



XIV Congresso Brasileiro
de Pontes e Estruturas

Estudo da Espessura de Lajes para Pontes em Grelha com Pré-laje sem transversinas intermediárias sob a Ótica Econômica no Consumo Aço/Concreto

Sheila Stravate Leonel Esteves¹, Leonardo da Silva Carvalho²

¹HMNC Engenharia / Departamento de Estruturas / sheila.stravate@hmnc.com.br

²HMNC Engenharia / Departamento de Estruturas / leonardo.carvalho@hmnc.com.br

Resumo

O presente artigo tem como objetivo estudar economicamente as espessuras de lajes de pontes em grelha sem transversinas intermediárias, com vigas pré-moldadas e pré-lajes, a luz das normas atuais de projeto de estruturas de concreto (NBR6118), pontes e viadutos (NBR7187 e NBR7188). Para tanto, foi realizado o dimensionamento da armadura da laje do tabuleiro considerando a variação paramétrica das espessuras de laje a fim de obter a variação do consumo de insumos (concreto e aço) para cada caso de estudo. Os resultados obtidos, possibilitam avaliar a espessura de laje que apresenta os melhores fatores econômicos e estruturais, após as etapas de dimensionamento e levantamento de custos. Tornou-se possível observar a variação de consumo de insumos da laje do tabuleiro bem como a variação histórica dos preços unitários de aço e concreto considerando o período de 2001 a 2022. Foi realizado ainda levantamento da relação de preço Concreto/Aço ao longo do período histórico descrito a fim de evidenciar o comportamento dos custos unitários destes insumos e seu impacto na tomada de decisão para reduções ou aumentos na espessura da laje considerando cenários futuros em que os preços destes insumos sejam alterados. Existem alguns projetos já estudados e desenvolvidos por departamentos governamentais que administram estradas, denominados projetos padrão, que apresentam espessuras de laje de 20cm, no entanto, atualmente já se encontram lajes dimensionadas com 22cm e até 26cm. Posto isto, o estudo buscou evidenciar a necessidade de cautela ao definir a espessura de laje posto que a economia no consumo de concreto, provocada pela redução da espessura de laje, não é uma variável isolada, pois gera impacto direto no consumo de aço. Atrelado a isto, encontra-se o fato de que as lajes de tabuleiros de pontes e viadutos em grelha geralmente apresentam elevadas taxas de armação, tanto devido a sua pequena espessura quanto à alta quantidade de armação utilizada. O estudo é baseado em projetos cedidos pela empresa HMNC Engenharia.

Palavras-chave

Espessura Econômica de Lajes de Pontes; Lajes de Pontes em Grelha; Dimensionamento de Lajes de Pontes; Espessura de Lajes com Pré-lajes.

Introdução

As pontes com múltiplas vigas em especial com vigas protendidas pré-moldadas são bastante utilizadas no contexto nacional. Tal fato deve-se de modo geral à robustez do conjunto de elementos que compõem o tabuleiro, eficiência estrutural e execução. O tabuleiro é composto por uma laje, bastante flexível quando comparada com a inércia dos demais elementos; vigas longitudinais (longarinas) em geral protendidas, que por serem múltiplas, contribuem com a subdivisão dos esforços para a mesoestrutura; e as vigas transversais (transversinas), obrigatórias nos apoios, podendo existir também nos vãos para garantir o intertravamento das longarinas.

Em consequência deste comportamento, realiza-se para pontes com vigas múltiplas, tal como a estrutura do presente estudo, a análise da estrutura considerando uma grelha equivalente, em que parte da laje, em cada painel entre o conjunto de vigas, é considerada atuando em conjunto com as vigas

longarinas da estrutura. Para tanto, considera-se este trecho de laje como seção composta na mesa das longarinas de modo que esta seção de laje é considerada na inércia das vigas. Por tratar-se de elementos com diferentes módulos de elasticidade, realiza-se a compatibilização das propriedades mecânicas com o cálculo da largura efetiva de laje, a qual denomina-se mesa colaborante.

A analogia de grelha, utilizada no presente estudo, segundo (O'BRIEN e KEOGH, 1999) é, provavelmente, o mais popular e eficaz método computacional para análise de tabuleiro de ponte devido sua facilidade de compreensão. ZSCHETSCHKE (1898) realizou um dos estudos pioneiros a respeito do comportamento de pontes em grelha, neste estudo, porém, não se utilizava o conceito de lajes ortótropas (com propriedades mecânicas distintas para cada uma das direções ortogonais). Este conceito foi introduzido apenas alguns anos depois por HUBER (1914) que analisou o comportamento de lajes em concreto armado considerando ortotropia.

Elencados os principais aspectos a respeito do comportamento estrutural de pontes com vigas múltiplas, o presente estudo possui como objetivo avaliar o impacto gerado nas relações de consumo aço/concreto (taxa de armadura) e seu conseqüente impacto nos custos totais de insumos ao considerar a variação paramétrica da espessura de laje. É válido ressaltar, que por tratar-se de uma concepção com vigas múltiplas deve ser considerada a redundância do conjunto de elementos que compõem o tabuleiro, de modo que sua conseqüente hiperestaticidade requer a elaboração de um novo modelo a cada variação das propriedades geométricas inicialmente adotadas, a fim de obter a nova distribuição dos esforços solicitantes na estrutura. Considerando o objetivo supracitado, foram elaborados 4 modelos computacionais em elementos finitos utilizando o Software Strap versão 2021.

