concreto (kN/m)	14,85	15,68	17,74	19,80	22,28	24,75
		F _{GK} -pavim. (kN/m)	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34	6,34
		F _{GK} -recap (kN/m)	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60
		F _{GK} (guarda roda) (kN/m)	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
		ΣF _{GK}	37,33	38,37	41,16	44,26	48,44	52,87
		Q= 1,4*ΣF _{GK} (kN/m)	52,26	53,72	57,62	61,97	67,82	74,01
M _{max} = qP/8 (kN.m)		1469,79	2685,77	4501,59	6971,33	13563,97	23129,47	
V _{max} =q l/2 (kN)	391,94	537,15	720,25	929,51	1356,40	1850,36		
Fator distr. mom vigas internas	1 faixa LDF	0,733	0,656	0,613	0,579	0,533	0,500	
	2 faixas - LDF	1,018	0,934	0,891	0,855	0,806	0,771	
Fator dist. mom vigas externas	K _g (cm)	3,66E+11	4,01E+07	6,75E+11	1,03E+08	1,82E+08	3,01E+08	
	1 faixa LDF	1,059	1,059	1,059	1,059	1,059	1,059	
	2 faixas - LDF	1,184	1,086	1,036	0,994	0,937	0,897	
Fator distr cisalh vigas internas	1 faixa LDF	0,807	0,807	0,807	0,807	0,807	0,807	
	2 faixas - LDF	1,043	1,043	1,043	1,043	1,043	1,043	
Fator distr cisalh vigas externas	1 faixa LDF	1,059	1,059	1,059	1,059	1,059	1,059	
	2 faixas - LDF	1,009	1,009	1,009	1,009	1,009	1,009	
Fator distribuição momento fletor vigas		1,184	1,086	1,059	1,059	1,059	1,059	
Fator de distribuição cisalhamento vigas		1,059	1,059	1,059	1,059	1,059	1,059	
Carga de multidão x FD x CIV (kN)		26,7	24,1	23,1	22,9	22,2	21,8	
Carga P x CIV (9kN)		182,2	164,2	157,5	155,9	151,8	148,9	
carga móvel	cortante FMK (kN)	905,5	828,9	795,3	787,1	772,2	751,6	
	momento FMK (kN.m)	6723,6	6154,7	5905,2	5844,5	5729,9	5581,2	
C2=1,4FGK+1,5FMK	Momento (kN.m)	1750,2	1780,5	1913,2	2110,9	2514,7	2977,8	
	Cortante (kN)	11555,2	11917,8	13359,4	15737,9	22158,8	31501,3	
Verificação Perfil aço	V _{SD} (kN)	268,2	373,1	517,7	689,5	1041,3	1462,7	
	V _{RD} (kN)	3406,6	3960,9	3821,9	4593,5	6423,4	8573,2	
	M _{SD} (kN.m)	1005,9	1865,2	3235,5	5171,3	10413,4	18284,1	
	M _{RD} (kN.m)	6463,6	7139,6	9918,3	13893,9	21461,7	31444,5	
Verificação da seção mista	F _{hd} (kN)	11147,1	11766,4	13314,6	14862,9	16720,7	18578,6	
	V _{SD} (kN)	1750,2	1780,5	1913,2	2110,0	2514,7	2977,8	
	V _{RD} (kN)	3406,6	3961,0	3821,9	4583,5	6423,4	8573,2	
	M _{SD} (kN.m)	11555,2	11917,8	13359,4	15740,0	22158,2	31501,3	
	M _{RD} (kN.m)	11614,3	12524,7	17760,6	24122,7	36538,0	52690,9	
Flecha admissível	L/800 (mm)	1,88	2,50	3,13	3,75	5,00	6,25	

O gráfico 4.4.1 apresenta a razão entre o peso das longarinas (kN) e a área do tabuleiro (m²), calculada para os diferentes vãos.

Gráfico 4.4.1 – Relação entre peso das longarinas e o vão da estrutura.



5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados os dimensionamentos de longarinas utilizadas em pontes mistas de aço e concreto. Como premissa foi adotada uma seção transversal composta por quatro longarinas e largura igual a 13,2 metros. Vãos entre 15 e 50 metros foram avaliados. O dimensionamento das longarinas mistas foi realizado conforme ABNT NBR 8800:2008, considerando o trem tipo classe 45 presente na norma ABNT NBR 7188:2013.

A análise estrutural foi desenvolvida no programa Ftool com a determinação das linhas de influência dos esforços solicitantes da estrutura. O efeito de grelha foi considerado através do coeficiente de distribuição de esforços, conforme recomendação da norma americana AASHTO:2013. De posse do dimensionamento das longarinas para os diferentes vãos avaliados, foi possível determinar uma relação entre o peso das longarinas por metro quadrado e o vão da estrutura. Essa relação se apresentou aproximadamente como uma relação linear para os vãos analisados e conforme as premissas adotadas.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. NBR 8800: *Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios*. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. NBR 6123: *Forças devidas ao Vento em Edificações*. Rio de Janeiro, 1988.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. NBR 7189: *Cargas móveis para projeto estrutural de obras ferroviárias*. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. NBR 8681: *Ações e segurança nas estruturas, procedimentos*. Rio de Janeiro, 2003.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS AASHTO LRFD: *Bridge Design Specifications*, Washington, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM DNER: *Manual de projeto de obras de artes especiais*. Rio de Janeiro, 1996.