Metodologia e Critérios de Cálculo

Neste estudo utilizou-se como base um projeto de ponte elaborado pela empresa HMNC Engenharia. Trata-se de uma ponte com vigas múltiplas com vão teórico de 24,2m (entre aparelhos de apoio) e largura total de 11,10m. A laje possui espessura total de 20cm, sendo 8cm correspondente às pré-lajes. As vigas pré-moldadas são protendidas e totalizam 4 unidades conforme observa-se no desenho da seção transversal (Figura 1).

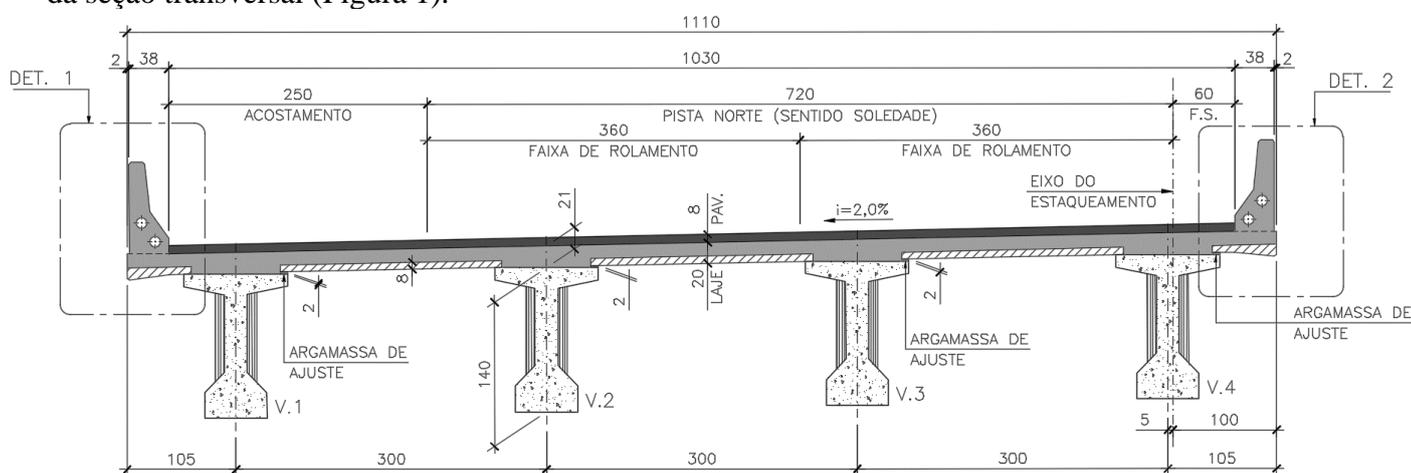


Figura 1 - Seção transversal do projeto base

Foram elaborados 4 modelos computacionais no programa de análise estrutural em elementos finitos STRAP na versão 2021. Nestes modelos foram considerados os mesmos carregamentos (exceto o peso próprio) e a mesma geometria de tabuleiro, tendo sido alteradas apenas as espessuras totais de laje, e por conseqüência as propriedades das vigas longarinas devido à mesa colaborante das lajes. O cálculo da mesa colaborante foi realizado conforme itens 14.6.2.2 da NBR6118:2014 e 8.5.1 da NBR7187:2021. A relação do vão pela altura da viga em seção simples considerada é de $L/H=17,3$. Foi admitido constante a espessura das pré-lajes ($H_{pré-laje}=8\text{cm}$) e consideradas as seguintes variações paramétricas para espessura total de laje: 20cm, 22cm, 24cm e 26cm.

Características Geométricas e Hipóteses do Modelo em elementos finitos

A modelagem foi realizada considerando elementos finitos de placa ortotrópicos no tabuleiro da ponte a fim de considerar o comportamento mecânico distinto destes elementos em cada direção ortogonal, posto que, na direção longitudinal (sentido de tráfego da ponte) as pré-lajes (as quais alojam a armadura positiva do tabuleiro e servem como forma para a concretagem da laje), apresentam menor rigidez por estarem previamente apoiadas e não possuem ligação entre si, justificando assim, desconsiderar a espessura das pré-lajes no cálculo do módulo de rigidez longitudinal, obtendo uma rigidez equivalente a qual é matematicamente expressa por:

$$E_{cs, longitudinal} = \frac{Inércia_{longitudinal}}{Inércia_{transversal}} \cdot E_{cs, transversal}, \text{ sendo: } \begin{cases} E_{cs, transversal} = \left(0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80}\right) \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \\ Inércia_{longitudinal} = \frac{1,00 \cdot (H_{laje} - H_{pré-laje})^3}{12} \\ Inércia_{transversal} = \frac{1,00 \cdot (H_{laje})^3}{12} \end{cases}$$

A resistência característica do concreto (f_{ck}) adotada no estudo foi de 40Mpa, cujas propriedades mecânicas correspondentes estão contidas no Anexo A.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas ortótropas das lajes em estudo

Propriedades / Espessura Lajes	Hlaje (cm) = 20	Hlaje (cm) = 22	Hlaje (cm) = 24	Hlaje (cm) = 26
H pré-laje (m)	0,08	0,08	0,08	0,08
I transversal (m ⁴)	0,000667	0,000887	0,001152	0,001465
I longitudinal (m ⁴)	0,000144	0,000229	0,000341	0,000486
E _{cs,transversal} (MPa)	31875,76	31875,76	31875,76	31875,76
E _{cs,longitudinal} (MPa)	6885,16	8214,41	9444,67	10576,89

Ressalta-se que para obtenção de rigidez (EI) real da seção em cada um dos modelos foram consideradas as mesmas inércias para ambas as direções ortogonais de cada espessura da laje e a variação ortótropa foi obtida em função da variação dos módulos de elasticidade transversal e longitudinal. Foram obtidas as propriedades geométricas das vigas longarinas, levando em conta o incremento de altura total devido à variação paramétrica da espessura das lajes, para cada um dos modelos por intermédio de desenho da seção transversal realizado no software AUTOCAD, conforme exemplo apresentado para a espessura de 20cm (vide Anexo B). Para as demais espessuras de laje foi realizado o mesmo procedimento, cujas propriedades apresentam-se resumidas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades geométricas das Vigas Longarinas (seção composta)

Espessura Lajes	Hlaje (cm) = 20			Hlaje (cm) = 22			Hlaje (cm) = 24			Hlaje (cm) = 26			
	Seções	Área (m ²)	I _x (m ⁴)	I _y (m ⁴)	Área (m ²)	I _x (m ⁴)	I _y (m ⁴)	Área (m ²)	I _x (m ⁴)	I _y (m ⁴)	Área (m ²)	I _x (m ⁴)	I _y (m ⁴)
Borda - Apoio 1		1,085788	0,298377	0,203506	1,136788	0,316204	0,234213	1,187788	0,333648	0,261212	1,238788	0,350795	0,289914
		1,271005	0,320807	0,215977	1,322005	0,340885	0,245044	1,373005	0,360700	0,274004	1,424005	0,380318	0,302869
Borda - Vão		0,940600	0,283772	0,199198	0,991600	0,299720	0,227949	1,042600	0,315183	0,256590	1,093600	0,330268	0,285138
Interna - Apoio 1		1,139788	0,313161	0,296567	1,199788	0,332311	0,341567	1,259788	0,350917	0,386567	1,319788	0,369100	0,431567
Interna - Apoio 2		1,325005	0,337695	0,308402	1,385005	0,359524	0,353402	1,445005	0,380921	0,398402	1,505005	0,401983	0,443402
Interna - Vão		0,994600	0,296816	0,292933	1,054600	0,313733	0,337933	1,114600	0,330030	0,382933	1,174600	0,345826	0,427933

Nesta análise foi desprezada a rigidez à torção das vigas longarinas para todos os modelos, permitindo realizar uma análise comparativa dos resultados gerados por terem seguido as mesmas premissas.

Os carregamentos aplicados no modelo estão descritos abaixo.

- G = Peso próprio estrutural e não estrutural;
- Q = Trem tipo TB45, conforme NBR7188:2013 (com CIV=1,35 e CIA=1 ou 1,25).

As combinações dos esforços seguiram as prescrições da NBR8681:2004, com os seguintes fatores:

$$M_{sd} = 1,35 \cdot M_g + 1,5 \cdot CIV \cdot CIA \cdot M_q \text{ – Combinação ELU normal}$$

$$M_{sd, fad} = M_g + 0,8 \cdot CIV \cdot CIA \cdot M_q \text{ – Combinação ELU para fadiga}$$

A geometria do tabuleiro foi elaborada conforme Figura 2.

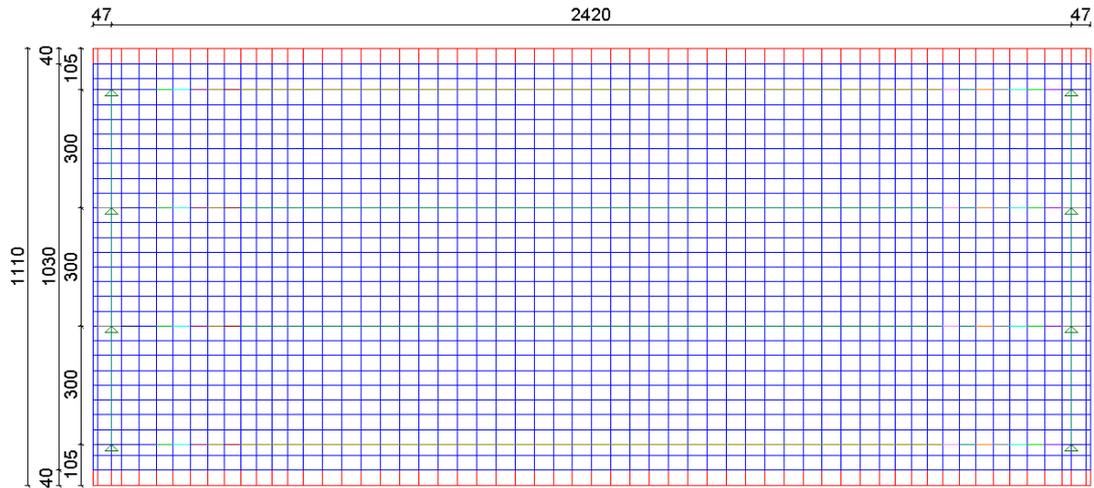


Figura 2- Geometria do tabuleiro da ponte em estudo

Resultados e Discussões

Foi utilizado aço CA-50 para composição da armadura das lajes, cujas propriedades mecânicas estão contidas no Anexo A. Por intermédio de prévios dimensionamentos nota-se que a verificação à fadiga tende a ser condicionante no dimensionamento das pontes de lajes rodoviárias, sendo assim, adotou-se como critério condicionante o dimensionamento da armadura à fadiga para todas as espessuras de laje em estudo. A fim de obter a variação das tensões nas armaduras foi utilizado o programa SECC com a finalidade de obter o arranjo que resultasse nos valores de variação de tensão na armadura, no Estádio II, o mais próximo possível do limite de 190Mpa. O dimensionamento detalhado das áreas de aço para cada uma das seções em estudo foi realizado conforme itens A.3 do Anexo A. Na Tabela 3 estão resumidos os resultados da combinação de esforços solicitantes obtidos. Na tabela 4 estão apresentados os acréscimos de reações totais características devido ao aumento da espessura da laje.

Tabela 3 - Esforços solicitantes máximos à flexão

Espessura Lajes (cm)	Hlaje(cm) = 20	Hlaje(cm) = 22	Hlaje(cm) = 24	Hlaje(cm) = 26
Md, pré-laje [+] (tf.m)	0,47	0,51	0,55	0,59
Md, transversal [+] (tf.m)	8,62	8,93	9,28	9,61
Md, transversal [-] (tf.m)	8,77	8,69	8,68	8,69
Msd, longitudinal [+] (tf.m)	2,96	3,21	3,48	3,87
Msd, longitudinal [-] (tf.m)	1,59	1,80	1,99	2,19
Msd, long. extremidades [-] (tf.m)	4,01	4,28	4,57	4,87

Tabela 4 - Reações de apoio da superestrutura

Reações por carregamento	Hlaje(cm) = 20	Hlaje(cm) = 22	Hlaje(cm) = 24	Hlaje(cm) = 26
*Reação total Acidental (tf)	165,47	165,47	165,47	165,47
Reação total Permanente (tf)	430,00	444,00	458,00	472,00
Acréscimo da carga permanente %	-	3,26%	6,51%	9,77%
Reação total combinada (tf)	595,47	609,47	623,47	637,47
Acréscimo da carga combinada %	-	2,35%	4,70%	7,05%

*sem CIA

Embasando-se no dimensionamento apresentado foi realizada uma análise comparativa do consumo dos insumos aço CA-50 e concreto fck40Mpa.

Tabela 5 - Taxa de Armadura e consumo de concreto para cada espessura de laje

Espessuras Lajes	Hlaje (cm) = 20	Hlaje (cm) = 22	Hlaje (cm) = 24	Hlaje (cm) = 26
Taxa de Aço	214,9 kg/m³	182,2 kg/m³	160,8 kg/m³	143,9 kg/m³
Taxa de decréscimo	-	15,22%	11,75%	10,51%
Consumo de concreto	53,73 m³	59,1 m³	64,47 m³	69,85 m³
Taxa de crescimento	-	9,99%	9,09%	8,34%

A partir dessas variações de consumo dos insumos aço e concreto foi elaborado gráfico de variação da taxa de armadura em função da espessura de laje.

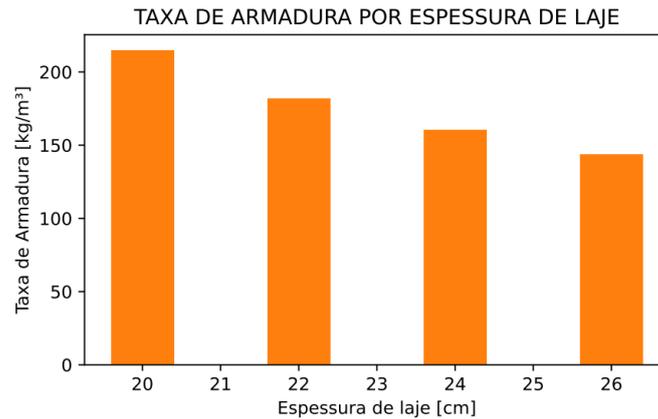


Figura 3 - Variação da taxa de armadura em função da espessura de laje

Nota-se que a taxa de decrescimento do consumo de aço é inferior à taxa de crescimento no consumo de concreto, no entanto, apesar do decrescimento nas taxas de aço não é possível afirmar de maneira conclusiva qual espessura de laje apresenta maior economia sem antes analisar os custos unitários de cada um dos insumos. Sendo assim, foi realizado um levantamento histórico dos custos unitários de aço e concreto de 2001 a 2022 segundo dados da Tabela de Preços Unitários (TPU-DER).

Fonte: Os autores. (Baseado em dados da TPU-DER de 2001 a 2022)

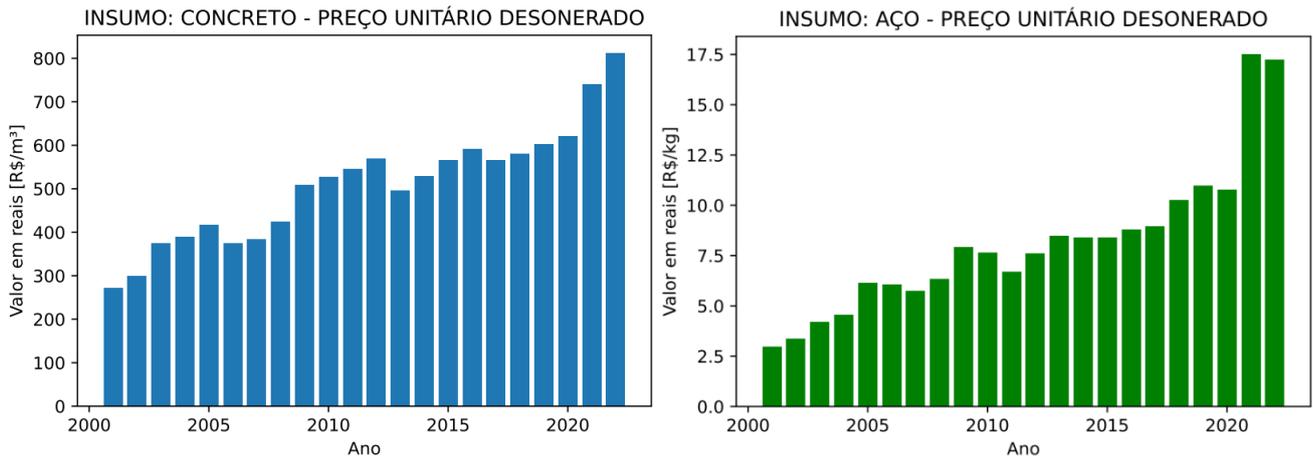


Figura 4 - Levantamento histórico de preços unitários de aço e concreto

Embasando-se nos dados obtidos foi calculada a razão de preços unitários concreto/aço para cada um dos anos, das quais obteve-se a relação máxima de 91,41 em 2001 e mínima de 42,25 em 2021. Tal levantamento possibilitou delimitar o escopo de estudo considerando relação de preços unitários no intervalo entre $40 < \text{concreto/aço} < 90$.

Fonte: Os autores.

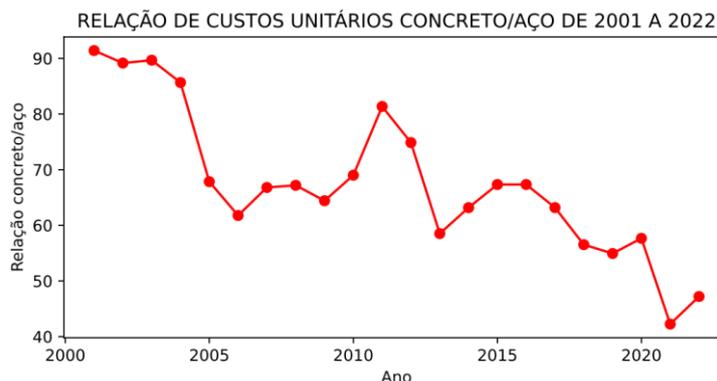


Figura 5 - Variação da relação de custos unitários concreto/aço de 2001 a 2022

A seguir são apresentados os custos totais de aço e concreto para cada uma das espessuras de laje estudadas, considerando o tabuleiro completo da ponte.

Tabela 6 – Percentual de custo por insumo em função da variação de consumo para cada espessura de laje e da relação concreto/aço

Insumos	Preço Unit. (R\$) *	Hlaje (cm) = 20			Hlaje (cm) = 22		
		Consumo (m3 ou kg)	Subtotal (R\$)	Percentual de Custo	Consumo (m3 ou kg)	Subtotal (R\$)	Percentual de Custo
Concreto	812,45	55,86	R\$ 45.383,46	18,0%	61,45	R\$ 49.925,05	20,6%
Aço	17,21	11996	R\$ 206.451,16	82,0%	11185	R\$ 192.493,85	79,4%
Relação Concreto/Aço	47,21	Total (R\$) = 251.834,62			Total (R\$) = 242.418,90		
Insumos	Preço Unit. (R\$) *	Hlaje (cm) = 24			Hlaje (cm) = 26		
		Consumo (m3 ou kg)	Subtotal (R\$)	Percentual de Custo	Consumo (m3 ou kg)	Subtotal (R\$)	Percentual de Custo
Concreto	812,45	67,03	R\$ 54.458,52	22,7%	72,62	R\$ 59.000,12	24,7%
Aço	17,21	10770	R\$ 185.351,70	77,3%	10442	R\$ 179.706,82	75,3%
Relação Concreto/Aço	47,21	Total (R\$) = 239.810,22			Total (R\$) = 238.706,94		

*Os valores de custo dos insumos foram baseados na TPU do DER de 31/12/2022.

De modo equivalente ao que foi apresentado na Tabela 6, foi realizado o cálculo dos custos totais dos insumos aço e concreto para o tabuleiro da ponte em estudo, considerando cada uma das espessuras de laje com base nos custos unitários de aço e concreto de 2001 a 2022.

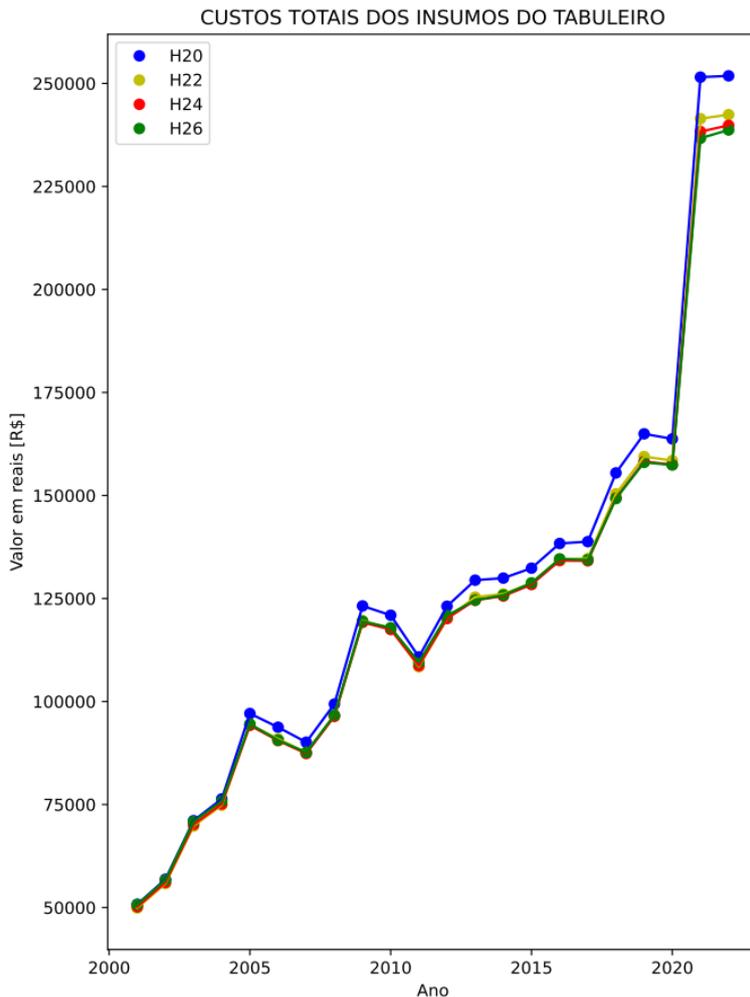


Figura 6 - Custos totais dos insumos do tabuleiro por espessura de laje

Considerações Finais

Observa-se pelo estudo quantitativo apresentado que as variações nas espessuras de laje podem ser alteradas em relação a projetos padrões a fim de otimizar o consumo de materiais em tabuleiros das Obras de Arte. Para o cenário atual, espessuras de 24 a 26 cm podem ser um bom ponto de partida para um projeto otimizado, onde deverão ser realizadas todas as demais considerações como as influências em vigas, meso e infraestrutura.

Para trabalhos futuros, a influência da torção nas vigas frente as variações das espessuras de laje poderiam ser avaliadas já que é um critério bastante utilizado para buscar otimização de consumo de aço em lajes. Também poderiam ser feitas análises das demais armaduras dos elementos estruturais como a viga-protendida, transversinas, meso e infraestruturas.

Referências

- ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). NBR 7187: Projeto de pontes de concreto armado e concreto protendido - Procedimento, Rio de Janeiro, 2021.
- ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). NBR 7188: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas, Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento, Rio de Janeiro, 2003.
- ALVEZ, Eduardo V.; ALMEIDA, Sérgio M.; JUDICE, Flávia M.-Método de análise estrutural de tabuleiros de pontes em vigas múltiplas de concreto protendido. Universidade federal fluminense agosto 2004.
- BOGNER, F. K., Schimit e Foz – Finite Deflection Structural Analysis – AIAA Journal, nº 5, maio de 1968.
- HUBER, Maksymilian Tytus. Die Grundlagen einer rationellen Berechnung der kreuzweise bewehrten Eisenbetonplatten. Verlag für Fachliteratur, 1914.
- LONGO, Henrique Inneco. Esforços Máximos em Pontes Tipo Grelha. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1979.
- O'BRIEN, Eugene J.; KEOGH, Damien L.. BRIDGE DECK ANALYSIS. Ed. E&FN Spon. London, 1999
- PROGRAMA - SEEC versão 1.1 - Flexão Composta Oblíqua (FCO); CARDOSO, Sander David.
- PROGRAMA - STRAP (Structural Analysis Programs), versão 2021; Atir engineering software development.
- SPIGEL & ABELLANAS, 1992, p.158.
- TPU-DER 2001 A 2022 (<http://200.144.30.103/tpu-internet/>); data de acesso 03/2023.
- ZSCHETZSCHE, A. "Theorie Lastvertheilender Querverbände. Zeitschrift des Oesterr" Ingenieurund Architekten-Vereines, 1893, p.553.

ANEXO A

A.1 Propriedades Mecânicas do Concreto

Resistência: $f_{ck} = 40\text{MPa}$;

Ecs (módulo de elasticidade secante) = 32 GPa (tabela 8.1 da NBR6118:2014);

Peso específico do concreto armado - $\gamma = 2,5 \text{ tf/m}^3$;

Coefficiente de dilatação térmica = $0,00001 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;

Coefficiente de Poisson = 0,2;

A.2 Propriedades Mecânicas do Aço

Categoria CA50 para armadura passiva com $f_{yk} = 500\text{MPa}$;

Módulo de elasticidade $E_s = 210 \text{ GPa}$;

Coefficiente de minoração de resistência $\gamma_s = 1,15$.

A.3 Dimensionamento da armadura da laje

Critério para cálculo de fadiga

- **Ms,máx :**

$$x = -\frac{\alpha * (A_{s,adot} + A'_{s,adot})}{bw} + \sqrt{\left(\frac{\alpha * (A_{s,adot} + A'_{s,adot})}{bw}\right)^2 + \frac{2\alpha * (d \times A_{s,adot} + d' \times A'_{s,adot})}{bw}}$$

$$I_{fiss} = \frac{bw \times x^3}{3} + \alpha \times A_{s,adot} \times (d - x)^2 + \alpha \times A'_{s,adot} \times (x - d')^2$$

$$\sigma_{si,máx} = \alpha \times M_{sd,fad,máx} \times \frac{(d - x)}{I_{fiss}}$$

$$\alpha = 10$$

- **Ms,mín :**

$$x = -\frac{\alpha * (A_{s,adot} + A'_{s,adot})}{bw} + \sqrt{\left(\frac{\alpha * (A_{s,adot} + A'_{s,adot})}{bw}\right)^2 + \frac{2\alpha * (d' \times A_{s,adot} + d \times A'_{s,adot})}{bw}}$$

$$I_{fiss} = \frac{bw \times x^3}{3} + \alpha \times A'_{s,adot} \times (d - x)^2 + \alpha \times A_{s,adot} \times (x - d')^2$$

$$\sigma_{si,min} = \alpha \times M_{sd,fad,min} \times \frac{(x - d')}{I_{fiss}}$$

$$\alpha = 10$$

- **k,fad :**

$$\Delta\sigma_{si} = \sigma_{si,máx} - \sigma_{si,min}$$

$$\Delta\sigma_{si,fad} = 190\text{MPa}$$

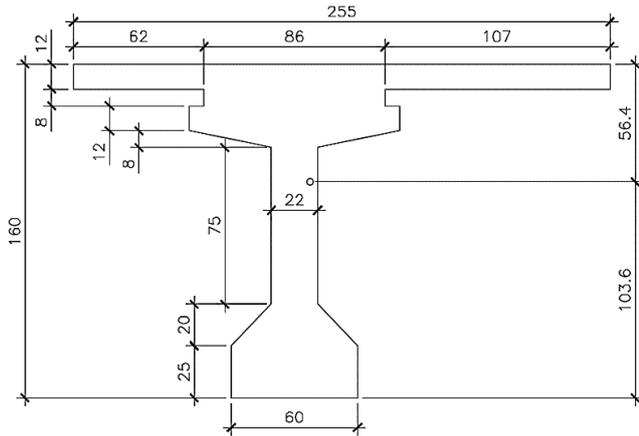
$$k_{fad} = \frac{\sigma_{si,máx} - \sigma_{si,min}}{\Delta\sigma_{si,fad}}$$

$$A_s = A_{s,adot} * k_{fad}$$

ANEXO B

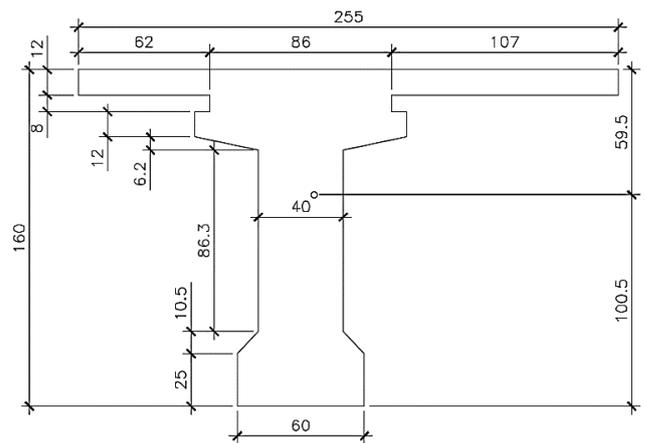
B.1 Propriedades Geométricas - Viga de Borda com 20cm de Laje

VIGA DE BORDA
COM LAJE COLABORANTE
SEÇÃO-VÃO



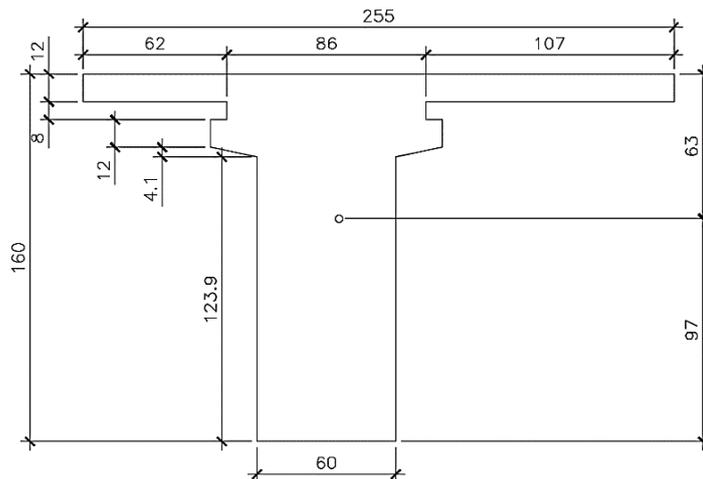
Área: 1.085788m²
Momento de inércia: X: 0.298377m⁴
Y: 0.203506m⁴

VIGA DE BORDA
COM LAJE COLABORANTE
SEÇÃO-APOIO



Área: 1.085788m²
Momento de inércia: X: 0.298377m⁴
Y: 0.203506m⁴

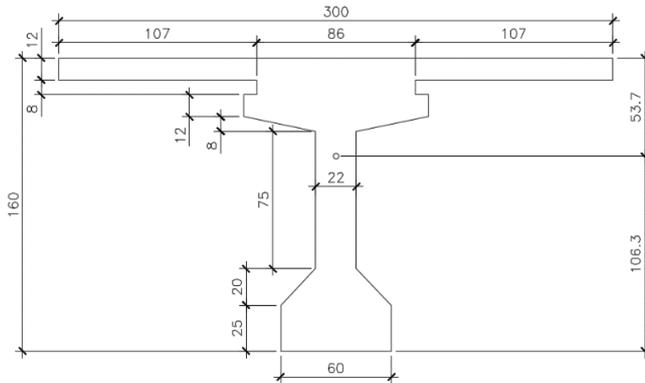
VIGA DE BORDA
COM LAJE COLABORANTE
SEÇÃO-APOIO 2



Área: 1.271005m²
Momento de Inércia: X: 0.320807m⁴
Y: 0.215977m⁴

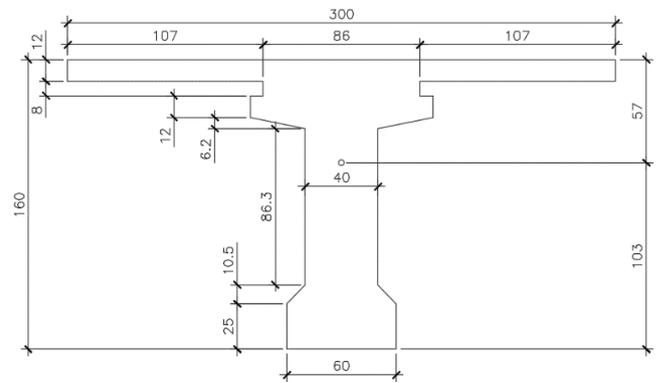
B.2 Propriedades Geométricas - Viga Interna com 20cm de Laje

VIGA INTERNA
COM LAJE COLABORANTE
SEÇÃO-VÃO



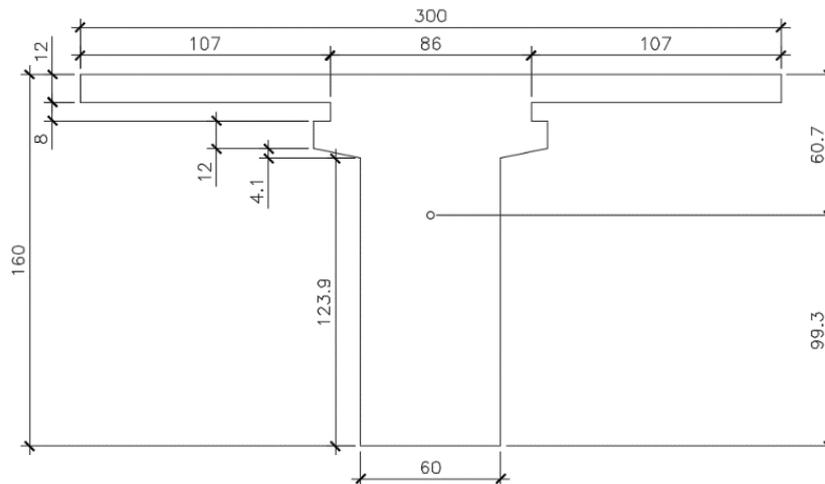
Área: 0.994600m²
Momento de inércia: X: 0.296816m⁴
Y: 0.292933m⁴

VIGA INTERNA
COM LAJE COLABORANTE
SEÇÃO-APOIO



Área: 1.139788m²
Momento de Inércia: X: 0.313161m⁴
Y: 0.296567m⁴

VIGA INTERNA
COM LAJE COLABORANTE
SEÇÃO-APOIO 2



Área: 1.325005m²
Momento de Inércia: X: 0.337695m⁴
Y: 0.308402 m⁴